



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

**Máster en Nanociencia y Nanotecnología
Molecular**

**Aplicaciones de films y nanocoatings como
mejora activa y pasiva en la integración
fotovoltaica en edificios**

Alumno(a): Daniel Valencia Caballero

Tutor(a): Miguel Ángel Rodríguez Pérez

Aplicaciones de films y *nanocoatings* como mejora activa y pasiva en la integración fotovoltaica en edificios

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | 3 |
| Abstract | 4 |
| Capítulo 1 Introducción | 5 |
| 1.1. Contexto climático y energético..... | 5 |
| 1.2. Nanotecnología y arquitectura..... | 10 |
| 1.2.1. <i>Propiedades antirreflectoras</i> | 12 |
| 1.2.2. <i>Propiedades fotocatalíticas</i> | 13 |
| 1.2.3. <i>Propiedades de autolimpieza</i> | 16 |
| 1.2.4. <i>Anti vaho</i> | 17 |
| 1.2.5. <i>Productos de hidratación del cemento</i> | 18 |
| 1.2.6. <i>Aislamiento: Aerogel</i> | 18 |
| 1.3. <i>Building Integrated Phoptovoltaics (BIPV)</i> | 21 |
| 1.3.1. <i>Distribución de los productos BIPV en el mercado</i> | 24 |
| 1.3.2. <i>Tecnologías BIPV</i> | 24 |
| Capítulo 2 Objetivo del proyecto | 29 |
| Capítulo 3 Estudios Experimentales | 30 |
| 3.1. <i>Nanocoating</i> hidrófobo: mejora activa del vidrio fotovoltaico..... | 30 |
| 3.1.1. <i>Estado del arte</i> | 31 |
| 3.1.2. <i>Experimental: Materiales e instrumental</i> | 40 |
| 3.1.3. <i>Experimental: Metodología</i> | 49 |
| 3.1.4. <i>Resultados y discusión</i> | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2. Films de filtro solar: mejora pasiva de vidrio fotovoltaico | 56 |
| 3.2.1 <i>Introducción</i> | 56 |
| 3.2.2 <i>Materiales</i> | 59 |
| 3.2.3 <i>Resultados y discusión</i> | 62 |
| Capítulo 4 Conclusiones y trabajo futuro | 70 |

Agradecimientos

Esta tesis representa el final del máster de Nanociencia y Nanotecnología Molecular, cursado a lo largo de los últimos dos años.

Me gustaría agradecer en primer lugar a la empresa Onyx Solar, y en especial al Dr Teodosio del Caño, por haberme permitido compaginar el trabajo en el departamento de I+D+i con los estudios anteriormente mencionados y, en esta última etapa, con el desarrollo de esta tesis. Sin la flexibilidad otorgada el desarrollo de estos trabajos hubiera sido imposible.

Por otro lado, agradecer también a los profesores Dr. J.A. de Saja y Dr. M.A. Rodríguez Pérez por su ayuda y consejos. A ellos les debo el haber podido conocer el apasionante mundo de la investigación, contribuyendo así a mi desarrollo profesional en este ámbito.

Agradecer también a todo el personal del grupo de investigación *CellMat* por su apoyo y paciencia en numerosos momentos. Samuel, Alberto, Eusebio, Josias, Blanca, Laura, Cristina,... Sus aportaciones en cuanto al manejo de equipos o en la resolución de numerosas dudas me han resultado de gran valía.

No me puedo olvidar de agradecer también a mis padres y mi hermano por haber sido un apoyo constante y muy importante, tanto a lo largo de mis años de estudios en la Universidad, como en la etapa laboral.

Valladolid, 7 de julio de 2013

Abstract

Building integrated photovoltaics is an emerging technology and market and it is in accordance with concepts as distributed generation, energy efficient buildings and smart cities. By the way, conventional photovoltaic modules have to be adapted to building requirements, that means there is a lot of work to do in development in R&D&I in order to improve their properties and added value. This thesis presents an analysis of possible improvement of these products by using surface modifications of PV glass through a nanotechnology approach. Moreover, architectural nanotechnology applications have been analyzed trying to show a deep scientific understanding of their applications.

As the core of this work two experimental experiences has been carried out:

Firstly, consist in an evaluation of hydrophobic coating as self-cleaning solution over a PV crystalline silicon module exposed to external conditions. Influence over PV production has been evaluated by comparing Isc evolution with another non coated module. This is an example of nanotechnology application, with a potencial improvement of active PV glass properties.

Secondly, consist in an analysis of commercial solar control films used in combination with a-Si modules. Different solar control films, already used in glass market, were characterized by spectroscopic measurements. One of them was selected as best candidate for PV glass application. Then, I-V characteristics of an a-Si module with the film were measured. This is an example of passive PV glass properties improvement by surface modification with an existing solution from glass industry.

This Master Thesis is the final report for the master academic studies in Nanoscience and Molecular Nanotechnology, which has been carried out in the last two years.

Capítulo 1 Introducción

Cabe destacar que esta tesis se ha realizado en el marco de los trabajos de I+D+i que se vienen realizando dentro de la empresa Onyx Solar, y su relación a través de distintos proyectos con el departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid.

Por esta razón, es importante advertir al lector del enorme peso que tiene el estudio de la aplicación con respecto a los trabajos más puramente científicos que, a pesar de haber puesto empeño en su desarrollo de manera adecuada, pueden no ser tan teóricos como se esperase.

1.1. Contexto climático y energético

Mitigar el cambio climático es uno de los objetivos más importantes de la economía global, aunque últimamente no sea uno de los más urgentes. Actualmente sabemos que la Tierra está sufriendo un proceso de calentamiento progresivo y el clima está cambiando. En la Fig. 1 se puede ver las temperaturas medias terrestres en 2000-2010 en relación con las correspondientes a los años 1900-1910 y 1960-1970 respectivamente. Un aumento anómalo es evidente: cerca de 1.2 grados desde el primer periodo y cerca de 0,6 grados desde los años 70.

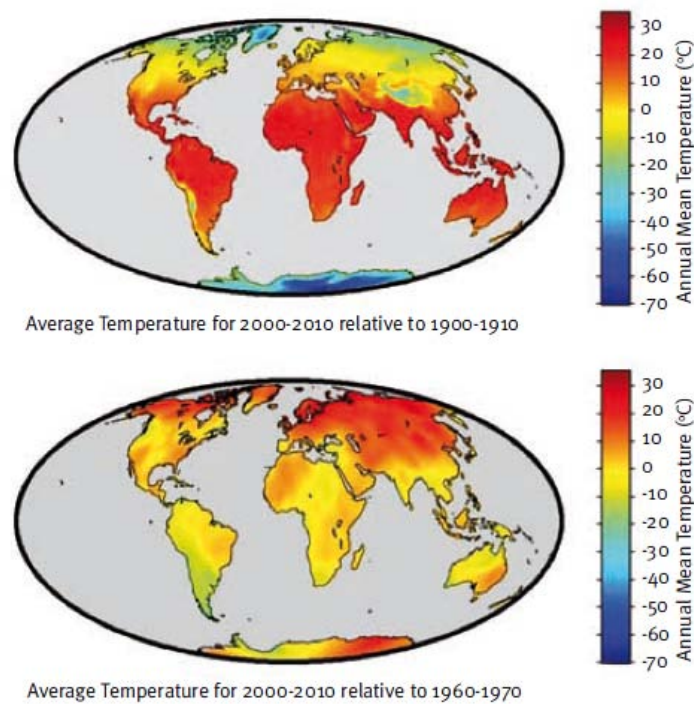


Fig. 1 El gráfico muestra las anomalías en la temperatura en Europa y la Antártida¹

Mitigar los factores producidos por el ser humano que pueden contribuir al cambio climático, tales como las emisiones de gases de efecto invernadero, es esencial en este nuevo escenario. Para alcanzar este objetivo, los gobiernos nacionales y los entes supranacionales han creado nuevos instrumentos regulatorios, los cuales pretenden cambiar los incentivos económicos de productores y consumidores.

En este sentido, y con el fin de mitigar el cambio climático, la Comisión Europea ha promulgado nuevas regulaciones para 2020 fijando objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de los Estados miembros. Estos objetivos, conocidos como 20-20-20, tienen la intención de contribuir al cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kioto, que siguen siendo una referencia mundial.

¹ Berkeley Earth Surface Temperature Project (2011)

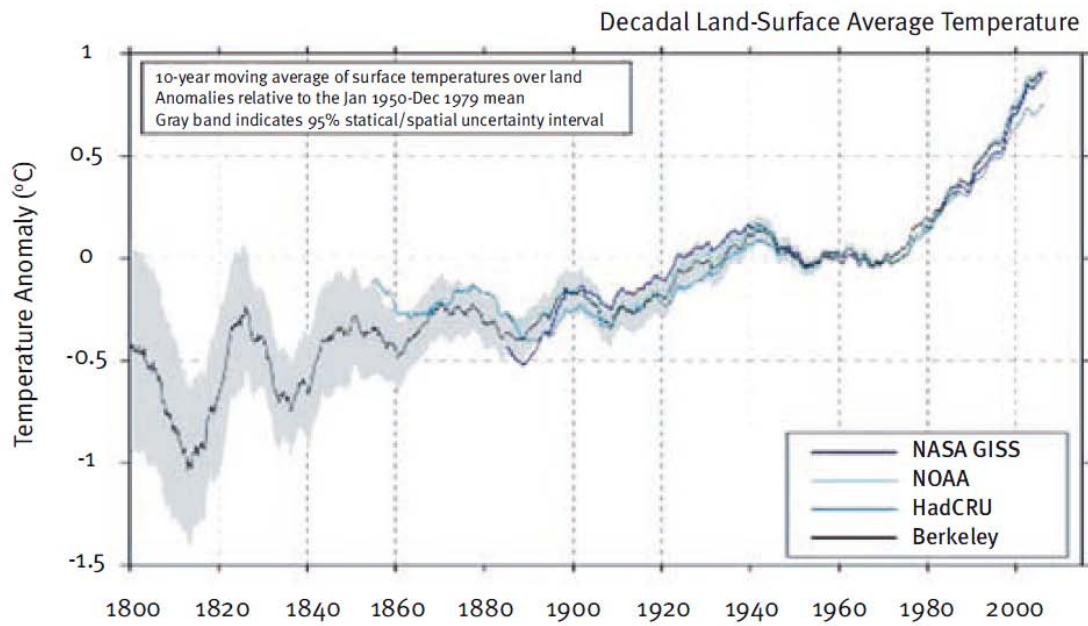


Fig. 2 Anomalías de la temperatura terrestre en los ods últimos siglos, de acuerdo a diferentes fuentes²

Dentro de este contexto climático y energético, los edificios gastan el 50% de la energía consumida en el planeta. La mayor parte de esta cantidad se refiere al consumo de combustibles para el calentamiento, la refrigeración y la iluminación, siendo el consumo restante empleado en las industrias y la construcción de edificios. En la Unión Europea, el sector residencial y terciario consumen el 40% del gasto total energético de todo el continente.

Hasta la entrada del siglo veinte, la única manera de controlar en invierno el clima interior de los edificios era mediante la quema rudimentaria de combustible, mientras que las opciones para la reducción de la temperatura en las épocas más calurosas eran prácticamente nulas. De esta manera, la importancia de las estrategias pasivas cobraba un valor elevado en cuanto al confort de los edificios. Con la llegada de los sistemas de calefacción, sistemas de aire acondicionado,

² Berkeley Earth Temperature Project (2011)

iluminación artificial y otros desarrollos tecnológicos, se pasó a ignorar las características climáticas de las localizaciones y su interacción con los edificios, recurriendo al uso indiscriminado de estos sistemas³. Esto ha conllevado a que se produzca un gasto energético en nuestros edificios muy importante, y a menudo innecesario.

Por todo ello, se hace completamente necesaria la utilización del conocimiento actual para el desarrollo de soluciones orientadas para disminuir el gasto energético en los edificios de nuestras ciudades y estar en la línea de las estrategias que se plantean a nivel global.

En este sentido, las tecnologías de producción eléctrica mediante el fenómeno fotovoltaico están sufriendo una adaptación para implementarlas como elementos arquitectónicos. La finalidad es doble: por un lado generar electricidad en el propio lugar de consumo, por otro, integrarlas como soluciones constructivas en las líneas de la arquitectura bioclimática, consiguiendo propiedades pasivas.

Y en esta filosofía la energía fotovoltaica es una tecnología madura, y cuyas previsiones mundiales de uso son crecientes. De hecho, para 2050 es esperable que la potencia acumulada instalada llegue a ser entre uno y dos terawatts, lo que podría suponer la generación de al menos el 10% de la energía⁴.

Por otro lado, la curva de aprendizaje sobre la tecnología y los factores de escala han contribuido a una bajada importante de los precios hasta llegar por debajo de la barrera de 1\$/Wp para los módulos fotovoltaicos de primera y segunda generación, lo que supone haber

³ Alexandra Albuquerque. Bioclimatic integration into the architectural design.2007

⁴ Jorge Hernández-Moro. El extraordinario crecimiento global de la potencia fotovoltaica y su futura evolución hacia la escala del terawatt. Rev Esp de Física, 27, 2, 2013.

alcanzado un hito perseguido durante años. Además, esta tendencia decreciente en el precio es esperable que continúe como consecuencia del continuo aumento del peso del mercado chino.

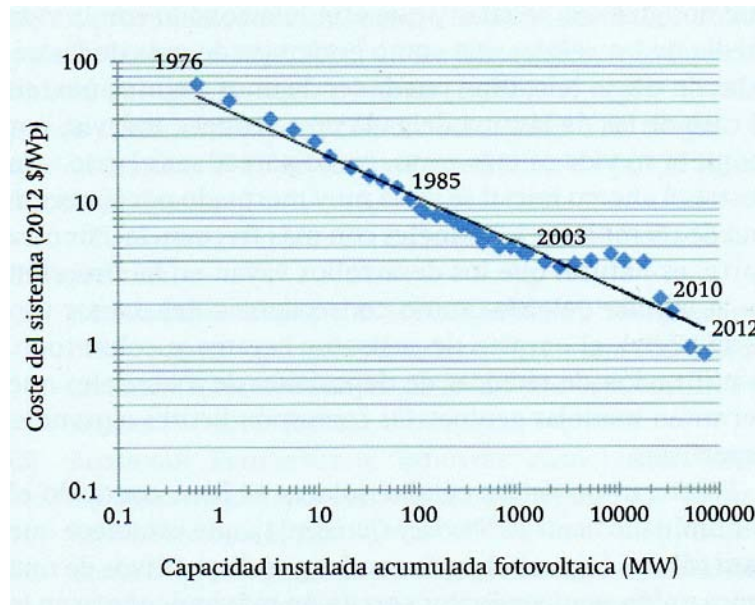


Fig. 3 Coste de los sistemas fotovoltaicos (1976-2012) como función de la potencia instalada acumulada⁴

Es por ello que el porcentaje de zonas terrestres en las que el coste de la electricidad fotovoltaica disminuirá hasta alcanzar la paridad con el de la red eléctrica se irá incrementando progresivamente sobre todo en las zonas de grandes recursos solares, generalmente localizadas en latitudes medias y bajas del globo terráqueo. Indicar finalmente que esta paridad con la red prácticamente ya se ha alcanzado en ciertas islas en las que es muy costoso transportar energía, como es el caso de Hawai o las Islas Canarias.

La unión de los contextos climáticos, energéticos, de políticas europeas y del desarrollo técnico y de mercado de los elementos fotovoltaicos, hacen que las investigaciones en el campo de los sistemas BIPV sean de máximo interés desde el punto de vista social y económico.

1.2. Nanotecnología y arquitectura

La charla de Richard Feynman “There’s plenty of room at the bottom”⁵, en 1959, durante una reunión de la Sociedad Americana de Física, se considera el inicio de la nanotecnología. En ella pronunció su famosa frase “Los principios de la física no impiden la posibilidad de manipular las cosas átomo a átomo”. No obstante, el concepto de nanotecnología no surgió hasta 1974 de la mano del profesor Norio Taniguchi⁶, refiriéndose al proceso por el que se considera el manejo de los átomos y las moléculas a nivel individual. Esta definición, fue matizada en 1981 por Drexler⁷ como los procesos que involucran dimensiones entre 0,1 y 100 nm. En la actualidad, esta disciplina ha alcanzado ya el mercado en diversos ámbitos estimando que, por ejemplo para el caso de los nanomateriales, se estima un volumen de ventas para 2017 de 37.300 millones⁸ de dólares, por lo que se trata de un ámbito cuyas aplicaciones ya comienzan a ser explotadas comercialmente y están encontrando su hueco en la sociedad (Fig. 4).

⁵ Feynman R. There’s plenty of room at the bottom. American Physical Society. Eng Sci 1960;23:22-36

⁶ Taniguchi N. On the basic concept of Nano-technology. Proceedings of International Conference on Production Engineering Tokyo. Society of precision Engineering; 1974. P. 18-23

⁷ Drexler K. Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. Proc Natl Acad Sci USA 1981; 78:5275-8.

⁸ Nanotechnology: A realistic market assessment. Sep 2012. BCC Research

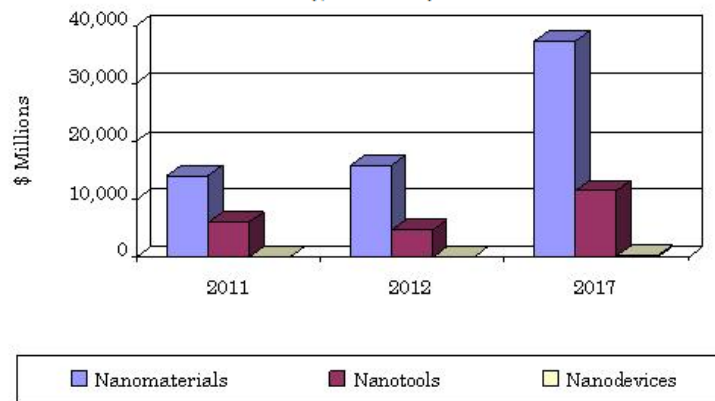


Fig. 4 Volúmenes de venta estimados para diferentes áreas de la nanotecnología

El primer informe que sintetiza las aplicaciones del área de la nanotecnología en la construcción surge en 2004⁹ centrándose en los ámbitos de:

- Incremento de la resistencia mecánica y duración de los composites de cemento a través de nanopartículas, nanotubos de carbono y nanofibras
- Tratamientos de bajo coste de anticorrosión del acero
- Aislamiento térmico muy superior al otorgado por materiales convencionales
- Pinturas, recubrimientos y películas delgadas con propiedades de autolimpieza
- Nanosensores y materiales para desarrollo de sensores orientados hacia la autoreparación.

No obstante, y dado que el concepto de arquitectura es más amplio que el de construcción, se exponen a continuación las diversas aplicaciones de la nanotecnología en esta área.

⁹ Zhu W., Bartos P., Porro A. RILEMTC 197-NCM

Nótese que se han excluido de este apartado los tratamientos *self-cleaning* por estar desarrollados más adelante con mayor detalle.

1.2.1. Propiedades antirreflectoras

Los reflejos de los vidrios u otros materiales son a menudo indeseados en el mundo de la arquitectura por impedir una correcta visión a través de un elemento transparente, o incluso deben ser eliminados, como sucede por ejemplo en las cercanías de los aeropuertos, por normas de seguridad para evitar deslumbramientos.

Llevado a los vidrios fotovoltaicos, esta característica hace además que se aumenten las propiedades de producción eléctrica gracias a una ganancia en la transmitancia lumínica en la interfase aire-vidrio.

Los tratamientos antirreflejo existentes se basaban en la deposición de películas delgadas de materiales con diferentes índices de refracción como por ejemplo, combinaciones de SiO₂, SiN y TiO₂¹⁰. Estos están basados en la aniquilación por interferencia de la propia onda luminosa con su reflejo, adaptando el espesor de la capa a un cuarto de una longitud de onda dada. Éstos, ofrecían la limitación de presentar una propiedad antirreflejo asociada a una longitud de onda predominante en el espectro luminoso (determinada por espesores) y formas de deposición relativamente caras¹¹.

¹⁰ O. Zabeida, A. Amassian, S. Larouche, C. Lavigne, J. E. Klemberg-Sapieha, and L. Martinu. Plasma deposition of anti-reflective coatings on spherical lenses.

¹¹ A. Cannavale et al. Building and Environment 45 (2010) 1233-1243

Con el desarrollo de la deposición de partículas por sol-gel o LbL (layer by layer) se han realizado estudios en los que se consiguen controlar las propiedades ópticas de los vidrios, llegando a realizar tratamientos selectivos¹² o con reflectancias inferiores al 1%¹³. Por otro lado, la propiedad antirreflejo de las estructuras porosas de nanopartículas hacen que la propiedad antirreflejo pueda abarcar una zona amplia del espectro. Existen además investigaciones en las que esta propiedad ya se combina con la hidrofobicidad¹⁴

1.2.2. Propiedades fotocatalíticas

La aplicación más conocida y más explotada de la nanotecnología, en el ámbito de la construcción y la arquitectura, está centrada en la utilización de los materiales semiconductores con propiedades fotocatalíticas. De todos los que presentan esta propiedad (TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , WO_3 y CdSe) el más estudiado es el TiO_2 , siendo su fase de rutilo la normalmente utilizada por ser la más estable termodinámicamente hablando. Por otra parte, este óxido no tiene además problemas de suministro, ya que es el noveno material más abundante en la corteza terrestre.

La actividad catalítica del TiO_2 se manifiesta cuando este es irradiado con radiaciones de longitudes de onda entre 320-400 nm, lo cual genera pares electrón-hueco en su estructura. Cuando esto sucede en presencia de moléculas de agua, se forman iones O_2^- y radicales OH . Ambos compuestos altamente oxidantes reaccionan con la suciedad y sustancias orgánicas promoviendo su desintegración.

¹² Soutar A., Nee TS. SIMTech technical report. Singapore Institute of manufacturing Technology. 2002

¹³ Melninkaitis A. et al. Proc SPIE 2007; 6403. 64031C-1.

¹⁴ X. Li et al. Materials Research Bulletin 48 (2013) 2522–2528

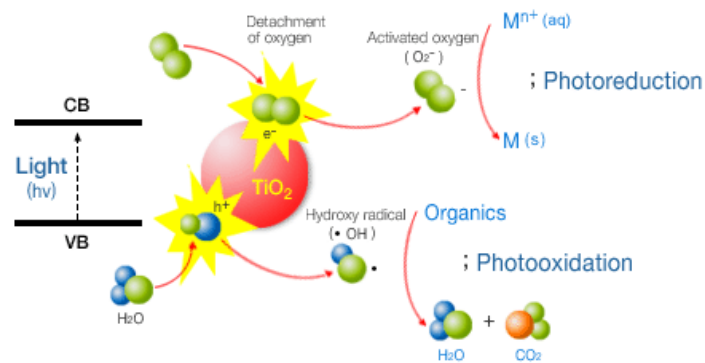


Fig. 5 Proceso de fotocatalisis en el TiO_2 ¹⁵

Además, las superficies cubiertas con TiO_2 muestran una significativa hidrofiliidad que se manifiesta en una reducción del ángulo de contacto con las gotas de agua, facilitando de esta manera obtener una superficie con mejores propiedades de limpieza. Este aspecto, se descrito con mayor extensión más adelante.

A modo de ejemplo sobre el potencial comercial de esta tecnología, mencionar que la empresa japonesa TOTO Ltd, ha solicitado ya 1200 patentes relativas a este aspecto, de las que 500 ya han sido aprobadas.

De entre las aplicaciones del efecto fotocatalítico, se distinguen las de propiedades de autolimpieza de las superficies, eliminación de polución del aire y efecto antibacterianos.

Destacar, que estos compuestos no solamente se han utilizado sobre vidrio sino también sobre superficies de cemento. La primera aplicación de este tipo fue en la iglesia de Roma “Dives in Misericordia”, diseñada por Richard Meyer y abierta en 2003, y cuyo exterior está formado por bloques de cemento blanco recubierto con TiO_2 .

¹⁵ <http://apps-jar-2013.blogspot.com.es/2011/08/green-road-tio2-in-road-pavement.html>

Por otro lado, la reducción de la contaminación del aire que se encuentra en contacto con el material, es otra de las ventajas del efecto fotocatalítico. El efecto se produce principalmente sobre los óxidos de nitrógeno (NO_x) expulsados principalmente en las áreas urbanas por los vehículos diesel. Esta aplicación cobra mayor interés en los interiores de los edificios, donde el material presenta la limitación de tener que recibir radiación UV para que el efecto ocurra de manera efectiva. No obstante, se han realizado estudios en los que se consigue un comportamiento satisfactorio con los niveles de radiación interiores habituales, a pesar de ser estos menores que los exteriores¹⁶. A modo de ejemplo, en una calle de Bérgamo se han utilizado estos materiales en el pavimento, habiéndose reducido un 45% los óxidos de nitrógeno¹⁷. En general, para este tipo de aplicaciones, se ha encontrado que la porosidad de los materiales es crucial para aumentar este efecto, de esta manera, se aumenta la superficie de contacto entre el TiO₂ y el aire exterior, maximizando los efectos.

También se ha encontrado una reducción de los VOC (Volatile Organic Compounds), compuestos dañinos para la salud cuya cantidad se encuentra regulada para ambientes interiores¹⁸. No obstante, estas aplicaciones, de nuevos se ven limitadas por la necesidad de radiación UV para la activación del proceso.

Por último, dentro de las aplicaciones de la fotocatalisis se encuentra la destrucción de hongos y bacterias. En ambientes interiores, la proliferación de estos organismos son las principales

¹⁶ Maier W., Nilsson C., Holzer M., et al. National Congress of construction mortars, Lisboa. 2005

¹⁷ Beeldens A. RILEM International Symposium on photocatalysis environment and construction materials. Italy; 2007; 187-194

¹⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Volatile_organic_compound#Biologically_generated_VOCs

causas de degradación de los materiales de construcción y de problemas de salud, siendo los hongos los responsables del crecimiento de micotoxinas¹⁹.

Se ha encontrado que determinadas nanopartículas son capaces de destruir colonias de bacterias, habiéndose encontrado un mejor comportamiento al disminuir el tamaño de las nanopartículas²⁰. En concreto, el efecto destructor de bacterias se atribuye a los radicales OH, cuyo poder puede ser muy superior a los productos químicos de desinfección²¹. De nuevo, esta aplicación queda limitada en espacios interiores debido a la necesidad de radiación UV.

1.2.3. Propiedades de autolimpieza

Las propiedades de autolimpieza pueden venir dadas por dos tipos de tratamientos: Hidrofóbico e hidrofílico.

Los tratamientos hidrófobos (o superhidrófobos) persiguen simular el efecto Lotus, observado en la planta que lleva el mismo nombre, y que muestra una gran capacidad para repeler la suciedad de su superficie.

¹⁹ Wiszniewska M., et al. Int Journal of Occupational and Environmental Health 2009;22:343-354

²⁰ Huang Z., Maness P. et al. J Photochemical Photobiology A Chem 2000; 130:163-170

²¹ Cho M., Chung H. Water Res 2004; 38: 1069-1077

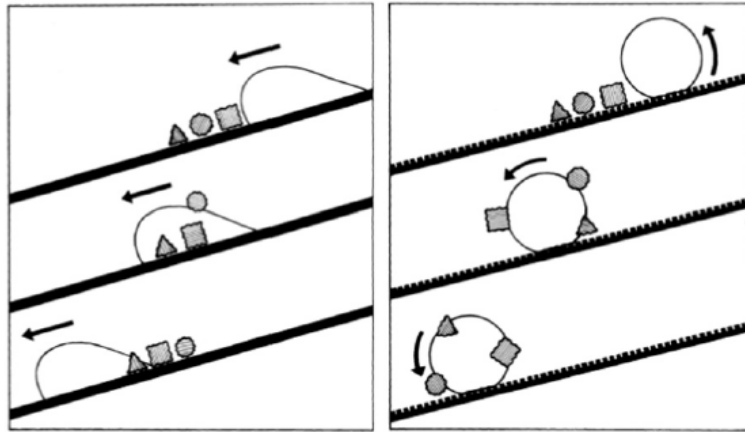


Fig. 6 La figura describe el comportamiento de la suciedad sobre las hojas de la planta de Lotus (derecha) frente a una superficie convencional (izquierda), donde la rugosidad de la superficie tiene una influencia notable²².

Por otro lado, los tratamientos hidrofílicos poseen la propiedad de extender el agua por la superficie, provocando así un mayor arrastre de las impurezas. Además, éstos suelen realizarse con nanopartículas de TiO_2 , por lo que existe un combinado de efectos de limpieza con fotocátalisis.

Este aspecto será descrito y discutido posteriormente al analizar los diferentes tratamientos de autolimpieza del vidrio.

1.2.4. Anti vaho

De nuevo el TiO_2 muestra una nueva aplicación basado en su alta energía superficial, lo que provoca que en su superficie no se formen gotas sino láminas finas, que evitan la apariencia de empañamiento sobre los vidrios.

Estos tratamientos suelen ser temporales, por lo que deben ser aplicados con cierta periodicidad.

²² W. Barthlott, C. Neinhuis. *Planta* 202 (1997) 1–8

1.2.5. Productos de hidratación del cemento

El cemento es el material más utilizado del planeta para la construcción. No obstante presenta algunos inconvenientes como es su alta permeabilidad, que permite que el agua u otros elementos agresivos lo penetren, lo que ocasiona problemas de corrosión debido a la carbonatación y cloración. Por lo tanto, el estudio a escala nanométrica de los productos de hidratación puede suponer un paso importante en la mejora de la sostenibilidad de este material²³.

Por otro lado, también se ha investigado como aumentar las propiedades mecánicas de este material en áreas como el estudio de las fases cementantes por nanoindentación o la utilización de nanopartículas (nanotubos, nanofibras, nanosilicas o nanoarcillas). En concreto, y en el caso de las nanosílicas, se han encontrado mejoras en la resistencia mecánica del 15-20%²⁴.

1.2.6. Aislamiento: Aerogel

El aerogel durante años, hasta el desarrollo del aerografito y del aerogel de grafeno, ha sido el material sólido más ligero del mundo y el de mayor capacidad de aislamiento térmico. Se trata de un material con estructura de un gel en el que el componente líquido ha sido sustituido por un gas, lo que da como resultado un compuesto con una densidad extraordinariamente baja, al estar formado en más de un 95% por aire. Los primeros aerogeles se conformaron partiendo de geles de sílice, aunque también se ha trabajado sobre aluminio, cromo y dióxido de estaño.

A pesar del nombre, las propiedades que ofrece el material final no son similares a las de los geles. Se trata de un material rígido, que rompe de manera similar al vidrio, y que presenta

²³ F. Pacheco-Torgal, Said Jalali. *Construction and Buildings Materials* 25 (2011) 582-590

²⁴ Sobolev K., Flores I., Hermosillo R., Torres Martinez L. *American Concrete Institute: ACI Special Publication*; 2008. P 93-120

buenas características mecánicas. Su estructura contiene poros del orden de los 100 nm y este tamaño puede ser controlado en su fabricación.

Sus excelentes propiedades de aislamiento térmico vienen dadas por la prácticamente anulación de los mecanismos de transferencia de calor de convección y conducción. La convección, se ve anulada debido a la inmovilidad del gas interno, que se encuentra atrapado en poros con un tamaño suficientemente pequeño como para que no se de este fenómeno. La conducción, presente especialmente en la matriz sólida, se ve minimizada por la poca cantidad de material y por las bajas conductividades que presentan sobre todo los compuestos de sílice. Cuando se trata de aerogel de compuestos metálicos el mecanismo de conducción ha de ser considerado, ya que consecuentemente pierden capacidad en cuanto a la aplicación de aislamiento térmico se refiere. En cuanto al transporte por radiación, destacar que el aerogel es transparente al infrarrojo, por lo que no evita la transferencia de calor por este mecanismo.

Este material tiene la peculiaridad de atraer enormemente el agua, lo que hace que sea desecante. En relación con su manipulación, esto se ha convertido en un problema a solventar ya que ocasiona daños en la piel, obligando a ser manipulado con guantes.

Por otro lado, cuando el material absorbe agua se producen cambios en su estructura que provocan su degradación. Debido a esto, se han desarrollado tratamientos que lo hacen hidrófobo, no solamente en sus caras externas, sino también en el interior del material. De esta manera se evita que los posibles cracks lo degraden.

Sus principales aplicaciones, dentro del mundo de la arquitectura, se centran en los cerramientos transparentes, donde a menudo se combinan con el vidrio, aumentando la capacidad de aislamiento de éste, actualmente limitada a las cámaras de gas y tratamientos bajo emisivos. Esta capacidad cobra especial sentido en su utilización en lucernarios, donde los efectos de

convección en las cámaras utilizadas tradicionalmente hacen que aumente la transferencia de calor existentes en los cerramientos de vidrio habituales.



Fig. 7 Integración de *U canal glass* de Pilkington con *Lumira Aerogel*

No obstante, y en relación con esta aplicación aun se debe trabajar para tener un mayor control sobre la transparencia del aerogel y sus propiedades ópticas. Actualmente, estas aplicaciones se limitan a una apariencia translúcida que no siempre es deseable.

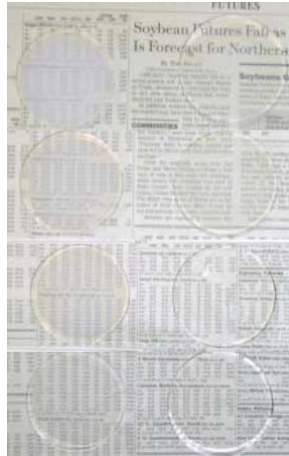


Fig. 8 Distintas formulaciones estudiadas por la empresa Aspen Aerogels para la obtención de transparencia²⁵

1.3. *Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*

La integración de módulos fotovoltaicos puede ser incluida de diversas maneras. Dependiendo de su nivel de integración y las funcionalidades que pueden desarrollarse clasifican en:

- a) BAPV: Building Applied Photovoltaics

Se refiere a sistemas fotovoltaicos que no sustituyen a ningún material de construcción, y no añaden ningún valor adicional al edificio más a parte de la producción eléctrica.

El BAPV, por lo general se añade al edificio, una vez que su proceso de construcción ha finalizado. Es relativamente común hacerlo en las cubiertas de los edificios, aunque también se puede encontrar en otros lugares.

- b) BIPV: Building Integrated Photovoltaics

²⁵ Aspen Aerogels: Highly Insulating Windows

En este sistema, los elementos fotovoltaicos, han estado presentes en el proyecto desde el inicio, y son una parte del diseño integral. De este modo, en el BIPV, los módulos solares tienen el papel de un elemento constructivo más. La gran variedad y las diferentes características de los productos hacen posible que puedan reemplazar muchos componentes de la edificación, principalmente en fachadas y tejados.

La envolvente del edificio garantiza una frontera entre el edificio y el ambiente. Tiene que proporcionar una calidad de aire estable evitando el intercambio de masa de aire sin control, permitiendo así el adecuado funcionamiento y la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado exterior. Por otra parte está destinada a ejercer como capa impermeabilizante al edificio.

Cuando los módulos solares van a ser integrados en el edificio, estos elementos deben ser considerados en la fase de diseño para así conseguir productos más adecuados.

Es obligado destacar que como característica principal de estas soluciones, se encuentra la **generación de energía eléctrica**, lo que se conoce como **propiedad activa**. Esta energía puede ser utilizada para el propio consumo del edificio o para ser inyectada a la red. Dependerá principalmente del nivel de radiación de la zona geográfica, la inclinación y orientación del módulo y de su eficiencia, reflejado esto último en los vatios-pico (Wp) por cada metro cuadrado de la instalación.

Sobre este último punto, la potencia de cada módulo fotovoltaico se mide a través de unas condiciones estándar definidas de 1000W/m² de radiación incidente, con un espectro AM1.5 y una temperatura de 25°C. Es la potencia entregada por el módulo, bajo esas condiciones, lo que se conoce como su potencia-pico.

No obstante, existen otros muchos elementos a considerar que pueden modificar la energía producida por la instalación. Por ejemplo, el sombreado de una célula o módulo hace que se

reduzca la intensidad eléctrica que recorre todos los elementos que se encuentran en serie con él, lo que causa pérdidas que no son proporcionales al sombreado; esto se conoce como *mismatch*. Otras pérdidas pueden venir ocasionadas por la eficiencia de la electrónica que gestiona la energía y su capacidad o no para adaptarse al punto de máxima potencia de la curva I-V de la instalación (Maximum Power Point Tracking o MPPT). Y en esta relación, otro fenómeno que puede causar pérdidas de generación activa de una instalación BIPV es la suciedad. Este tema será objeto de uno de los estudios experimentales que se abordarán en esta investigación.

Por otra parte, cuando los elementos fotovoltaicos son integrados como parte de un edificio, éstos son susceptibles de aportar una serie de **propiedades pasivas**, a menudo con igual o mayor valor que las propiedades activas en función de las características perseguidas en el edificio. Las más comunes son:

- Aislante térmico.
- Protección solar.
- Entrada de luz natural
- Impermeabilidad.
- Aislamiento acústico

En un posterior apartado se analizará la influencia referente a la protección solar otorgada por una lámina de poliéster situada sobre vidrio fotovoltaico, así como su efecto sobre la eficiencia del módulo.

1.3.1. Distribución de los productos BIPV en el mercado

Alrededor de las tres cuartas partes de las aplicaciones BIPV, están basadas en la tecnología de silicio cristalino. Se estima que representa más del 70% del total de los productos BIPV vendidos. Ello es lógico, ya que es la tecnología más madura y actualmente representa un total del 85% del mercado fotovoltaico.

Los productos basados en silicio cristalino, son utilizados habitualmente en tejados y en sistemas de revestimiento, módulos semitransparentes y tejas rígidas. El silicio cristalino es muy habitual en las aplicaciones BIPV ya que los paneles convencionales son más fáciles de integrar y son los más económicos. En el mercado existen numerosas empresas que se encuentran en el sector de la tecnología de silicio cristalino, por lo que son muchas las que han dado el paso a su integración arquitectónica.

Las tecnologías “Thin Film” conforman la parte restante de los productos comercializados. Los beneficios de esta tecnología son su flexibilidad y sus buenas características bajo condiciones de luz difusa. La eficiencia de estos módulos tiende a ser menor que los de silicio cristalino. Su precio, también es inferior, por lo que la alternativa de su aplicación ha de venir ligado a un balance económico.

La mayoría de estos productos se basan en la tecnología de capa delgada de silicio amorfo y de CIGS (Cadmio-Indio-Galio-Selenio) o CdTe (Teluro de Cadmio). La integración utilizando las tecnologías *thin film* se espera que crezca sustancialmente en los próximos años.

1.3.2. Tecnologías BIPV

Conseguir integrar un elemento fotovoltaico en un edificio, implica considerar una serie de ventajas e inconvenientes.

A continuación se analizan las tres generaciones de tecnologías fotovoltaicas existentes atendiendo a sus posibilidades de uso como elementos arquitectónicos.

Tecnología de Silicio Cristalino. 1ª generación PV

Los módulos de silicio cristalino son muy favorables para los productos BIPV, por tres razones:

- En primer lugar está la madurez de esta tecnología y del mercado que ha llevado a la diversificación de la oferta de productos.
- Existe una amplia investigación por lo que esta tecnología ha alcanzado buenos niveles de calidad.
- La eficiencia en la conversión es más elevada que en el resto de las tecnologías. Esta propiedad se vuelve crucial cuando la disponibilidad de superficie es limitada.

Por otra parte, esta tecnología presenta determinados inconvenientes. La inclusión de las células de silicio en los módulos, producen un impacto visual sobre los edificios, aunque hay algunas maneras de evitar que la parte delantera y el centro de las obleas de los productos de integración arquitectónica afecten visualmente, sobre todo los módulos vidrio-vidrio.



Fig. 9 Realización de un elemento de sombreado en el centro de Barcelona mediante tecnología de silicio cristalino.

Otra limitación estética, consiste en la interconexión de las células con los módulos. Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino constan de un cable fino de plata que recoge la corriente de la superficie frontal y de otro cable más grueso que conecta los electrodos. Estas franjas de plata están en contraste con la apariencia más uniforme tanto de las células de silicio y los materiales de la mayoría de los edificios. Además, las rayas de tabulación pueden ir en diferentes direcciones con lo que puede llegar a dar un aspecto extraño del producto.

Por último, aunque entre las tecnologías BIPV, el silicio cristalino presenta la mayor eficiencia, el hecho de que la integración arquitectónica es plana inmóvil y con una orientación determinada a las características del edificio, resta valor a su eficiencia.

Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino, dependen más que el resto del ángulo de incidencia de la luz. La iluminación fuera de un eje, la radiación difusa o la pérdida por sombras, es mayor que con la tecnología *thin film*.

Tecnología Thin-Film. 2ª generación PV

Las tecnologías *thin film* o de segunda generación, atendiéndose a los materiales base que utilizan, son tres principalmente: silicio amorfo (a-Si), CIGS/CIS y Teluro de Cadmio (CdTe).

A pesar de tener asociado una eficiencia menor que el alcanzado en la tecnología cristalina, estos productos compiten con los productos cristalinos con otras ventajas como son un coste más reducido, su versatilidad o la mejor captación de la radiación difusa.



Fig. 10 Integración de vidrios fotovoltaicos de tecnología de silicio amorfo en la fachada de la SMLHouse. Solar Decathlon 2011.

Otro condicionante que hay que tener en cuenta a la hora de elegir el tipo de tecnología es la temperatura a la que se exponga la superficie de integración, ya que a temperaturas muy altas la tecnología cristalina ve afectado considerablemente su rendimiento de producción energética, al contrario que las tecnologías de segunda generación.

Una importante ventaja de las tecnologías *thin film* es su apariencia homogénea, que a menudo resulta más estética que los módulos de células. Este aspecto, en función del diseño del edificio, a menudo puede resultar decisivo en la elección del sistema a imponer.

Tecnologías orgánicas e híbridas. 3ª generación PV

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías que siguen manifestando un efecto fotovoltaico a pesar de estar alejadas de la tecnología tradicional de semiconductores, en las que, recordemos, la separación de cargas se produce en uniones p-n de semiconductores inorgánicos.

Como tecnologías principales dentro de esta tercera generación, podemos destacar como las más cercanas al mercado BIPV la fotovoltaica orgánica (OPV) y la de *dye sensitized solar cells* (DSSC) que combina estructuras híbridas orgánica-inorgánica.

El principal valor de estas últimas tecnologías es que su fabricación es potencialmente mucho más barata que las tecnologías anteriores, ya que se pueden depositar sobre sustratos flexibles que abren la puerta a técnicas de producción en masa como R2R (*roll-to-roll*).



Fig. 11 Película flexible fotovoltaica fabricada por R2R por la compañía Konarka basada en tecnología orgánica

A pesar de que son tecnologías aun bajo investigación, han dado ya el salto a ciertas aplicaciones comerciales. Un ejemplo de ello es la empresa Heliatek (OPV), cuya capacidad de producción aumentará considerablemente en los próximos años, o la empresa G24i (DSSC), que ya lo utiliza para pequeños elementos electrónicos.

Capítulo 2 Objetivo del proyecto

Como objetivo general del proyecto se establece la evaluación de las modificaciones superficiales de los vidrios fotovoltaicos de integración arquitectónica como fuente de mejora de sus propiedades activas y pasivas.

Dentro de este marco general, se establecen dos objetivos específicos claramente diferenciados en los dos estudios experimentales:

- 1) Evaluación de las propiedades de autolimpieza de un tratamiento hidrófobo comercial, como ejemplo de aplicación de la nanotecnología a una problemática real, y su influencia en las propiedades de generación fotovoltaica (propiedad activa) del vidrio.
- 2) Evaluación de la implementación de las láminas de control solar en el vidrio fotovoltaico transparente de cara a la mejora y control de su factor solar (propiedad pasiva) y, por ende, del control térmico del edificio donde se implementa.

Con ello se pretende llevar a cabo una evaluación de dos casos en los que se ha realizado una modificación superficial del material, y como ello puede afectar a las propiedades necesarias en el vidrio fotovoltaico en sus funciones como elemento constructivo.

Capítulo 3 Estudios Experimentales

En este apartado se presentan los estudios que se han realizado y que constituyen la base de nuestra investigación.

El primero de ellos consiste en la aplicación de un tratamiento hidrófobo sobre un vidrio solar empleado como encapsulante de células fotovoltaicas de silicio cristalino. Se aborda aquí el potencial que tendría un desarrollo del ámbito de la nanotecnología, sobre **la propiedad activa** (generación eléctrica) de un vidrio fotovoltaico orientado hacia la integración en edificios. (Apartado 3.1.)

El segundo, consiste en analizar la influencia de un film con propiedades de control solar adherido a un vidrio fotovoltaico con tecnología de silicio amorfo. En este estudio, se busca la mejora, no de una propiedad activa como es la generación energética, sino de una **propiedad pasiva** del vidrio que permita aumentar el confort interno del edificio en el que se utiliza. El fundamento de esta aplicación está vinculado al filtrado de determinadas longitudes de onda del espectro solar. (Apartado 3.2.)

3.1. *Nanocoating* hidrófobo: mejora activa del vidrio fotovoltaico

El citado tratamiento hidrófobo puede aportar posibles mejoras vinculadas a las propiedades de autolimpieza sobre vidrio fotovoltaico.

Es nuestro propósito en esta serie de experiencias, demostrar cómo un desarrollo de un producto ligado a la nanotecnología puede ser susceptible de ser aplicado para conseguir una mejora de las propiedades activas de los vidrios fotovoltaicos, y por lo tanto de la eficiencia energética de los edificios.

Por otro lado, esta modificación no solamente va a tener implicaciones energéticas sino también estéticas, pudiendo permanecer el vidrio limpio durante más tiempo, con el consecuente ahorro económico.

3.1.1. Estado del arte

Efecto del polvo y la suciedad en vidrio fotovoltaico

La acumulación de polvo y suciedad en el vidrio fotovoltaico resulta ser un factor importante a tener en cuenta en la utilización de estos elementos para la producción de electricidad, debido a la consecuente reducción asociada por la pérdida de transmitancia lumínica.

Quizás, el lugar dónde este fenómeno se pone más de manifiesto es en zonas geográficas áridas con escasa precipitación. Como ejemplo, estudios en zonas desérticas han mostrado pérdidas del 20%, mientras que otros realizados en el sur de España muestran pérdidas del 15%.

Antes de los años 90, las investigaciones de este tipo se referían primordialmente a los colectores solares (energía solar térmica), pero a lo largo de los 90, con el desarrollo de la industria fotovoltaica, se publicaron numerosos trabajos de relacionados con la implicación del polvo en el funcionamiento de los módulos.

Las áreas geográficas estudiadas se sitúan normalmente en las zonas desérticas, comúnmente conocidas como MENA (Middle East and North Africa)¹. A pesar de ser lugares con elevados índices de radiación, existen razones técnicas que dificultan la utilización de tecnología fotovoltaica. Una de ellas es la acumulación de polvo sobre los módulos, que disminuye considerablemente su capacidad de generación, y cuya solución pasa por una limpieza periódica

¹ Said S. Appl Energy 1990;37(1):73–84

con agua, que no siempre es viable, bien por la baja disponibilidad de este elemento, o bien por su elevado coste².

Por otro lado, la disminución de la eficiencia de los módulos por ensuciamiento ha resultado ser un fenómeno complejo debido a su dependencia de numerosos factores. En concreto, puede verse afectado por la composición de las partículas de polvo, el tamaño de las partículas o la densidad de la deposición, todo esto en cuanto a la naturaleza de la suciedad se refiere³. Por otro lado, fenómenos como la humedad, la velocidad y dirección del viento y la inclinación del módulo también tienen efectos sobre el resultado⁴.

Entre estos parámetros, es especialmente influyente resulta la inclinación del módulo, habiéndose encontrado pérdidas superiores para módulos con inclinación inferior a 30°.

² AlBusairi HA, Moller HJ. 25th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Valencia, Spain, 2010. p. 3468–70

³ El-Shobokshy MS, Hussein FM. Sol Energy 1993;51(6):505–11

⁴ Mani M, Pillai R. Renew Sustain Energy Rev 2010;14(9):3124–31

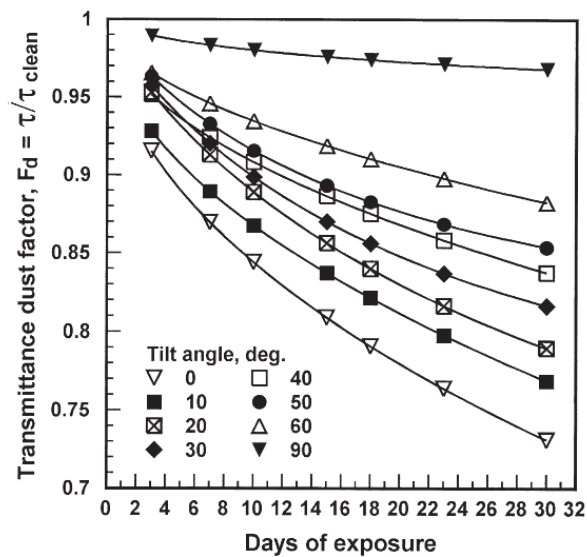


Fig. 12 Pérdidas de transmitancia lumínica a lo largo del tiempo de vidrios con diferentes inclinaciones⁵

Es por todo ello que el desarrollo de los vidrios con propiedades de autolimpieza ha abierto un campo que pretende investigar la minimización de este efecto. Más aun, estos tratamientos tienen una especial cabida dentro del sistema BIPV, ya que en este mercado el coste deja de ser un factor menos crucial que el correspondiente en las aplicaciones puramente de producción energética, como son las plantas solares.

Uno de los primeros artículos que se han publicado, y que aun se encuentra en fase de aprobación, describe la reducción de pérdidas en módulos que utilizan vidrios de autolimpieza desarrollados por la compañía japonesa Asahi. Éstos incorporan una capa de nanopartículas de TiO₂ junto con aglutinantes, que otorgan propiedades hidrofílicas, fotocatalíticas y antireflejantes al vidrio. La experiencia se ha llevado a cabo en Málaga con módulos en posición

⁵ A.A. Hegazy / *Renewable Energy* 22 (2001) 525–540

horizontal, encontrándose una mejora debido al uso del tratamiento, especialmente en las épocas de menor precipitación (Fig. 13).

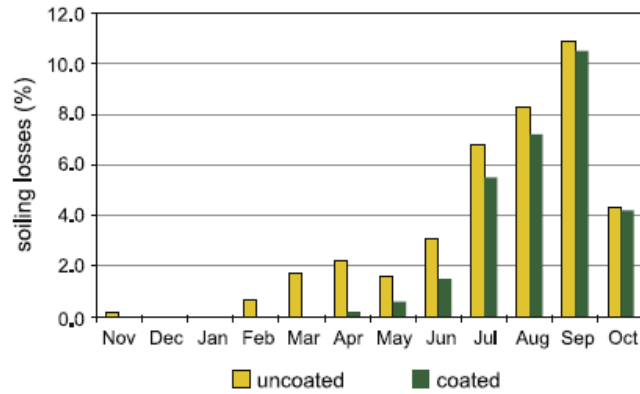


Fig. 13 Comparativa de las pérdidas por suciedad en dos módulos fotovoltaicos, uno de ellos con tratamiento superficial de autolimpieza

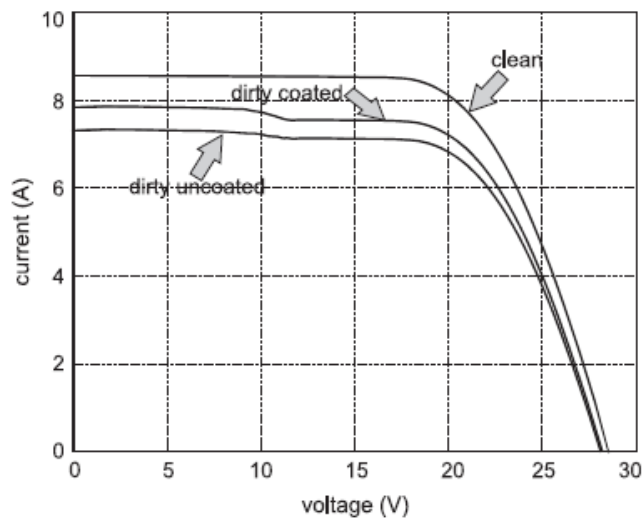


Fig. 14 Curvas I-V de tres módulos fotovoltaicos, uno sucio con tratamiento de autolimpieza, otro sucio sin tratamiento y por último uno limpio.

Productos para self-cleaning: principios

Actualmente son numerosas las empresas dedicadas a la fabricación de vidrio fotovoltaico, así como otras especializadas en productos de nanotecnología que están trabajando para ofrecer recubrimientos de autolimpieza para todo tipo de superficies. Es destacable que el mundo de las tecnologías fotovoltaicas está unido al vidrio ya que éste es el material universal utilizado hasta el momento como sustrato.

Las propiedades de autolimpieza son interesantes porque se traducen en un menor, o nulo, mantenimiento de los productos en cuanto a limpieza, con el consecuente ahorro económico. Este concepto, llevado al vidrio fotovoltaico utilizado en la integración arquitectónica, puede suponer además una mejora de la producción eléctrica sobre la base del mantenimiento de la transmitancia lumínica original del vidrio que cubre la capa activa.

Dado que es una aplicación relativamente avanzada que ya se ofrece de manera comercial, se está trabajando en la estandarización de un método que cuantifique estas propiedades [NMP3-CT-2003-505952], que defina un coeficiente conocido como “Self-Cleaning Factor” (SCF).

Las propiedades de autolimpieza del vidrio pueden depender en primer lugar del comportamiento de su superficie con respecto al agua, para lo que pueden manifestar comportamientos hidrofílicos e hidrofóbicos. Por otro lado, además éstas pueden venir acompañadas de otros efectos, como la fotocatalisis, que destruya la materia orgánica y pueda contribuir al ensuciamiento. Este último efecto, está generalmente asociado a las partículas de TiO_2 , por lo que suele ir acompañado de un comportamiento hidrofílico.

Los tratamientos **hidrofílicos+fotocatalíticos**, comienzan con la aplicación de una capa de nanopartículas de TiO_2 que debe ser activado con radiación UV. Gracias a ello, el TiO_2 reacciona con las moléculas de agua y oxígeno del aire y produce radicales libres. Este proceso necesita de la exposición a la luz diurna, dándose la activación total al cabo de una semana

aproximadamente de funcionamiento. Cuando la suciedad, el polvo u otros depósitos llegan a la superficie, la radiación UV genera grupos O_2^- y OH^- que destruyen las partículas de suciedad y los microorganismos (Fig. 15). Como la radiación UV es abundante incluso en días nublados o en áreas sombreadas, el proceso continua mientras haya luz diurna. El proceso de fotocatalisis fue descrito dentro del área de las aplicaciones de la nanotecnología en la arquitectura.

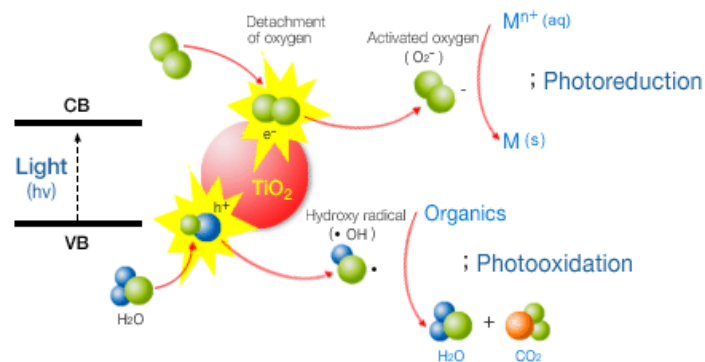


Fig. 15 Proceso de fotocatalisis en el TiO_2 ⁶

En una superficie hidrofílica, el agua formará una película fina que se extenderá sobre la superficie, arrastrando así la materia orgánica descompuesta por la fotocatalisis. Ahora bien, si ésta es hidrofóbica, como es el caso que nos ocupa, el agua formará gotas en las que los depósitos serán atrapadas y eliminadas de la superficie.

Aunque la descripción anterior contempla el proceso fotocatalítico realizado por el TiO_2 , son muy comunes los tratamientos en los que se considera la autolimpieza solamente desde el punto de vista de la alteración de las propiedades superficiales. Esto se consigue aplicando una fina capa que reacciona químicamente con la superficie de sílice del vidrio, formando una película

⁶ <http://apps-jar-2013.blogspot.com.es/2011/08/green-road-tio2-in-road-pavement.html>

ultrafina sobre el vidrio que transforma su superficie, por defecto hidrofílica, en una hidrofóbica que repele el agua.

Las propiedades de autolimpieza de las **superficies hidrofóbicas** se valoran midiendo el ángulo de contacto de una gota de agua destilada con la superficie del vidrio. Las gotas de agua sobre una superficie hidrofóbica tiene un ángulo de contacto elevado debido a la superficie plana y ello implica una elevada tensión superficial; en esta situación las gotas de agua son capaces de atraer los contaminantes y atraparlos en su interior. Una comparación visual se da en la siguiente figura.

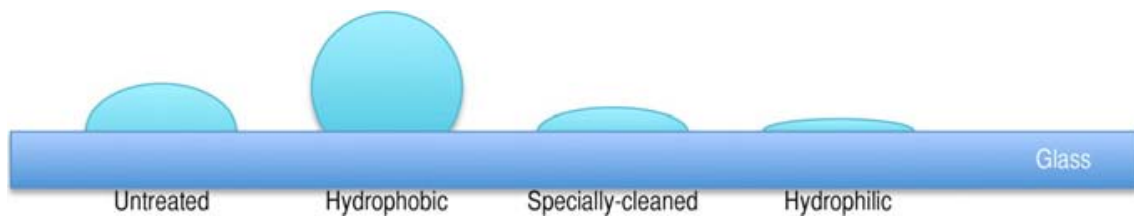


Fig. 16 Ilustración de la forma que adquiere una gota de agua en diferentes superficies⁷

A modo de ejemplo, una superficie hidrofóbica presentará un ángulo de contacto en torno a 104° , mientras que se define como hidrofílica aquella que tiene un ángulo inferior a 90° .

Como se ha mencionado anteriormente, una aplicación potencial de los tratamientos de autolimpieza está en los sistemas BIPV, no solamente por el ahorro económico que conlleva un menor ensuciamiento de las soluciones en vidrio, sino también por una mejora en las propiedades de generación eléctrica de las partes activas.

⁷ Solar Energy Materials & Solar Cells 109 (2013) 126–141

Con estos antecedentes, nuestra investigación ha procedido a realizar un estudio en el que se analicen las posibles mejoras derivadas de la utilización de un tratamiento hidrófobo sobre un vidrio fotovoltaico.

Existe una diferencia sustancial en las propiedades de limpieza entre las superficies hidrofóbicas y las **superhidrofóbicas**. Este segundo fenómeno se conoce como el “efecto Lotus” gracias a la planta que lleva este mismo nombre perteneciente a la familia *Nelumbo nucifera*. En concreto, la planta muestra ángulos de contacto en torno a 160°, así como una demostrada capacidad de autolimpieza.

Un estudio realizado⁸ muestra la gran influencia que tiene la energía cinética con la que las gotas de agua caen sobre una superficie, en cuanto a eliminación de suciedad cuando se trata de una superficie superhidrofóbica. En concreto, se muestra como a partir de una determinada presión de impacto una superficie superhidrofóbica es limpiada por completo, mientras que una hidrofóbica mantiene unos restos de contaminación.

Todas estas observaciones conducen a que aumentar las propiedades de hidrofobicidad es una de las líneas a seguir para mejorar los efectos de autolimpieza.

Productos para self-cleaning: productos comerciales

Actualmente existen numerosos productos comerciales para otorgar al vidrio propiedades de autolimpieza, bien sea porque lo ofrecen las propias empresas de vidrio, incorporando el tratamiento ya sobre éste, o bien como tratamientos desarrollados por empresas externas, generalmente desarrolladoras de recubrimientos nanotecnológicos.

⁸ R.F. Furstner, W.Barthlott,C.Neinhuis,P.Walzel. Langmuir21(2005) 956–961

Una posible forma de clasificarlos es en base a su aplicación, y por lo tanto a su distribución y venta. Existen dos tipos: los tratamientos aplicados en fábrica, y los que se venden directamente al usuario para que sea él mismo quien lo aplique (DIY: *Do It Yourself*).

Los primeros suponen el caso más general, en el que normalmente empresas del sector del vidrio ofrecen su producto con propiedades de autolimpieza incorporadas. En general, son recubrimientos basados en TiO_2 con propiedades hidrofílicas (en ocasiones conseguidas con óxido de silicio), con lo que el agua elimina los restos orgánicos que el semiconductor a desactivado. Los tiempos de activación por UV del TiO_2 declarados por los fabricantes varían entre 1 y 3 semanas, mientras que la duración del tratamiento garantizado oscila entre los 10 y 15 años. Aunque la información que se otorga en algunos casos es reducida, los parámetros ópticos no varían significativamente respecto al vidrio convencional, manteniendo transmitancias del 90% y reflexiones en torno al 8% para vidrios monolíticos. Es importante también destacar, que estos tratamientos actúan solamente sobre la materia orgánica, y no tienen propiedades de limpieza con elementos inorgánicos como sales o arena. Algunos ejemplos de empresas que ofrecen estos productos son Cardinal, Fuyao, Pilkington, PPG Residential Glass, Press Glass, Reflex Glass, Saint Gobain o Viridian.

Por otro lado se encuentran los productos que adquiere y aplica el propio usuario. Generalmente se adquieren en forma de líquido que se aplica mediante spray y se extiende mediante una bayeta por la superficie del vidrio, o directamente en toallitas. Estos tratamientos generalmente otorgan propiedades hidrófobas, y su duración depende del método de aplicación, aunque los fabricantes hablan en algunos casos de varios años. En cuanto a su naturaleza, en algunos casos se declaran como compuestos que se adhieren a las superficies vítreas por enlaces químicos, en ocasiones hablando de recubrimientos poliméricos.

| Fabricante | Nombre comercial del producto |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Balcony Systems Solutions | BalcoNano |
| Rain Racer Developements | Rain Racer |
| Ritec International | ClearShield / ClearVision |
| Diamon Fusion International | Clear-Fusion V/ Clear-Fusion Pro |

Tabla 1 Fabricantes de tratamientos de autolimpieza con posibilidad de aplicación por el propio usuario

El estudio experimental que se ha llevado a cabo, se ha realizado con el compuesto ClearFusion Pro de la casa Diamon Fusion, del que posteriormente se presentará una descripción más detallada.

Aunque aquí se ha hablado de los tratamientos sobre vidrio, cabe destacar la aplicación de tratamientos con estas mismas propiedades sobre otros elementos como madera, cemento o material textil.

3.1.2. Experimental: Materiales e instrumental

La evaluación se ha llevado a cabo con la utilización de un tratamiento hidrófobo que responde al nombre comercial Clear Fusion Pro de la empresa Diamon Fusion International sobre un módulo fotovoltaico que contiene cuatro células perforadas de silicio mono cristalino.

Se describen a continuación los materiales y experiencias previas realizadas para la caracterización de los comportamientos de interés.

Tratamiento hidrófobo

El tratamiento consiste en un recubrimiento mediante un spray que se pulveriza sobre la superficie de vidrio, cubriéndola por completo. Transcurridos dos minutos, se limpia con un limpiacristales neutro y ya se tiene la superficie tratada.

La apariencia de la superficie no cambia a simple vista por lo que no se producen cambios ópticos notorios. Al tacto la superficie se vuelve más suave y deslizante.

En una primera observación, se comprobó como al verter agua sobre la superficie tratada, y comparándola con una análoga sin tratar, las gotas de agua mostraban una apariencia más esférica y se deslizaban rápidamente hacia abajo. A pesar de ello, algunas de ellas se quedaban ancladas al vidrio de manera similar a como ocurre en el vidrio sin tratar, aunque en menor cuantía (más adelante se dará una descripción ampliada de la cuantificación de hidrofobicidad del tratamiento).

A pesar de que el fabricante no da datos sobre la composición y la naturaleza de los materiales utilizados, sí que habla de la existencia de una patente que protege el producto. Tras hacer una búsqueda de las patentes asociadas a esta empresa, se encontró una que encajaba con la descripción del producto, y que responde a la referencia CO5550475A2. Si bien se habla de la aplicación de dos compuestos, y puede que no coincida exactamente con el producto utilizado, de una pista importante sobre el funcionamiento y la naturaleza del mismo.

En concreto, en la patente, se describe un método por el que el vidrio se recubre con una película que consiste en cadenas de moléculas de silicona, con cada cadena químicamente ligada por un extremo a la superficie del vidrio. Cada una de estas cadenas, contiene desde docenas a cientos de unidades de dimetilsiloxano, terminando en el extremo libre en un grupo hidroxil o cloro unido a una silicona, la cual reacciona rápidamente con agua y produce un grupo OH.

El proceso comenzaría con con una superficie humedecida, como la mostrada en Fig. 17

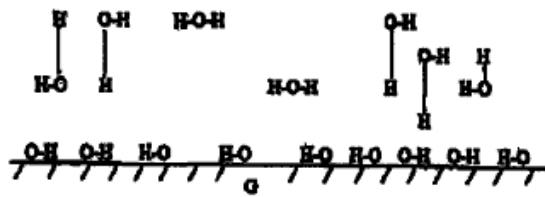


Fig. 17

La superficie es tratada con dimetildiclorosilano, que se aproximará a los grupos OH existentes en la superficie acuosa. La reacción resultante consiste en una molécula que unirá la película de silano a la superficie G. Por reacciones con los hidrógenos, los átomos de cloro se irán desprendiendo en forma de HCl, al tiempo que se irán formando cadenas de grupos altamente hidrófobos con terminación en OH (Fig. 18).

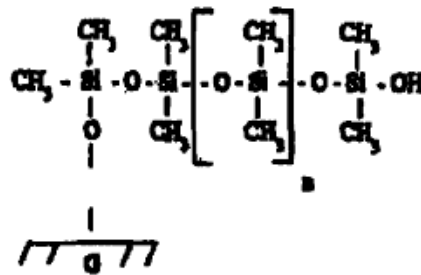


Fig. 18

Para la eliminación del Si-O-H, que resulta disminuir la hidrofobicidad del conjunto, la película anterior se trata con trimetilclorosilano, resultando en una película con la forma de la Fig. 19. El resultado es una película con mayor hidrofobicidad que la correspondiente a la Fig. 18.⁹

⁹ Proceso detallado en patente CO5550475A2

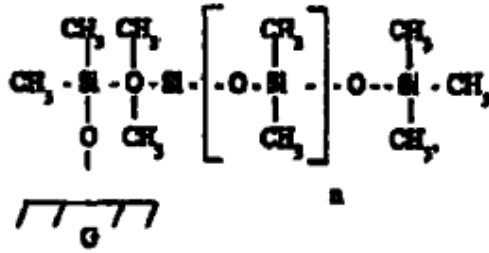


Fig. 19

La **caracterización de la hidrofobicidad** del tratamiento se llevó a cabo mediante la medida del ángulo de contacto entre una gota de agua destilada y la superficie del vidrio. El equipo (Fig. 17) consiste en un sistema que deposita un volumen de agua calibrado sobre la superficie a estudiar, acompañado de un sistema óptico de aumentos que capta la imagen. Ésta es finalmente procesada por un software que estudia la tangente de la gota depositada y por lo tanto el ángulo con la superficie.

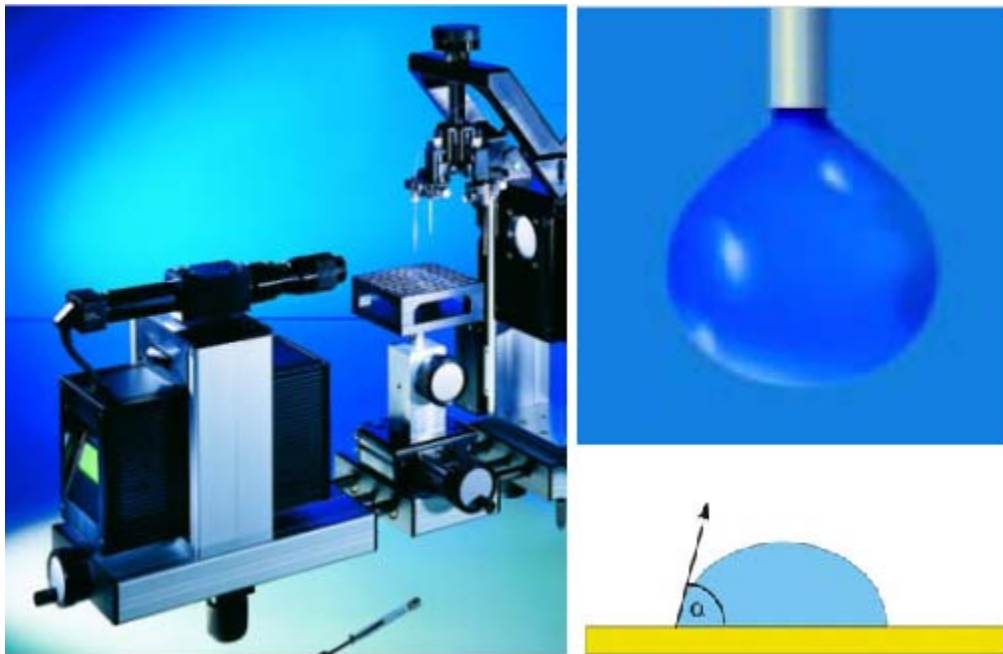


Fig. 20 Sistema para la determinación del ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie sólida

Los resultados mostraron ángulos de contacto entre 104° y 106° , por lo que efectivamente se demuestra que el tratamiento depositado convierte el vidrio en una superficie con propiedades hidrófobas.

A modo de ejemplo, la superficie del vidrio sin tratar contempla ángulos de contacto entre 21° y 26° , por lo que se trata de un comportamiento hidrofílico, muy diferente del mostrado después del tratamiento.

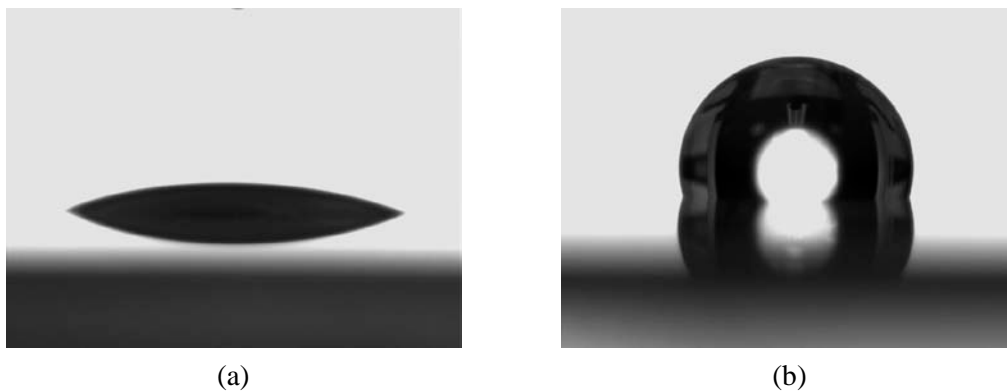


Fig. 21 (a) Gota sobre vidrio sin tratamiento. Ángulo de 21° (b) Gota sobre vidrio con tratamiento hidrófobo. Ángulo de 106°

Inicialmente se realizó una **primera prueba de ensuciamiento** para tener una primera aproximación del comportamiento del tratamiento ante el polvo.

Se partió de un vidrio cuya mitad se encontraba tratada con el producto hidrófobo, mientras que la otra mitad se encontraba sin ningún tratamiento. Se realizó un primer ensuciamiento mediante arena y polvo secos sobre el vidrio en posición horizontal, para luego levantarlo y observar la suciedad remanente. En este caso, la parte hidrófoba se mostró mucho más sucia que la parte sin tratar, que apenas mantenía partículas.

A continuación se realizó un segundo ensuciamiento del vidrio, esta vez utilizando la misma arena que en el caso anterior pero con agua. Al levantar el vidrio, la parte hidrófoba quedó

prácticamente sin ninguna partícula de arena o polvo, mientras que la parte sin tratar se mostraba ensuciada debido a que el agua no había conseguido arrastrar todas las partículas.

Este segundo resultado se mostraba en consonancia con los movimientos de las partículas de suciedad ocasionados por una gota que se muestran en los estudios del efecto Lotus.

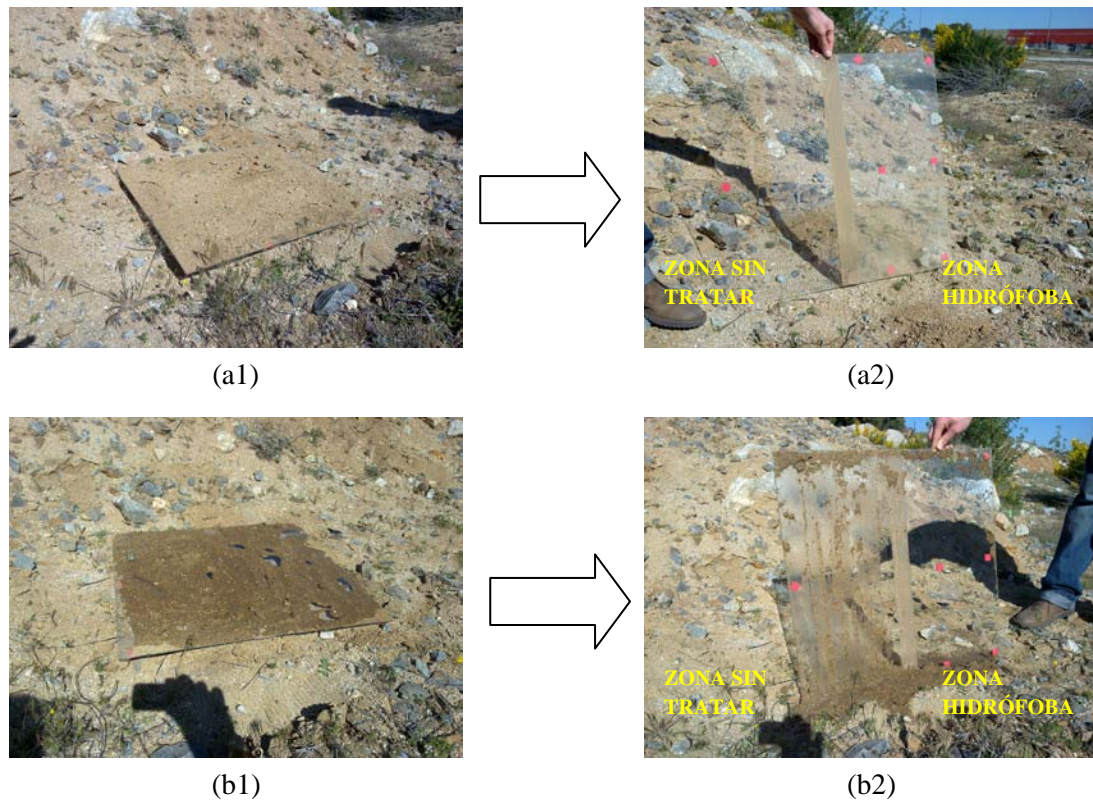


Fig. 22 (a1) Vidrio ensuciado con arena seca (a2) La mitad que incorpora el tratamiento hidrófobo se muestra más sucia que la normal (b1) Vidrio ensuciado con agua y arena (b2) Vidrio ensuciado con agua y arena

Se observó bajo microscopía óptica los resultados de la primera experiencia, corroborando así, lo que se apreciaba a simple vista.

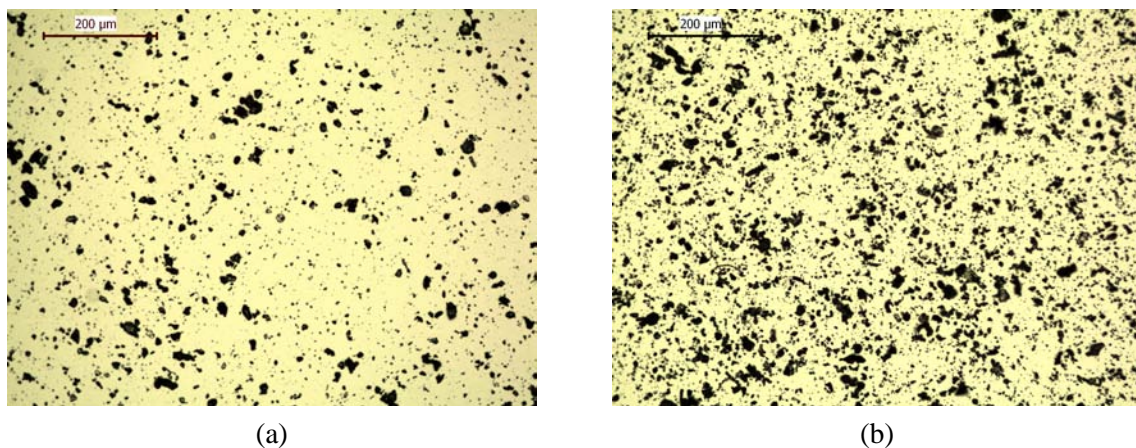


Fig. 23 (a) Polvo seco en vidrio sin tratar (b) Polvo seco en vidrio con tratamiento hidrófobo

Estos resultados son aproximadamente similares en la mayor parte del vidrio, pues el nivel de ensuciamiento es bastante homogéneo. No sucedía lo mismo en el caso del polvo humedecido, pues el resultado es muy inhomogéneo y unas imágenes similares de microscopía óptica no hubieran sido representativas.

Este comportamiento es contradictorio a las propiedades de autolimpieza que se presuponen para el tratamiento hidrófobo, por lo será un factor a tener en cuenta.

Experiencias sobre vidrio fotovoltaico

Se partió de dos módulos fotovoltaicos de iguales características, de los que el tratamiento se aplicó sobre uno de ellos, mientras que se dejó el otro, de idénticas características eléctricas, sin tratar para tener como referencia.

La composición de ambos módulos consiste en un vidrio frontal de 4 mm, dos capas de EVA de 0,76 mm cada una y una capa trasera de Tedlar. Entre ambas láminas de EVA, se encuentran dispuestas 4 células fotovoltaicas de silicio monocristalino perforadas (Fig. 21).

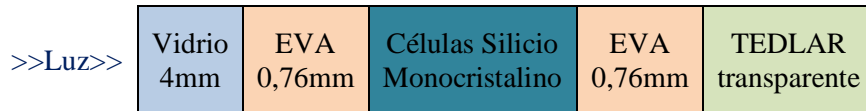


Fig. 24 Esquema de las capas que componen los módulos fotovoltaicos

Para garantizar las mismas características eléctricas de los módulos, éstos se midieron en un simulador solar bajo condiciones estándar de espectro AM1.5 e intensidad de radiación de 1000W/m². Las curvas I-V de ambos módulos se muestran en Fig. 22 y Fig. 23.

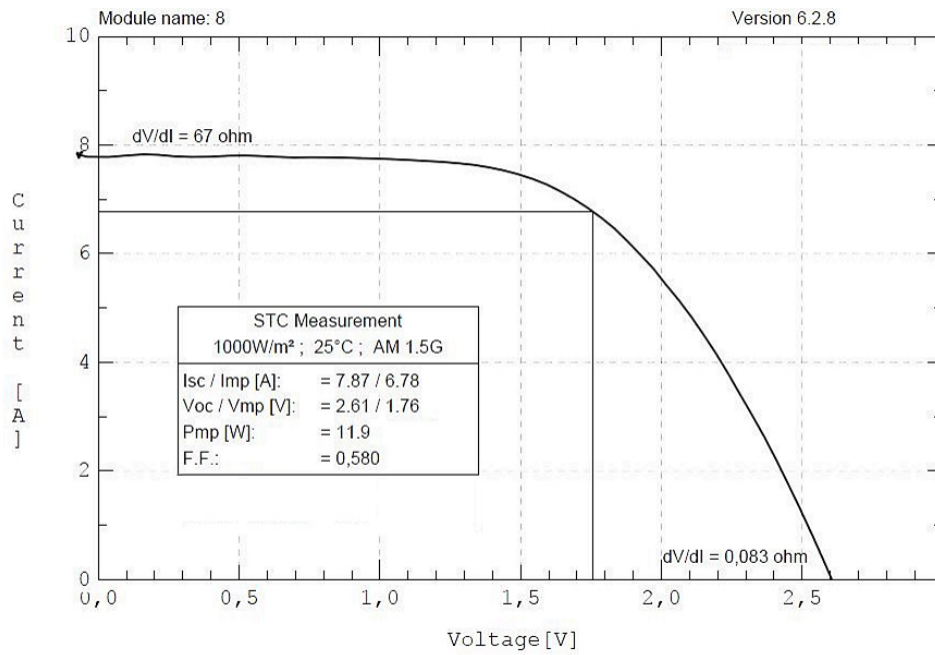


Fig. 25 Curva I-V Módulo 1

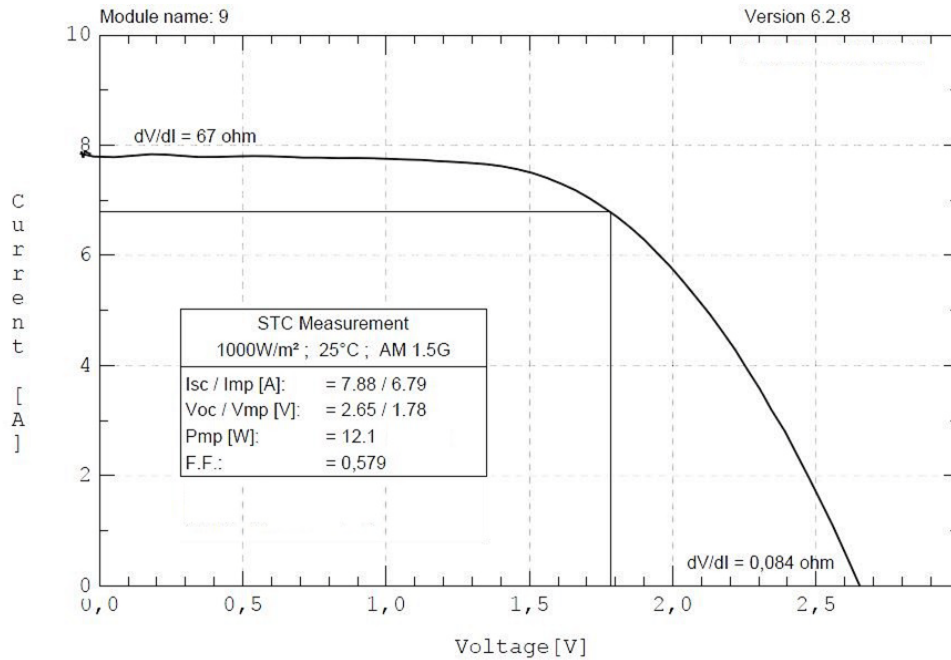


Fig. 26 Curva I-V Módulo 2

Como característica a resaltar, el vidrio que se utiliza en este caso es un vidrio texturizado específico para aplicaciones fotovoltaicas (Guardian EcoGuard Pattern). Este vidrio tiene la propiedad de tener una reflexión menor así como de captar mejor la radiación incidente desde ángulos abiertos, es decir, cuando la incidencia de la radiación está lejos de ser ortogonal.

Con respecto al estudio que nos concierne, cabe destacar que se ha elegido este vidrio porque una de las desventajas que normalmente se le asocia es la de ensuciarse más que los vidrios con superficie convencional. Por esta razón, se escogió un vidrio específicamente de estas características extremas con la intención de maximizar los efectos.

Instrumental

Adicionalmente, como instrumentos de medida se han utilizado

- Polímetros para las medidas de voltaje y de intensidad
- Medidor de temperatura infrarrojo para medir la temperatura de los módulos

- Sistema de medición para medir la irradiancia solar incidente en el momento de la medida.

3.1.3. Experimental: Metodología

Con la intención de que los módulos se ensuciaran de manera natural, estos se colocaron en una zona libre de obstáculos significativos cercanos que los pudieran proteger del viento y de otros fenómenos meteorológicos. En concreto, se ubicaron en una zona rural de la provincia de Valladolid, cuyas coordenadas son 41°18'36,94''N, 5°13'12,07''O, y 749 msnm.

Ambos módulos se colocaron sobre una misma estructura de madera, de manera que las condiciones para ambos fueron en todo momento las mismas en cuanto a orientación e inclinación.

Como ya se había descrito en la bibliografía¹⁰, la inclinación resulta ser un factor de suma importancia de cara a la deposición del polvo sobre los elementos de vidrio. Para este caso, una inclinación de 45° se seleccionó como adecuada. Por un lado, una inclinación demasiado vertical muestra unos niveles de deposición de suciedad muy bajos, que quizás pudieran haber sido inapreciables. Por otro lado, una situación demasiado horizontal habría favorecido la permanencia sobre el módulo de cualquier impureza que se depositase sin posibilidad de movimiento, impidiendo hacer notoria las diferencias en el deslizamiento de la suciedad debido a las distintas superficies.

¹⁰ Renewable Energy 22 (2001) 525–540



Fig. 27 Imagen del entorno en el que se encuentran los módulos utilizados en el estudio

Para evaluar las pérdidas de captación solar derivadas de la deposición de suciedad, se realizó a través de medidas de la I_{sc} con la utilización de un amperímetro. Estas medidas se basan en la variación proporcional que sufre la intensidad en cortocircuito con el nivel de radiación que llega al dispositivo fotovoltaico. Este método que ya había sido descrito con anterioridad en la bibliografía¹¹.

Las medidas de intensidad se realizaron con periodicidad semanal, de manera que se tuviera una evolución de este parámetro suficiente, que reflejase la evolución de los niveles de captación solar de los módulos. La colocación de los módulos se hizo el 12/05/2013, realizándose la primera medición una semana después, es decir, el 19/05/2013.

¹¹ M. Piliouguine et al. Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates. Applied Energy 2013.

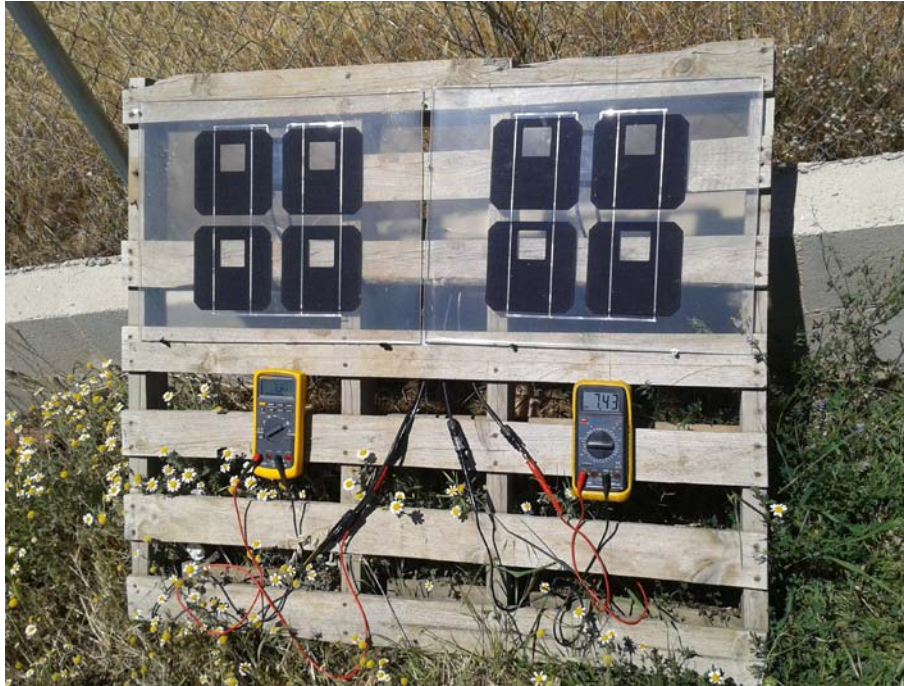


Fig. 28 Imagen tomada en la medida del 30/06/2013

En cuanto al tiempo de toma de mediciones, existen diversidad de rangos indicados en la literatura, que se extienden desde 1 mes hasta 1 año. En cualquier caso, los estudios muestran que tras varias semanas las pérdidas por suciedad ya pueden ser notables respecto a los valores iniciales.

Las medidas de intensidad se tomaron siempre con niveles de radiación entre 800 y 1000 W/m², de manera que se permaneciera en el rango en el que la eficiencia del silicio es constante, evitando así otro tipo de influencias derivadas del comportamiento de la tecnología¹²¹³. Este

¹² N.H. Reich et al. Weak light performance and spectral response of different solar cell types

¹³ J.F. Randall et al. The performance and modelling of 8 photovoltaic materials under variable light intensity and spectra

control se llevó a cabo mediante la utilización de un medidor de radiación modelo Mac Solar SLM 118c.

De manera complementaria, se utilizó un medidor de temperatura infrarrojo para controlar que la temperatura de ambos módulos, en las posiciones de las células, era la misma en el momento de la medida de intensidad. De no haber sido así, hubiera sido necesaria una corrección de temperatura en las medidas. Destacar que previamente se había comprobado mediante termografía la invariabilidad de la emisividad al dar el tratamiento sobre vidrio.



Fig. 29

Después de cada medida, se dejó caer agua sobre los módulos de manera que se simulara un periodo de lluvia. Esto, unido a las lluvias frecuentes que tuvieron lugar durante el ensayo (se

detallarán más adelante), pretendía maximizar los efectos de mayor arrastre de partículas de polvo que se dan en los tratamientos superhidrófobos con respecto a los hidrófilos¹⁴. Por otro lado, se maximizaría también la eliminación de las gotas de agua caídas, evitando así su evaporación sobre el módulo y, por lo tanto, la deposición suplementaria de la suciedad que llevan disuelta.

3.1.4. Resultados y discusión

Los datos recogidos de intensidad se presentan de manera relativa en Fig. 27. Nótese que se toma como valor normalizado el valor de intensidad otorgado por el módulo sin tratar, por lo que los valores muestran la desviación del módulo con el tratamiento hidrófobo en tanto por 1. Es decir, se representa un factor K definido como

$$K = I_{sc}' / I_{sc}$$

dónde I_{sc}' corresponde con la intensidad en cortocircuito medida en el módulo hidrófobo, e I_{sc} corresponde con la intensidad en cortocircuito medida en el módulo de referencia.

Así mismo, se han representado los días de lluvia (en azul), ya que este fenómeno ha de ser tenido en cuenta de cara a los efectos de suciedad en los módulos.

¹⁴ Building and Environment 45 (2010) 1233–1243

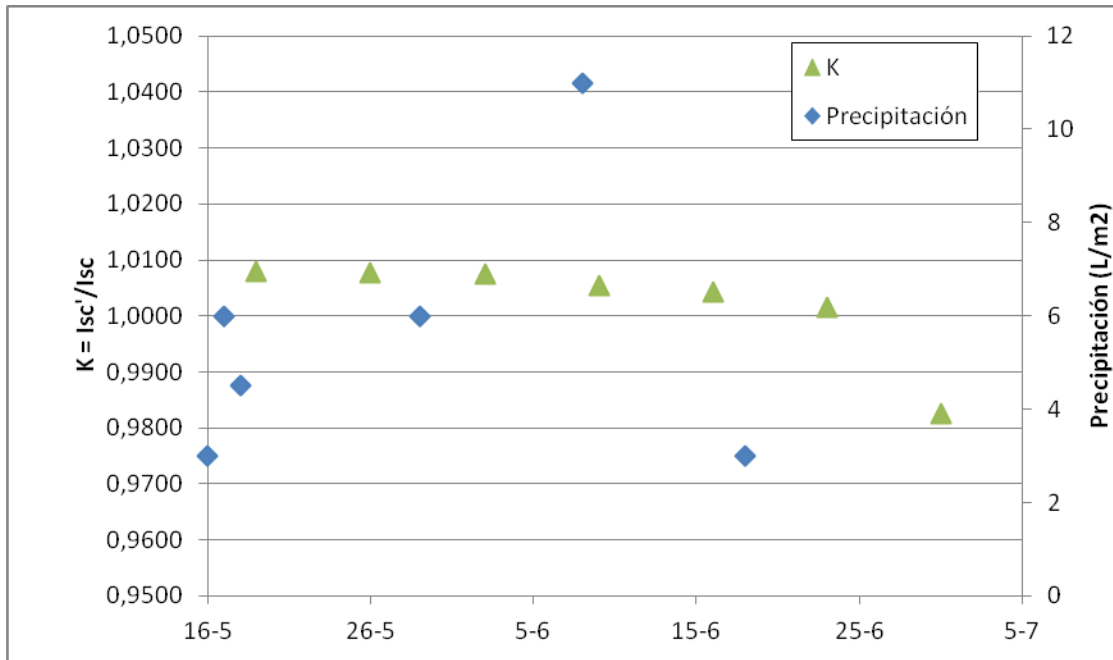


Fig. 30 Resultados de K en función del tiempo. Se indica adicionalmente los días de lluvia y la cantidad de precipitación.

| | Isc' (A) | Isc (A) | K |
|------------|----------|---------|--------|
| 19/05/2013 | 7,69 | 7,63 | 1,0079 |
| 26/05/2013 | 7,75 | 7,69 | 1,0078 |
| 02/06/2013 | 6,74 | 6,69 | 1,0075 |
| 09/06/2013 | 7,28 | 7,24 | 1,0055 |
| 16/06/2013 | 6,93 | 6,9 | 1,0043 |
| 23/06/2013 | 7,03 | 7,02 | 1,0014 |
| 30/06/2013 | 7,3 | 7,43 | 0,9825 |

Tabla 2 Datos recogidos de Isc de ambos módulos en las diferentes semanas

Los datos muestran una mejora inicial del 0,7% del módulo hidrófobo respecto al de referencia. Este nivel de mejora se mantiene prácticamente constante en las semanas siguientes, observando un ligero decrecimiento en el tiempo.

Fuera de esta tendencia, se sitúa la medida realizada en último lugar, que muestra una intensidad en el módulo hidrófobo un 2% inferior a la intensidad medida en el módulo de referencia.

Como posible causa, las medidas ligeramente superiores pueden deberse a un mejor comportamiento del vidrio hidrófobo en los periodos con lluvia debido a una mejor limpieza. Por otro lado, el peor comportamiento en la última medida puede corresponderse con unos días más secos en los que el polvo del aire haya podido haberse adherido a la superficie hidrófoba de manera similar a la ya encontrada en pruebas previas.

En cualquier caso, las diferencias en el resultado entre ambas muestras son muy pequeñas, por lo que los efectos del tratamiento hidrófobo no llegan a ser significativos. Esto se encuentra en concordancia con los estudios más recientemente publicados¹⁵, cuyas diferencias observadas entre vidrios fotovoltaicos con y sin tratamiento rara vez supera el 2%. A pesar de ello, no hay que olvidar que el interés de estos tratamientos de cara a BIPV no solamente reside en mejorar la producción eléctrica, sino que también importan los beneficios que puedan tener sobre la estética y su capacidad para reducir el mantenimiento, lo que supondría una mejora económica.

Algunas de las conclusiones anteriormente comentadas como posibles causas, se continuarán contrastando a lo largo del estudio de la evolución en meses siguientes a lo reportado en este estudio. Se pretende así poder comprender mejor los fenómenos que influyen en el comportamiento de este tipo de tratamiento hidrófobo de cara a sus efectos de autolimpieza y la influencia que esto tiene sobre la captación fotovoltaica.

¹⁵ M. Piliouge et al. Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates. Applied Energy 2013.

3.2. Films de filtro solar: mejora pasiva de vidrio fotovoltaico

Las citadas láminas de control solar podían aportar posibles mejoras vinculadas a las propiedades térmicas y de iluminación natural de los acristalamientos en los edificios.

Es nuestro propósito en esta serie de experiencias, evaluar la utilización de este tipo de láminas sobre vidrios fotovoltaicos con objeto de mejorar sus propiedades pasivas.

3.2.1 Introducción

Es bien sabido que uno de los factores limitantes del confort interno en edificios que integran amplios ventanales y muros cortina para ganar luminosidad son el carácter nocivo de parte del espectro solar, en particular la radiación UV, responsable de envejecimiento prematuro de interiores, y la radiación infrarroja, responsable de un efecto de calentamiento en interiores. Por esta razón, los elementos que contribuyen a filtrar estas radiaciones no deseadas son a menudo requeridos en el diseño de los cerramientos acristalados.

En lo que se refiere a control térmico interno, la radiación en infrarroja resulta determinante en la limitación del calentamiento interno de un edificio por efecto invernadero. Limitar la entrada de energía implica en una disminución significativa del consumo en refrigeración, reduciéndose consecuentemente la energía consumida por el edificio para alcanzar el confort higrotérmico de sus ocupantes¹⁶.

No obstante, cualquier limitador o filtro de estas radiaciones debe seguir permitiendo el paso de la luz natural para no penalizar en exceso la iluminación interior.

¹⁶ F.J. Neila González. Arquitectura Bioclimática. Munillalera 2004.

En este contexto se enmarcan diferentes magnitudes y coeficientes que definen las propiedades pasivas de los cerramientos de vidrio. Se enumeran a continuación las más importantes¹⁷:

- Factor de transmisión luminosa (τ_v): La fracción transmitida de la radiación solar incidente en la parte del espectro solar visible, i.e. entre 380-780 nm. Tiene especial interés para los cálculos de iluminación natural. De manera análoga, se define también un factor de reflexión luminosa que tiene en cuenta lo propio para los fenómenos de reflexión del acristalamiento..

- Factor de transmisión directa de la energía solar (τ_e): La fracción transmitida de la radiación solar incidente en el espectro comprendido entre 300-2500 nm. Tiene especial interés para su aplicación en el cálculo del factor solar. De manera análoga, se define también un factor de reflexión directa de la energía solar, que tiene en cuenta lo propio para los fenómenos de reflexión del acristalamiento.

- Factor de transmisión del UV (τ_{uv}): La fracción transmitida de la radiación solar incidente en el espectro comprendido entre 280-380 nm.

- Factor de transmisión de la energía solar total (Factor Solar, FS): Es la suma del factor de transmisión directa de la energía solar y del factor de reemisión térmica hacia el interior. Se trata del dato más importante de un acristalamiento en términos de confort térmico, ya que indica la fracción de energía total que penetra en el interior del edificio con respecto a la incidente. También se conoce como “valor g”. Se define como:

$$g = \tau_e + q_i$$

donde q_i es el factor de reemisión térmica hacia el interior.

¹⁷ Una información más detallada de estos coeficientes puede encontrarse en EN 410:2011

Cabe destacar que, en norteamérica, el factor solar se conoce como *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC), definiéndose además un coeficiente de sombreado o *Shadow Coefficient* (SC) como

$$SC = SHGC/0,87$$

un coeficiente normalizado sobre 0,87, que corresponde con el valor g de un vidrio extraclaro de 3mm.

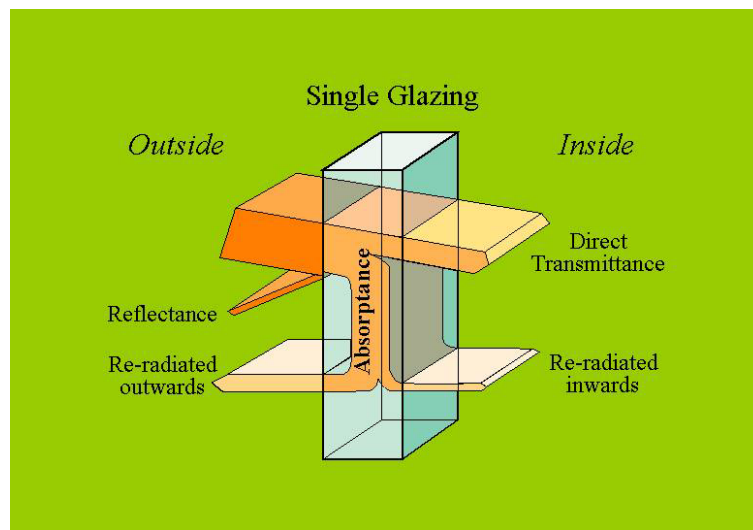


Fig. 31 Comportamiento óptico de un vidrio y los parámetros que influyen en su factor solar¹⁸

Los valores requeridos de los anteriores factores para un acristalamiento, pueden ser muy variables dependiendo del edificio, localización, y ubicación de la solución, por lo que no existen unos valores idóneos a alcanzar. No obstante, es relativamente común buscar soluciones que incorporen un bajo factor solar y una alta transmisión luminosa para evitar un calentamiento excesivo al tiempo que se obtienen altos niveles de iluminación natural.

¹⁸<http://www.pilkington.com/south-america/chile/spanish/building+products/glass+reference/energy+control/shading+coefficients.htm>

3.2.2 Materiales

Films

Se seleccionaron con este objetivo un conjunto de laminaciones específicas para su aplicación sobre vidrio y con diferentes niveles de filtrado del espectro solar. En concreto, se trata de una combinación de láminas de poliéster con un adhesivo que se activa con agua para poder ser adherido al vidrio. Éstas aplicaciones han sido desarrolladas por la compañía 3M.

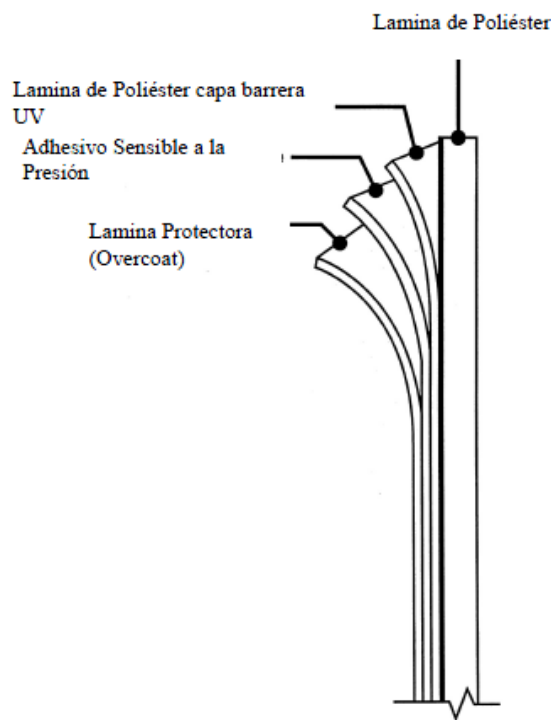


Fig. 32 Ejemplo de la distribución de capas que forman la lámina de control solar

Entre las propiedades de estas láminas, se encuentran las de filtro de UV e IR, reducción del deslumbramiento, reducción de la pérdida de calor, aumentos o disminuciones de reflectancias y mejoras estructurales. Su espesor es variable dependiendo de la lámina, aunque se encuentra en torno a los 50 - 100 μm .

Su aplicación comienza por limpiar la superficie del vidrio con una mezcla de agua y jabón, de forma que se elimine la mayor cantidad de impurezas posibles. A continuación se pulveriza agua con jabón sobre la capa adhesiva que facilitaba su adhesión al vidrio. De esta forma, se evitan los efectos de la electricidad estática, por lo que el manejo de la lámina se simplifica. Tras pulverizar también con agua y jabón la superficie del vidrio, la lámina se pone en contacto con ésta. Debido a la humedad de ambas superficies, el adhesivo no hace efecto inmediatamente y la lámina, que estaba ya en contacto con el vidrio, se puede deslizar fácilmente, pudiéndose eliminar con una espátula las burbujas generadas.

Tras esta deposición, se aplica un peso sobre la lámina y se deja secar durante 48 horas. Pasado este periodo, la película ya se encuentra perfectamente adherida a la superficie del vidrio.

A cada una de las láminas de control solar de la gama disponible, se le asignó un número. A continuación se presentan todas ellas con las principales propiedades declaradas por el fabricante:

L01: Transparencia y control solar. Filtro selectivo contra IR y UV.

L02: Control solar

L03: Control solar

L04: Control solar aspecto neutro

L05: Control solar de alta transparencia

L06: Protección de UV

L07: Control solar de aplicación exterior de alta eficacia

L08: Control solar de aplicación exterior de alta eficacia

L09: Control solar de aplicación exterior

L10: Control solar de baja reflexión interior y alta eficacia

L11: Control solar de baja reflexión interior y alta eficacia

L12: Control solar de baja reflexión interior

Espectroscopía UV-VIS

Se realizó una caracterización de la transmitancia de las películas con la intención de conocer mejor su comportamiento óptico, lo que repercutiría en las propiedades finales del vidrio fotovoltaico. Para ello se utilizó un equipo de espectroscopía UV-Vis SHIMADZU, Mod. UV-2102PC (Fig. 30).



Fig. 33 Equipo utilizado de espectroscopía UV-Vis

El funcionamiento del equipo consiste en un prisma que separa la luz de unas lámparas en longitudes de onda que van desde 200 nm a 900 nm (hasta IR cercano) con una sensibilidad de 1 nm. Una vez se selecciona la frecuencia adecuada, el haz se divide en dos, de manera que ambos se hacen pasar por la cámara donde se colocan las muestras. Tras atravesarlas, la luz es captada

por fotómetros y comparada con la emitida inicialmente, de esta manera se pueden obtener valores de transmitancias o absorbancias.

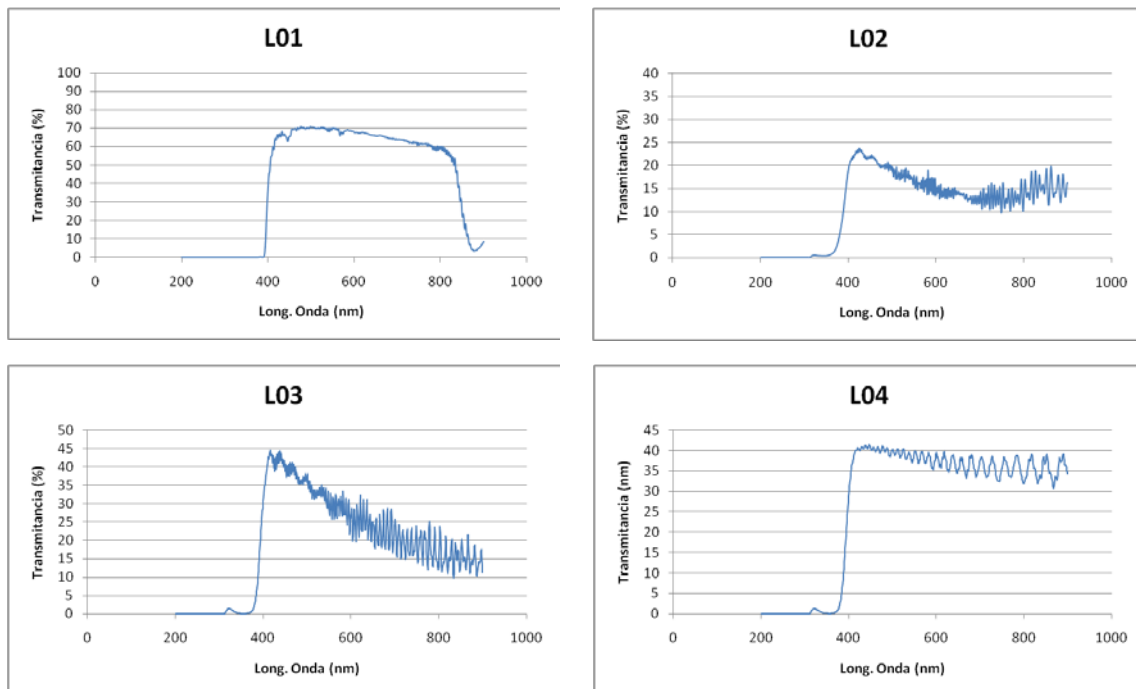
La razón de tener dos haces es la de poderlo comparar, de manera que se puedan establecer medidas diferenciales. Un ejemplo sería colocar en un haz el vidrio normal y en el otro el vidrio con lámina, de manera que nos daría como resultado los efectos de la lámina, estableciendo como línea de 100% los resultados tras atravesar el vidrio.

En nuestro caso, la medida se realizó colocando la lámina de forma ortogonal a uno de los haces, dejando el segundo libre. Esta configuración nos daría unos valores de la transmitancia de las láminas con respecto a la del aire.

3.2.3 Resultados y discusión

Medidas de transmitancia de láminas

Los resultados obtenidos para cada lámina se presentan a continuación:



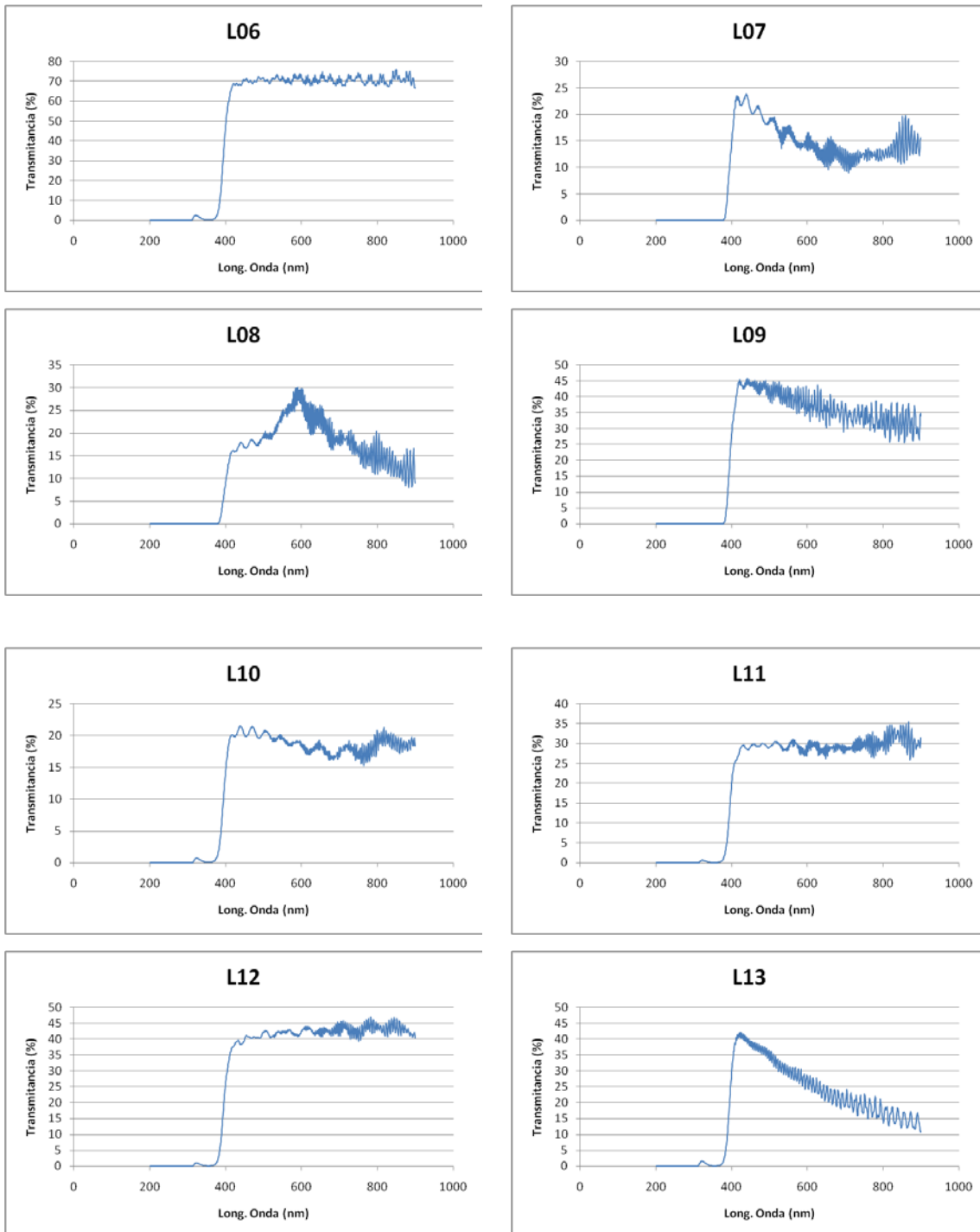


Fig. 34 Transmitancia espectral de las diferentes láminas de control solar. Nótese las diferentes escalas de los ejes de ordenadas, que se encuentran ajustados a las transmitancias de cada caso.

En todos ellos se observó una transmitancia prácticamente nula para longitudes de onda por debajo de los 400 nm, lo que indica que el tratamiento impide el paso de la radiación ultravioleta.

Las láminas con transmitancias no variables con la longitud de onda en la zona del visible (400 nm - 750 nm) muestran colores neutros, mientras que, como resulta previsible, las transmitancias variables en esta zona corresponden con láminas de colores. Para nuestro propósito, en caso de colocar la lámina por delante del elemento activo, es importante que la transmitancia en la zona del visible sea la mayor posible, pues es aquí donde mayor eficiencia poseen los dispositivos fotovoltaicos.

Fijándonos en las propiedades de **filtro solar**, la **lámina L01** resulta especialmente atractiva debido a su capacidad para anular la UV, manteniendo un 70% en la zona visible. Los parámetros ópticos declarados por el fabricante se muestran en la Tabla 3.

| | Transmitancia lumínica | Reducción IR | Reducción UV | Emisividad | Reducción del FS |
|-----|------------------------|--------------|--------------|------------|------------------|
| L01 | 68% | 97% | 99% | 0,78 | 38% |

Tabla 3 Datos otorgados por 3M para su lámina Prestige 70 (L01) sobre un vidrio claro de 6mm

Con estos datos, se escogió la lámina L01 como la más idónea para su aplicación sobre vidrio fotovoltaico, y por lo tanto para realizar la medida de eficiencia mediante flash test que se detallará a continuación.

Medidas de transmitancia de vidrios fotovoltaicos transparentes de a-Si

A modo de referencia, también se hicieron unas medidas análogas de vidrio fotovoltaico de silicio amorfo en el que se elimina parte del material activo mediante laser para conseguir

distintos niveles de transparencia. Su configuración se detalla en la Fig. 32, mientras que la Fig. 33 muestra su apariencia.

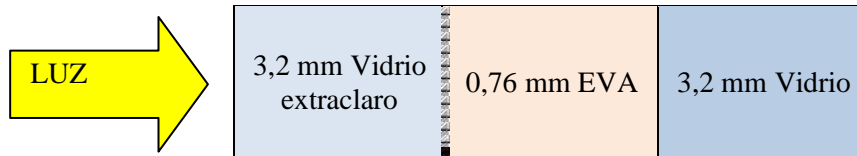


Fig. 35 Esquema de las partes de un vidrio laminado fotovoltaico con tecnología a-Si

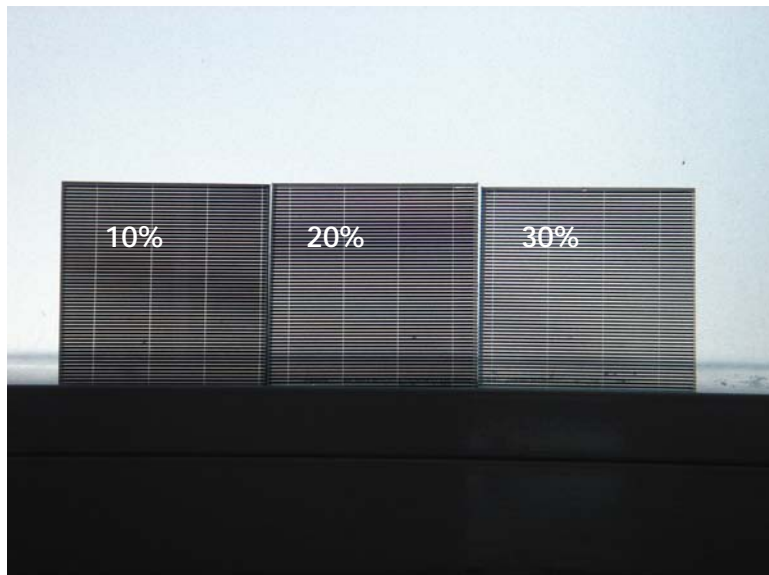


Fig. 36 Vidrios fotovoltaicos de silicio amorfo con diferentes grados de transparencia

Debido a que habitualmente se conocen con los grados de transparencia del 10%, 20% y 30%, se han continuado llamándose así, aunque como se aprecia en la medida, la denominación no coincide exactamente con el valor real.

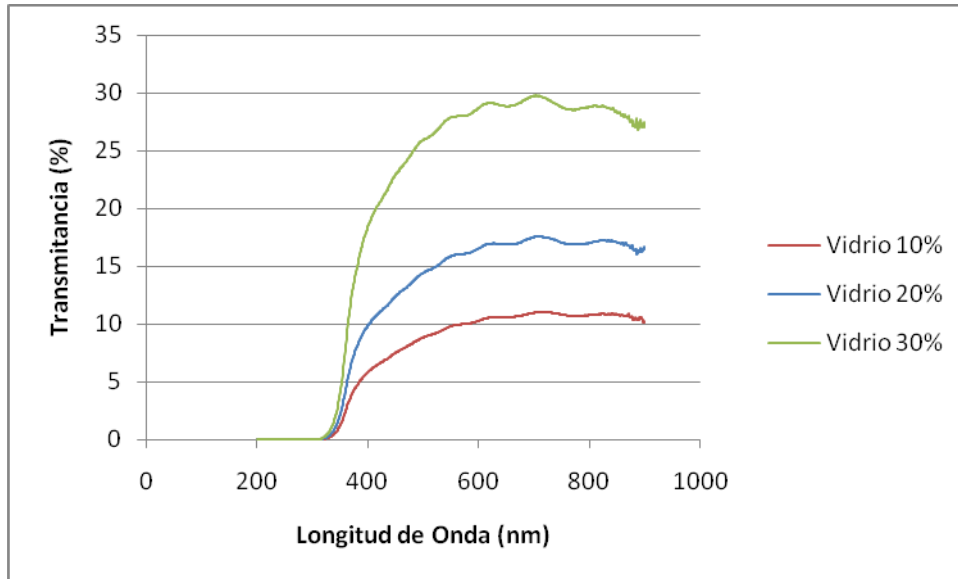


Fig. 37 Transmitancia de los vidrios transparentes de silicio amorfo

Los resultados (Fig. 34) muestran una transmitancia espectral bastante constante en las zonas medias del visible, descendiendo a medida que nos aproximamos a la zona UV. Estos resultados se deberán tener en cuenta en caso de la utilización de láminas, ya que éstas disminuirán la transmisión en el visible, afectando a la iluminación natural.

Con respecto a la zona UV, la transmitancia es prácticamente nula para longitudes de onda inferiores a 330 nm, mientras que no es así para longitudes mayores. Esto hará que el factor de transmitancia UV, que considera el rango 280-380 nm, no sea inferior al 1-2% requerido para ciertos edificios. Atendiendo a los resultados de las láminas, su utilización contribuiría a bajar esta cifra y por lo tanto a mejorar la capacidad de filtrado UV del acristalamiento.

Respuesta fotovoltaica de vidrios funcionales con lámina

Adicionalmente, se realizó una prueba de eficiencia del módulo fotovoltaico con la incorporación de la lámina en su cara delantera. Se pretendía con esta medida conseguir información más cercana a la aplicación real del dispositivo, ya que los análisis realizados hasta

el momento solamente permitían conjeturas más o menos acertadas sobre la influencia en la producción eléctrica.

Para ello, se seleccionó un vidrio laminado fotovoltaico de 0,72 m² de tecnología a-Si opaco. Su estructura tipo *sandwich* estaba formada por un vidrio termoendurecido con bajo contenido en hierro de espesor 3,2 mm, una capa de material activo, una lámina de EVA de 0,7 mm y un vidrio flotado de 3,2 mm (Fig. 31). Sobre uno se aplicó la lámina L01 de filtro solar

Se eligió la lámina L01 por ser la que mayor transparencia mostraba en el rango visible. En la Fig. 35, se muestra la curva de absorción del silicio amorfo. Se observa como la eficiencia de esta tecnología no varía en la zona IR, por lo que no debería verse afectada por las absorciones de la lámina en esta zona del espectro.

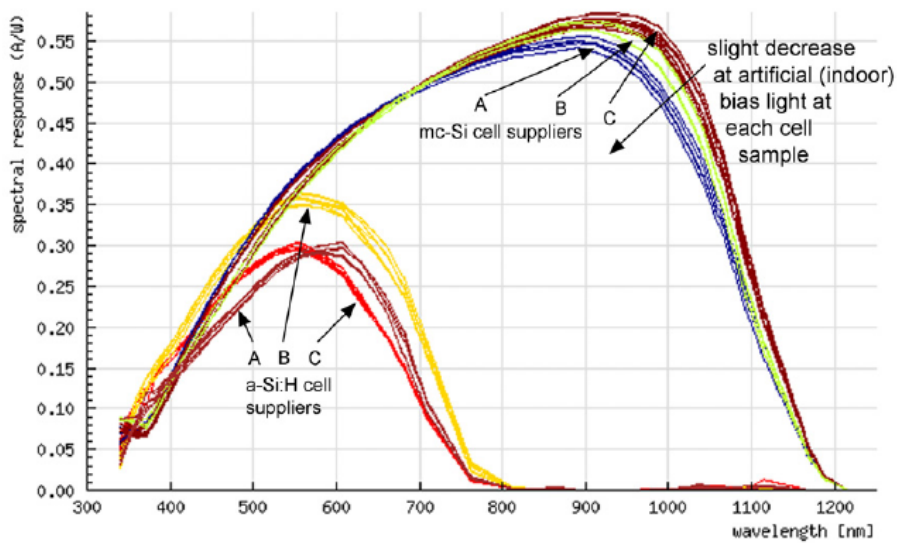


Fig. 38 Respuesta espectral de diferentes muestras de a-Si y mc-Si. En nuestro caso, la muestra elegida se corresponde con la tecnología de a-Si¹⁹.

¹⁹ N.H. Reich et al. Weak light performance and spectral response of different solar cell types

Para la medición de los parámetros eléctricos del módulo, antes y después de la colocación de la lámina, se utilizó un simulador solar con las características estándar habituales, i.e. 1000W/m² AM1.5.

En la Fig. 36 y Tabla 4 se muestran los resultados de la curva I-V, así como los principales datos cuantitativos.

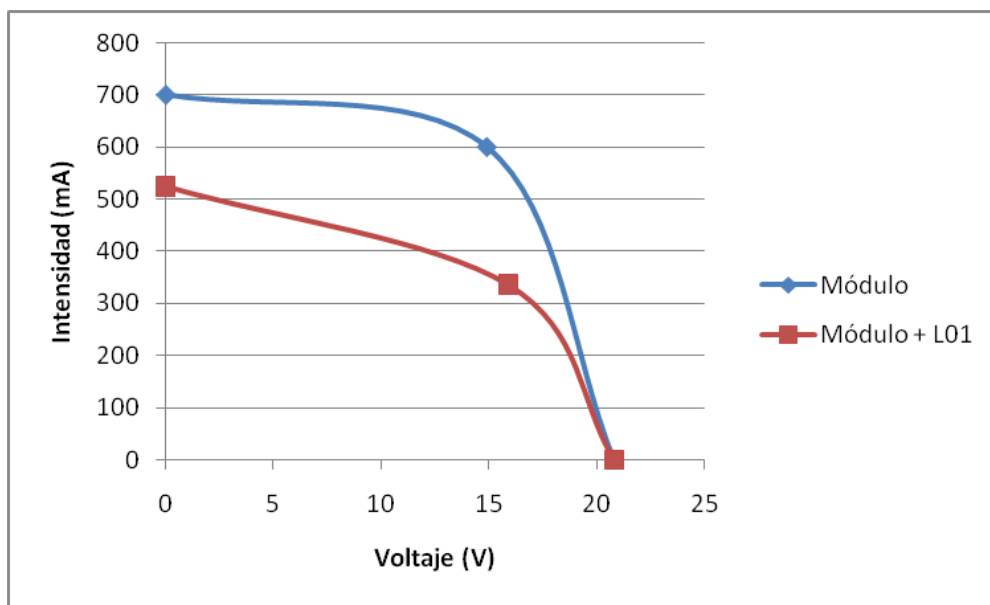


Fig. 39 Representación de los puntos Isc, Voc y punto de máxima potencia (V_m, I_m) para el módulo de a-Si con lámina L01 y sin ella.

| | Pot (W) | Voc (V) | Isc (mA) | Vmp | Imp (mA) | FF (%) |
|----------------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Módulo | 9,00 | 20,80 | 700 | 14,90 | 600 | 61,81 |
| Módulo + L01 | 5,40 | 20,80 | 525 | 15,90 | 336 | 49,45 |
| Porcentaje reducido | 40,00 | 0,00 | 25,00 | -6,71 | 44,00 | 20,00 |

Tabla 4 Datos eléctricos principales del módulo sin y con la lámina. Se han indicado las variaciones porcentuales de cada magnitud

La Tabla 4 analiza cómo se han visto afectados los parámetros eléctricos del módulo de silicio amorfo por la utilización de la lámina. Como dato más destacable, se observa una reducción de un 40% de la potencia del módulo.

Analizando en detalle cada factor, se observa cómo el V_{oc} apenas se ve afectado, pues éste depende principalmente de la naturaleza de la tecnología utilizada, viéndose mínimamente afectado por los cambios de irradiancia en niveles superiores a 100 W/m^2 .¹⁹

Por otra parte, la I_{sc} , que depende de la intensidad de la radiación, se ve reducida en un valor lógico teniendo en cuenta las transmitancias de las láminas. Como reflejan los modelos analíticos²⁰, la corriente en cortocircuito de las células es proporcional a la irradiancia recibida, por lo que la reducción detectada del 25% es acorde a los niveles de transmitancia lumínica detectados en la lámina.

Por último, el *Fill Factor* se ve reducido en un 20%, lo que afecta significativamente en el resultado final de la eficiencia.

A pesar de que las pérdidas no son despreciables, la viabilidad de la aplicación de la lámina no es descartable. Para el caso de la aplicación del filtro solar, un módulo de un metro cuadrado **de 54 Wp, pasaría a ser de 32 Wp**. Se trata de una reducción importante, aunque habrá que valorar las condiciones de cada proyecto.

²⁰ Energía Solar Fotovoltaica. Luis Castañer Muñoz. Edicions UPC. 1992. Apartado 3.4.

Capítulo 4 Conclusiones y trabajo futuro

Las modificaciones superficiales de los vidrios fotovoltaicos es un campo que ofrece múltiples posibilidades para la mejora de este tipo de soluciones, favoreciendo al mismo tiempo su introducción y expansión en el mercado de la arquitectura, en consonancia con los valores de arquitectura sostenible, edificios eficientes energéticamente y *smart cities*.

Este campo se está viendo ampliado enormemente por los desarrollos en el área de la nanotecnología, que ya ofrece diversas opciones a nivel comercial y otras muchas potenciales aun en investigación.

Por un lado, se ha llevado a cabo el estudio de la influencia de la hidrofobicidad en los vidrios fotovoltaicos, revelando que las diferencias con un vidrio sin tratar son mínimas en cuanto a la influencia sobre la capacidad de generación eléctrica. No obstante, el estudio se ha desarrollado a lo largo de varias semanas con lluvias frecuentes y aplicaciones de agua semanales, por lo que se establece como trabajo futuro el seguimiento para periodos de tiempo más largos con otras características climáticas. Así mismo, será interesante analizar otro tipo de tratamientos con propiedades de autolimpieza, ya no solo por el aumento de la producción eléctrica, sino por la mejora estética.

Por otro lado, se han estudiado diferentes láminas de control solar comerciales para vidrio convencional y su influencia sobre vidrio fotovoltaico, lo que constituye una solución específica para sistemas BIPV. Tras seleccionar la lámina más idónea por tener una mayor transmitancia en la zona visible del espectro y presentar un color neutro, se analizaron los efectos sobre la eficiencia de un módulo de a-Si cuando está se coloca sobre él. Se encontró una disminución en la eficiencia del 40%, lo que constituye un valor mayor de lo esperado. Como trabajo futuro, se analizarán otras soluciones de control solar en los vidrios que puedan ser implementadas junto

con vidrios fotovoltaicos, para conseguir un mejor confort interno cuando estos son utilizados como cerramientos en los edificios.

Se concluye así un trabajo que solamente supone un punto y seguido en lo que a la aplicación de modificaciones superficiales de vidrios fotovoltaicos se refiere, y que sin duda tiene un campo por explorar con el desarrollo de soluciones basadas en la nanotecnología.