

Filtros solares y ahorro de energía

POR RAFAEL ALMANZA SALGADO Y JESÚS CHÁVEZ GALÁN

INTRODUCCIÓN

Para alcanzar condiciones de confort térmico humano dentro de las edificaciones, se usan cantidades de energía muy altas, principalmente en las zonas norte y costera de nuestro país, donde el mayor consumo de energía del subsector residencial es por acondicionamiento de aire; mientras que en otras muchas zonas el consumo por este rubro no es tan considerable. El diseño de un edificio, por tanto, debe procurar la comodidad de sus futuros ocupantes con el mínimo consumo de energía, y proyectar que la misma construcción sea capaz de regular los intercambios de materia y energía con el medio ambiente y propiciar las condiciones de confort en su interior.

Una de las principales causas del aumento de la ganancia térmica en una edificación (y con ello del discomfort térmico humano) es la radiación emitida por el Sol, que se introduce a través de las ventanas. Tal radiación solar es absorbida y reflejada por los cuerpos del espacio interior (y se transforma en calor), mientras que la radiación solar térmica (infrarrojo cercano o calor) provoca un calentamiento directo del aire, que eleva la temperatura del medio.

Como consecuencia, en las temporadas calurosas, la edificación tiene una gran ganancia térmica a través de las ventanas y el interior experimenta un aumento considerable de temperatura. Por otro lado, en las temporadas de temperaturas bajas, éstas también penetran del exterior por las ventanas, principal elemento por el cual la edificación pierde el calor generado en su interior. En los grandes edificios modernos con fachadas de vidrio casi por completo, este tránsito de temperatura a través de las ventanas es el mayor obstáculo para conseguir confort térmico interior,



problema que normalmente se soluciona utilizando equipos de aire acondicionado y sistemas de calefacción.

Para remediar el problema de discomfort en el interior de las edificaciones por las inadecuadas propiedades ópticas y térmicas de las ventanas, hay una nueva alternativa consistente en colocar en los vidrios recubrimientos de material selectivo a la radiación. Éste regula la entrada de la radiación solar incidente sobre las ventanas; es lo que actualmente se conoce como *filtros solares*. Para este fin, es necesario que los filtros solares impidan el paso de la radiación solar con longitud de onda dentro del intervalo del infrarrojo cercano (calor) y sí lo permiten para la radiación solar visible.

El planteamiento busca propiciar ahorro en el consumo de energía por calefacción y aire acondicionado, utilizando filtros solares con base en películas delgadas de óxido ferroso (Chávez, 2007 y 2009), cobre y azufre depositadas sobre vidrio para ventanas (Correa, 2002). Estos filtros seleccionan la radiación solar, y proporcionan baja transmisividad de la infrarroja, lo que evita tanto el calentamiento excesivo en el interior por ganancias térmicas grandes a través de las ventanas en las temporadas calurosas, como la pérdida hacia el exterior del calor generado en el interior durante las temporadas de clima frío.

Esta tecnología tiene ventajas competitivas que redundan en menores costos en la fabricación de ventanas. En primer lugar, al utilizar filtros no es necesario adquirir ventanas comerciales con vidrios dobles o triples, ya que éstos se pueden aplicar a cualquier tipo de vidrio; en segundo lugar, en el país se cuenta tanto con la materia prima necesaria para

producir la película (por ejemplo, cobre, azufre y oxígeno) como con la infraestructura requerida, ya que se sigue la misma técnica de producción de películas (erosión iónica con magnetrones) con que las empresas fabrican vidrios decorativos para las fachadas de edificios.

Hace aproximadamente dos décadas, se inició una línea de investigación dedicada a desarrollar filtros solares con comportamiento selectivo a la incidencia de radiación solar para aprovecharlos en ventanas y así ahorrar energía en los edificios, reduciendo o incrementado la reflejancia de la radiación infrarroja cercana (calor). Una ventana residencial típica con una o dos capas de material de vidriería permitía el ingreso de 75 a 85% de la energía solar. Esto, en climas extremos, causaba un incremento notable en los recibos de electricidad en verano por la necesidad de usar aire acondicionado para lograr confort.

En la actualidad, sólo existen comercialmente *filtros solares pasivos*, los cuales conservan sus propiedades ópticas ante cualquier cambio de los parámetros del medio ambiente. Sin embargo, hay un avance importante en *filtros solares activos*, los cuáles cambian sus propiedades ópticas ante los cambios de parámetros ambientales. El filtro más conocido y el único comercial, que se oscurece ante la incidencia de radiación solar es el *fotogray*, utilizado en lentes para la vista.

Los arquitectos pueden usar dispositivos externos para brindar sombra en ventanas, como persianas externas, aleros, postigos y pantallas solares; también se hace uso de dispositivos internos, como cortinas y persianas. Sin embargo, los postigos, pantallas solares, cortinas y persianas oscurecen las habitaciones, y las cortinas y persianas también dejan pasar parte del calor indeseable proveniente del

exterior. Los dispositivos externos para sombra son 50 % más eficientes que los internos para bloquear el calor solar, pero pueden afectar la estética de la construcción y a veces son costosos. Tampoco resulta práctico construir aleros que proyecten en forma eficiente sombra en las ventanas orientadas al Este y al Oeste.

Remediar la ineficiencia de las características térmicas de las ventanas con vidrio normal se convirtió en uno de los principales objetivos de investigación y desarrollo para poder controlar las temperaturas interiores en las viviendas. Esto ha llevado a la creación de vidrios con filtros solares de baja emisividad, conocidos como *Low-E*, los cuales controlan la ganancia y pérdida de calor, tienen buena transmitancia para dar buena visibilidad, reducen el resplandor, minimizan la decoloración del género, ofrecen intimidad e incluso llegan a brindar más seguridad en zonas de viento, sismos y otros grandes riesgos.

Actualmente, en las nuevas construcciones, así como al cambiar ventanas, se puede comprar material de vidriería con estos recubrimientos o filtros, entre los cuales está el vidrio entintado y los revestimientos espectralmente selectivos, que transmiten luz visible. Muchos recubrimientos espectralmente selectivos también cuentan con baja emisividad.

Los materiales modernos de vidriería para ventanas se dividen en tres categorías: vidrio alterado química o físicamente, vidrio o filtros solares con recubrimientos y conjuntos de múltiples capas con o sin alguno de los dos primeros elementos.

VIDRIOS QUÍMICA O FÍSICAMENTE TRATADOS

La coloración es la más antigua de las tecnologías modernas para ventanas y, en condiciones favorables, puede reducir la ganancia de calor solar durante los meses cálidos de 25 a 55%. El entintado se hace generalmente mediante la alteración de las propiedades químicas del vidrio, de manera que es posible teñir estos laminados de vidrio o plástico. Estas tintas absorben una porción de la luz natural (visible) y del calor solar antes de que pueda atravesar la ventana y llegar a la habitación. Estos vidrios de color que son “absorbentes de calor” maximizan su absorción a través de una parte del espectro solar o de todo el espectro. Lamentablemente, la energía absorbida suele transferirse al interior por radiación y convección.

Los tintes espectralmente selectivos reducen la transmisión de luz infrarroja (calor) y a la vez permiten el paso de luz vi-



sible (en comparación con el vidrio de color bronce o gris). Para las viviendas iluminadas en el interior con luz natural, una ventana espectralmente selectiva constituye una buena opción. El vidrio espectralmente selectivo también absorbe gran parte de la luz ultravioleta (UV) del espectro solar. En una ventana de hojas múltiples, funciona mejor como capa externa del material de vidriería. Cuando se lo combina con una película de baja emisividad, mejora su rendimiento térmico. Estos recubrimientos espectralmente selectivos suelen tener un tinte celeste o verde.

RECUBRIMIENTOS Y FILTROS SOLARES

En general, los recubrimientos reflejantes y de baja emisividad se construyen con una capa metálica. El espesor y la reflectancia de esta capa (recubrimiento de baja emisividad), así como su ubicación sobre el vidrio al que está adherida, afectan directamente el ingreso de calor solar en la habitación. Los fabricantes de dichas ventanas utilizan actualmente una o más capas de recubrimientos de baja emisividad en sus líneas de productos.

Un recubrimiento de baja emisividad equivale a agregar en la ventana otra hoja de vidrio, pero con más eficiencia. Los recubrimientos de baja emisividad reducen la transferencia de calor por radiación de onda larga de 5 a 10 veces. Cuanto menor sea el valor de emisividad (podría decirse que es en principio una medida de la cantidad de calor que se emite a través del material de vidriería), se reduce mejor la transferencia de calor del interior al exterior. Asimismo, la mayoría de los revestimientos de baja emisividad reducen ligeramente, respecto del vidrio transparente, la cantidad de luz visible que se transmite por el material de vidriería. Estos son valores típicos representativos de la emisividad de distintos tipos de vidrio:

Vidrio transparente, sin recubrimiento: 0.84

Vidrio con un solo recubrimiento duro de baja emisividad: 0.15

Vidrio con un solo recubrimiento blando de baja emisividad: 0.10

Un recubrimiento pirolítico recocido a alta temperatura constituye un recubrimiento de baja emisividad de *capa dura*. Usualmente puede ser de un óxido metálico. El espesor de una capa es 1/10 000 de un cabello humano.

Los recubrimientos de baja emisividad de *capa blanda* se aplican al vidrio a temperaturas más bajas y con menores espesores que los de las capas duras. Ambos tipos de recu-



brimientos de baja emisividad (dentro de los conjuntos de materiales para vidriería) suelen tener una garantía desde 10 hasta 50 años.

Sin embargo los únicos recubrimientos espectralmente selectivos disponibles en el mercado son los de baja emisividad y de capa blanda modificada. Las propiedades selectivas de estos recubrimientos pueden ser modificadas al variar el espesor y la cantidad de capas del recubrimiento. Un material para vidriería de color espectralmente selectivo que posee una capa dura pirolítica también cumple una función similar. Sin embargo, algunas de estas capas duras espectralmente selectivas se encuentran en proceso de desarrollo.

RENDIMIENTO

Las mediciones esenciales del rendimiento de una ventana se conocen como el factor U, el coeficiente de ganancia de calor solar y la transmitancia en el espectro visible. Aunque las fugas de aire (medición de la pérdida o ganancia de calor en torno a una ventana por corrientes de aire) también es importante, aquí no nos ocuparemos de ellas.

El factor U es una medida del grado de dificultad con que se pierde calor debido al viento en un material. Cuanto menor sea ese valor, menor será la cantidad de transferencia de calor por la ventana (del interior al exterior). Algunos fabricantes califican el desempeño térmico mediante el factor R, que es la inversa del factor U. Por ejemplo: un factor U de 0.25 es igual a un factor R de 4.0. El factor U general, *total* o *de toda la ventana* depende del tipo de material de vidrie-

ría, los materiales y el tamaño del marco, los revestimientos y en algunos casos del tipo de gas (aire, argón o criptón inertes) alojado entre las hojas, cuando se usan más de una. Los siguientes valores constituyen algunos ejemplos de valores típicos de factores U para distintos conjuntos de ventanas:

Vidriado simple: 0.91 - 1.11

Vidriado doble: 0.43 - 0.57

Vidriado triple: 0.15 - 0.33

Otro concepto importante es el *coeficiente de ganancia de calor solar* (SHGC, por sus siglas en inglés), que es la fracción de calor solar que entra por la ventana y se convierte en calor. Incluye tanto la radiación solar transmitida directamente a través de la ventana como la absorbida. A menor SHGC, menor calor solar se transmite por la ventana del exterior al interior y mayor es su capacidad de proyectar sombra. En general, las ventanas orientadas al Sur de las casas diseñadas para calefacción solar pasiva (con un alero que les dé sombra en verano) deben tener un SHGC alto, que permita la ganancia del calor solar, tan necesaria en invierno. Las ventanas orientadas al Este o al Oeste que reciben gran parte del Sol indeseable por la mañana y la tarde, respectivamente, y las ventanas de las casas situadas en climas cálidos, deben tener conjuntos de SHGC menores.

La transmitancia visible (T_v) se refiere al porcentaje del espectro visible (380 a 720 nanómetros) que pasa a través del vidrio. Cuando la luz natural resulta deseable en un espacio, por ejemplo en salas de exhibiciones y estudios, la vidriería de alto T_v es una elección lógica. No obstante, la de T_v baja, como las ventanas con filtro reflejante de color bronce o gris, resultan más apropiadas para edificios de oficinas o en los casos en que conviene reducir el resplandor interior. Una ventana típica transparente y de una sola hoja tiene 0.90 de T_v , lo cual significa que admite el 90 % de la luz visible.

La relación existente entre SHGC y T_v se denomina relación de ganancia lumínica a solar (LSG, por sus siglas en inglés). De este modo se obtiene una indicación de la eficiencia relativa de distintos tipos de vidrio para transmitir la luz natural al tiempo que bloquean el ingreso de calor. A mayor relación, resulta más iluminada la habitación, sin recibir cantidades excesivas de calor.

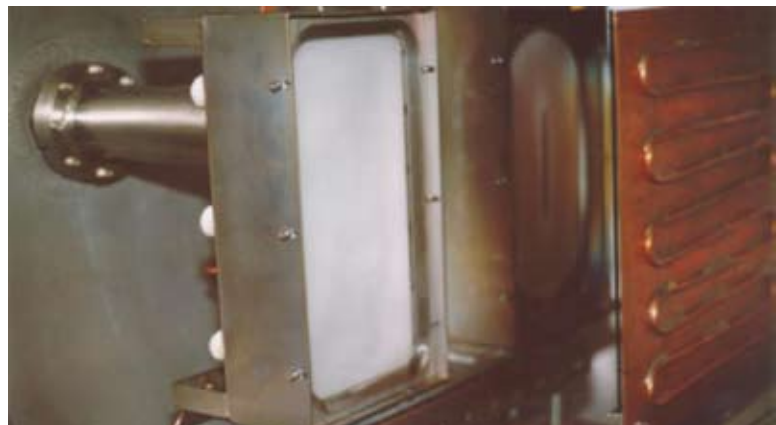
TIPOS DE VENTANAS Y MATERIALES PARA VIDRIERÍA	SHG	T_v	LSG
Transparente, de vidriería simple	0.77 (0.85)	0.67 (0.89)	0.85 (1.03)
Transparente, de vidriería doble	0.56 (0.75)	0.55 (0.80)	0.96 (1.06)
Bronce, de vidriería doble	0.46 (0.61)	0.41 (0.60)	0.87 (0.96)
Vidriado doble, espectralmente selectivo	0.30 (0.40)	0.50 (0.71)	1.61 (1.73)
Vidriado doble, espectralmente selectivo	0.24 (0.31)	0.29 (0.43)	1.17 (1.37)
Vidriado triple, baja emisividad nueva	0.35 (0.48)	0.46 (0.67)	1.27 (1.38)

La tabla anterior da algunos valores típicos de toda la ventana y del centro del vidrio (entre paréntesis), para distintos tipos de ventanas

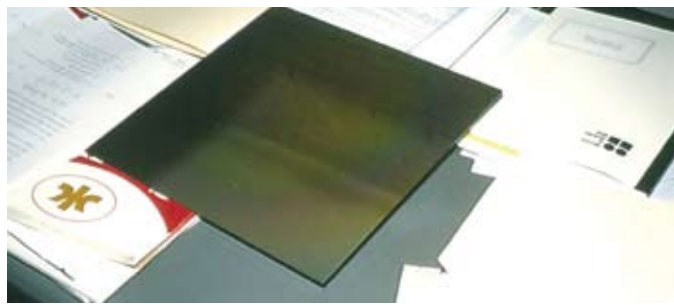
Los factores que se deben tomar en cuenta en el momento de elegir las ventanas son: el tipo de clima, el diseño de la construcción, la orientación y la sombra externa.

CÁLCULO DEL AHORRO DE ENERGÍA

Para predecir con exactitud el ahorro de energía que se logra con la vidriería para control solar, es necesario considerar diferentes variables, principalmente: el tamaño y la orientación de las ventanas, el coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) y el factor de carga de enfriamiento (CLF, el índice de enfriamiento total real comparado con el enfriamiento uniforme total durante el mismo periodo en condiciones ambientales constantes). Para simplificar este concepto, algunas referencias combinan estas variables en una cifra: el multiplicador de la transferencia de calor (MTT), que varía según la ubicación, los cambios de estación, la hora del día, la sombra, la orientación, la temperatura y el color del edificio (blanco o claro reflejan la radiación solar, mientras que negro u oscuro la absorben).



Existe también *software* para determinar el tamaño de los sistemas de calefacción/enfriamiento. Es posible utilizarlo para estimar la ganancia de calor solar de distintos tipos de ventanas (dado el SHGC y el clima). Normalmente se ejecuta el mismo programa para cada opción de tipo de ventana y se busca el valor real económico en la diferencia de ahorro de energía que existe entre las opciones. Para determinar la amortización simple, se puede dividir el precio de la compra por el ahorro estimado.



CONCEPTOS IMPORTANTES

- **Coefficiente de ganancia de calor solar (SHGC).** Este coeficiente, también denominado coeficiente de sombra, es una medida de la calidad de absorción o reflexión del calor del Sol que tiene una ventana. Cuanto menor es el coeficiente, mayor es la capacidad de la ventana para bloquear el calor del Sol. Las ventanas de climas cálidos o templados deben tener un SHGC bajo; las ventanas orientadas al sur en zonas de climas fríos deben tener un SHGC alto. El SHGC se incluye en la etiqueta de certificación del *National Fenestration Rating Council (NFRC, Consejo Nacional para la Calificación de Ventanas)*.
- **Contraventana.** Hoja extra de vidrio o plástico que se añade a una ventana para reducir la infiltración de aire y reforzar el valor aislante de la ventana. Si piensa poner contraventanas, debe comparar los costos con la instalación de ventanas nuevas de gran eficiencia energética.
- **Valor U.** Es una medida de la facilidad con que el calor atraviesa un objeto (conductividad térmica). Se le llama también coeficiente de transferencia del calor o coeficiente de transmisión de calor. Se mide según la cantidad de calor (en Btu) que circula por una zona determinada (un pie cuadrado) por hora, para una diferencia de temperatura dada ($^{\circ}\text{F}$), por lo que se mide en $\text{Btu}/\text{ft}_2\text{-h-}^{\circ}\text{F}$. El valor U es el recíproco del valor R: cuanto menor sea el valor U, mayor será el valor aislante del material. Muchos productos para construcción y aislamiento traen el valor U indicado en la etiqueta.

DESARROLLOS EN MÉXICO

En este contexto, se desarrollaron filtros solares con base en cinco diferentes materiales: Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O}+\text{CuS}$, $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$, VO_2 y FeO .

La radiación infrarroja (calor) se detiene 50 % en la ventana con filtro de Cu_2O y hasta 85 % si a la ventana se le incorpora CuS , además del Cu_2O . La visibilidad de la ventana permanece casi sin cambio, pues si bien el paso de la luz

visible oscila de 80 a 40 %, para el ojo humano sigue habiendo suficiente paso de luz a través del vidrio.

Durante condiciones de calentamiento, estas ventanas dejan pasar, en el peor de los casos, la mitad del calor, por lo que reducen la carga térmica en el interior de la habitación. En condiciones de frío, la ventana permite la salida del calor a la mitad de la velocidad, manteniendo durante más tiempo la temperatura confortable del interior.

Con objeto de investigar el ahorro de energía alcanzado al emplear estas ventanas, se simuló el comportamiento térmico a lo largo de un año en un modelo de habitación similar a las de departamentos de interés social. Se trabajó con departamentos de 70m^2 , con orientación Norte-Sur para los climas de Mexicali y la Ciudad de México. En el caso del departamento ubicado en clima extremoso (Mexicali), el ahorro de energía resultó de cerca de 20% anual, debido a la reducción en las oscilaciones térmicas diarias y a la disminución de calor; mientras que en el de clima templado (Ciudad de México) el ahorro fue menor de 10% y debido principalmente a la reducción en el consumo de electricidad para calentamiento.

El filtro solar VO_2 es el único activo que se ha desarrollado. Éste es sensible a cambios de temperatura, de manera que arriba de los 60°C cambia sus propiedades ópticas, y bloquea 50 % más la parte de infrarrojo. 🏠

REFERENCIAS

Chávez Galván, J (2003), Ahorro de energía usando filtros solares con base en hierro en ventanas, tesis de maestría en ingeniería energética, FI, UNAM, oct

Chavez Galván, J (2009), Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de filtros solares ahorradores de energía, tesis de doctorado en energía, II UNAM

Correa Miranda, G (2002), Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de $\text{Cu}_2\text{O}+\text{CuS}$ y VO_2 , tesis de doctorado, II UNAM, abr