



DESARROLLO DE UN RECUBRIMIENTO ABSORBENTE SOLAR DE BAJO COSTO BASADO EN HOLLÍN DE BIOMASA FORESTAL: CARACTERIZACIÓN TÉRMICA Y APLICACIÓN EN UN SISTEMA DE COCCIÓN SOLAR

DEVELOPMENT A LOW-COST SOLAR ABSORBER COATING BASED ON SOOT OF BIOMASS-FOREST: THERMAL CHARACTERIZATION AND APPLICATION IN A SOLAR COOKING SYSTEM

L.B., López-Sosa^{1*}, L.M., Hernández-Ramírez², M., González-Avilés³, H., Servín-Campuzano², J., Zárate-Medina¹

¹Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo. C.P. 58000, Morelia, Michoacán.

²Facultad de Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo. C.P. 58000, Morelia, Michoacán.

³Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. C. P. 61614, Pátzcuaro, Michoacán.

Recibido 26 de Julio 2017; Aceptado 24 de Febrero 2018

Resumen

El presente trabajo muestra el desarrollo de un recubrimiento de bajo costo basado en hollín de biomasa forestal, utilizado para formar superficies absorbentes solares para su uso en tecnologías solares térmicas, como cocinas solares. Se ha desarrollado un recubrimiento con un acrílico como aglutinante para poder adherir el recubrimiento a superficies metálicas. Para caracterizar el comportamiento térmico de las superficies metálicas con el recubrimiento propuesto, se diseñó una metodología teórica y experimental. Experimentalmente, el recubrimiento de hollín de biomasa se comparó con una pintura comercial de alta temperatura utilizada en tecnologías solares térmicas. A través de pruebas de campo estándar para cocinas solares, fue posible corroborar la metodología sugerida en superficies metálicas con recubrimientos de hollín; adicionalmente se estimó la selectividad de las superficies con hollín, los resultados fueron similares a la caracterización térmica. Finalmente, debido a la funcionalidad del recubrimiento, se aplicó a 37 sistemas de cocción solar que se implementaron en una comunidad indígena en el estado de Michoacán, México. Debido a lo anterior, se vislumbran muchas aplicaciones del revestimiento desarrollado.

Palabras clave: absorbedor solar, hollín, rendimiento térmico, potencia de cocción.

Abstract

The present work shows the development of a low cost coating based on forest biomass soot, used to form solar absorbent surfaces for use in solar thermal technologies, such as solar cookers. A coating with an acrylic as a binder has been developed to be able to adhere the coating to metal surfaces. To characterize the thermal behavior of the metallic surfaces with the proposed coating, a theoretical and experimental methodology was designed. Experimentally the biomass soot coating was compared with a commercial high temperature paint used in solar thermal technologies. Through standard field tests for solar cookers, it was possible to corroborate the methodology suggested on metal surfaces with soot coatings; additionally the selectivity of the sooty surfaces was estimated, the results were similar to the thermal characterization. Finally, due to the coating's functionality, it was applied to 37 solar cooking systems that were implemented in an indigenous community in the state of Michoacán, Mexico. Due to the above, many applications of the developed coating are glimpsed.

Keywords: solar absorber, soot, thermal performance, cooking power.

1 Introducción

En los últimos años las investigaciones sobre tecnologías que aprovechan Fuentes Renovables de Energía (FRE) se han incrementado. De forma

conveniente se ha sistematizado el estudio de los materiales que son utilizados en estas tecnologías. En el caso de las tecnologías solares térmicas, una parte importante que contribuye a aumentar la eficiencia de termoconversión de colectores solares es la superficie de absorción solar (Meinel, 1982); estas superficies

* Autor para la correspondencia. E-mail: sosabernardo@hotmail.com
Tel. (443)425 56 50 y (443)257 18 74
doi: 10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/LopezL
issn-e: 2395-8472

deben tener una alta absorbancia en el rango del espectro solar. La característica importante para que las superficies sean selectivas, es que posean una alta absorbancia y baja emitancia en el espectro solar (Duffie & Beckman, 2013).

En realidad, una superficie selectiva no tiene una longitud de onda crítica bien definida, así como propiedades uniformes en la gama de longitudes de onda corta y larga, por lo que los valores de la emitancia serán más sensibles a las temperaturas superficiales, que las de una superficie gris ideal. Este concepto tiene una gran importancia en el diseño de superficies para aplicaciones de la energía solar, habiéndose desarrollado una serie de modelos y productos que permiten hacer combinaciones de propiedades de las mismas, por ejemplo las superficies absorbentes (Fernández, 1992), tema de estudio del presente trabajo. Las superficies absorbentes tienen como objetivo absorber la mayor cantidad de energía aunque el sustrato no sea un buen absorbente, al tiempo que proporcionan una baja emitancia; este tipo de superficies se componen de un sustrato metálico y un recubrimiento. De forma general se pueden destacar las siguientes (Kennedy, 2002):

- Pinturas
- Filtros de interferencia
- Pinturas de multicapas

Estas superficies se clasifican de acuerdo a su uso en rangos de temperatura bajo ($>100^{\circ}\text{C}$), medio ($100 < ^{\circ}\text{C} < 400^{\circ}\text{C}$) y alta ($>400^{\circ}\text{C}$).

Han sido diversas las investigaciones sobre recubrimientos absorbentes solares, las cuales versan desde las superficies multicapas como $\text{TiAlN/TiAlON/Si}_3\text{N}_4$ (Liqiong y col., 2015), o bien $\text{AlCrSiN/AlCrSiON/AlCrO}$ para recubrimientos de altas temperaturas (Zou y col., 2016), así como Cobalto y óxido de Co-Fe (Barrera y col., 2005), hasta las investigaciones con estructuras de carbono para formar materiales funcionales fototérmicos; por ejemplo, las estructuras de carbono, hidrógeno y titanio para la generación de películas absorbedoras de energía solar (Duffie & Beckman, 2013). También se han utilizado nanotubos de carbono para la generación de superficies absorbedoras (Schuk y col., 2000). Estructuras de grafito con alúmina también se han utilizado para la generación de superficies selectivas absorbedoras, donde sigue siendo el común denominador el uso de estructuras de carbono para generar la absorción de energía solar (Karami y col., 2014). Además de las estructuras de carbono

que se han utilizado para la generación de este tipo de superficies, existen trabajos donde se han incorporado ZnO y NiO, donde no sólo se reporta la caracterización térmica, sino que también se evalúa óptica y estructuralmente el recubrimiento (Kontinen y col., 2003).

Con otros materiales, como NiO también se han utilizado nanoestructuras de carbono para generar recubrimientos absorbedores (Kontinen y col., 2003); o bien simplemente nanotubos de carbono ha generado recubrimientos de baja temperatura para aplicación en colectores solares (Kittessa y col., 2012).

En general, muchos materiales nanoestructurados, han sido utilizados para la generación de recubrimientos absorbedores solares y que poseen múltiples características de absorción alta y emisión de energía baja (Oelhafenet y col., 2005; Karami y col., 2014), pero ninguno se ha elaborado a partir de materiales de desecho. En los casos mencionados, el material se deposita con técnicas y procesamientos sofisticados, lo que limita la replicabilidad del recubrimiento.

El uso de materiales de desecho para la formación de recubrimientos absorbentes solares es un campo de investigación interesante y poco abordado, no únicamente por sus aplicaciones inmediatas a tecnologías solares térmicas, sino porque utilizar materias primas de desecho para la formación de materiales funcionales genera un menor impacto ambiental, además de generar recubrimientos de muy bajo costo.

Hasta ahora, sólo se ha realizado un estudio sobre el hollín de biomasa forestal como posible materia prima para la elaboración de un recubrimiento absorbedor solar (Correa y col., 2014); dicha propuesta realizó un análisis termogravimétrico en muestras de hollín provenientes de diversas clases de biomasa forestal para determinar su posible aplicación en tecnologías solares térmicas; no obstante, el estudio es limitado, no sugiere un uso específico característico del hollín como elemento de un nuevo recubrimiento.

Por lo tanto, la presente propuesta plantea la preparación y caracterización térmica de un recubrimiento absorbente solar de hollín de biomasa forestal, para su utilización como material funcional en sistemas de termoconversión solar. Además, se demuestra la funcionalidad del hollín (material que se desprende de la quema de biomasa) como material funcional para el aprovechamiento de la energía solar. Esto sugiere un material funcional para tecnologías solares térmicas a partir de un material de desecho que será de bajo costo y bajo impacto ambiental.

Este recubrimiento de forma inmediata puede ser aplicado a sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones, debido a que la olla de la cocina solar que se ha sugerido para el uso del recubrimiento en cuestión está hecha de aluminio, lo que contribuye a generar una superficie selectiva, ya que las superficies con alta conductividad térmica tienen una baja emisión térmica, es decir, la base para cualquier superficie absorbente selectiva de baja emitancia en el infrarrojo tiene que ser generalmente metálica (Duffie & Beckman, 2013). Por lo tanto, el desarrollo de un recubrimiento absorbente solar es posible gracias al hollín que se desprende de la combustión de biomasa forestal, tal como se describe a continuación.

2 Metodología

El procedimiento metodológico para el desarrollo del recubrimiento de hollín de biomasa forestal se puede apreciar en la figura 1.

De forma general, son tres etapas en el desarrollo del recubrimiento:

1. El hollín que es un desecho, del que no se ha reportado en la literatura científica ninguna aplicación especializada, se impregna en los techos de viviendas de comunidades rurales que combustionan leña para uso doméstico, se recolecta como materia prima para el recubrimiento en cuestión. El hollín, además de ser un desecho, es un material peligroso en las viviendas rurales, porque representa un problema de salud pública (Fullerton y col. 2008). Algunos intentos por mitigar la presencia de este material han sido a través de las estufas ahorradoras de leña, por ejemplo la estufa Patsari ® (Mäser y col., 2007); con el uso de estas estufas el hollín se acumula en un tubo metálico y no dispersa las viviendas que las utilizan, lo que facilita la recolección del hollín para utilizarlo como materia prima para el desarrollo del recubrimiento de la presente investigación.

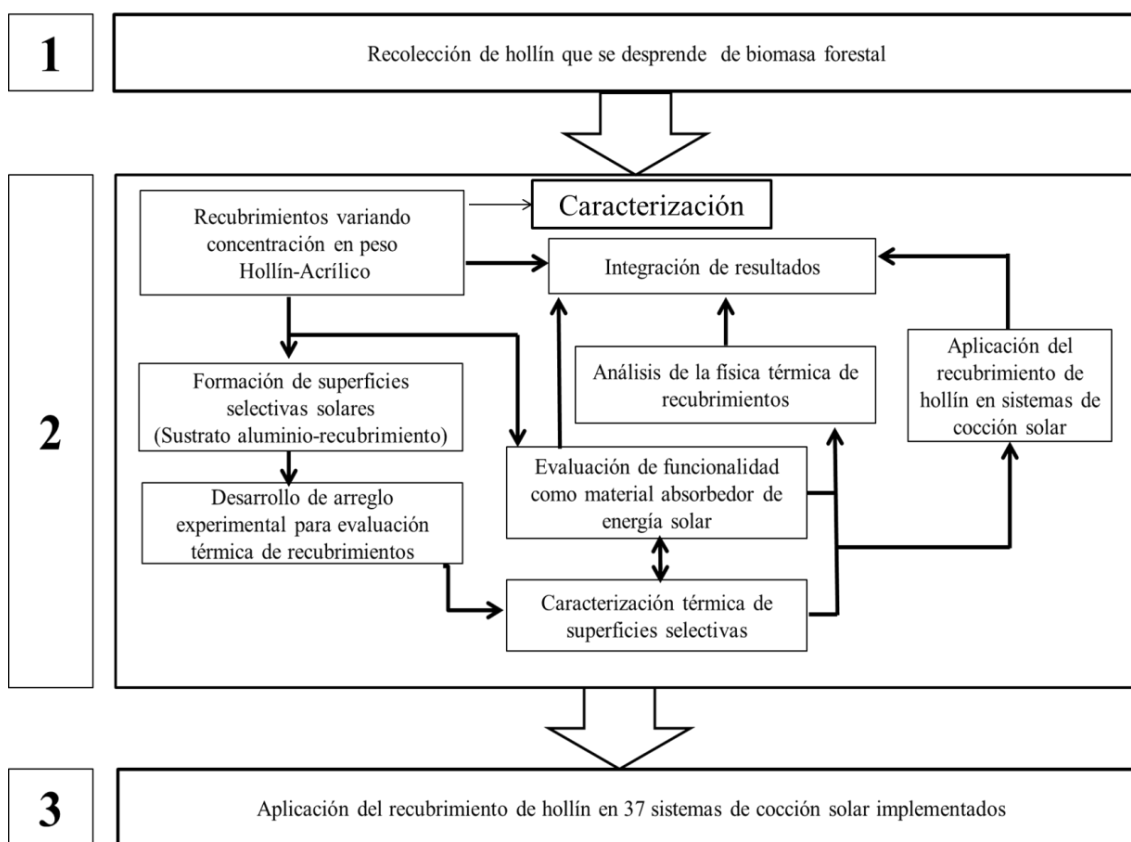


Fig. 1. Diagrama de flujo metodológico.

2. La segunda etapa consiste en caracterizar la materia prima, hollín de biomasa forestal, considerando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX), para reportar una caracterización inicial del material que comienza a tener especial interés en la literatura científica. Posteriormente analizar la mejor concentración del hollín con un ligante para poder depositar el recubrimiento sobre superficies metálicas, de tal forma que el recubrimiento se adhiera con facilidad y sea sencillo de elaborar. Con los parámetros óptimos de hollín y ligante, es necesario evaluar la funcionalidad del recubrimiento y de la superficie selectiva solar que se forma con el sustrato metálico (superficie selectiva=sustrato+recubrimiento); por lo que se sugiere una metodología experimental para evaluar térmicamente la funcionalidad del recubrimiento. Luego, se analiza la física térmica de la superficie selectiva con la finalidad de establecer un modelo teórico para escalar su funcionalidad a un sistema solar térmico, donde será posible validar el modelo experimental, el modelo teórico y la funcionalidad del recubrimiento de hollín de biomasa forestal.
3. Una vez que se ha validado la funcionalidad del recubrimiento, la tercera etapa de la metodología consiste en utilizar el recubrimiento. Por lo que el recubrimiento ha sido útil para su aplicación en varios sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

La metodología para el desarrollo del recubrimiento es integradora, porque sugiere incorporar valor agregado a un material de desecho, generar un material funcional, de bajo costo y bajo impacto ambiental.

2.1 Caracterización del material

Es importante documentar la caracterización del hollín de biomasa forestal que recientemente ha despertado el interés de la comunidad científica (Servín y col., 2017; Peña y col., 2017; Carabali y col., 2016; Correa y col., 2014). Para reforzar la caracterización que ya se ha realizado en torno al hollín de biomasa forestal, se realizaron estudios mediante MEB y DRX,

utilizando un modelo JSM-6400 y D8 ADAVANCE DAVINCI respectivamente. Hasta ahora, se conoce que el hollín es un material de desecho sin algún uso específico. El hollín ha sido identificado como un material nanométrico (Carabali y col., 2016), cuyo tamaño de partícula está por debajo de los 100 nanómetros. Adicionalmente, se conoce que la reflectancia de este material está por debajo del 5%, de acuerdo a los estudios de reflectancia reportados en la literatura especializada (Servín y col., 2017), lo que propicia inferir que es un material con alta absorción en el espectro solar; así mismo, se conocen de forma preliminar su composición química (Peña, 2017). Sin embargo, los estudios referentes a la estructura cristalina aún no han sido realizados, por lo que en el presente trabajo se aborda esta parte de la caracterización para reforzar los análisis que ya se han realizado con antelación.

2.2 Procedimiento experimental

Se sugiere que el hollín de biomasa forestal presenta propiedades de absorción de energía solar, por lo que de diversas formas se puede corroborar su funcionalidad. En esta investigación la funcionalidad del material se analizará a través de un análisis térmico de recubrimientos con hollín de esta naturaleza. Además, se puede corroborar su completa funcionalidad al utilizar un recubrimiento con este hollín aplicado en un sistema solar térmico, por ejemplo un sistema de cocción solar.

Las cocinas solares, como la Cocina Solar Rural (González-Avilés y col., 2013), funcionan con un almacenador de alimentos de aluminio de 2 mm de espesor. Bajo la consideración anterior, se utilizó para el modelo experimental placas de aluminio cuadradas de 5 cm por lado (peso específico de 2,70 g / cm³, Pureza 99,5%, Aleación 3003, Temple H14, 14G - 2 mm), similar al que se utiliza en las ollas exprés de la cocina solar antes mencionada. La intención del modelo es evaluar del comportamiento térmico del hollín como recubrimiento absorbente solar. Fue necesario adherir el hollín al sustrato metálico mediante un medio ligante tipo acrílico marca comex ®. Con la finalidad de conocer la función del ligante y el hollín, se decidió hacer una variación en peso del hollín y el acrílico (Figura 2a); cada recubrimiento se depositó mediante técnica en aerosol sobre las superficies metálicas de aluminio (Figura 2b).

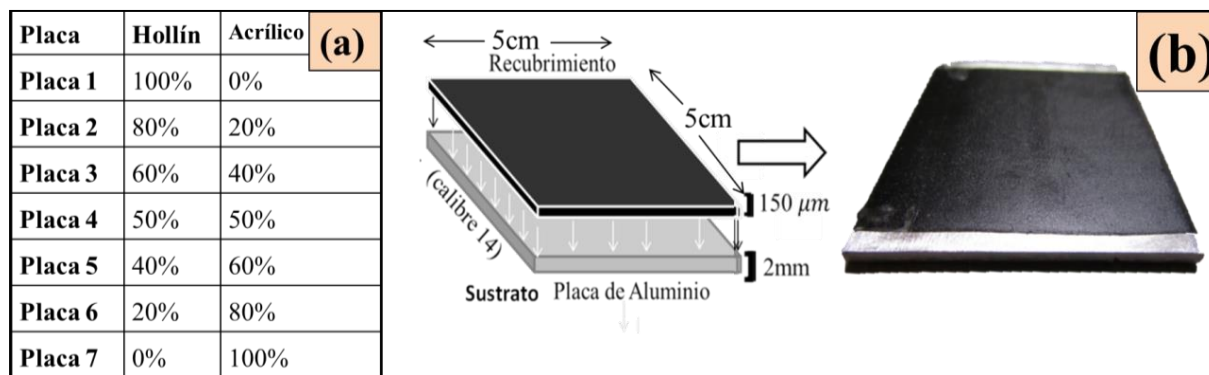


Fig. 2. a) Variación de la concentración en peso hollín-acrílico, b) superficie selectiva.

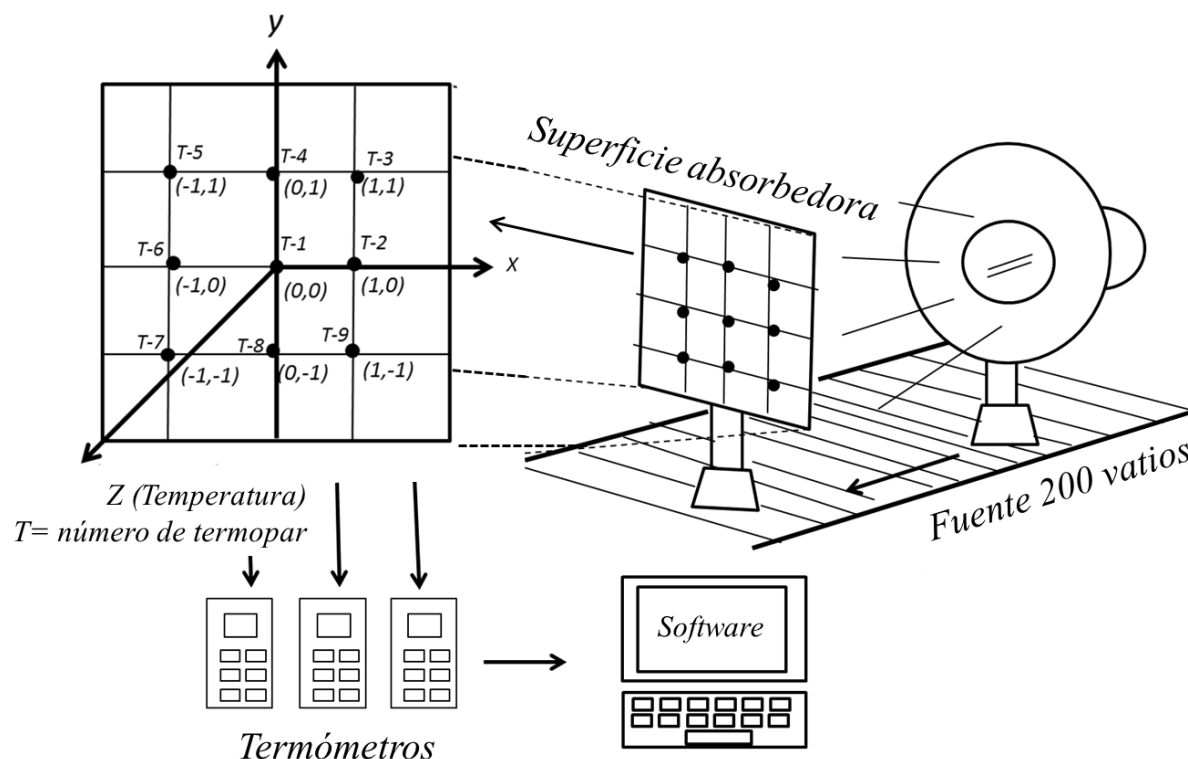


Fig. 3. Arreglo experimental.

2.3 Arreglo experimental

Como se ha demostrado en la literatura, no es sencillo evaluar superficies selectivas en tecnologías solares térmicas. En el caso de las cocinas solares, la evaluación de los recubrimientos de absorción solar depende directamente de días soleados para validar las pruebas de funcionalidad de esta tecnología, principalmente la potencia de cocción estándar (ASAE, 2003). Por lo tanto, con el fin de desarrollar un método práctico, funcional y accesible, se realizó

un arreglo experimental con una fuente de luz 250 w (Figura 3), lámpara de calor infrarrojo marca general electric® modelo E27, para tener una fuente de energía constante, lo cual ya se ha analizado en otras investigaciones (Passamai y col., 2007); lo que permitirá conocer el comportamiento térmico de la superficie selectiva. Para fines prácticos se etiquetó a cada termopar de acuerdo a un plano cartesiano elaborado en la parte trasera de la placa metálica expuesta a la fuente de luz, es decir T-1,

T-2, T-3, y así sucesivamente. La superficie con los recubrimientos analizados se colocaron a una distancia de 25 centímetros.

Aunque esta fuente de luz espectralmente no simula estrictamente la radiación solar, es una aproximación que permite sugerir un modelo con condiciones controladas y energía incidente constante. Una metodología que puede ser útil para facilitar análisis comparativos en laboratorio sin necesidad de utilizar la radiación solar directa.

La instrumentación utilizada para este arreglo experimental fue:

- a) Un termómetro digital *anaheim scientific* ® modelo h240, con 4 terminales para sensor de temperatura tipo k (Resolución 0.1)
- b) Tres termómetros con dos terminales para sensor de temperatura tipo k, modelo UT-325 (Resolución: 0.1 °C).
- c) Diez termopares tipo k.
- d) Software para registro y procesamiento de datos (temperaturas), UNIT-UT320 V3.01.

Los termopares utilizados permitieron conocer la temperatura en toda la placa analizada, se determinó un promedio de la temperatura máxima asociada a cada recubrimiento, es decir el efecto máximo de absorción de energía. Las lecturas de temperatura

registradas por los termopares fueron procesados en el software UNIT-UT320 V3.01, por lo que las mediciones se registraron en tiempo real durante la experimentación.

3 Discusión y resultados

3.1 Caracterización SEM y DRX

Tal como lo reporta Peña y col., en 2017, los análisis de MEB muestran una gran cantidad de elementos presentes en el hollín de biomasa; en caso particular, el hollín de biomasa forestal estudiado en la presente investigación, muestra elementos presentes como: K, Ca, C, O, Si, Cl, P, Al y S, analizados por composición utilizando la técnica de Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), del MEB. Aunque la técnica utilizada es semi-cuantitativa, representa un referente para conocer de forma preliminar la cantidad de cada material presente. Lo anterior se aprecia en la figura 4. Se puede notar que la mayor cantidad del material es carbono. Una vez realizado el análisis mediante DRX, los resultados de EDS-MEB son consistentes con los compuestos identificados. Se aprecia que el hollín contiene compuestos como: óxidos de azufre, óxido de potasio, carburo de calcio y carburo de silicio (Figura 5).

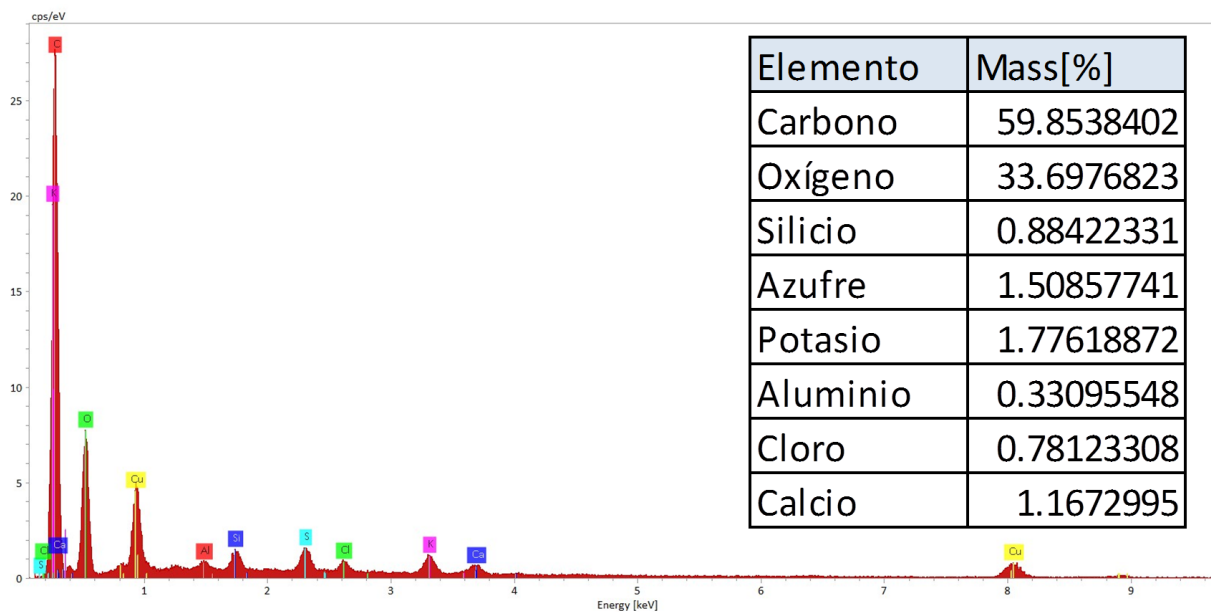


Fig. 4. Análisis EDS-MEB.

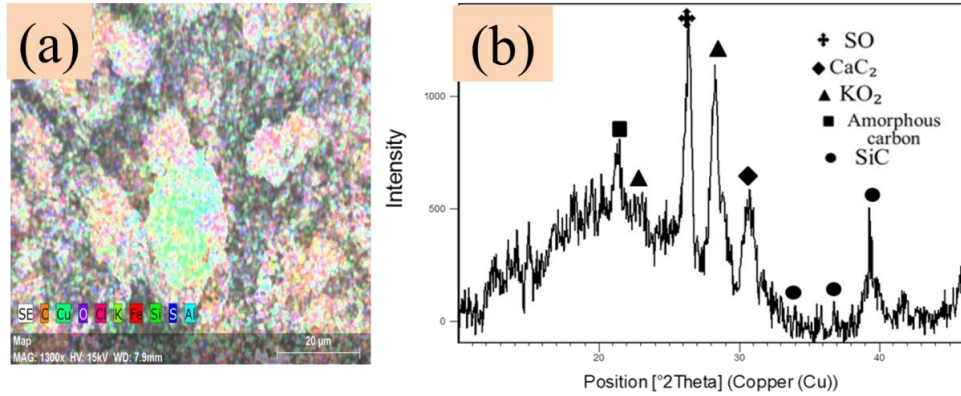


Fig. 5. Análisis: (a) EDS-MEB (b) DRX.

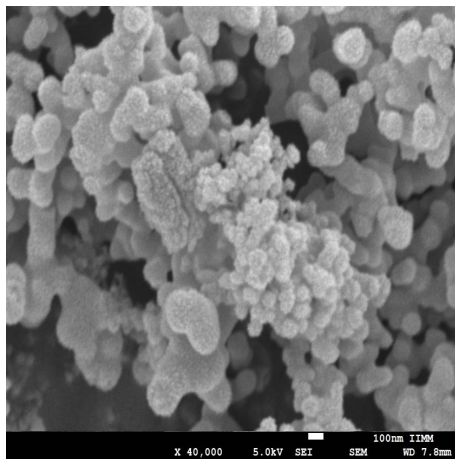


Fig. 6. Análisis MEB.

El material presenta algunas estructuras cristalina y gran parte de estructuras amorfas. Aunque el alcance de la presente investigación no profundiza sobre la caracterización y procesamiento del material, se vislumbran posibles investigaciones futuras. El hollín presenta tamaños de partícula de orden nanométrico, tal como se han reportado en algunas investigaciones (Carabali y col., 2016). Figura 6. Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura científica.

3.2 Análisis del comportamiento térmico

Las pruebas en laboratorio de los recubrimientos analizados con el arreglo experimental antes mencionado, se realizaron iniciando a temperatura ambiente, y expuestas a la fuente de luz hasta alcanzar las temperaturas máximas de equilibrio.

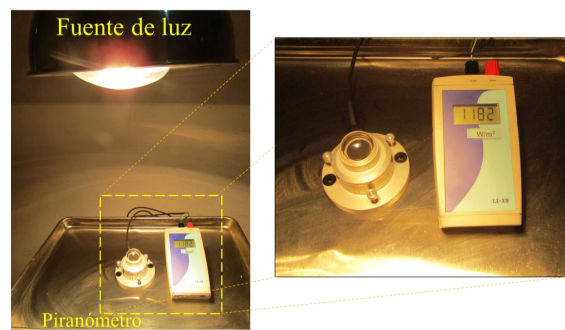


Fig. 7. Medición con el Piranómetro de la fuente de luz.

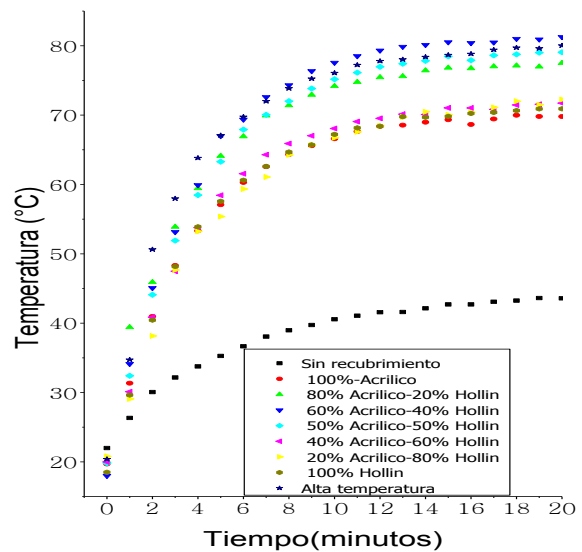


Fig. 8. Comportamiento térmico durante las pruebas de las superficies con distintos recubrimientos.

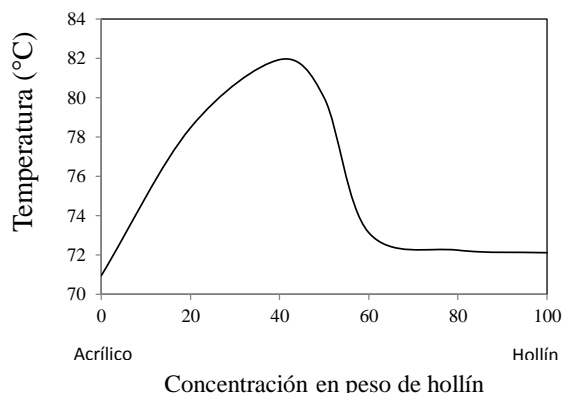


Fig. 9. Temperaturas máximas de equilibrio de las superficies selectivas

Para cuantificar la cantidad de energía incidente de forma preliminar, aun considerando que no es una estimación espectral como la radiación solar, se utilizó un Piranómetro portátil Hukseflux con datalogger modelo LP02, con resolución de $\pm 1\%$, que registro una medición de 1182 w/m^2 (figura 7), esta medición y técnica utilizada está asociada a un diseño experimental con lámparas incandescentes para simular la radiación solar reportada en la literatura científica (Passamai, 2007); la medición se registró a la distancia donde se realizaron las estimaciones del arreglo experimental descrito en la figura 3. Los resultados de las pruebas experimentales de las superficies selectivas se muestran en la figura 8. Los datos de la experimentación durante las pruebas realizadas, muestran las temperaturas máximas alcanzadas. Se aprecia que la temperatura máxima se alcanzó en la concentración 40% hollín-60% acrílico (Figura 9).

3.3 Modelo teórico-experimental

Con base en los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio se pudo realizar un modelo teórico.

El modelo experimental propuesto, aunque no determina de forma directa la emitancia de la superficie analizada, pretende determinar el flujo total de calor cedido por la placa y el calor total cedido en un intervalo de tiempo ($0 \rightarrow t$). Para esto será necesario analizar algunos fenómenos de transferencia de calor que intervienen durante la experimentación (Monroy, 1995).

Para determinar la distribución de temperaturas en régimen transitorio y, finalmente, la transferencia de calor por unidad de tiempo, se necesita resolver la ecuación general de la conducción, en la

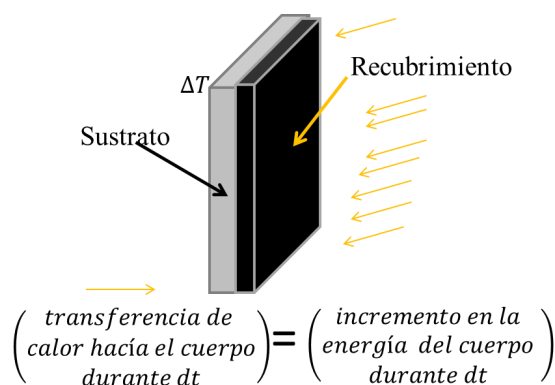


Fig. 10. Balance de energía en la placa de aluminio con el recubrimiento de hollín.

cual se considera la transmisión y acumulación del calor. Así mismo, el análisis de la placa metálica utilizada en la experimentación del presente trabajo, se considera como un problema del tipo "sistemas concentrados", también llamados sistemas de parámetros concentrados o de resistencia interna despreciable, en los cuales la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo pero permanece uniforme en cualquier instante (Cengel, 2007).

Analizando la placa de aluminio, bajo el concepto de régimen transitorio, se considera un sólido, a la placa de masa "m", volumen V, área superficial A_s , densidad ρ y calor específico c_p , con una temperatura inicial T_i ó $T(0)$; en el instante en que el cuerpo alcanza su temperatura de equilibrio, se dice que el cuerpo está a la temperatura T_∞ . Por lo tanto la placa lleva a cabo transferencia de calor con el ambiente que lo rodea, mediante un coeficiente de transferencia de calor "h". Así, en beneficio del análisis del problema se supondrá que $T_\infty > T_i$. Se considerará también que el análisis de sistemas concentrados es aplicable; la temperatura permanece uniforme dentro del cuerpo en todo momento, en este caso el cuerpo es la placa, de forma que únicamente cambia con el tiempo $T = T(t)$.

En un intervalo diferencial de tiempo (dt), la temperatura de la placa incrementa en una cantidad diferencial (dT). Un balance de energía en la placa para el intervalo de tiempo dt se puede expresar como se muestra en la Figura 10.

Lo cual se puede expresar como

$$hA_s(T_\infty - T)dt = mcpdT \quad (1)$$

dado que $m = \rho V$ (donde m=masa, V=Volumen y ρ =densidad y h=coeficiente de pérdidas por transferencia de calor), $dT = d(T - T_\infty)$ y

T_{∞} =Constante , la Ec. (1) puede reescribirse como

$$\frac{d(T - T_{\infty})}{T - T_{\infty}} = -\frac{hA_s}{\rho V C_p} dt \quad (2)$$

Donde A_s =Área superficial de la placa, c_p =capacidad calorífica de la placa. Resolviendo se tiene que:

$$\frac{T_{\infty} - T(t)}{T_{\infty} - T(0)} = e^{-\alpha t} \quad (3)$$

Donde $\alpha = hA_s / (Vc_p)$.

El análisis anterior permite saber que $T(t) - T_{\infty}$ representa la condición de la diferencia de temperatura inicial, que se puede expresar como $\Delta T(0) = T_{\infty} - T_i$. Por otra parte, el salto térmico para el instante t está dado por $\Delta T(t) = T_{\infty} - T(t)$.

Así, la Ec. (3) se puede expresar como:

$$T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t}) \quad (4)$$

Donde $A = T(0)$ y $B = \Delta T(0)$.

Este modelo se ajusta al comportamiento térmico de las superficies con recubrimientos analizados (Figura 11). En el análisis se incluye también una superficie con pintura negra para alta temperatura (comex ®).

También se calculó la relación absorptancia-emitancia (llamada selectividad, y razón por la que se define también a una superficie selectiva) utilizando la siguiente ecuación (5) (Duffie & Beckman, 2013), teniendo en cuenta que el intercambio térmico podría no ser considerado por conducción y convección en la superficie de la placa metálica.

$$\frac{\alpha_{\lambda}}{\epsilon_{ir}} = \frac{\sigma T_{\max}^4}{I} \quad (5)$$

Donde:

T_{\max} = temperatura máxima de la placa

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$, constante de Stefan-Boltzmann

α_{λ} =absorbancia en el espectro solar,

ϵ_{ir} =emitancia en el infrarrojo,

I = irradiación incidente en la placa.

De acuerdo con el arreglo experimental (Figura 3), donde se ha utilizado una fuente de luz de 200W a cierta distancia, la irradiancia que llega a la placa es:

$$I = \frac{200W}{4\pi d^2} = 255 \frac{W}{m^2} \quad (6)$$

La tabla 1 muestra la razón absorptancia-emitancia (selectividad) para cada una de las superficies analizadas.

Esto es representativo, considerando que materiales funcionales costosos y sofisticados en su deposición poseen selectividad de 5 a 10 (Cheng y col., 2013; Cao y col., 2014), y son utilizados para alcanzar altas temperaturas. Por lo que una selectividad mayor a 3 es funcional para las temperaturas a las que operan tecnologías solares térmicas como las cocinas solares.

Con base en la Ec. (4), es posible conocer la cantidad de calor conducido en la superficie selectiva, por la teoría de régimen transitorio, durante el intervalo de tiempo $0 \rightarrow t$, el cual se obtiene a través de:

$$q(0 \rightarrow t) = \rho V c_p (T_0 - T_i) [J] \quad (7)$$

Esta cantidad de calor conducido se traslada a la contracara de la superficie absorbadora. La Figura 12 muestra un análisis del calor conducido, por unidad de área (25 cm², área de la placa), y por intervalo de tiempo para cada superficie analizada hasta alcanzar el equilibrio térmico, el cual se aprecia en la figura 11 se alcanza aproximadamente a los 15 minutos de experimentación con el arreglo experimental de la figura 3.

La funcionalidad del recubrimiento propuesto, con base en hollín de biomasa forestal, y los modelos sugeridos para la caracterización térmica, pueden analizarse como la cantidad de calor transferido al interior de la olla de presión donde se cocinan los alimentos. El análisis de la Figura 10, representa un corte de sección transversal, mientras que la cantidad de calor total conducido de la Figura 12, muestra la cantidad de energía calorífica que se transfiere del recubrimiento que absorbe energía hacia el sustrato de aluminio. Cuanto más se transfiere, el modelo muestra que más es la cantidad de energía absorbida.

Tabla 1. Selectividad en diferentes recubrimientos.

Placa	Hollín	Acrílico	Selectividad
Placa 1	100%	0%	3.4
Placa 2	80%	20%	3.14
Placa 3	60%	40%	3.47
Placa 4	50%	50%	3.1
Placa 5	40%	60%	3.1
Placa 6	20%	80%	3.1
Placa 7	0%	100%	2.23
Placa 8	Pintura alta temperatura		
	100%		3.02

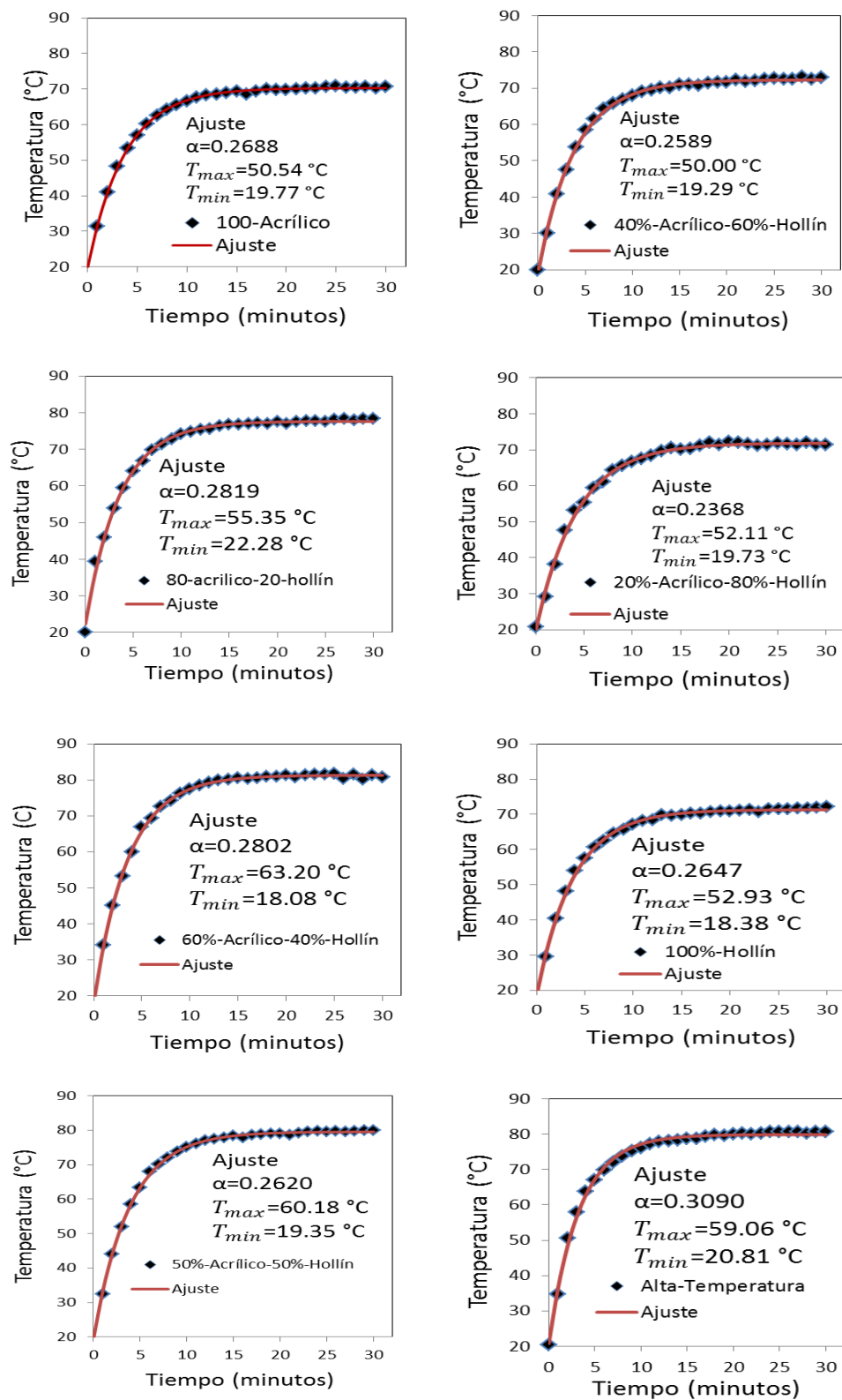


Fig. 11. Modelo de ajuste del comportamiento térmico de las superficies analizadas.

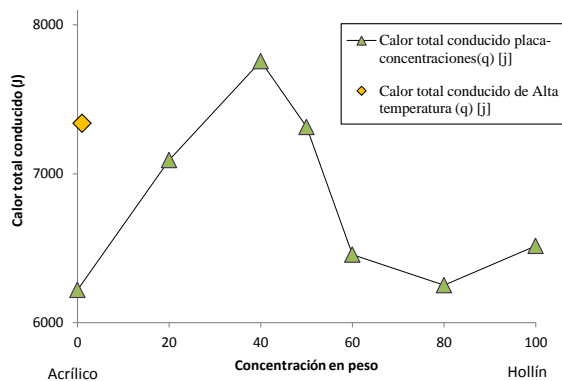


Fig. 12. Calor total "q" conducido en un intervalo de tiempo ($0 \rightarrow t$).

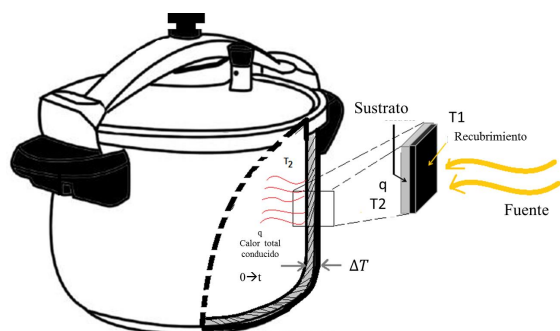


Fig. 13. Análisis térmico de corte transversal de la olla de presión de una cocina solar.

Análogo a las superficies rectangulares con los recubrimientos estudiados, lo que ocurre al trasladar el análisis de la figura 10 como una sección de corte transversal, de la olla de presión de un sistema de cocción solar, es que el calor transferido permite la cocción de los alimentos por acumulación térmica, que se manifiesta con incrementos de temperatura en el fluido o alimento que se utilice al interior de la olla de presión. Lo anterior se muestra en la figura 13.

El modelo anterior sugiere que mediante pruebas de laboratorio con condiciones controladas, es posible analizar y predecir el comportamiento térmico de los recubrimientos analizados en sistemas de cocción solar. Esto porque los materiales utilizados son consistentes con los que se utilizan en sistemas de cocción solar; aluminio como sustrato metálico y los recubrimientos que pueden ser variados para su análisis.



Fig. 14. Cocina Solar Rural (CSR).

3.4 Evaluación térmica-funcional del recubrimiento

El recubrimiento con hollín de biomasa forestal, con el modelo teórico-experimental, demostró ser térmicamente más eficiente que la pintura para alta temperatura comercial. El siguiente procedimiento para contrastar estos resultados, es a través de la evaluación de los recubrimientos con pruebas de funcionalidad en tecnologías solares térmicas, en este caso sistemas de cocción solar.

Las pruebas para la caracterización térmica de cocinas solares generalmente son tres: rendimiento térmico, tiempo de calentamiento y potencia de cocción. Los parámetros antes mencionados se calculan utilizando procedimientos estándar que involucran variables controladas dependiendo del diseño del sistema de cocción solar, y variables no controlables como la radiación solar, la velocidad del viento, el índice de nubosidad y la temperatura ambiente (González-Avilés y col, 2017).

Para llevar a cabo las pruebas de caracterización térmica y evaluar el recubrimiento de hollín, así como compararlo con la pintura de alta temperatura y contrastar resultados del modelo antes descrito, se utilizó la cocina solar rural (López y col., 2014), figura 14; este dispositivo cuenta con un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) en tres dimensiones como colector solar, un sistema de seguimiento solar manual y un almacenador de alimentos que es una olla de presión donde se coloca el recubrimiento

absorbedor solar.

Las pruebas de caracterización térmica en la cocina solar se realizaron colocando sobre distintas ollas de presión el recubrimiento 60%acrílico-40% hollín y la pintura negra comercial para alta temperatura. Todas las pruebas se realizaron al medio día solar y bajo los estándar de evaluación internacionales (ASAE S580; Kundapur y col., 2009; Pejack, 2003).

Para conocer la funcionalidad del recubrimiento en la CSR, se analizarán los parámetros térmicos que definen la eficiencia del dispositivo. El recubrimiento de hollín se aplicó en una olla de presión de 5 litros de capacidad, la cual fue utilizada para la evaluación de los parámetros térmicos de la CSR.

La principal figura de mérito analizada, bajo la norma ASAE S580 es la potencia de cocción estándar (ASAE S580). Los criterios más importantes, para determinar la potencia de cocción estandarizada, según marca el protocolo son:

- Medición y registro de la temperatura promedio del agua dentro de una olla, de la temperatura ambiente y la irradiancia directa en intervalos de 5 minutos.
- En condiciones de viento fuerte (mayor a 2 m/s) durante más de 5 minutos, alta variación de la insolación (+100 watt/m²), baja variación de insolación (-100 watt/m²) o baja temperatura ambiente (menor a 20 °C), las pruebas se invalidan.

El cálculo para su obtención se hace multiplicando la diferencia de temperatura ΔT (Temperatura del agua-temperatura ambiente), en los 5 minutos de cada medición que se realiza según esta norma, por la masa de agua contenida (m) en la olla, por el calor específico del agua ($C_p = 4.186 \text{ J/kgK}$) dividido entre el tiempo transcurrido $\Delta\tau = 300$ segundos de cada medición.

$$P_c = mc_p \frac{dT}{d\tau} \quad (8)$$

donde:

P_c = potencia de cocción,

$dT/d\tau$ = derivada de la temperatura respecto al tiempo.

Para obtener la potencia de cocción estándar, la potencia de cocción se normaliza a un valor de 700 W/m² a través de la siguiente ecuación.

$$P_s = P_c \left(\frac{700(\text{W/m}^2)}{I} \right) \quad (9)$$

donde:

I = irradiancia promedio en el intervalo de tiempo (W/m²),

P_c = potencia de cocción (W),

P_s = potencia de cocción estándar (W).

Los resultados se muestran al graficar P_s como función de la diferencia de la temperatura del agua y del ambiente $\Delta T = T_{\text{agua}} - T_{\text{amb}}$, y se aplica la técnica de regresión lineal. La prueba es válida si el coeficiente de correlación es mayor de 0.7. Para estandarizar procedimientos, se establece que se debe reportar la potencia de cocción estándar, que corresponde a una diferencia de temperatura de $\Delta T = 50 \text{ °C}$ para la ecuación resultante de la recta de regresión lineal. El resultado se expresa en watts [W]. La prueba debe realizarse de las 10:00 a las 14:00 horas tiempo solar para que sea efectiva.

Para el cálculo de la derivada se han usado fórmulas numéricas de tres puntos (Burden & Faires, 1993);

En el punto inicial:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{-3T_i + 4T_{i+1} - T_{i+2}}{2\Delta\tau} \quad (10)$$

En los puntos centrales:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta\tau} \quad (11)$$

En el punto final:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i-2} - 4T_{i-1} + 3T_i}{2\Delta\tau} \quad (12)$$

Se han usado estas expresiones porque aproximan mejor a la derivada que aparece en la ecuación (8), que la usada comúnmente en este tipo de pruebas:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta\tau} \quad (13)$$

Otro parámetro evaluado fue el cálculo del rendimiento, el cual se estima usando la expresión (Kundapur & Sudhir, 2009):

$$\eta = \frac{mc_p(T_{w2} - T_{w1})}{A \int I d\tau} \quad (14)$$

donde:

A =área de captación

I =irradiancia solar

T_{w1} =temperatura del agua

T_{w2} =temperatura ambiente

Así mismo, se estimó el tiempo de calentamiento, que se calcula al 95% de la temperatura máxima alcanzada durante el tiempo de prueba de exposición

a la radiación solar (Pejack, 2003). Este parámetro define el tiempo del sistema en alcanzar el tiempo mínimo de referencia para una vez alcanzado iniciar la cocción de alimentos. Cuanto más tarda el tiempo de calentamiento, más demora la cocción; por ello es un parámetro comparativo bastante útil. Si un recubrimiento reduce el tiempo de calentamiento de estos sistemas, el cocinado de los alimentos se verá aminorado.

Para ambos parámetros, rendimiento térmico y tiempo de calentamiento, son utilizados los datos del protocolo de potencia de cocción estándar que están definidos como protocolos estándar.

3.4.1 Instrumentación para evaluación térmica funcional del recubrimiento

La instrumentación utilizada en estas pruebas fue la siguiente:

- Piranómetro portátil Hukseflux con datalogger modelo LP02, con resolución de $\pm 1\%$
- Dos termopar tipo k.
- Un termómetro con dos terminales para sensor de temperatura tipo k, modelo UT-325 (Resolución: $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Un vaso de precipitado de 500 mililitros.
- Un anemómetro con medidor de temperatura ambiente skywatch atmos.

3.4.2 Resultados de evaluación de parámetros térmicos

Las pruebas para obtener los parámetros térmicos se realizaron entre las 10:00 y las 14:00 horas solar, en la ciudad de Morelia, Michoacán (19.700, -101.186). La irradiancia promedio durante la prueba fue de 783 w/m^2 , pero las mediciones se registraron de forma puntual para cada medición de acuerdo a los parámetros descritos anteriormente; no se registró variación abrupta de irradiancia durante el intervalo de prueba. La velocidad del viento fue nula, por lo que las pruebas con las que se obtuvieron los resultados fueron válidas.

El rendimiento térmico es mayor para para la pruebas con recubrimiento de hollín (Tabla 2). La potencia de cocción estandarizada también es más alta para el recubrimiento de hollín, como se muestra en la figura 15.

Tabla 2. Rendimiento térmico.

Superficie	Rendimiento térmico (%)
Recubrimiento de alta temperatura	35
Recubrimiento hollín	45

Los últimos parámetros que se calcularon fueron el tiempo de calentamiento y el inicio de tiempo de cocción (Pejack, 2003). La Figura 16 muestra el tiempo de calentamiento y cocción. Este tiempo de calentamiento es donde la masa del recipiente ha alcanzado el 95% de su aumento de temperatura final; dado que el cocinado de alimentos se realiza en dos periodos de tiempo, el primer periodo estima el tiempo en que el sistema alcanza la temperatura máxima, por debajo de esta temperatura se sitúa el tiempo de calentamiento, una vez que el sistema se estabiliza y alcanza equilibrio térmico el tiempo de cocción da inicio. El tiempo de calentamiento es de 101.7 minutos para la olla con recubrimiento de pintura de alta temperatura, mientras que el tiempo de cocción se considera a partir que finaliza el tiempo de calentamiento. Para el recubrimiento propuesto, los resultados fueron mejores que los obtenidos con pintura para alta temperatura; en este caso, el tiempo de calentamiento fue de 84.7 minutos, desde allí el tiempo de cocción. Lo anterior muestra que, a partir de un análisis comparativo de los alimentos cocinados, el uso del recubrimiento propuesto tardará aproximadamente 18 minutos menos que si se utiliza el recubrimiento de pintura para alta temperatura.

Los resultados anteriores pueden integrarse en la Figura 17. Lo que demuestra la funcionalidad del hollín como material de absorción de energía solar, de bajo costo, bajo impacto ambiental al ser un material de desecho y con gran capacidad de réplica como recubrimiento; que además puede ser utilizado en tecnologías solares térmicas.

Los resultados anteriores son consistentes con el modelo teórico experimental de superficies selectivas de pequeñas dimensiones.

3.5 Aplicación del recubrimiento con base en hollín de biomasa forestal

De acuerdo con las características del recubrimiento: de bajo costo, fácil réplica, bajo impacto ambiental y eficiencia de absorción solar; éste se utilizó en sistemas de cocción solar que fueron implementados en una comunidad indígena del estado de Michoacán, Nurio, municipio de Paracho (López y col., 2016).

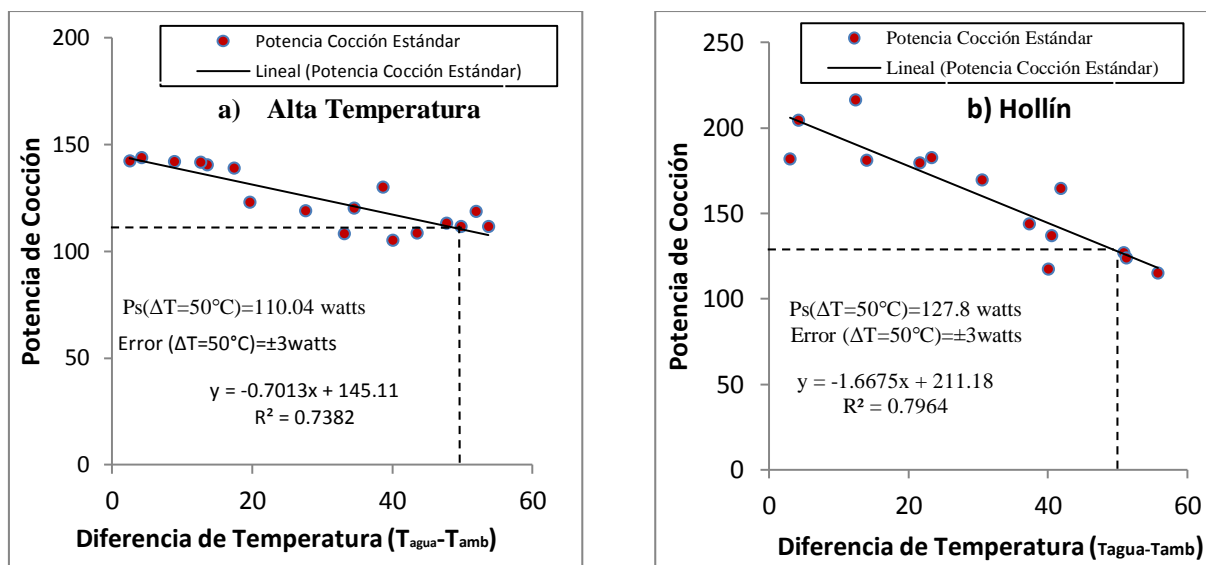


Fig. 15. Potencia de cocción estandarizada.

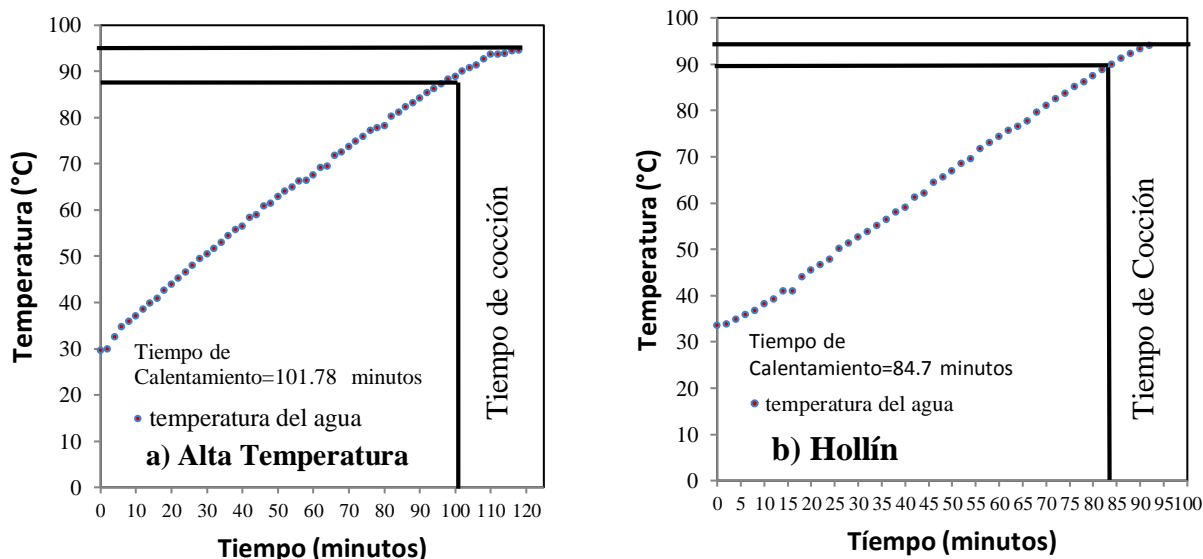


Fig. 16. Tiempo de calentamiento y cocción.

Se implementaron 37 sistemas de cocción solar con el recubrimiento de hollín de biomasa forestal (Figura 18).

Hasta ahora los beneficiarios de las cocinas solares han podido replicar el recubrimiento para depositarlo a las ollas de presión donde cocinan los alimentos, principalmente cuando el recubrimiento se cae por el desgaste del uso frecuente de estas tecnologías.

Conclusiones

- Se ha descubierto que el hollín de biomasa forestal como un nuevo recubrimiento de absorción de energía solar es funcional en tecnologías solares térmicas, como cocinas solares; propuesta que no se ha reportado hasta ahora en la literatura científica. Por lo que se vislumbra una línea de investigación que profundice en este nuevo campo de estudio.

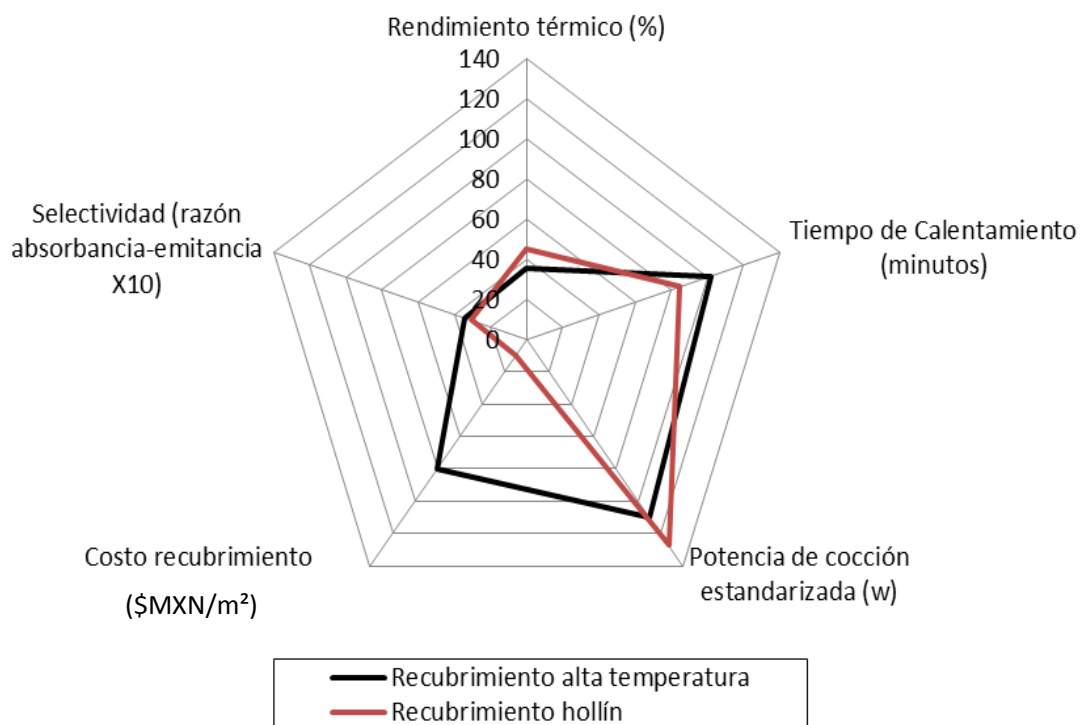


Fig. 17. Análisis comparativo energético-económico de los recubrimientos caracterizados recubrimientos.



Fig. 18. Implementación de sistemas de cocción solar con recubrimiento absorbente solar de hollín.

- El análisis de los perfiles de temperatura propone una ecuación para predecir el comportamiento térmico derivado de la absorción de energía solar en superficies selectivas, variando el sustrato y el recubrimiento. Se han identificado parámetros que dependen tanto del sustrato como del revestimiento, por lo que se puede pensar en un modelo matemático útil y eficaz para futuras investigaciones, que permita escalar el análisis térmico a tecnologías solares térmicas antes de hacer pruebas con radiación solar, con la finalidad de optimizar materiales y tiempo.
- En pruebas de rendimiento térmico, potencia de cocción y tiempo de calentamiento y tiempo de cocción, en un sistema de cocción real (CSR), el recubrimiento de hollín propuesto es mejor que la pintura comercial de alta temperatura, lo que puede traducirse en una reducción de aproximadamente 18 minutos en la cocción de alimentos.
- Los valores de absorción-emitancia de las superficies analizadas son consistentes con el comportamiento térmico analizado y estimado con el modelo desarrollado, debido a que la absorción está vinculada al aumento de la temperatura. Comparando la selectividad del recubrimiento de hollín, ésta es aceptable considerando su bajo costo y sencilla elaboración.
- El recubrimiento de hollín procedente de la biomasa forestal es funcional y se prevé un campo de aplicación para todo tipo de tecnologías solares térmicas. Tal como se ha utilizado en la implementación que se llevó a cabo en la comunidad de Nurio, municipio de Paracho, Michoacán, México. Además, el hollín pasa de ser un material peligroso para la salud pública a ser un material con valor agregado que puede auspiciar un intercambio comercial en comunidades rurales.
- La presente trabajo apertura una línea de investigación para recubrimientos con hollín de biomasa forestal; en próximos trabajos se sugiere realizar la caracterización del hollín a través de técnicas como difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido y transmisión, con la finalidad de reportar todas las características intrínsecas de este

material, así como optimizar el desarrollo de un recubrimiento más eficiente, a través del procesamiento de este material. Es por lo anterior que el presente trabajo vislumbra un campo de investigación que nos e ha reportado hasta ahora en la literatura científica.

Nomenclatura

t	tiempo
T_{∞}	temperatura de equilibrio
T_i	temperatura inicial
V	volumen de la placa
m	masa
q	calor total conducido
T	temperatura
T_0	temperatura inicial
C_p	capacidad calorífica
A_s	área superficial
h	coeficiente de pérdidas por transferencia de calor
P_s	potencia de cocción estandarizada
I	irradiancia en la placa
d	distancia
<i>Símbolos griegos</i>	
ρ	densidad
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}$)
α	pendiente de incremento de temperatura
ϵ_{ir}	emitancia en el infrarrojo
α_{λ}	absortancia en el espectro solar

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), proyecto No. 166126 y 247719, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán para llevar a cabo el presente trabajo.

Referencias

-
- ASAE S580, (2003) Testing and Reporting Solar Cooker Performance. American Society of Agricultural Engineers, ASAES580 JAN03, pp.824-826
 - Barrera-Calva, E., Martínez-Flores, J. C., Ávila-García, A., Rodil, S., Huerta-Arcos, L., & Viveros-García, T. (2005). Superficial

- characterization of Co and Co-Fe oxide films. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 4, 147-156.
- Burden, R.L., Faires, J.D., (1993). *Numerical Analysis*, fifth ed. Prindle, Weber & Schmidt, Publishing Company, Boston
- C. E. Kennedy (2002). Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials, NREL/TP-520-31267, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Cao, F., McEnaney, K., Chen, G., & Ren, Z. (2014). A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers. *Energy & Environmental Science* 7, 1615-1627.
- Carabali, G., Castro, T., De la Cruz, W., Peralta, O., Varela, A., Amelines, O. & Policroniades, R. (2016). Morphological and chemical characterization of soot emitted during flaming combustion stage of native-wood species used for cooking process in western Mexico. *Journal of Aerosol Science* 95, 1-14.
- Cheng, J., Wang, C., Wang, W., Du, X., Liu, Y., Xue, Y. & Chen, B. (2013). Improvement of thermal stability in the solar selective absorbing Mo-Al₂O₃ coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 109, 204-208.
- Correa F, González M, Servín H, Márquez F, Rutiaga G, Lemus A and Alonso V 2014 Development of a selective low cost absorbing surface based on soot for solar thermal applications. *Energy Procedia* 57, 1565-72.
- Correa, F., González, M., Servín, H., Márquez, F., Rutiaga, J. G., Lemus, A. A., & Alonso, V. (2014). Development of a selective low cost absorbing surface based on soot for solar thermal applications. *Energy Procedia* 57, 1565-1572.
- Duffie, J.A. & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 3a ed. Nueva York.
- Fernández, D. (1992). Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Santander: Servicio de Publicaciones, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.
- Fullerton, D. G., Bruce, N., & Gordon, S. B. (2008). Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 102, 843-851.
- González-Avilés, M., López-Sosa, L.B., Servín-Campuzano, H. & González-Pérez, D. (2017). Adoption sustainable technology of solar cookers in indigenous and rural communities of Michoacán. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17, 273-282.
- Gonzalez-Avilés, M., López-Sosa, L.B., Servín-Campuzano, H. & González Pérez, D. (2013). Desarrollo, implementación y apropiación de cocinas solares para el medio rural de Michoacán: una alternativa energética para la conservación de recursos forestales maderables. *Revista Energías Renovables de la ANES* 17, 12-15.
- Karami, M., Akhavan, M. A., Bahabadi, S., Delfani, & Ghoozati, A. (2014). A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 121, 114-118.
- Kittessa T., Roro, Ngcal T, & Andrew F. (2012). Preparation and characterization of carbon/nickel oxide nanocomposite coatings for solar absorber applications. *Applied Surface Science* 258, 7174-7180.
- Konttinen, A, Kilpi, R & Lund, D. (2003). Microstructural analysis of selective CyAl₂O₃yAl solar absorber surfaces. *Thin Solid Films* 425, 24-30.
- Konttinen, P, Lund P.D., Kilpi, R.J. (2003). Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 79, 273-283.
- Kundapur C. & Sudhir V. (2009). Proposal for new world standard for testing solar cooker. *Journal of Engineering Science and Technology* 4.
- Kundapur C. & Sudhir V. (2009). Proposal for new world standard for testing solar cooker. *Journal of Engineering Science and Technology* 4.
- Liqiong, A., Syed, T., Søndergaard, T., Nørgaard, J., Tsao, Y. & Kjeld, P. (2015). Optimization of

- TiAlN/TiAlON/Si₃N₄ solar absorber coatings. *Solar Energy* 118, 410-418.
- López Sosa, L. B, González-Avilés, M., Pérez, D. G., & Gutiérrez, Y. S. (2014). Rural solar cookers, an alternative to reduce the timber resource extraction through the use of renewable energy sources: Technology transfer and monitoring project. *Energy Procedia* 57, 1593-1602.
- López Sosa, L. González-avilés, M., & Hermelinda Servín Campuzano (2016). Ecotécnicas y tecnologías solares térmicas: proyecto de implementación tecnológica en el sector rural michoacano. *Revista de Energías Renovables*. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). No. 17. ISSN: 2395-9304.
- Masera, O., Edwards, R., Arnez, C. A., Berrueta, V., Johnson, M., Bracho, L. R. & Smith, K. R. (2007). Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy for Sustainable Development* 11, 45-56.
- Meinel, A. (1982). Aplicaciones de la energía solar. Barcelona. Editorial Reverté.
- Monroy, M. (1995). Comportamiento térmico de cerramientos soleados: un modelo de simulación por diferencias finitas. Tesis Doctoral. Universidad de la Plamas de Gran Canaria. pp. 35-44.
- Oelhafen, P & Schüler, A (2005). Materiales nanoestructurados para la conversión de energía. *Solar Energy* 79, 110-121.
- Passamai, V., Passamai, T., Pareja, S. y Pizarro, L, (2007). Física térmica de una cocina solar de pequeñas dimensiones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11.
- Pejack, E. (2003). Technology of solar cooking. Self-published on Internet. Prof. at University of the Pacific. Available at <http://solarcooking.org/Pejack-on-solar-cooker-technology.pdf>
- Peña, G. M. Caracterización óptica de recubrimientos a base de hollín para aplicaciones solares. Congreso Nacional de Física. (IX: 9-13 octubre, 2017: Monterrey, Nuevo León, México). Memorias. Asociación Mexicana de Física. pp.66.
- SchuK, A., Geng, J, Oelhafen, Brunold, S., Gantenbein, P, Frei, U. (2000). Application of titanium containing amorphous hydrogenated carbon "lms (a-C : H/Ti) as optical selective solar absorber coatings. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 60, 295-307.
- Servín, H., Peña, M., Sobral, H., & González, M. (2017, January). Thermal and optical analysis of selective absorber coatings based on soot for applications in solar cookers. In *Journal of Physics: Conference Series* 792,012095.
- Zou, C. & LexiShao, W. (2016). Functional multi-layer solar spectral selective absorbing coatings of AlCrSiN/AlCrSiON/AlCrO for high temperature applications. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 153, 9-17.