

SUPERFICIES SELECTIVAS PARA INSTALACIONES SOLARES: FUNDAMENTO Y EVALUACIÓN DE SU APLICACIÓN.

Arcelio A. Hernández Ferreira

Departamento de Física, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Autor para correspondencia: archdez@ucf.edu.cu

Fecha de recepción: 18 de julio de 2013 - Fecha de aceptación: 4 de octubre de 2013

Imagen ilustrativa: Solar collectors. Fuente: <http://www.bsp.it>



Resumen

El análisis de la eficiencia de las instalaciones solares que tienen su fundamento de trabajo en la termo conversión exige que en cada uno de sus elementos componentes se logre la mayor eficiencia en los procesos relativos a la incorporación de la radiación solar máxima para ser convertida en calor y la minimización de los procesos de pérdidas de energía en la instalación. En este sentido se debe someter a análisis los dos componentes fundamentales de las instalaciones, el captador opaco y las superficies aislantes transparentes que lo cubren.

El objetivo del presente trabajo es exponer los fundamentos de las superficies espectralmente selectivas que se usan tanto en los captadores opacos como en los materiales aislantes transparentes que normalmente los cubren, cuáles materiales se emplean que ya exhiben dichas características y cuál es su impacto en la eficiencia de dichas instalaciones.

Palabras claves: Superficies selectivas, instalaciones solares, eficiencia, termoconversión.

Abstract

The analysis of the efficiency of solar installations that have their foundation in-thermo conversion requires that in each of its components the highest efficiency be achieved in the processes related to the incorporation of maximum solar radiation to be converted into heat and minimization of the energy loss processes in the installation. In this regard must be submitted to the two fundamental components analysis facilities, opaque and transparent gauge overlying insulating surfaces.

The aim of this paper is to present the fundamentals of spectrally selective surfaces used in both opaque and transparent sensors insulating materials that usually cover, what materials are used that already exhibit these characteristics and how they impact on efficiency of these facilities.

Keywords: Selective surfaces, solar installations, efficiency, thermal conversion.

1. INTRODUCCIÓN

Si se toma como punto de partida para el análisis del funcionamiento de cualquier instalación solar basada en la termo conversión un colector plano, vemos que el mismo de forma general está integrado por los componentes que aparecen en el esquema representado en la Figura 1. El colector comprende un arreglo térmicamente bien aislado cuya cara superior es transparente de manera que la radiación solar puede penetrar a una superficie absorbente con propiedades cuidadosamente escogidas en contacto con un medio al cual le transfiere el calor, generalmente agua o aire.



Figura 1. Esquema de un colector solar plano.

La eficiencia de este colector viene dada por la razón entre la energía útil obtenida y la energía solar recibida. En el caso de la termoconversión la energía útil se obtiene en forma de calor extraído del colector por la sustancia de trabajo y su manifestación concreta es el aumento de la temperatura de dicha sustancia. Así, el incremento de la eficiencia de los colectores se consigue mediante un grupo de medidas que tiendan a reducir las pérdidas y que la fracción de la energía solar incorporada sea lo mayor posible.

Uno de los elementos esenciales en las instalaciones solares es el absorbedor, captador o colector solar, el cual tiene la función de recibir la radiación solar y convertirla en otro tipo de energía útil, generalmente en calor, si se trata de termo conversión. Para hacer eficiente el proceso de conversión de la energía solar que llega al captador en energía térmica, la superficie del mismo, o superficie absorbente, debe exhibir una alta absorción de la radiación solar incidente en todo su espectro y una baja emisión de radiación térmica que necesariamente ocurre producto del calentamiento, o sea, debe ser espectralmente selectiva.

También se buscan alternativas para que el proceso de transferencia a la sustancia de trabajo sea también lo más eficiente posible. En este caso se emplean metales con buena conductividad térmica y en algunos casos dispositivos favorecedores del intercambio como aletas.

Para evitar pérdidas por intercambio de calor por conducción desde las partes que adquieren altas temperaturas se utilizan sustancias aislantes.

Para reducir las pérdidas térmicas el captador debe ser aislado del medio circundante para evitar pérdidas por intercambio de calor que no sea con la sustancia de trabajo encargada de extraerla en forma útil. De esta manera se evitan las pérdidas al aire, sobre todo por convección. En este caso se coloca la superficie absorbente debajo de una cubierta de vidrio que evita las pérdidas por convección al limitar el movimiento del aire. Se utilizan materiales aislantes transparentes como los vidrios en múltiples variedades con diferentes propiedades ópticas. El carácter espectralmente selectivo para estos materiales exige que sean muy transparentes para la radiación solar incidente y reflectantes para la radiación térmica emitida por el captador en virtud de su elevada temperatura. En las instalaciones que usan concentradores en forma de tubos y que trabajan a elevadas temperaturas se evacúa el aire de los mismos para acentuar el propósito anterior.

En el presente trabajo nos vamos a referir fundamentalmente a las propiedades espectralmente selectivas que antes señalamos tanto para el absorbedor captador como para la cubierta transparente aislante.

2. SUPERFICIES ESPECTRALMENTE SELECTIVAS PARA EL ABSORBEDOR. PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MISMOS.

La parte más crítica de un colector solar energéticamente eficiente es el absorbedor y en particular su superficie. El mismo debe absorber la radiación solar incidente en su totalidad, o sea, toda la radiación solar proveniente del sol en todas las longitudes de onda. Si tenemos en cuenta el espectro característico de la radiación solar mostrado en la figura 2 de la izquierda, vemos que toda la radiación está contenida en un intervalo de longitudes de onda comprendidas entre los 0,2 μm y los 3 μm ($200 \text{ nm} < \lambda < 3000 \text{ nm}$).

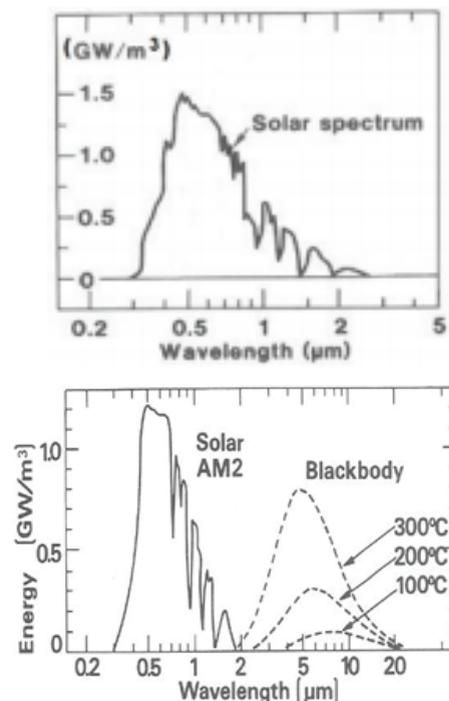


Figura 2. Espectro solar sobre la superficie de la Tierra (izq.) y espectro solar junto a curvas de emitancia espectral de un cuerpo negro para tres temperaturas (der.).

La superficie del captador al absorber esta radiación solar se calienta y como resultado de dicho calentamiento emite radiación térmica. Las curvas de trazos de la figura 2 de la derecha muestran las gráficas de la emitancia espectral de un cuerpo negro para las temperaturas de 100, 200 y 300 °C.

La energía emitida para temperaturas inferiores a 100 °C es despreciable para longitudes de onda inferiores a 3 μm. Las pérdidas asociadas con la radiación térmica deben ser evitadas para ganar en eficiencia. Esto puede lograrse de dos maneras diferentes. La primera es depositar sobre la parte interior del vidrio que cubre el absorbedor un recubrimiento que refleje toda la radiación de longitudes de onda superiores a los 3 μm ($\lambda > 3000 \text{ nm}$) provenientes del absorbedor debido a la radiación térmica de manera que esta es devuelta al absorbedor. La segunda, y más comúnmente usada, es disminuir las pérdidas de calor teniendo una superficie del absorbedor cuya emitancia térmica sea baja precisamente para ese intervalo de longitudes de onda.

Como vemos, en lo relativo a la superficie del absorbedor, el carácter espectralmente selectivo de la misma se logra cuando se satisfacen al mismo tiempo ambas condiciones: absorción total de la radiación solar en el intervalo $0,2 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$ y baja emisividad en el intervalo de longitudes de onda correspondiente al espectro de emisión de la radiación térmica, que depende de la temperatura del absorbedor.

De acuerdo a las leyes de la radiación térmica de un cuerpo negro opaco se cumple:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

Siendo: ρ_λ la reflectividad espectral hemisférica, α_λ el poder absorbente espectral y ε_λ el poder emisor espectral. De esta manera, si se conoce ρ_λ se puede calcular tanto el poder absorbente espectral como el poder emisor espectral.

La reflectividad espectral ρ_λ generalmente se determina experimentalmente con ayuda de espectrofotómetros con esferas integradora que permiten la medición de la misma teniendo en cuenta la reflexión en todas las direcciones. En la figura 3 se presenta una gráfica típica de la reflectividad espectral en el intervalo de longitudes de onda que abarca tanto la radiación solar como la parte infrarroja correspondiente a la emisión por radiación térmica. Con línea de puntos está mostrado lo que se considera el espectro que debería exhibir una superficie espectralmente selectiva ideal para la cual en el intervalo $0,2 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$ exhibe una $\alpha_\lambda = 1$ y en el intervalo correspondiente a la emisión de radiación térmica una $\varepsilon_\lambda = 0$. Este caso corresponde a un recubrimiento de un material compuesto de Al-Si atacado químicamente para obtener un micro relieve superficial que también contribuye a las propiedades ópticas deseadas para los fines antes expuestos.

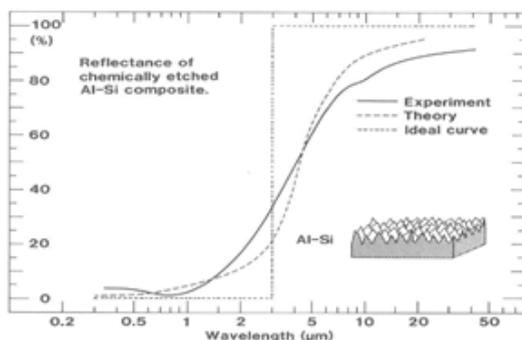


Figura 3. Curva típica de reflectividad espectral. Se muestra con línea de puntos el comportamiento ideal.

El micro relieve es una forma de darle características absorbentes a la superficie y que sea independiente de la longitud de onda de la radiación incidente. Se basa en las reflexiones múltiples que atrapan los rayos luminosos de bajo ángulo de incidencia entre las irregularidades. Estas pueden obtenerse mediante un surcado mecánico de la superficie metálica, como se muestra en la figura 4(a), o por métodos que permitan obtener estructuras dendríticas, como las de la figura 4(b), o similares como en el caso ya citado del ataque químico.

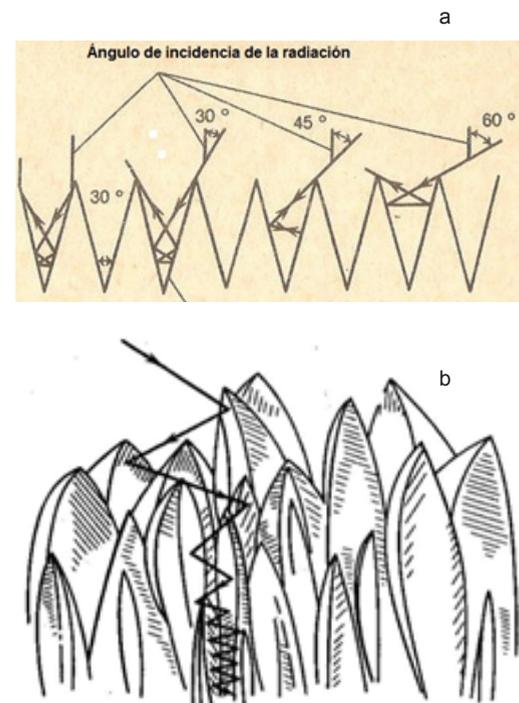


Figura 4. Reflexiones múltiples en irregularidades del micro relieve (a) e irregularidades en forma de dendritas (b)

Los óxidos de muchos metales de transición y semiconductores poseen propiedades ópticas en la región de longitudes de onda de interés que los hacen idóneos para su uso como recubrimientos con características espectralmente selectivas. Así se pueden mencionar los óxidos de cobre, de hierro, de cromo, de cobalto, de molibdeno, de wolframio, etc. También se usan otros compuestos como carburos, sulfuros de metales o de aleaciones como en el caso del níquel negro obtenido a partir de una aleación de Ni-Zn-S. Las propiedades ópticas que le confieren el carácter selectivo son muy dependientes del sustrato sobre el cual se deposita el recubrimiento y de igual manera varía mucho con las condiciones de obtención de los mismos. Por esa razón es preciso observar de forma estricta los parámetros tecnológicos de cada una de las operaciones necesarias para su obtención. En la literatura existen innumerables reportes dedicados a estos recubrimientos. Brindaremos las características solo de algunos de los más empleados.

El cromo negro es el más ampliamente utilizado, el mismo resulta ser un compuesto complejo de Cr metálico y Cr_2O_3 dieléctrico. La concentración del metal es baja en la interface hacia el aire y se incrementa con la profundidad hacia el recubrimiento. La absorción selectiva resulta una combinación del efecto del compuesto metal-dieléctrico y la pronunciada rugosidad de la superficie que se observa en estas películas. En la figura 5 se muestran las características ópticas del cromo negro obtenido por el método electroquímico y por rociado (sputtered).

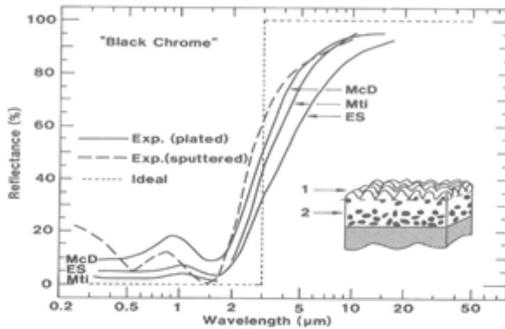


Figura 5. Propiedades ópticas del recubrimiento cromo negro.

Cuando se usa el depósito electroquímico los parámetros principales resultan ser la densidad de corriente, regularmente muy alta y la duración del proceso. En la figura 6 (izq.) se muestran las curvas para productos de la densidad de corriente y la duración del proceso igual a 500 mA.min / cm^2 en un depósito sobre acero con una subcapa de níquel. En la figura 6 (der.) se muestra un depósito hecho directamente sobre una lámina de cobre. Se han investigado depósitos sobre recubrimientos orgánicos realizados sobre acero.

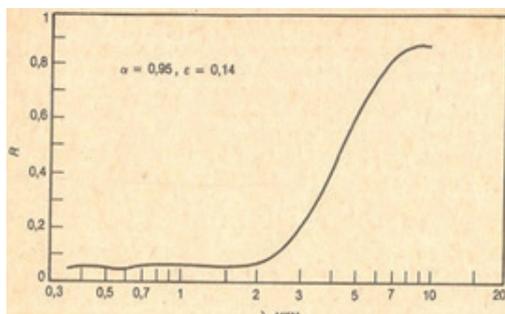
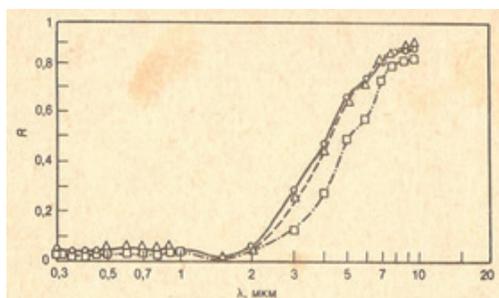


Figura 6. Propiedades ópticas del cromo negro depositado sobre níquel (izq.) y sobre cobre (der.)

Bajo esta misma esencia se han producido otros recubrimientos comerciales compuestos por partículas metálicas de Ni embebidas en Al_2O_3 obtenido en un proceso anódico. El proceso se realiza en dos etapas. Una etapa inicial de anodizado del aluminio para obtener el Al_2O_3 en una solución, por ejemplo, de ácido fosfórico diluido en el que se obtiene la superficie porosa y otra en la que se precipita níquel en el interior de los poros por electrolisis AC en un baño conteniendo sulfato de níquel. En la Figura 7 se brindan las propiedades ópticas de tal recubrimiento.

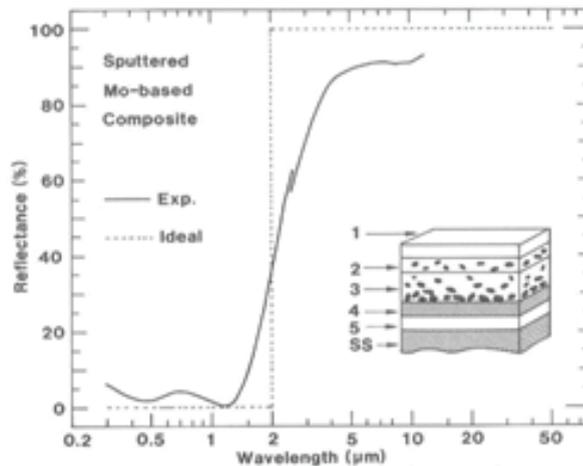
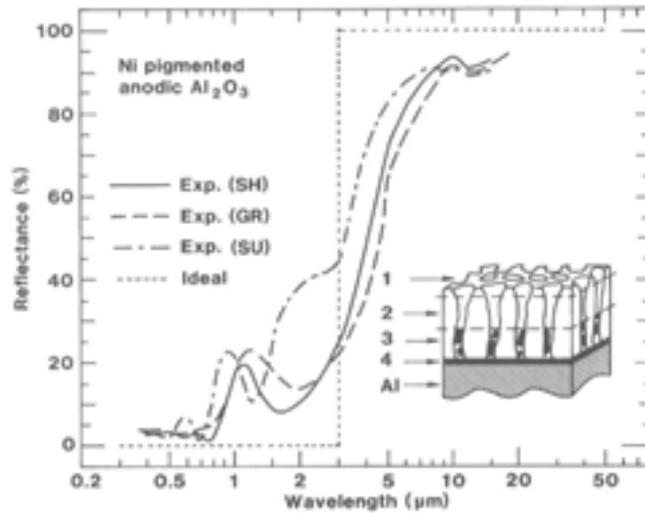


Figura 7. Propiedades ópticas de recubrimiento de Al_2O_3 embebidos en níquel (arriba) y multicapa de compuesto de Mo, SiO_2 y Al_2O_3 .

Existen otras alternativas como la obtención de recubrimientos integrados por varias capas. Por ejemplo, el uso sobre acero inoxidable de compuesto en base a molibdeno para su uso a gran escala en colectores solares tubulares diseñados para operar a temperaturas superiores a $300^\circ C$. La microestructura abarca dos capas de compuesto Mo-dieléctrico de concentraciones diferentes y graduadas, sobre una capa reflectante a la radiación infrarroja. Una capa anti reflectante de SiO_2 en la parte superior y una barrera de difusión de Al_2O_3 en el fondo completan el diseño. En la Figura 7 se muestran las propiedades ópticas de este recubrimiento multicapa.

3. ALTERNATIVAS PARA LA CUBIERTA AISLANTE TRANSPARENTE.

En la actualidad se proponen cuatro tipos genéricos, ilustrados en la figura 8, los cuales muestran comportamientos físicos diferentes e incluyen materiales más reales.

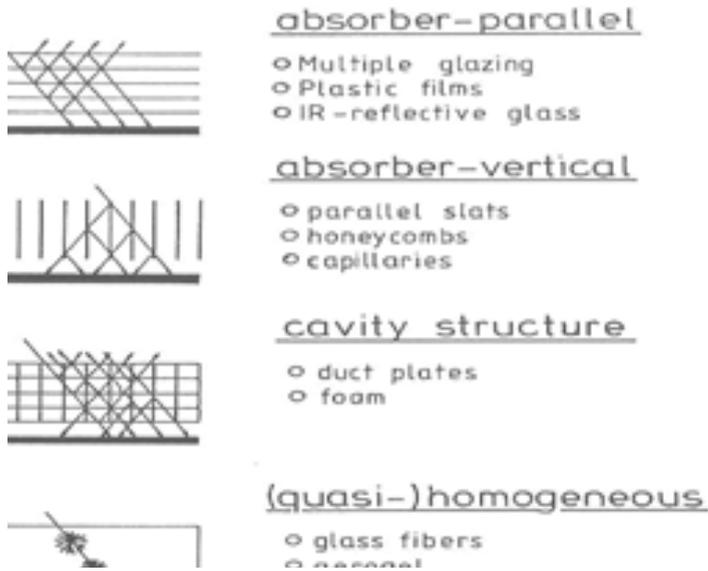


Figura 8. Tipos genéricos de esquemas de aislantes transparentes

El primer tipo es el bien conocido cubierta de absorbedor paralelo con varias láminas de vidrio o plástico las cuales pueden ser claras, pero también difusas. Las altas pérdidas ópticas por reflexión prohíben el uso de un gran número de capas. Los paneles de vidrio o láminas de plástico deben tener alta transmitancia. En la figura 9 se muestra los valores de la misma para tres tipos de vidrio. Como se conoce el contenido en óxido de hierro empeora sensiblemente esta propiedad óptica en los mismos.

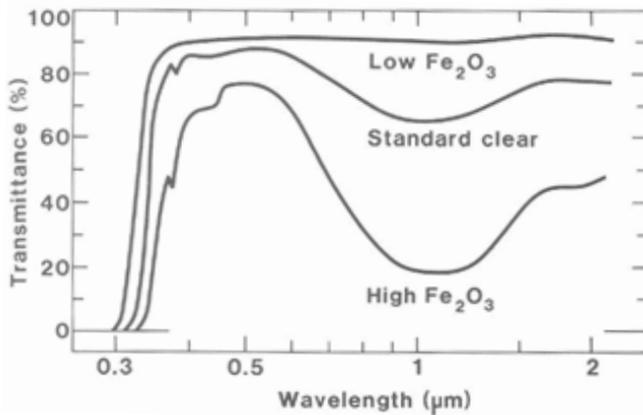


Figura 9. Calidades del vidrio atendiendo a su transmitancia.

Con el proceso de aplicación de recubrimientos con una alta reflectancia en el intervalo $3 \mu\text{m} < \lambda < 50 \mu\text{m}$ en las superficies interiores de las láminas de vidrio se le confieren propiedades ópticas que resultan espectralmente selectivas y rechazan la radiación térmica proveniente del absorbedor, evitando pérdidas por este concepto. El esquema más empleado, conocido como D/M/D, es una película extremadamente fina de metal embebida entre dos capas de dieléctrico de alto índice de refracción con espesor seleccionado de manera que maximice la transmitancia o capas de óxidos semiconductores altamente dopados. En la figura 10 se muestran las propiedades ópticas de los mismos, caracterizadas por una alta transmitancia y baja reflectancia en la región de longitudes de onda correspondiente a la radiación solar incidente y una alta reflectividad y baja transmitancia para la radiación de longitudes de onda correspondientes a la radiación térmica.

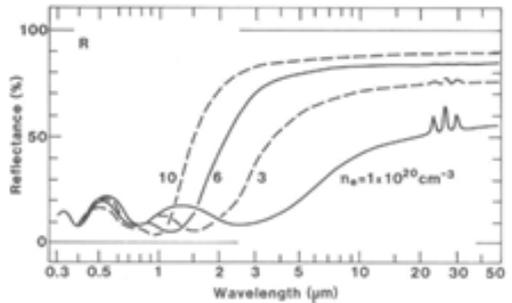
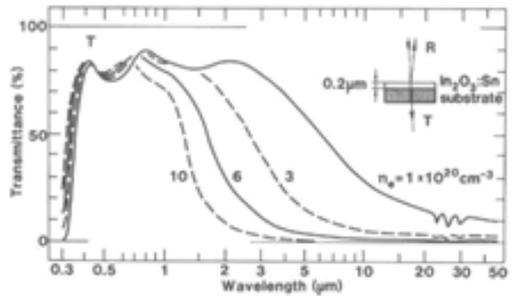
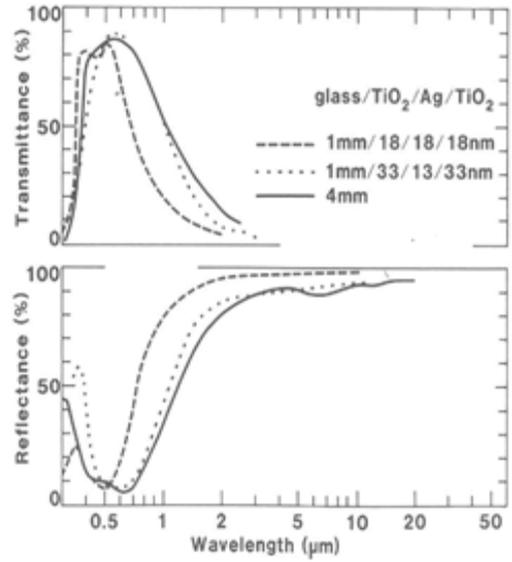


Figura 10. Propiedades ópticas de los recubrimientos selectivos para la cara interior de los paneles de vidrio. Esquema D/M/D (a) y óxidos semiconductores altamente dopados (b).

El segundo tipo son los absorbedores verticales que incluye los materiales de paneles y capilares de diferentes geometrías en su sección transversal. Como el haz incidente se refleja y se transmite por la estructura de paredes hacia el absorbedor, las pérdidas ópticas pueden ser muy pequeñas y solo alguna dispersión y absorción dentro de las láminas reduce la transmitancia global. Si se combinan los dos primeros tipos se obtiene el tercer tipo que son las estructuras de cavidades representada en realidad por placas múltiples de conductos transparentes o espuma transparente con burbujas o pompas de dimensiones de algunos milímetros.

El último tipo son las capas cuasi homogéneas caracterizadas por propiedades similares a las mencionadas anteriormente, pero basadas en otros mecanismos físicos tales como la dispersión y absorción. El aerogel, una espuma de silicato micro porosa pertenece a esta clase. Debido a los poros con dimensiones de algunas decenas de nanómetros, la luz se dispersa en el interior de los mismos de forma análoga a la conocida dispersión de Rayleigh que le da el color azul al cielo. En la figura 11 se ilustran las propiedades ópticas de los panales (a) y del aerogel (b).

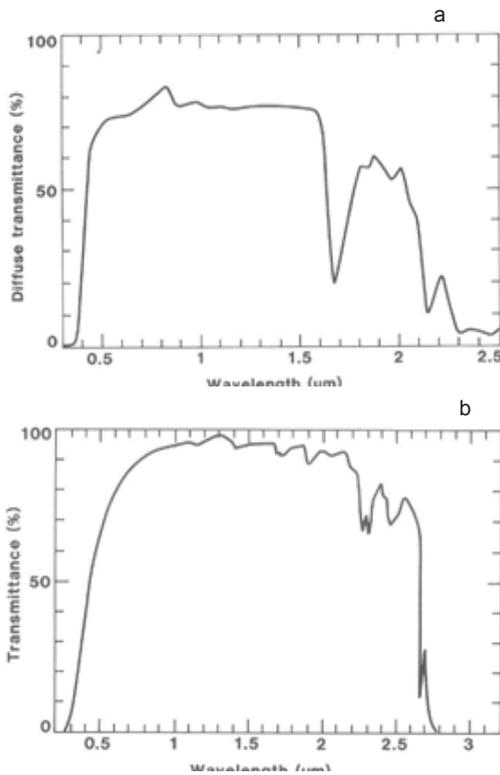


Figura 11. Transmitancia espectral obtenida para el intervalo de longitudes de onda correspondiente a la radiación solar incidente. Para esquema de panales (a) y para aerogel (b).

La combinación de varios de estos métodos, como se ilustra en el esquema general del colector plano que usamos para el análisis, reporta resultados muy favorables. Por ejemplo, en la figura 12 se presentan las curvas de eficiencia para colectores solares con diferentes elementos de los materiales aislantes transparentes en su diseño. Como se aprecia, la combinación de una placa de vidrio con características selectivas con una estructura tipo panel eleva considerablemente la eficiencia a valores cercanos a los correspondientes al uso de tubos al vacío (50% para un $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ y una irradiación de 800 W/m^2).

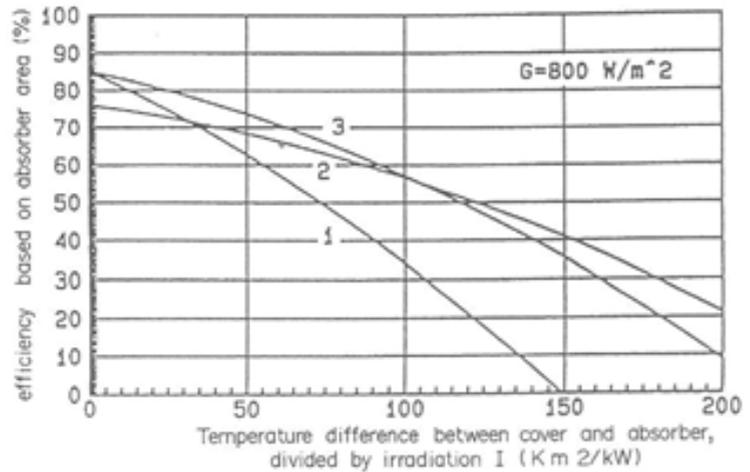


Figura 12. Eficiencia de un colector solar para diferentes variantes de material transparente aislante. 1- superficie selectiva. 2- superficie selectiva y panales. 3- tubos al vacío.

Estos esquemas también son aplicables para la colocación entre dos paneles de vidrio (ver figura 13) y los materiales de las láminas, las espumas, los panales, los capilares y el aerogel tienen las mismas propiedades ópticas para que exhiban las características espectralmente selectivas que se pretende para los fines de elevar la eficiencia del trabajo del colector. A manera de ejemplo, en la figura 14 (a) se muestran las propiedades de las láminas colocadas entre estas, que como se observa, resultan similares a las depositadas sobre la superficie interior que ya analizamos.

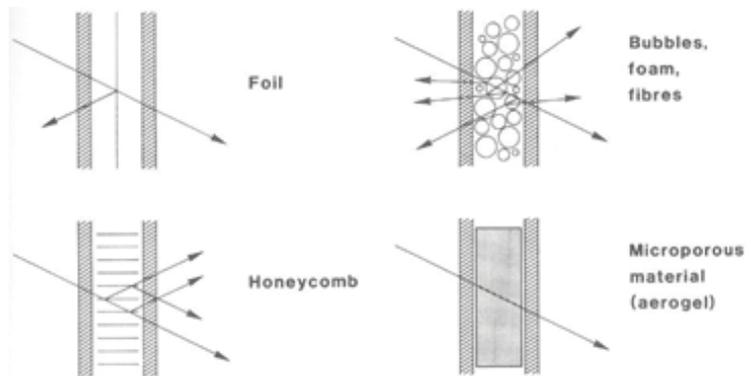


Figura 13. Esquema de uso de materiales entre paneles de vidrio.

Por su parte, en la figura 14 (b) se ilustra la transmitancia para la radiación solar difusa de capilares y espuma. Para los primeros la transmitancia no se reduce apenas con el espesor, sin embargo para las espumas el aumento del espesor reduce la transmitancia.

4. INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DE LOS COLECTORES.

Los cálculos teóricos y los datos experimentales de la eficiencia para colectores planos con doble cubierta de vidrio en calidad de aislante térmico transparente para tres tipos de construcción fueron realizados tempranamente (Winegarner, 1976).

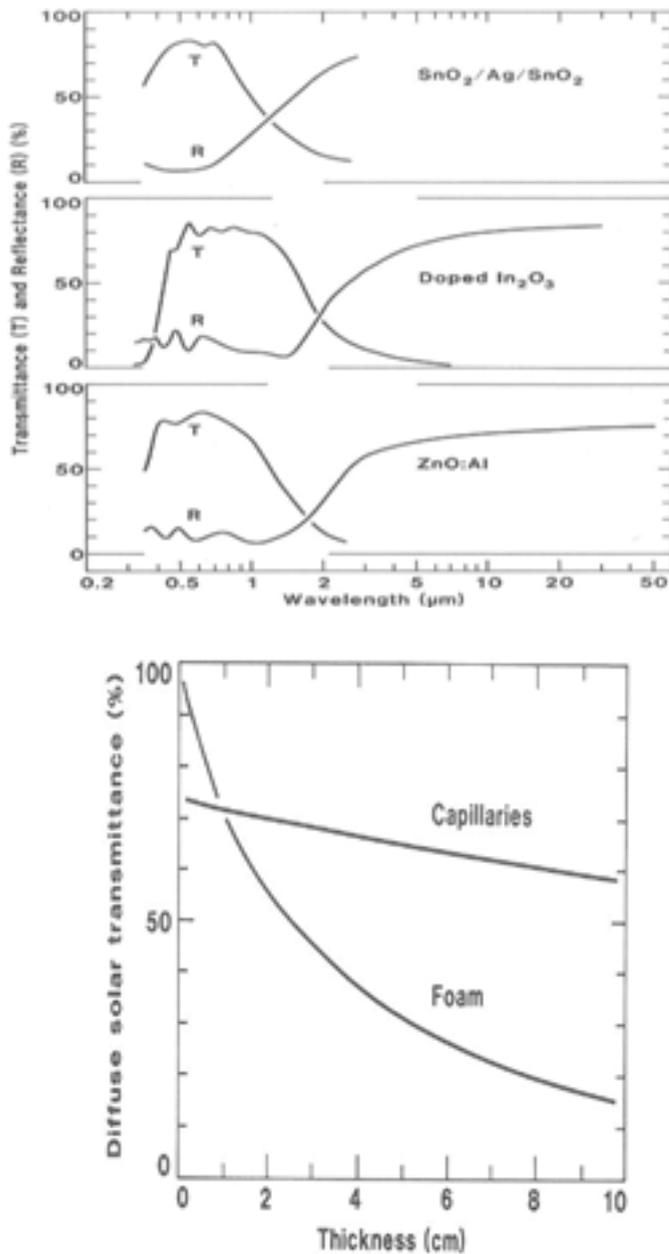


Figura 14. Propiedades de los materiales que se intercalan entre dos paneles de vidrio. Propiedades ópticas de las láminas con características selectivas (a). Transmitancia de la radiación difusa para capilares y espumas (b).

Los tipos de construcción considerados fueron: (1) dos láminas de vidrio común en calidad de aislante térmico transparente y superficie negra absorbente sobre la lámina absorbidora (2) dos láminas de vidrio común en calidad de aislante térmico transparente y superficie selectiva sobre la lámina absorbidora (3) cubierta de vidrio con recubrimiento espectralmente selectivo (transparente a la radiación solar y reflectante a la radiación térmica infrarroja proveniente del absorbedor) en la cara inferior del vidrio interior y superficie negra absorbente sobre la lámina absorbidora. En la figura 15 se muestra un esquema de la distribución de los flujos de energía y temperaturas. En el colector A la lámina absorbidora tiene superficie absorbidora negra ($\alpha=0,92$; $\epsilon=0,92$). La superficie de la lámina absorbidora del colector B tiene características espectralmente selectiva ($\alpha=0,90$; $\epsilon=0,10$). El colector C tiene la misma su lámina absorbidora como la del colector A, pero con recubrimiento selectivo en la cara inferior del vidrio interior de la cubierta.

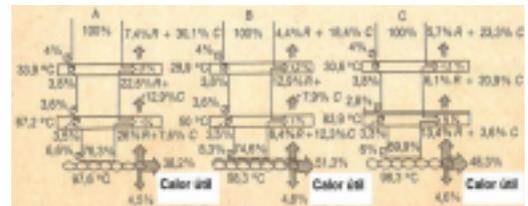


Figura 15. Comparación de colectores solares con diferentes construcción para $I = 946 \text{ W/m}^2$, $T_a = 21^\circ\text{C}$.

Como resultado de las pérdidas que tienen lugar en la cubierta de vidrio y en el absorbedor del colector A, la cantidad de energía que llega al absorbedor es solo el 76,3% de la energía solar incidente y debido a las pérdidas por radiación, convección y termo conductividad se transmite a la sustancia de trabajo aproximadamente la mitad de este calor. Al cambiar a una superficie selectiva en el absorbedor, como en el colector B, las pérdidas por radiación disminuyen del 26% al 6,4% el calor transferido a la sustancia de trabajo aumenta de 38,2% al 51,3%. Al comparar la temperatura en la cara inferior del vidrio interior, vemos que en el colector C alcanza 83,9°C mientras que en el colector A es 67,2°C y en el B 50°C. De esta manera la diferencia de las temperaturas entre la lámina absorbidora y la parte inferior del vidrio disminuye por lo cual las pérdidas por radiación disminuyen. Así las pérdidas en el colector A serán de 33,6% mientras que en el C sólo alcanzan 17%. Como resultado de esto la cantidad de calor útil incorporado a la sustancia de trabajo se incrementa de 38,2% a 48,3%.

Para colectores con concentradores cilindro parabólicos también la presencia de recubrimientos selectivos trae consigo un aumento de su eficiencia. En la figura 16 se muestra esquemáticamente el aumento de la temperatura del absorbedor, la disminución de la temperatura de la cubierta de vidrio y cuanto aumenta la eficiencia de 40% al 62,5% producto de la reducción de las pérdidas asociadas con estos cambios y el aumento del flujo de calor a la sustancia de trabajo. La temperatura del aire exterior se tomó como de 21 °C y la temperatura de trabajo del colector 315°C.

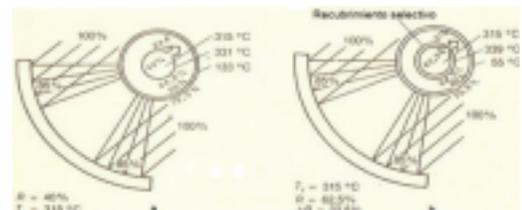


Figura 16. Comparación de las eficiencias y temperaturas en un concentrador cilindro parabólico con y sin recubrimiento selectivo.

5. CONCLUSIONES

El uso de recubrimientos con propiedades ópticas que le confieran características espectralmente selectivas a las superficies tanto de la cubierta

aislante tanto de la cubierta aislante transparente como del absorbedor, de conjunto con otras soluciones tecnológicas más conocidas, elevan considerablemente la eficiencia de las instalaciones solares.

Referencias

- Bishop, C.A. and Howson, R.P. *Solar Energy Materials*, 13, 175, (1986).
- Cathro, K.J. *Metal Finishing* 76, (10), 57, (1978).
- Fan, J.C. and Bachner, F.J. *Applied Optics*, 15, 1012, (1976).
- Fan, J.C. and Spura, S.A. *Applied Physics Letter*, 30, 511, (1977).
- Hamberg, I. and Granqvist, C.G. *Journal of Applied Physics*, 60, R123, (1986).
- Jarvinen, P.O. *Journal Energy*, 2, 95, (1978).
- Jin, Z.C. and Granqvist, C.G. *Applied Optics*, 26, 3191, (1987).
- Jin, Z.C. et al. *Applied Physics Letter*, 51, 149, (1987).
- Jin, Z.C. et al. *Applied Physics Letter*, 64, 5117, (1988).
- Lampert, C.M. *Solar Energy Materials*, 1, (1979).
- Mc Donald, G.E. *Solar Energy* 17, 119, (1975).
- Niklasson, G.A. and Craighead, H.G. *Journal of Applied Physics*, 54, 5488, (1983).
- Platzer, W.J. *Solar Energy Materials*, 16, 275, (1987).
- Rommel, M. and Wittwer, V. in *Advances in Solar Energy Technology*. Pergamon, Oxford, 1988. p. 641.
- Tewari, P.H. et al. in *Aerogels*, Springer, Berlin, 1976. P. 127. Vander, L.M. *Journal of Electrochemical Society*, 125, 1361, (1978).
- Winegarner R.M. in *Proc. ISES and SES Canada*, K.W. Ed. Winnipeg, 1976, Vol. 6, p. 339.
- Winegarner R.M. *Optical Spectra*, 12, (1975).