

DE CÓMO LAS VENTANAS PUEDEN SER INTELIGENTES: TERMOCROMISMO APLICADO

ABOUT HOW WINDOWS BECOME SMART: APPLIED THERMOCHROMISM

A. A. IRIBARREN ALFONSO, Y. AGUSTÍN, J. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ-ELIPE[†]

a) Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de La Habana, La Habana; agosto@imre.uh.cu[†]

b) Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (CSIC-Univ. Sevilla), España

[†] autor para la correspondencia

Recibido 25/10/2019; Aceptado 5/11/2019

PACS: Optical coatings (revestimientos ópticos), 42.79.Wc; Thermo-optic effects (efectos termo-ópticos), 78.20.N-; Optical constants (constantes ópticas), 78.20.Ci; Day lighting/natural lighting of buildings (iluminación diurna / iluminación natural de edificios), 88.40.mx

I. INTRODUCCIÓN

Las construcciones y mantener el confort de quienes permanecen en ellas consumen enormes cantidades de energía para mantener iluminación, ambiente y temperatura adecuada [1]. Ese consumo de energía crece continuamente en el sector comercial y residencial y en algunos países ha superado a los gastos de energía de sectores como el de transporte y hasta el industrial y se ha estimado que consumen un tercio de la energía total consumida [2]. Por otra parte, no puede olvidarse el consumo energético por climatización, o sea, refrigeración, calefacción y ventilación. El consumo de energía eléctrica en los sectores comercial y residencial es de alrededor de la mitad del consumo de energía eléctrica mundial, solo superados por el sector industrial [3]. Cuantitativamente se ha estimado que la iluminación artificial consume aproximadamente el 20 % de la electricidad en el mundo lo que representa alrededor del 6 % del consumo mundial de energía. El gasto en climatización de edificaciones representa dos tercios de lo que estos consumen [4–6] y eso representa alrededor del 22 % del consumo mundial total y seguirá aumentando [4]. Todo esto en medio de las crisis que se avecinan más agudas por la escasez de los combustibles fósiles y el calentamiento global entre otros daños que la civilización actual propicia.

Una forma de reducir algo los gastos de climatización es la construcción con materiales termoaislantes que disminuyen las transferencias indeseables de energía térmica desde y hacia el exterior de las edificaciones. Esto se explica a partir de que luego de alcanzar la temperatura de confort deseada, las bajas fugas térmicas permiten mantener el confort con poco gasto de energía. Estas soluciones, lamentablemente, son opacas, o sea, bloquean el paso de la luz solar. Así hay que tener en cuenta otro aspecto que conspira contra el ahorro o disminución general del gasto energético que es la iluminación necesaria en el interior de las edificaciones. Aparte del posible uso de iluminación artificial a la que estamos habituados se recomienda el uso de la iluminación natural, o sea, la proveniente del sol que de hecho posee todos los componentes de la luz visible necesarios para un

confort visual dado el hecho de que el propio ser humano evolucionó en medio de este mismo flujo luminoso. Sin embargo, el flujo luminoso solar que llega a la superficie terrestre (Fig. 1), además del casi 45 % de la deseable luz visible, posee aproximadamente un 6 % de luz ultravioleta (UV) y casi el 50 % de luz infrarroja (IR). La componente ultravioleta, invisible a nuestros ojos, que es la radiación de menor longitud de onda o mayor energía es perjudicial a la piel humana, pero puede ser absorbida por el vidrio de una ventana común.

La componente infrarroja, también invisible, con longitud de onda larga, puede transferir grandes cantidades de calor al interior a través de las ventanas comunes, pues son fotones de baja energía que al ser absorbidos por los objetos ocasionan calentamiento y elevan su temperatura contribuyendo al calentamiento general del espacio en que se encuentra. Para regiones frías puede ser beneficioso, pero en las cálidas llega a ser agobiante.

Para controlar la luz solar y disminuir la transferencia térmica a interiores se han utilizado diversas variantes convencionales como quebrasoles, cortinas, recubrimientos simples y múltiples, colorantes, fotodispersores y otras variantes y mecanismos. Sin embargo, estas soluciones que básicamente clasifican dentro de las estáticas, resuelven parcialmente el problema térmico, pero afectan la iluminación, como también pueden ser caras o poco prácticas, por lo que no resultan óptimas. Actualmente, además, existe la tendencia a utilizar grandes ventanas y elementos transparentes y translúcidos en fachadas y hasta en techos de las construcciones que impone la creación de soluciones eficientes que mejoren el confort visual y el térmico a la vez que no impliquen aumentos en gastos de energía. En el presente trabajo se da una panorámica sobre las ventanas inteligentes y sus características generales así como que refleja las motivaciones que han llevado a enfocar investigaciones y colaboración científica en este tema por diversos grupos de investigación incluidos los de los

autores.

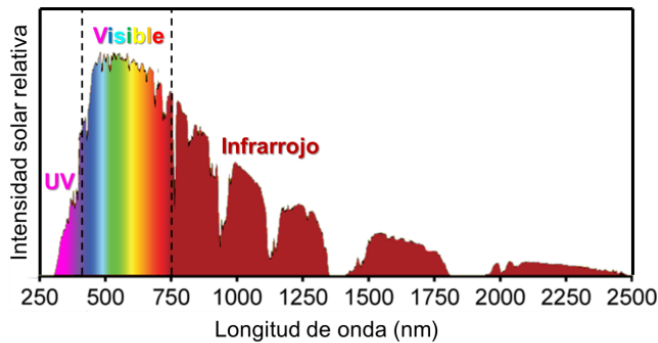


Figura 1. Espectro de intensidad relativa de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra.

II. VENTANA “IDEAL”

En la actualidad se desarrollan trabajos de investigación que persiguen el desarrollo de una ventana ideal mediante la aplicación de tecnologías novedosas no convencionales capaces de ahorrar energía y, simultáneamente, aumentar el confort ambiental de manera más eficiente que las variantes convencionales [7]. Una ventana ideal debe ajustar su diseño y función al clima donde se utiliza. En un lugar cálido, sería muy conveniente que este elemento constructivo permita la entrada de luz visible a los espacios interiores, pero refleje la luz infrarroja exterior sin absorberla. En lugares fríos, sería conveniente que este elemento constructivo permita pasar la luz natural, incluida la radiación infrarroja, desde el exterior. En ambos casos este elemento constructivo debe ser térmicamente aislante para evitar la transmisión de calor en uno u otro sentido.

Son muchos los materiales, orgánicos e inorgánicos, y tecnologías que se utilizan para lograr diversas funciones en las ventanas, incluyendo las de disminuir o retener la radiación infrarroja que entra en un local o reducir el exceso de iluminación y deslumbramiento entre otros objetivos. En el presente trabajo nos referiremos al desarrollo de ventanas que utilizan vidrios con recubrimientos avanzados cuyas características cambian de manera autónoma cuando lo hacen las condiciones ambientales.

III. VENTANAS INTELIGENTES

El flujo de radiación solar varía durante el día, de forma que para lograr el confort deseado se impone el uso de elementos constructivos que, aunque permitan siempre el paso de la luz visible, varíen selectiva y convenientemente la transmisión y la reflexión de la luz de las regiones ultravioleta e infrarroja. Se ha acuñado el término de ventanas inteligentes (smart windows en inglés) para designar las tecnologías capaces de controlar la cantidad y tipo de radiación que penetra en los edificios a través de ventanas y cubiertas transparentes. Las tecnologías típicas usadas en las ventanas inteligentes están basadas en recubrimientos [8] y se clasifican en:

- Tecnologías bajo-emisivas basadas en recubrimientos que filtran la radiación infrarroja. Sin embargo, son pasivos e invariables frente a cambios en las condiciones ambientales.
- Tecnologías fotocromáticas basadas en recubrimientos que se oscurecen automáticamente al ser irradiados con luz de alta energía, generalmente ultravioleta. Su eficacia depende de la intensidad de esta radiación y no son fáciles de aplicar a grandes superficies.
- Tecnologías termocrómicas basadas en recubrimientos que se oscurecen automáticamente, cambian de color o reflejan la radiación infrarroja al alcanzar determinada temperatura.
- Tecnologías electrocrómicas basadas en materiales que se oscurecen, cambian de color o aumentan la reflexión en todo el rango espectral mediante la aplicación de polarización eléctrica. Para su funcionamiento requieren de capas que actúen como electrodos y electrolitos, por lo que técnicamente son más complejos, de costos elevados en grandes superficies y requieren mantenimientos a veces complicados.

Los sistemas (b) y (c) responden de manera autónoma a cambios de temperatura o radiación, aunque no pueden ser modulados directamente. Las tecnologías a y b pueden ser de bajo costo, pero no responden a los cambios térmicos y en el caso de los recubrimientos fotocromáticos se produce una caída en transmisión tanto en el visible como en el infrarrojo.

Las tecnologías electrocrómicas se consideran activas por ser dependientes y controlables mediante la aplicación de una polarización eléctrica. Existen otras variantes de tecnologías activas como la gasocrómica, la de partículas suspendidas o cristal líquido, entre las más comunes. Estas tecnologías, aunque pueden ser eficientes y se acercan más a lo que podría considerarse una ventana ideal, poseen desventajas como su costo y su mayor complejidad técnica. Las tecnologías por recubrimientos termocrómicos pueden ser de gran interés para climas calientes y de alta irradiación solar como el nuestro. La base de la respuesta autónoma de los recubrimientos termocrómicos es una transición de fase que transforma el comportamiento de la capa de aislador a conductor eléctrico, reflejándose la radiación infrarroja cuando se encuentra en esta situación. En concreto, al calentarse el recubrimiento termocrómico, este cambia sus propiedades ópticas, afectando a penas a la transmisión de luz visible, mientras que el coeficiente de energía solar térmica transmitida al interior en forma de radiación infrarroja es desahablemente bajo.

Los recubrimientos inteligentes como los electrocrómicos y los termocrómicos tienen la posibilidad de cambios de características ópticas como color, transparencia, fotodispersión, etc. bajo la acción de estímulos eléctricos, térmicos o de otro tipo, de ahí que las posibilidades de aplicación van más allá que su uso en ventanas inteligentes.

IV. VENTANAS INTELIGENTES CON RECUBRIMIENTOS TERMOCRÓMICOS

El funcionamiento de los recubrimientos termocrómicos se basa en una transición de fase reversible que tiene lugar al superar una temperatura determinada T_t . Por encima de la misma se produce un cambio desde un estado semiconductor, en que la capa es transparente, a un estado metálico que reflejan la radiación infrarroja pero mantienen casi inalterada la transparencia a la luz visible. En la Fig. 2 se ilustra cómo trabaja el recubrimiento termocrómico en una ventana inteligente. La reflexión de la radiación infrarroja reduce el calentamiento al evitarse la absorción de esa radiación. Para que esta función sea operativa y de interés práctico, es necesario que el material del recubrimiento presente ese cambio de fase a una temperatura cercana a la temperatura ambiente que se considere adecuada para conseguir confort ambiental. Materiales inorgánicos como algunos óxidos y yoduros metálicos y materiales organometálicos poseen transiciones termocrómicas semiconductor-metal. Sin embargo, de ellos, el único que presenta una temperatura de cambio de fase cercana a la ambiente es el dióxido de vanadio, VO_2 , con $T_t \approx 68^\circ\text{C}$ [8–10]. Al alcanzar esta temperatura, la red cristalina del VO_2 cambia de monoclinica, que ópticamente se comporta transparente a la radiación infrarroja, a la tetragonal, en que se produce una disminución de la transmisión y aumento de la reflexión en la región infrarroja cercana.

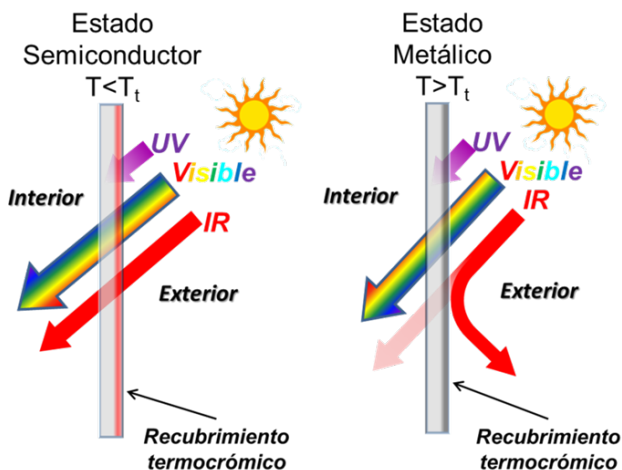


Figura 2. Funcionamiento de un recubrimiento termocrómico.

En ambos casos este recubrimiento absorbe la componente ultravioleta, lo que también hace, por ejemplo, el vidrio de la ventana. En consecuencia, la modulación de radiación solar que atraviesa un elemento recubierto de VO_2 puede ocurrir automáticamente al alcanzarse la temperatura de transición de fase. Aunque el VO_2 se perfila como material sobresaliente en las aplicaciones solares termocrómicas, sus propiedades típicas en forma de compuesto másico no son las óptimas para su uso para el control de la radiación en ventanas "inteligentes". En concreto, las investigaciones que se siguen desarrollando en este campo tienen como objetivo fabricar recubrimientos para los cuales la transición de fase tenga

lugar a temperaturas más próximas a la ambiente [9, 11]. Estas investigaciones persiguen modificar la nanoestructura y morfología de las capas con el fin de mejorar su desempeño a temperaturas de operación deseadas.

Los materiales termocrómicos pueden ser también orgánicos o híbridos [12], o sea, una mezcla de orgánicos e inorgánicos. Los materiales orgánicos investigados son variados, pero presentan inconvenientes como su inestabilidad, alta temperatura de transición, colores inicial y final diferentes, falta de reversibilidad, degradación y poca eficiencia de modulación de sus propiedades ópticas, que limitan su uso generalizado.

V. APLICACIONES

La aplicación más generalizada de los recubrimientos termocrómicos se encuentra en su uso para ventanas y cubiertas transparentes y traslúcidas de edificios que combinen confort visual con la reducción de la radiación infrarroja que penetra a través de ellos en el caso de climas cálidos o la penetración y retención en el interior de tal radiación en climas fríos. El ahorro energético que posibilita el uso de estos recubrimientos es alto debido a la reducción del empleo de sistemas de climatización y ventilación. Los recubrimientos termocrómicos pueden también tener otros usos. Por ejemplo, el control de la radiación en los calentadores solares de agua doméstica sirve para prevenir averías por sobrepresión de agua cuando su temperatura es muy elevada. De la misma manera, en invernaderos, los recubrimientos termocrómicos pueden controlar inteligentemente la radiación infrarroja que llega a las plantas. También, el uso de pinturas termocrómicas se puede considerar para limitar el incremento de temperatura en superficies expuestas a la radiación solar como en el caso de los vehículos que poseen superficie y cubierta metálicas que se calientan al estar bajo la radiación solar. También pueden aplicarse tales pinturas como recubrimiento de materiales sintéticos, telas, cerámicas, etc. Materiales termocrómicos orgánicos podrían usarse como indicadores de temperatura usados en seguridad alimentaria.

VI. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En resumen, los esfuerzos de investigación presentes y futuros sobre recubrimientos termocrómicos presentan un gran interés y deben potenciarse. Su uso es relevante para el desarrollo de nuevas generaciones de ventanas inteligentes que contribuyan a aumentar el ahorro energético. Aunque ya ha habido numerosos estudios sobre el uso de recubrimientos de óxido de vanadio VO_2 sobre áreas grandes, se requiere continuar con el estudio de nuevos materiales compuestos basados en el VO_2 entre otros para propiciar un mejor control ambiental y su producción masiva de manera eficaz. El bajo costo de producción de ventanas inteligentes o recubrimientos de ventanas, específicamente de VO_2 , estimula el desarrollo de estudios fundamentales por la academia y el de investigación aplicada desarrollada por la industria, resultando muy promisorio y factible

para países con recursos limitados. En Cuba, donde no se emplean las ventanas inteligentes, a pesar de que llega alta radiación solar, los trabajos en este tema, aunque son aún incipientes, ya se realizan y perfilan estudios que incluyen obtención de nanopartículas de VO₂, estudio de posibles matrices poliméricas y modificaciones morfológicas en películas delgadas.

REFERENCIAS

- [1] P. Bhusal, E. Tetri, L. Halonen, Lighting and energy in buildings, Espoo, Finland, Helsinki University of Technology, Department of Electronics, Lighting Unit, Report 47 (2008).
- [2] InfoConstrucción, El 33% del consumo energético mundial tiene lugar en los edificios, (March 6th, 2019) (<https://www.infoconstruccion.es/noticias/20190306/edificios-consumo-energetico>) Accessed 12.12.2019.
- [3] D. Stolik Novgorod, Energía Fotovoltaica para Cuba (Editorial Cubasolar, La Habana, 2019), p. 17.
- [4] The Future of Cooling, International Energy Agency, OECD/IEA (2018). (https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/The_Future_of_Cooling.pdf).
- [5] Rockwool, El 66% del consumo energético de los edificios corresponde a aire acondicionado, ventilación y calefacción, (July 26, 2018) (<https://www.rockwool.es/quienes-somos/noticias/2018/el-66-del-consumo-energetico-de-los-edificios-corresponde-a-aire-acondicionado-ventilacion-y-calefaccion/>).
- [6] I. G. Mardones, La demanda de aire acondicionado disparará el consumo eléctrico en el mundo, Geotermiaonline (2018) (<https://geotermiaonline.com/2018/05/aire-acondicionado-refrigeracion/>) Accessed 12.12.2019.
- [7] S. D. Rezaei, S. Shannigrahi and S. Ramakrishna, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **159**, 26 (2017).
- [8] M. Kamalisarvestani, R.Saidur, S.Mekhilef, F.S.Javadi, R. Saidur, S. Mekhilef and F.S. Javadi, Renew. Sust. Energy Rev. **26**, 353 (2013).
- [9] Sh. Wang, K. A. Owusu, L. Mai, Y. Ke, Y. Zhou, P. Hu, Sh. Magdassi and Y. Long, Appl. Energy **211**, 200 (2018).
- [10] M. M. Seyfour and R. Binions, Sol. Energy Mat. Sol. C. **159**, 52 (2017).
- [11] Sh. Wang, M. Liu, L. Kong, Y. Long, X. Jiang and A. Yu, Prog. Mater. Sci. **81**, 1 (2016).
- [12] J. Faucheu, E. Bourgeat-Lami and V. Prevot, Adv. Eng. Mater. 1800438 (2018).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

