

Recibido 27 de junio de 2025. Aceptado 25 de noviembre de 2025. Publicado 22 de diciembre de 2025.
ISSN: 2448-7775

Estudio experimental de recubrimientos con óxido de cobre para placas absorbedoras planas en SAH

ROBERTO CARLOS SALMORÁN SALGADO^{1*}, JOSÉ ENRIQUE BOTELLO ÁLVAREZ², BRENDA RIOS FUENTES³.

¹Tecnológico Nacional de México en Celaya, Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

²Tecnológico Nacional de México en Celaya, Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental.

³Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Guanajuato, Celaya, Gto.

*Autor de correspondencia: docente.invitado.rcss@itcelaya.edu.mx

RESUMEN Este estudio experimental evalúa recubrimientos acrílicos con óxido de cobre (CuO), sobre placas absorbedoras planas en calentadores solares de aire (SAH) para mejorar la eficiencia térmica. Se formularon y probaron tres concentraciones de CuO, monitoreando temperaturas superficiales de la placa, entrada/salida de aire y eficiencia térmica bajo convección libre. La formulación con 79.3 g/m² alcanzó una eficiencia térmica promedio de 14.5%, un 15% superior a las demás, gracias a una dispersión homogénea del CuO verificada por microscopía electrónica de barrido. Estos resultados destacan la importancia de la uniformidad en la distribución de nanopartículas para obtener una interacción efectiva con la radiación solar incidente en SAH.

PALABRAS CLAVE — Calentador solar de aire, óxido de cobre, recubrimiento selectivo.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar puede ser aprovechada en tecnologías fotoeléctricas o fototérmicas. Las tecnologías fototérmicas están basadas en el uso de colectores, concentradores y absorbedores solares. Los absorbedores solares se han empleado en el calentamiento de distintos fluidos como agua, aceites y aire. El calentamiento de aire se utiliza principalmente en la deshidratación de alimentos. Los calentadores solares de aire (SAH) presentan una geometría prismática rectangular y están conformados por una cubierta de vidrio plano, liso y transparente, así como por una placa metálica denominada superficie absorbidora. El aire fluye entre la cubierta y la placa por mecanismos convectivos, incrementando su temperatura mediante transferencia de calor por conducción al ponerse en contacto con la superficie metálica, la cual recibe la radiación solar incidente y la transforma en energía interna. El componente clave en el desempeño térmico de estos sistemas es la placa absorbidora, que está constituida por una placa metálica comúnmente de aleaciones ferrosas y una película que recubre la superficie expuesta de la placa a la radiación solar. La película está conformada por partículas de óxidos metálicos “negros” depositadas por diferentes tecnologías [1]. La energía absorbida por la película se transfiere tanto al aire como hacia la placa metálica por conducción. La placa metálica tiene como función principal el almacenamiento de energía, que toma relevancia cuando la radiación solar decrece.

La absorbancia (α) corresponde a la fracción de la radiación solar incidente que es captada por una superficie, mientras que la emisividad (ε) representa su capacidad para emitir energía térmica en forma de radiación infrarroja. Diversos estudios han demostrado que los recubrimientos selectivos, definidos como aquellos que combinan alta absorbancia solar con baja emisividad térmica permiten maximizar la captación de energía y reducir las pérdidas por radiación [2] [3]. Estos recubrimientos suelen estar constituidos por metales, óxidos metálicos y materiales dieléctricos, organizados en configuraciones simples o multicapa. La implementación estas formulaciones debe considerar aspectos clave como la durabilidad, estabilidad morfológica y costos [4].

El uso de óxido de cobre (CuO) como aditivo en recubrimientos acrílicos ha despertado interés debido a su estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y propiedades ópticas adecuadas. El CuO presenta una alta absorbancia en el rango del espectro visible, además de propiedades semiconductoras que favorecen su interacción con la radiación solar incidente [5]. La incorporación controlada de nanopartículas de CuO en matrices poliméricas contribuye al incremento de la eficiencia térmica, siempre que se logre una adecuada dispersión del material [6]. Esta condición puede ser verificada mediante técnicas de caracterización estructural, tales como la microscopía electrónica de barrido [7].

En el presente trabajo se desarrolla un estudio experimental sobre recubrimientos acrílicos formulados con diferentes concentraciones de óxido de cobre aplicados sobre placas absorbedoras de acero al carbón en un SAH de tipo placa plana. El objetivo es identificar la concentración óptima de CuO que permita maximizar la temperatura superficial de la placa y la eficiencia térmica del sistema. Asimismo, se evalúa la distribución del CuO sobre la superficie de los recubrimientos mediante análisis de microscopía electrónica, con el fin de establecer su relación con el desempeño térmico observado.

II. METODOLOGÍA

Se fabricaron 3 SAH, como se muestra en la Fig. 1, empleando madera de pino de $\frac{3}{4}$ de pulgada de espesor y recubierto con esmalte negro mate, con dimensiones de 124 cm de largo, ancho de 53 cm y profundidad de 15 cm. La base interna fue aislada con un colchón de fibra de vidrio rosa de $1\frac{1}{2}$ pulgada de espesor. Cada SAH cuenta con tres orificios inferiores de 5 cm de diámetro para el ingreso de aire y un único orificio superior de 10 cm de diámetro para la salida del aire. La cubierta superior consistió en vidrio plano oscurecido de $\frac{1}{4}$ de pulgada de espesor.



Fig. 1. Cuerpo del SAH.

Se construyó una plataforma para exponer los SAH y sus correspondientes placas absorbedoras a las mismas condiciones ambientales. Sus dimensiones son 190 cm de largo y 180 cm de ancho, con una inclinación de 30° respecto a la horizontal, sobre la cual se colocaron, como se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. SAH instalados en plataforma.

Se prepararon recubrimientos mezclando diferentes cargas de CuO con 100 mL de barniz acrílico, conforme a lo descrito en la Tabla I. Las mezclas fueron colocadas en tubos Falcon de 50 mL y homogenizadas en mezclador de vórtice de alta velocidad (Intllab®) durante 10 minutos. Las mezclas fueron diluidas en thinner para aplicarse con una pistola de aire comprimido. La aplicación de pintura fue realizada por pintores profesionales para lograr una película homogénea.

TABLA I. ESPECIFICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Número de muestra	CuO (g)	Concentración (g/m ²)
1	3	4.76
2	50	79.36
3	160	253.96

Las temperaturas del aire a la entrada y salida de los SAH fueron medidas utilizando termopares tipo J (Maxim Integrated DS18B20 -155-122 °C), cuyos datos fueron registrados en una PC portátil, mediante conexión inalámbrica. La velocidad del aire a la entrada se determinó con un anemómetro de hilo caliente (Hot Wire Traceable Anemometer/Thermometer 4330CC, 0.2-20 m/s). La radiación solar incidente sobre la superficie de los SAH fue cuantificada mediante un solarímetro (SM206, 0-2,000 W/m²). Las condiciones ambientales se monitorearon con una estación meteorológica portátil colocada en el sitio de medición (Genérica, -40-60 °C, 20-90% humedad). La temperatura superficial de las placas absorbedoras fue determinada mediante una cámara térmica portátil (Flir TG165, -25-380 °C). Los experimentos se realizaron por triplicado durante tres días consecutivos, entre marzo y mayo del 2025, en un horario comprendido entre las 11:00 y 16:00 horas.

La eficiencia térmica η se estima de acuerdo con la Ec. (1) [8], que es el cociente entre la cantidad de calor cedido por la placa absorbidora al aire y la radiación solar incidente. Donde $\dot{m}$ es flujo másico de aire, C_p su capacidad calórica, T_{ao} y T_{ai} sus temperaturas en la salida y entrada de SAH, I_{solar} es la radiación solar y A_{plate} es el área de la placa absorbidora expuesta. Para estimar el flujo másico de aire es necesario medir la velocidad de aire a través de los orificios inferiores, Fig. 1. La densidad y capacidad calórica del aire fueron estimadas a la temperatura promedio de la entrada y salida del SAH [9].

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_{ao} - T_{ai})}{I_{solar}A_{plate}} \quad (1)$$

III. RESULTADOS

En las Fig. 3 (a), (b) se presentan fotografías de las láminas de acero al carbón utilizadas como placas absorbedoras. La Fig. 3 (a) refiere la lámina antes de la aplicación del recubrimiento acrílico, mientras que la Fig. 3

(b) posee la cubierta con CuO a una concentración de 79 g/m². La Fig. 3 (c) se presenta una fotografía de microscopía electrónica de una sección de lámina, los puntos azules corresponden a las partículas de cobre dispersas en la superficie.

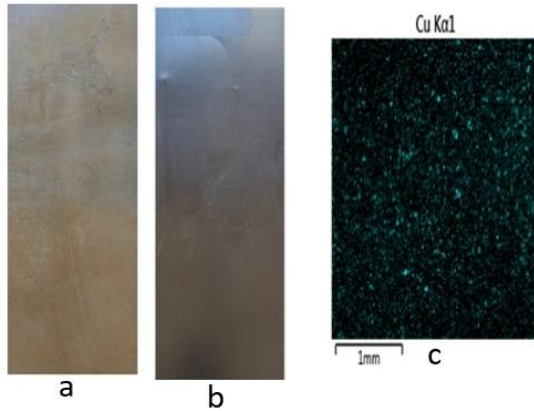


Fig. 3 (a), (b), (c). Aspectos de las láminas de acero al carbón. (a) antes de la aplicación, (b) después de la aplicación del recubrimiento acrílico, (c) distribución de las partículas de Cu sobre la superficie, mediante microscopía electrónica.

La dispersión homogénea de las partículas sobre la superficie es un factor relevante en cuanto su capacidad de absorción de la radiación solar. La superposición de capas de partículas, así como su aglomeración limitan la capacidad de absorción de la radiación por superficie expuesta. De acuerdo con la Ley de Lambert y Beer propuesta para la absorción de radiaciones monocromáticas de soluciones líquidas, establece que la energía absorbida es proporcional a la concentración de las moléculas absorbentes. Este mismo principio puede explicarse en el caso estudiado. Las partículas superficiales pueden generar un efecto de sombra sobre las partículas internas, como lo que sucede en los hornos de tubos, donde se buscan arreglos para maximizar la superficie expuesta a la radiación.

Por otro lado, las partículas y sus moléculas que absorben la radiación experimentan un aumento de su energía interna y su temperatura, las moléculas vibrantes golpean a sus alrededores transfiriendo su energía por conducción. Bajo este contexto, la matriz polimérica debido a su baja conductividad térmica puede ofrecer una resistencia a la transferencia de calor hacia las placas absorbedoras de hierro. Por otro lado, la dispersión de cobre tiene un efecto relevante en las propiedades ópticas de la superficie. La absorbancia y la emitancia son una función ponderada de la concentración y distribución de los materiales que conforman la superficie. Una película conformada únicamente de CuO quizá sería un absorbente ideal de la radiación solar, sin embargo, también podría experimentar una gran pérdida de energía por el mecanismo de emisión.

En las Fig. 4 (a), (b) se presenta una termografía correspondiente a las placas absorbedoras durante el desarrollo experimental. La Fig. 4 (a) refiere a la fase inicial de exposición, donde las temperaturas más elevadas se concentran en las regiones superiores de la placa, mientras que, en la zona inferior, particularmente en la entrada de aire, se registran temperaturas menores. Bajo condiciones de máxima radiación solar incidente, la distribución térmica se torna homogénea a lo largo de toda la superficie de la placa, como se observa en la Fig. 4 (b).

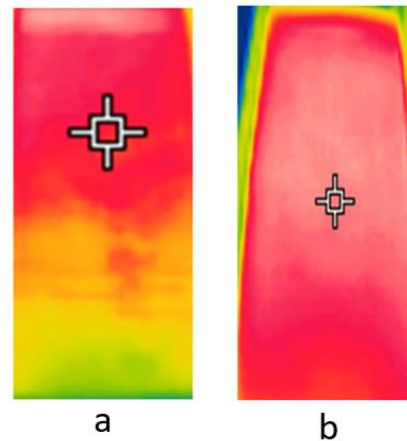


Fig. 4 (a), (b). Mapas térmicos de las placas durante la experimentación. (a) Periodo de inicio de calentamiento de las placas. (b) Periodo de máxima intensidad de la radiación solar. Azul (~ 20 °C); Verde (~ 45 °C); Amarillo (~ 70 °C); Rojo (~ 95 °C). Escala basada en la cámara termográfica.

Las Fig. 5 y Fig. 6 presentan las temperaturas superficiales de las placas absorbedoras y la eficiencia térmica de los SAH correspondientes a las muestras 1, 2, 3. La muestra 1 presentó las menores temperaturas y la eficiencia más baja correspondiente a 6.7%, mientras que la muestra 2 alcanzó mayores temperaturas con estabilidad y una eficiencia térmica de 14.5%. En contraste, la muestra 3 registró una eficiencia inferior pese a su temperatura elevada, atribuible a una mayor dispersión térmica.

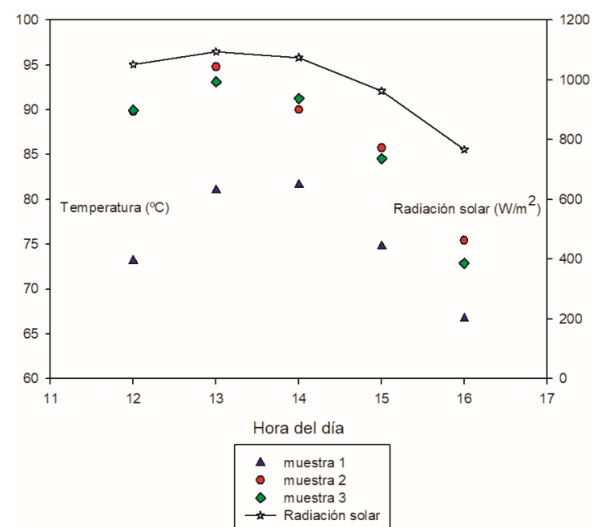


Fig. 5. Temperatura superficial de la placa absorbidora.

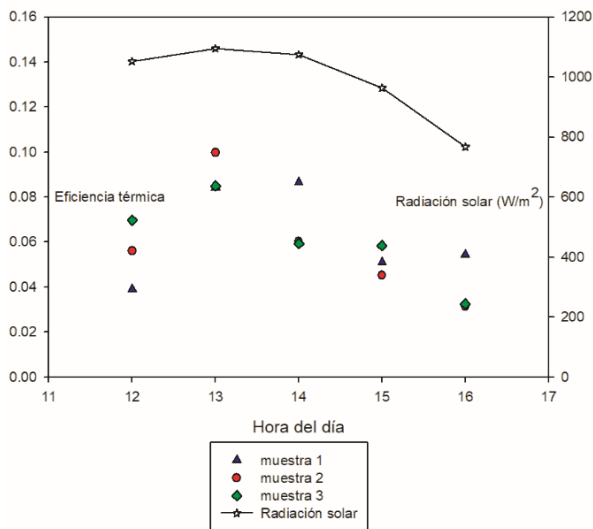


Fig. 6. Eficiencia térmica de los SAH.

Las pruebas se realizaron bajo el régimen de convección libre donde las velocidades de aire medidas en la entrada de los SAH están en un rango de 0.1 a 0.3 m/s. El calentamiento uniforme de la placa absorbadora puede conducir a la formación de bolsas de aire caliente, así como flujos recirculatorios que pueden limitar un flujo longitudinal del aire a través del SAH reduciendo su eficiencia térmica. Visualmente no se identificaron diferencias marcadas en los perfiles térmicos de las placas absorbadoras; sin embargo, las variaciones de eficiencia observadas indican que la concentración de CuO influye significativamente en el aprovechamiento térmico. La muestra 2 mejora la captación y estabilidad térmica, mientras que en concentraciones extremas reducen el desempeño térmico del SAH.

El análisis estadístico mediante ANOVA (análisis de varianza) de un factor aplicado a los valores de temperatura superficial promedio mostró diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones evaluadas ($P=0.044$). En la Tabla II se presentan los resultados donde se observa que al menos una de las muestras difiere respecto a las demás con un nivel de confianza del 95%. Este hallazgo confirma que la concentración de CuO influye significativamente en la captación térmica bajo condiciones de convección libre.

TABLA II. ANÁLISIS DE VARIANZA ENTRE LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES DE CuO.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F	P
Entre concentraciones	428.23	2	4.06	0.044
Error	631.45	14		
Total	1059.68	16		

La caracterización morfológica realizada mediante microscopía electrónica reveló diferencias significativas en la distribución del CuO sobre las placas absorbadoras. La muestra 2 se observó una dispersión homogénea del material,

sin presencia de aglomeraciones ni zonas con acumulación evidente, lo cual favorece una absorción solar uniforme y consistente. En contraste, la muestra 1 mostró regiones extensas con baja densidad de partículas, mientras que en la muestra 3 se identificaron cúmulos irregulares que afectan la continuidad óptica del recubrimiento. Estas observaciones coinciden con los hallazgos de [6], quienes destacan que la uniformidad en la distribución de óxidos metálicos en matrices poliméricas mejora sustancialmente el comportamiento térmico. La correlación entre la morfología superficial y el desempeño térmico observado sugiere que la calidad de la dispersión del CuO es un parámetro crítico para el diseño de recubrimientos funcionales.

En adición, la interacción entre el CuO y la matriz de recubrimiento es crucial para maximizar la eficiencia térmica [7], lo cual coincide con los resultados obtenidos en la muestra 2, donde se logró una dispersión homogénea y un comportamiento térmico estable. Por otro lado, concentraciones superiores a ciertos umbrales pueden incluir saturación superficial, reduciendo su eficiencia térmica [5], fenómeno que también se observó en la muestra 3. Así mismo, la importancia del recubrimiento polimérico con óxido metálico depende no solo de la concentración del material activo, sino de su distribución espacial y del tipo de unión con la matriz acrílica [6].

IV. CONCLUSIONES

La formulación de 79.3 g/m² de CuO en recubrimientos acrílicos eleva la eficiencia térmica de SAH a 14.5%, bajo condiciones de convección libre. Esto fue confirmado mediante un análisis de varianza ($P=0.044$) y microscopía electrónica de barrido, revelando una dispersión homogénea en la muestra, favoreciendo la interacción con la radiación solar.

Los hallazgos experimentales coinciden con reportes previos que indican que la dispersión controlada de óxidos metálicos en matrices poliméricas es un parámetro clave para maximizar el aprovechamiento de la energía solar en su modalidad térmica.

REFERENCIAS

- [1] T. E. and S. S. Pergamon International Library of Science, "Selective Surfaces As Solar Energy Collectors," 1975.
- [2] M. G. Hutchins, "Spectrally Selective Solar Absorber Coatings" Wales (Great Britain), 1979.
- [3] N. El-Mahallawy, M. R. A. Atia, A. Khaled, and M. Shoeib, "Design and simulation of different multilayer solar selective coatings for solar thermal applications," *Mater Res Express*, vol. 5, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aab871.
- [4] A. Boubault, C. K. Ho, A. Hall, T. N. Lambert, and A. Ambrosini, "Durability of solar absorber coatings and their cost-effectiveness," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 166, pp. 176–184, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.03.010.

- [5] H. A. El-Wahab *et al.*, “Efficacy of zinc and copper oxide nanoparticles as heat and corrosion-resistant pigments in paint formulations,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-74345-0.
- [6] R. Harzallah, M. Larnicol, C. Leclercq, A. Herbein, and F. Campana, “Development of high performances solar absorber coatings,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jul. 2019. doi: 10.1063/1.5117538.
- [7] A. Scherer, O. T. Inal, and A. J. Singh, “Investigation Of Copper Oxide Coatings For Solar Selective Applications” 1983.
- [8] P. S. Pardeshi, M. Boulic, A. (Hennie) van Heerden, R. Phipps, and C. W. Cunningham, “Review of the thermal efficiency of a tube-type solar air heaters,” Jul. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2024.114509.
- [9] D. W. Green and M. Z. Southard, “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook,” 2019.

BIOGRAFÍAS



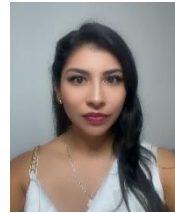
M.C. ROBERTO CARLOS SALMORÁN SALGADO

Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, egresado de Ingeniería Mecánica y Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del TecNM en Celaya. Su área de especialización se centra en el desarrollo de sistemas termo-mecánicos

y en la integración de sistemas de transferencia de calor, orientadas al aprovechamiento eficiente de la energía.



DR. JOSÉ ENRIQUE BOTELLO ÁLVAREZ Ingeniero Industrial Químico, con Maestría y Doctorado en Ingeniería Química con especialidad en Ingeniería de Procesos, egresado del TecNM en Celaya. Cuenta con amplia experiencia en el diseño y construcción de equipos industriales. Sus líneas de investigación se enfocan en el análisis de la sustentabilidad aplicada a procesos biotecnológicos y del sector alimentarios.



DRA. BRENDA RÍOS FUENTES Ingeniera Bioquímica por el TecNM en Celaya, con Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería por la misma institución. Su línea de investigación se ha enfocado en la gestión ambiental en la Agroindustria. Perteneció al SNII nivel Candidato. Actualmente, forma parte del Departamento de Agroindustria de la Universidad de Guanajuato.