



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS  
"MAT. LUIS MANUEL RIVERA GUTIÉRREZ"

## DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FOTOTÉRMICO DE UN RECUBRIMIENTO HECHO A BASE DE HOLLÍN

Tesis para obtener el grado de  
Licenciado en Ciencias Físico Matemáticas

PRESENTA  
Herminio Rebollo Sandoval

Asesor:  
Doctor en Física Luis Mariano Hernández Ramírez

Morelia, Michoacán; octubre de 2017



## DEDICATORIA

A mis padres que siempre me han apoyado en todo este tiempo.

A mi asesor por el tiempo y paciencia que me tuvo en la realización de este trabajo.

A familiares y amigos que han estado a mi lado en este proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONACyT por el apoyo otorgado para llevar a cabo este trabajo de tesis, con el proyecto 247719 CONACyT Problemas Nacionales 2014.

## ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
1. Introducción	6
1.1 Motivación.....	7
1.2 Objetivos.....	8
2. Marco teórico	9
2.1 Estufas solares.....	9
2.2 Estudios acerca del hollín.....	13
2.3 Materiales y propiedades térmicas de la materia.....	14
2.4 Mecanismos de transferencia de calor.....	17
2.4.1 Conducción.....	18
2.4.2 Convección.....	21
2.4.3 Radiación.....	21
2.4.4 Conducción de calor en estado transitorio.....	23
3. Desarrollo experimental	26
3.1 Sensor de temperatura.....	26
3.2 Arreglo óptico.....	28
3.3 Preparación de muestras.....	28
3.4 Adquisición de datos.....	29
4. Resultados y discusión	31
4.1 Calibración del sensor.....	31
4.2 Resultados de la variación del área de recubrimiento de hollín.....	32
4.3 Resultados de la variación del espesor de recubrimiento de hollín.....	38
4.4 Variación del espesor de la placa de acero.....	41
4.5 Resultados del análisis de transferencia de calor en estado transitorio.....	42
5. Conclusiones.....	48
Referencias	50
Anexo I. Código del programa de medición de temperatura para la placa Arduino	52

## RESUMEN

Se presentan los resultados del comportamiento fototérmico de una superficie que está hecha a base de hollín de resina de pino, que tiene la propiedad de mejorar la absorción de calor en una estufa solar, con el propósito de obtener información del material en sí, como son los parámetros que afectan la absorción y posterior transferencia de calor, tales como el área recubierta y el espesor del hollín sobre el sustrato.

El recubrimiento de hollín se depositó sobre placas metálicas de acero inoxidable, el montaje experimental consistió en una fuente de luz para iluminar el recubrimiento para después emplear un arreglo de sensores de temperatura desarrollado en el Laboratorio de Películas Delgadas y Caracterización de Materiales de la facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la UMSNH, capaz de tomar los datos de temperatura en función del tiempo. Primeramente se llevaron a cabo pruebas fototérmicas sobre las placas de acero sin el recubrimiento con fines comparativos. Posteriormente variamos los parámetros de espesor y el área de recubrimiento de hollín sobre la placa de acero inoxidable. Encontramos que la temperatura aumentaba de manera proporcional al área recubierta de hollín, por otro lado se observó que al variar el espesor del recubrimiento de hollín la temperatura aumentó respecto de la muestra sin recubrimiento, para posteriormente tener un decaimiento de la temperatura al incrementar el espesor, de modo que se puede inferir que existe un espesor crítico con el cual se alcanza la máxima temperatura sobre la placa. Finalmente fue posible ajustar los datos experimentales de la temperatura en función del tiempo con un modelo de transferencia de calor en estado transitorio ( $T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t})$ ), con el cual se obtuvo información de los parámetros  $\alpha$  y  $B$  del modelo antes mencionado, los cuales están relacionados con el sustrato, y con el recubrimiento, respectivamente. Teniendo una constante promedio  $\alpha = 0.0083 \pm 0.0004 (s^{-1})$ , y un parámetro  $B$  que depende del área recubierta y del espesor del hollín.

Palabras clave: Recubrimiento, estufa solar, hollín, sensor de temperatura, área y espesor del recubrimiento.

## ABSTRACT

The results of the photothermal behavior of a surface that is made of pine resin soot, which has the property of improving the absorption of heat in a solar stove, are presented, with the purpose of obtaining information of the material itself, as they are the parameters that affect the absorption and subsequent heat transfer, such as the coated area and the thickness of the soot on the substrate.

The soot coating was deposited on stainless steel metal plates, the experimental setup consisted of a light source to illuminate the coating and then used a temperature sensor array developed in the Laboratory of Thin Films and Characterization of Materials of the faculty of Physics-Mathematical Sciences of the UMSNH, able to take the temperature data as a function of time. Photothermal tests were first carried out on the steel plates without the coating for comparative purposes. We then vary the thickness parameters and the coating area of soot on the stainless steel plate. We found that the temperature increased proportionally to the area covered with soot, on the other hand it was observed that when varying the thickness of the coating of soot the temperature increased with respect to the uncoated sample, later to have a temperature decay by increasing the thickness, so that it can be inferred that there is a critical thickness with which the maximum temperature is reached on the plate. Finally it was possible to adjust the experimental data of the temperature as a function of time with a transient state heat transfer model ( $T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t})$ ), with which it was obtained information of the parameters  $\alpha$  and  $B$  of the aforementioned model, which are related to the substrate, and to the coating, respectively. Having a mean constant  $\alpha = 0.0083 \pm 0.0004$  ( $s^{-1}$ ), and a parameter  $B$  which depends on the coated area and the thickness of the soot.

Keywords: coating, solar stove, soot, temperature sensor, area and thickness soot coating

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día uno de los grandes retos que enfrentan las sociedades modernas es el de la creciente contaminación, producida principalmente por el uso de combustibles fósiles. A medida que pasa el tiempo y aumenta la población a nivel mundial se hace evidente que se tienen mayores gastos energéticos, que con el transcurso de los años se irán agotando inevitablemente, es por esta razón que se deben estudiar alternativas energéticas para satisfacer las necesidades del ser humano a corto y largo plazo.

Desde hace varias décadas se han ido implementando tecnologías ecológicas en todo el mundo para atacar el problema de la contaminación, como por ejemplo los paneles solares, los generadores eólicos o las estufas solares, aunque cabe mencionar que su aceptación social aún tiene cierto escepticismo debido a su eficiencia, ya que su funcionamiento depende en gran medida de las condiciones climatológicas. Es por ello que se deben mejorar dichas tecnologías para que crezca su utilización como alternativa energética.

La ciencia y la tecnología de los materiales han sido de gran importancia a lo largo de la historia de la humanidad, ya que han contribuido a su progreso y desarrollo. El estudio y comprensión de las distintas propiedades de la materia es fundamental para desarrollar aplicaciones que ayuden al mejoramiento de procesos y utensilios que utilizamos día con día. La optimización, en este caso de las estufas solares, se puede llevar a cabo en los diferentes componentes que la constituyen, como el reflector, y el recipiente de cocción, el primero para que refleje la mayor cantidad de energía solar y el segundo para que la absorba. Es en este punto donde el conocimiento de los materiales juega un papel de gran importancia para el mejoramiento de estos artefactos, y de esta manera generar una mayor confianza entre las personas para su utilización.

Básicamente en la literatura encontramos pocos trabajos que hablen acerca de estudios llevados a cabo en el hollín, algunos tratan sobre su generación en motores de combustión interna [1] y en hornillas de uso doméstico [6], ambos trabajos encaminados a disminuir las cantidades de hollín dado que es un subproducto de la combustión que genera problemas ambientales.

Aunque podemos hablar de que ya sea en la combustión de derivados del petróleo o de la combustión de biomasa (leña, carbón vegetal, resina), se observan cuatro fases en la formación del hollín; la pirolisis, la nucleación, crecimiento y la aglomeración [1].

En este trabajo se tiene como motivación mejorar el sistema absorbedor, que es el recipiente donde se contienen los alimentos de una estufa solar parabólica, el cual comúnmente se localiza en el punto o región donde los reflectores concentran la radiación solar; estos recipientes completan el ciclo termo-conversor del sistema de cocción solar [2].

Los estudios realizados en esta área son relativamente pocos, en algunos casos solo se menciona que se debe pintar el recipiente de cocción con pintura negra [4], sin especificar qué tipo de pinturas o concentración de la misma, tampoco se hace mención de si el espesor afecta o no la capacidad de absorbancia.

Existen estudios en los cuales se ha utilizado cromo negro como absorbedor selectivo en calentadores de agua solares [3, 4], demostrando su efectividad a la hora de absorber radiación infrarroja. La fabricación de estos materiales se hace mediante galvanoplastia lo cual hace que aumenten los costos.

En otros trabajos realizados en la UIIM se llevó a cabo el estudio de películas de hollín en el recipiente de cocción de una estufa solar. Se puso de manifiesto que la película de hollín de resina de pino presentaba las mejores propiedades de absorbancia térmica [2]. Basados en este tipo de estudios es que surge la idea de desarrollar un trabajo encaminado a investigar diferentes parámetros en la película de hollín de resina de pino que la puedan hacer más eficiente. En trabajos como el de Bernardo Sosa [18], se realiza un estudio con una metodología similar a la presentada en este trabajo. Dicho trabajo se centra en el estudio de mezclar el hollín con aglutinantes y observar cual presenta las mejores características de costo-beneficio, variando la proporción hollín-aglutinante.

En este trabajo se utiliza el hollín sin aglutinantes y se observa cómo afecta la variación del área recubierta y el espesor del recubrimiento para transferir calor a la placa de acero.

## 1.1 MOTIVACIÓN

El mejoramiento de la calidad de vida y el desarrollo de la sociedad en convivencia con nuestro medio ambiente, es parte de la labor de realizar trabajos de investigación y la finalidad de las ciencias.

Con los retos energéticos que enfrentamos hoy día, y los problemas de contaminación con sus efectos nocivos para la salud, tenemos la necesidad de investigar y buscar soluciones para estos problemas.

La necesidad de contar con un recubrimiento de bajo costo, como es el hollín, para su posible aplicación en tecnologías sustentables, como pueden ser estufas solares o calentadores solares de agua, es la motivación principal para llevar a cabo este trabajo de investigación. Para estos fines se tienen aspectos tales como su fácil obtención, ya que es un material de desecho de la combustión de biomasa que es ampliamente utilizada, y de su sencilla aplicación que puede realizar el mismo usuario en caso de que se dañe el recubrimiento sin tener que recurrir a métodos o procesos sofisticados, con lo cual se abaratan los costos y lo hacen económicamente viable.



## 1.2 OBJETIVOS

Trabajos realizados con el hollín muestran que aumentan la captación de radiación solar en recipientes de cocción de estufas solares [2], aunque dichos trabajos no muestran cómo afectan parámetros tales como el espesor o el área recubierta con el hollín, además de que las pruebas se realizan con las estufas mismas, lo cual dificulta los experimentos. Darle un sustento científico y metodológico a este tipo de tecnologías es parte esencial en este trabajo y para ello nos planteamos los siguientes objetivos:

- i. Determinar el comportamiento fototérmico del recubrimiento de hollín de resina de pino variando parámetros tales como el espesor y el área recubiertos sobre una placa de acero.
- ii. Implementar un montaje experimental en el laboratorio que nos permita simular las condiciones del sistema de cocción solar para las pruebas de calentamiento de las muestras, con la finalidad de no tener que realizar éstas con una estufa solar en campo. Porque dichas pruebas son tardadas al ser afectadas por condiciones climatológicas tales como el viento y la nubosidad, ya que un viento fuerte (mayor a 2 m/s) por más de 5 minutos, una alta variación de insolación (causada por la nubosidad), o una baja temperatura (menor a 20 °C) invalidan la prueba.

## Capítulo 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ESTUFAS SOLARES

Es un hecho que el consumo energético está directamente relacionado con la calidad de vida y por ende con el desarrollo de una nación, es por ello que desde que tuvo lugar la llamada revolución industrial los gastos energéticos se han ido incrementando, esto ha ocasionado que los recursos tales como los combustibles fósiles se estén agotando [5]. Pero más allá de que algún día se agote las fuentes de energía se tiene el problema de la contaminación que provoca su uso indiscriminado, tal es el caso del dióxido de carbono que alojado en la atmosfera en grandes cantidades provoca lo que se conoce como efecto invernadero. Es por esta razón que se debe voltear a ver las energías renovables como una opción para minimizar los efectos nocivos que causa el uso de los combustibles convencionales.

Las fuentes renovables de energía son aquellas que son inagotables y no producen ningún tipo de contaminante durante su producción ni durante su utilización. Dentro de estas fuentes encontramos la energía que nos proporciona el sol, llamada energía solar, con este tipo de energía es con la que funciona una cocina solar. Las cocinas solares son tecnologías que marcan un punto de partida en el aprovechamiento de fuentes alternas de energía, en este caso la energía solar. Estas tecnologías solares térmicas, logran la cocción de alimentos con ayuda de la radiación solar, en intervalos de tiempo variados. El uso adecuado de las cocinas solares pueden mitigar la extracción y consumo de leña, generar un ahorro económico familiar reduciendo la compra de gas LP o leña, así como reducir las emisiones de bióxido de carbono emitidas por la quema de combustibles fósiles y sin hacer a un lado la posibilidad de mitigar las enfermedades respiratorias, en aras de casa, a causa de la inhalación de humo de combustión [2].

Realmente no se tiene una fecha exacta acerca del uso y conocimiento de la energía solar, en algunos casos se dice que comenzó en Alemania a mediados del siglo XVII [2]. Y por esas épocas el físico suizo Saussure también comenzó a realizar estudios en esa área, éste se centró en la capacidad que tenía el vidrio de atrapar el calor (acumulación). Desde esas épocas hasta nuestros días la aceptación de este tipo de tecnologías ha sido bastante escaso, en medida porque no se comprende bien su funcionamiento, y otra razón es que en décadas anteriores se ha tenido abundancia de otras fuentes de energía, aunque no renovables pero que han cumplido con las expectativas de las sociedades en los últimos años.

En México las primeras aplicaciones de estufas solares se remontan a 1955 cuando la universidad de Wisconsin donó algunos de estos artefactos para ser utilizados en las zonas rurales no electrificadas intentando disminuir el uso excesivo de leña. Más

recientemente se han estado haciendo investigaciones para mejorar su eficiencia y también en la concientización sobre su uso.

Todas las cocinas solares, como su propio nombre indica, tienen un denominador común que es el uso de la radiación solar para ayudar a los alimentos a alcanzar altas temperaturas de cocción. Dentro de la familia de las cocinas solares, la clasificación que se utiliza divide a estos dispositivos en tres grandes grupos, que son los principales modelos de cocina que están actualmente más desarrollados y en mayor uso. Estos modelos son la cocina CookIt, el horno solar y la cocina parabólica [5].

Los sistemas de cocción solar, son termo-conversores solares, se definen como dispositivos capaces de transformar la radiación del sol, en poder calorífico suficiente para lograr la cocción de alimentos en intervalos de tiempo variados. Estos sistemas se clasifican en dos grupos: de concentración y tipo caja [2].

La acumulación es también conocida como “efecto invernadero”, en éste los rayos provenientes del sol atraviesan el cristal y quedan atrapados dentro de la caja de acumulación logrando de esta manera que aumente la temperatura en su interior [5] como se muestra en la figura 2.1, y de esta manera se pueden cocinar los alimentos.

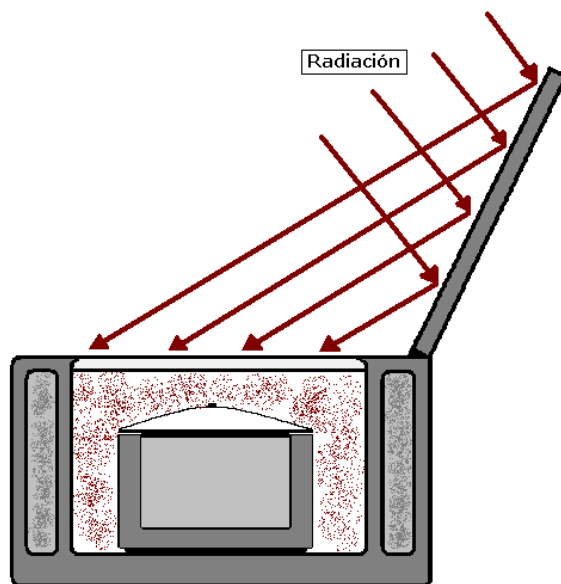


Figura 2.1. Estufa solar de acumulación [5].

Por la directa incidencia de los rayos sobre las superficies, éstas deben estar pintadas de negro, ya que está demostrado que el color negro es un absorbente [4].

En el sistema de concentración lo que se desea es que las ondas provenientes del sol converjan en un punto común, si utilizamos una superficie curvada, llamada parabólica, y forramos su interior con material reflectante podemos predecir cuál va a ser la dirección

de propagación de las ondas que incidan sobre la superficie anteriormente descrita [5]. El punto común en donde vamos a concentrar las ondas reflejadas se conoce como foco.

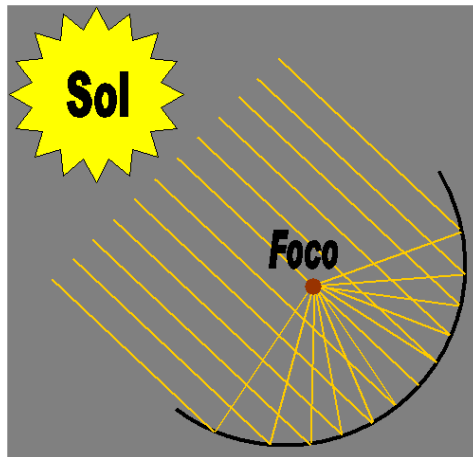


Figura 2.2. Estufa solar de concentración [5].

Al concentrarse todas las ondas reflejadas en ese punto común (foco), provocara una alta temperatura en dicho punto, la figura 2.2 muestra un esquema de su funcionamiento. Este tipo de sistema depende directamente de la orientación de la superficie parabólica respecto del sol.

Los sistemas de concentración se componen de dos elementos básicos, como se muestra en la figura 2.3, que son: el reflector, el cual se encarga de concentrar la radiación solar en un punto o región, y el absorbedor de almacenamiento para la cocción, éste contiene el alimento que se desea cocinar, y comúnmente se localizan en el punto o región donde los reflectores concentran la radiación solar; estos recipientes completan el ciclo termo-conversor del sistema de cocción solar [2].

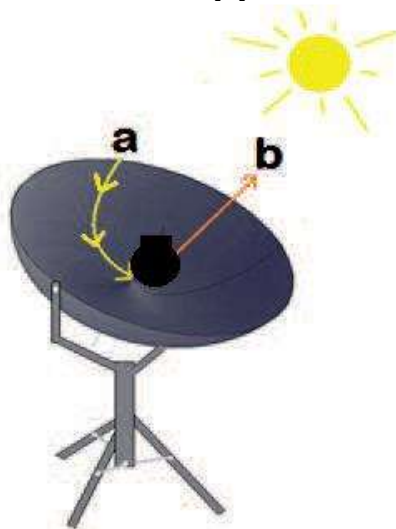


Figura 2.3. Ejemplo del sistema termo conversor de una estufa solar. (a) Región donde se concentran los rayos solares, (b) absorbedor de almacenamiento para la cocción [2].

En el caso de las estufas solares se tienen diferentes normativas para llevar a cabo los procedimientos de evaluación, uno de ellos es la normativa ASAE S580 que se caracteriza por ser un estándar sencillo en los cálculos pero muy significativos en la práctica comparativa [5].

A la hora de llevar a cabo el ensayo, se debe cumplir con el procedimiento que la norma señala. El ensayo queda invalidado siempre que sea realizado frente a fuertes vientos, baja insolación o baja temperatura ambiente.

Este estándar, desarrollado por el Dr. Paul Funk, fue aprobado en 1997 como norma internacional de ensayo para las cocinas solares. El objetivo de esta norma, como se puede observar en los cálculos que en ella se realizan, es meramente comparativo, basándose en los datos de rendimiento que se desprenden de los valores de potencia desarrollados por cada dispositivo [5].

Para llevar a cabo el ensayo se debe dejar registrados ciertos valores que van a ser indispensables para el cálculo de la potencia “ $P$ ”. Estos valores son la masa de agua y el recipiente en kilogramos con la que iniciemos el ensayo y sus capacidades caloríficas respectivas. Partiendo de esta base y con la cocina totalmente preparada y orientada hacia el sol (precalentada), se realizan tomas de temperatura en intervalos de 10 minutos, donde queda registrada la temperatura inicial y final de cada intervalo, así se puede hacer con los intervalos necesarios hasta llegar a la temperatura de estancamiento [5].

$$P = \left(\frac{T_2 - T_1}{\Delta t}\right)C \quad (2.1)$$

donde

$P$  = Potencia de la cocina [W]

$T_2$  = Temperatura final del líquido

$T_1$  = Temperatura inicial del líquido

$C$  = masa por capacidad calorífica [kJ/K]

De esta manera vemos que la pendiente  $\Delta T/\Delta t$  es un factor importante a tener en cuenta, pues está relacionada con la potencia de cocción de la estufa solar.

## 2.2 ESTUDIOS ACERCA DEL HOLLÍN

Los estudios que se han llevado a cabo en el área del hollín son pocos y básicamente los que podemos encontrar se centran en su formación en motores de combustión interna [7, 1], y en hornillas de combustión de leña [6], en los cuales se trata de mejorar los procesos de combustión y de esta manera minimizar la formación del hollín, ya que éste es un contaminante cuando es liberado en la atmosfera.

En general tenemos que el hollín es un subproducto de la combustión ya sea de madera, carbón o combustibles fósiles, y se genera en zonas con baja concentración de oxígeno [7]. El hollín está formado principalmente por carbono, y dependiendo del material del cual provenga contendrá otros elementos, así como algunos compuestos aromáticos como sucede en la combustión del diésel. Normalmente sus partículas se encuentran en forma de aglomerados, un conjunto de partículas comúnmente de forma esférica, que según su estado de formación serán de un tamaño de 10-50 nm para las partículas de hollín primarias y de 0,1 a 1  $\mu\text{m}$  para las partículas de hollín secundarias [1]. En cuanto a la estructura interna de las partículas de hollín, se ha propuesto un modelo de partícula primaria en las que se distinguen: un núcleo interno formado por varias capas de grafeno orientadas aleatoriamente y una capa externa con forma de caparazón, cuyas capas de grafeno están orientadas de manera paralela a la superficie externa de la partícula [7].

Aún no se conocen con exactitud los detalles de la formación del hollín, puesto que engloba procesos físicos y químicos bastante complejos como se puede ver en los trabajos [7, 1]. Aunque en principio tenemos que ya sea en la combustión de hidrocarburos o en la de biomasa, por ejemplo leña, se distinguen cuatro fases en la formación del hollín: la pirolisis, la nucleación, el crecimiento, y la aglomeración de las partículas.

La pirolisis se define como la descomposición térmica de un material en ausencia de oxígeno y en condiciones de alta temperatura. La nucleación es el proceso de formación de las primeras partículas de hollín a partir de los precursores macromoleculares, proceso homogéneo que tiene lugar en fase gaseosa, el crecimiento de las partículas puede deberse al propio crecimiento superficial de las partículas, a la coagulación o a la agregación. El crecimiento superficial es un proceso en el cual se añade masa en la superficie de los núcleos de hollín [1]. Tras la nucleación, se puede considerar que las partículas de hollín ya están formadas, y una vez formadas entonces tienden a crecer. Primero por coagulación, que consiste en la colisión de las partículas de hollín dando lugar a otras de mayor tamaño y segundo por aglomeración, donde las partículas se unen, pero mantienen sus identidades individuales [7]. A pesar de los estudios que se han llevado a cabo, los autores señalan que tal vez no sea posible conocer con exactitud los mecanismos de formación de hollín ya que también tenemos factores como son: el tipo de combustible, la concentración de combustible, y la temperatura [1].

A diferencia de los trabajos anteriores, los estudios realizados en la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, se centran en la aplicación del hollín como un recubrimiento para el recipiente de cocción de una estufa solar parabólica, que a su vez sea de bajo costo y que de esta forma sea utilizada en zonas rurales donde el hollín es de fácil acceso, ya que este proviene de la resina de pino.

Correa Méndez y colaboradores [2], realizaron el estudio de diferentes muestras de hollín provenientes de la combustión de leña en un hogar, del ocote, y de la resina de pino. En dicho trabajo se analizaron las muestras con técnicas como: energía dispersiva de rayos X, calorimetría de barrido diferencial y análisis termogravimétrico. El hollín procedente de la resina de pino presentó las mejores características térmicas para ser aplicado como recubrimiento para el recipiente de cocción de la estufa solar, esto debido a que presentó el mayor porcentaje de carbono, su degradación térmica está por arriba de los 400 °C , y también se logró tener un mayor rendimiento al producirlo. En el trabajo de Bernardo Sosa [18], se realiza un estudio con una metodología similar a la propuesta en este trabajo. Donde se centra en el estudio de mezclar el hollín con aglutinantes, dejando un espesor y área del recubrimiento fijas, y observa cual presenta las mejores características de costo-beneficio, variando la proporción hollín-aglutinante.

En base en los estudios anteriormente mencionados es que se decidió, para este trabajo de tesis, también utilizar el hollín de resina de pino como material de prueba sin aglutinantes y observar cómo afecta la variación del área recubierta y el espesor del recubrimiento para transferir calor a la placa de acero.

### 2.3 MATERIALES Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE LA MATERIA

A través de la historia de la humanidad podemos ver la importancia que han tenido los materiales en el desarrollo de las sociedades, desde el punto de vista económico y cultural las diferentes civilizaciones han girado en torno al progreso de los distintos materiales a los cuales han tenido acceso.

Inventar nuevos materiales o mejorar los ya existentes en base al conocimiento profundo de las propiedades de los mismos es parte de lo que se hace en el campo de la ciencia de materiales, y con ello desarrollar tecnología con la cual podamos dar solución a problemas específicos de la vida cotidiana que nos ayuden a tener una mejor calidad de vida.

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera; estas se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad [9]. Algunas estructuras compuestas están formadas por materiales diferentes que se

encuentran organizados en capas desiguales, esto se conoce como estructuras y materiales graduados, por ejemplo el triplay o madera contrachapada, o las barreras térmicas que también están organizadas en capas para disminuir la conductividad térmica [10].

Los materiales compuestos se pueden organizar en tres clases: particulados, con fibras, y laminares, con base en las formas de los materiales. Para fines de este trabajo daremos una breve explicación de los materiales compuestos laminares.

Los materiales compuestos laminares comprenden recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, materiales bimetálicos, laminados y todo un conjunto de otras aplicaciones. También se pueden considerar como parcialmente laminares los compuestos formados por fibras en forma de cintas o de tejidos. Unas de las características importantes son una resistencia superior al desgaste o la abrasión, una mejor apariencia y una expansión térmica fuera de lo común [9]. Algunas de las propiedades de los materiales compuestos laminares se estiman a partir de la regla de las mezclas. Estos materiales son altamente anisotrópicos. Las propiedades en dirección perpendicular a las laminillas son:

$$\text{Conductividad eléctrica } \frac{1}{\sigma_c} = \sum \left( \frac{f_i}{\sigma_i} \right)$$

$$\text{Conductividad térmica } \frac{1}{K_c} = \sum \left( \frac{f_i}{K_i} \right) \quad (2.2)$$

$$\text{Módulo de elasticidad } \frac{1}{E_i} = \sum \left( \frac{f_i}{E_i} \right)$$

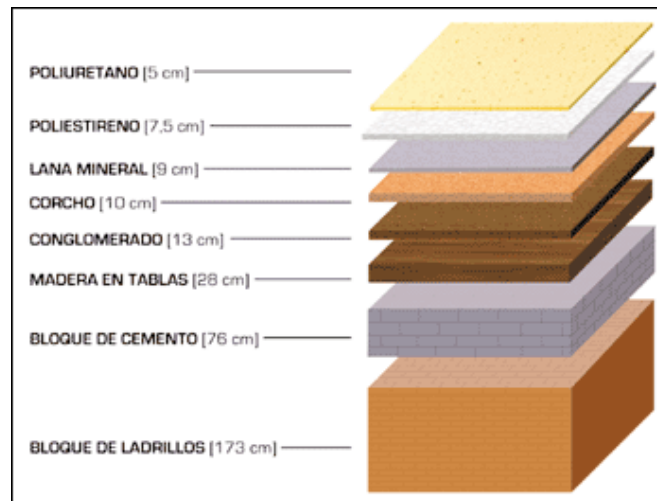


Figura 2.4. Ejemplo de un material compuesto laminar.

El manejo térmico se ha convertido en un factor muy importante en los materiales ya que las propiedades mecánicas y físicas de éstos dependen de la temperatura a la cual trabajan o serán sometidos durante su procesamiento. Una apreciación de las propiedades térmicas es de utilidad para la comprensión de la falla mecánica de materiales como los



cerámicos, las barreras térmicas, y las fibras cuando cambia la temperatura. En los materiales metálicos, los electrones transfieren el calor. En los materiales cerámicos, la conducción de calor corresponde a los fonones. En otras aplicaciones, como son las barreras térmicas lo que se desea es minimizar la transferencia de calor a través del material. Esta transferencia de calor es importante en muchas aplicaciones, que van desde los vasos de poliestireno para bebidas calientes hasta complejos recubrimientos de los vidrios para construir edificios eficientes en el uso de la energía [9].

Se puede considerar a la temperatura como la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. De esta manera tenemos que dos objetos están en equilibrio térmico, uno con otro, si se encuentran a la misma temperatura. En sentido inverso, si dos objetos no están en equilibrio térmico uno con otro entonces están a diferentes temperaturas. Dentro de los conceptos de la termodinámica nos encontramos con la distinción entre lo que es la energía interna y el calor, tenemos que la energía interna es toda la energía de un sistema que se asocia con sus componentes microscópicos, átomos y moléculas, cuando se ve desde un marco de referencia en reposo respecto del centro de masa del sistema, y por el otro lado tenemos que el calor es la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debida a una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores [13].

Cuando se le agrega energía a un sistema y no hay cambio en las energías cinética o potencial del sistema, se tiene, por lo general, un aumento en la temperatura. Si el sistema consiste de una muestra de una sustancia, se encuentra que la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una masa determinada de la sustancia a cierta cantidad varía de una sustancia a otra.

El calor específico  $c$  de una sustancia es la capacidad térmica por unidad de masa. Por lo tanto, si a una muestra de sustancia con masa  $m$  se le transfiere energía  $Q$  y la temperatura de la muestra cambia en  $\Delta T$ , el calor específico de la sustancia es

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.3)$$

El calor específico es en esencia una medida de que tan insensible térmicamente es una sustancia a la adición de energía. Mientras mayor sea el calor específico de un material, más energía se debe agregar a una determinada masa de la sustancia para causar un cambio particular de energía [12]. Es factible relacionar la energía  $Q$  transferida entre una muestra de masa  $m$  de un material y sus alrededores con un cambio de temperatura como

$$Q = mc\Delta T \quad (2.4)$$

Tenemos que el calor específico de una sustancia no es una constante, sino que varía con la temperatura. Sin embargo, si los intervalos de temperatura no son muy grandes se desprecia la temperatura y podemos tratar a  $c$  como una constante, en la tabla 2.1 se muestran unos ejemplos de materiales y su calor específico.

Tabla 2.1. Algunos materiales y su calor específico.

Material	Calor específico (cal/g K)	Material	Calor específico (cal/g K)
Al	0.215	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.200
Cu	0.092	Diamante	0.124
B	0.245	SiC	0.250
Fe	0.106	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.170
Pb	0.038	Sílice	0.265
Mg	0.243	Polietileno de alta densidad	0.440
Ni	0.106	Polietileno de baja densidad	0.550
Si	0.168	Nylon 6,6	0.400
Ti	0.125	Poliestireno	0.280
Zn	0.032	Agua	1.000
W	0.093	Nitrógeno	0.249

El factor de mayor importancia que afecta al calor específico es la vibración de la red cristalina o fonones. Podemos observar que el comportamiento óptico está determinado por la interacción de los fotones con el material. El fotón es tratado como una partícula con una energía específica o una radiación electromagnética con longitud de onda y frecuencia particulares. De igual manera las propiedades térmicas de los materiales pueden caracterizarse por medio de los fonones. En el cero absoluto, los átomos en un material tienen una energía mínima. Sin embargo, cuando se aporta calor, los átomos aumentan su energía térmica y vibran con una amplitud y frecuencia específica. La vibración de cada uno de los átomos se transfiere a los átomos circundantes y se produce una onda elástica que se conoce como fonon [14]. La energía del fonon se puede expresar en función de la longitud de onda o de la frecuencia.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (2.5)$$

#### 2.4 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Con la termodinámica se predice el intercambio de calor en un sistema cuando se realiza un proceso, pero no puede preverse el tipo de mecanismo por medio del cual se lleva a cabo tal transferencia de calor. Así, al aplicar la primera y segunda leyes de la termodinámica en un intercambiador de calor se obtiene información relacionada con el flujo de calor que debe transferirse del fluido caliente al frío. No obstante, la termodinámica no suministra datos con respecto al diámetro, longitud, material o arreglo geométrico de los tubos que deben emplearse. Estas características de diseño se obtienen mediante un análisis detallado de la transferencia de calor [15].

### 2.4.1 CONDUCCIÓN

Cuando existe un gradiente de temperatura en un sólido, líquido o un gas, tenemos un proceso de propagación de energía mediante comunicación molecular directa, a este fenómeno se le conoce como conducción. Al haber un gradiente de temperatura en el medio, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De esta manera se tiene que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura, es decir

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.6)$$

Donde  $q''$  denota el flujo de calor por unidad de área en la dirección  $x$ , y  $k$  es la conductividad térmica del material. Sus unidades son  $W/mK$  en el Sistema Internacional (SI) de unidades. Esta ecuación se conoce como la ley de Fourier y define la conductividad térmica  $k$ . cabe mencionar que esta propiedad de transporte no es una constante, varía con la temperatura, sin embargo en numerosas aplicaciones puede suponerse constante, en la tabla 2.2 se presentan algunos materiales y sus conductividades térmicas.

Tabla 2.2. Materiales y sus conductividades térmicas.

Material	Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Material	Conductividad térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Metales puros:		Materiales cerámicos:	
Ag	430	$Al_2O_3$	16-40
Al	238	Carbono (diamante)	2000
Cu	400	Carbono (grafito)	335
Fe	79	Arcilla refractaria	0.26
Mg	100	Carburo de silicio	270
Ni	90	AlN	270
Pb	35	Vidrio de cal y sosa	0.96-1.7
Ti	22	Sílice vítreo	1.4
W	171	Polímeros:	
Aleaciones:		Nylon-6,6	0.25
Acero 1020	100	Polietileno	0.33
Aleación aluminio 3003	280	Poliimida	0.21
Acero inoxidable 304	30	Espuma de Poliestireno	0.029
Cementita	50	Poliestireno	0.13
Ferrita	75	Teflón	0.25

En los metales la conductividad térmica se debe principalmente a la contribución electrónica, en estos materiales la conductividad depende de los defectos de la estructura cristalina, de su microestructura y de su procesamiento. Por lo tanto, los metales trabajados en frío, los metales endurecidos por solución sólida y las aleaciones en dos fases pueden mostrar conductividades inferiores a sus contrapartes libres de defectos. También tenemos que, cuando aumenta la temperatura hay dos factores que afectan la conductividad térmica. Las temperaturas más altas originan un aumento en la energía de los electrones, creando más portadores e incrementando la contribución proveniente de la vibración de la red cristalina; todo lo anterior incrementa la conductividad térmica. Sin embargo, una mayor vibración de la red dispersa los electrones, reduciendo su movilidad y tendiendo a reducir la conductividad térmica [9].

En los materiales cerámicos la banda de energía es muy amplia como para que sean excitados muchos electrones hacia la banda de conducción, a excepción de a muy altas temperaturas. En consecuencia, la transferencia de calor se debe principalmente a vibraciones de la red cristalina (es decir, los fonones). La razón principal de que los materiales cerámicos presenten una conductividad térmica menor a la de los metales, es debida a la porosidad que éstos presentan en su estructura. Sin embargo, existen materiales cerámicos con una estructura estrechamente empaquetada y un elevado módulo de elasticidad que producen fonones de alta energía que generan conductividades térmicas elevadas [10].

Siguiendo con el fenómeno conductivo, consideremos una placa de espesor  $L$ , y supongamos que sus dos caras se mantiene a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente. Si analizamos un volumen de control  $\Delta x$  dentro del material, la primera ley de la termodinámica establece que el calor que entra en el sistema por conducción es igual al que sale de él

$$q''A|_x - q''A|_{x+\Delta x} = 0 \quad (2.7)$$

al notar que el área  $A$  perpendicular al flujo de calor de la placa es constante, La expresión anterior se puede dividir entre  $A\Delta x$

$$\frac{q''A|_{x+\Delta x} - q''A|_x}{\Delta x} = 0 \quad (2.8)$$

cuando  $\Delta x \rightarrow 0$  se obtiene, por medio del teorema del valor medio

$$\frac{dq''}{dx} = 0 \quad (2.9)$$

integrando la expresión anterior respecto de  $x$  y después sustituyendo en la ley de Fourier obtenemos

$$-k \frac{dT}{dx} = C_1 \quad (2.10)$$

Si se supone que la conductividad térmica del material es constante, una integración de la ecuación anterior da como resultado

$$T = -\frac{C_1}{k}x + C_2 \quad (2.11)$$

mediante las condiciones de frontera,  $T = T_1$  en  $x = 0$  y  $T = T_2$  en  $x = L$ , se pueden evaluar las constantes  $C_1$  y  $C_2$ , de esta manera obtenemos

$$C_1 = \frac{k(T_1 - T_2)}{L}$$

y

$$C_2 = T_1$$

al sustituir  $C_1$  en la ecuación (9), podemos calcular el flujo de calor que se transfiere a través de la placa

$$q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.12)$$

esta ecuación indica que el flujo de calor es proporcional al área, a la conductividad térmica del material y a la diferencia de temperaturas. Por otra parte tenemos que el flujo de calor es inversamente proporcional al espesor de la placa. También podemos definir una resistencia térmica como

$$R_t = \frac{L}{kA} \quad (2.13)$$

de esta manera se puede evaluar el flujo de calor a través de la pared compuesta de distintos materiales en contacto íntimo como se muestra en la siguiente figura

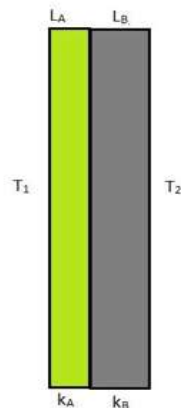


Figura 2.5. Material compuesto de dos capas.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_A}{Ak_A} + \frac{L_B}{Ak_B}} \quad (2.14)$$

la expresión anterior se puede extender para más de dos materiales, así como también puede involucrar lo que se conoce como resistencia de película, esto es cuando las paredes de los materiales están en contacto con un fluido, como por ejemplo el aire.

#### 2.4.2 CONVECCIÓN

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un fenómeno de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) en la vecindad de una superficie, y está íntimamente relacionado con su movimiento [14], en la figura 2.6 se muestra este fenómeno. Estos movimientos pueden ser causados por un agente externo (convección forzada) o mediante variaciones de la densidad provocada por cambios de temperatura (convección libre). En general, el análisis matemático de este tipo de fenómeno es bastante complicado. El modelo más simple que describe el flujo de calor por convección es aquel expresado mediante la ley de enfriamiento de Newton [15].

$$q'' = h(T_1 - T_2) \quad (2.15)$$

donde  $h$  es el coeficiente local de transferencia de energía o coeficiente de película. Sus unidades en el SI son  $W/m^2K$ .

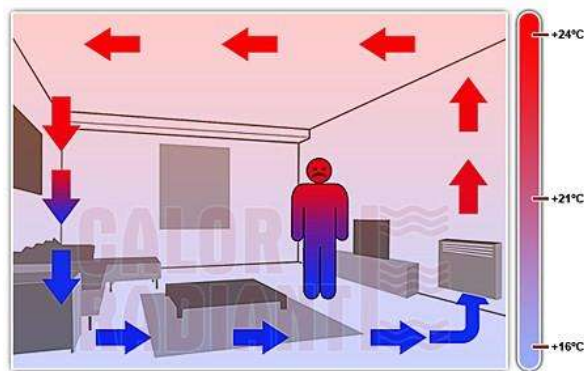


Figura 2.6. Ejemplo de fenómeno de convección.

#### 2.4.3 RADIACIÓN

Tanto en la conducción como en la convección se requiere de un medio para propagar la energía. Sin embargo, el calor también puede propagarse en el vacío absoluto mediante radiación. A una temperatura dada todos los cuerpos emiten radiación en

diferentes longitudes de onda, pero la magnitud de ésta depende de la temperatura absoluta y de las características superficiales de dichos cuerpos. Se considera radiación térmica la que se ubica en el rango de longitudes de onda entre 0.1 y 100 micrones, como se muestra en la figura 2.7. Dentro de ese intervalo del espectro electromagnético se ubican el rango ultravioleta, el infrarrojo, y el visible [17].

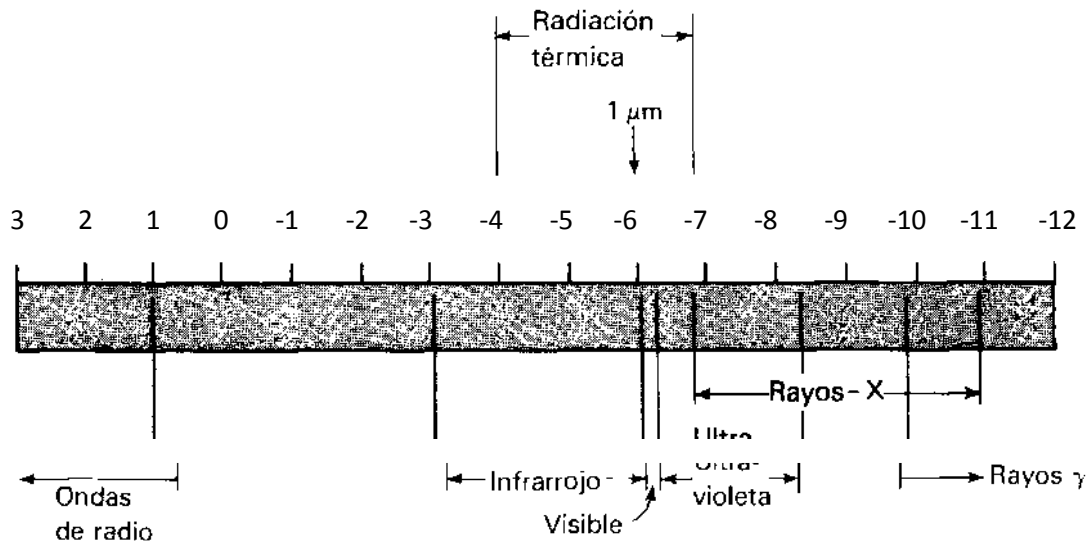


Figura 2.7. Espectro electromagnético.

Un radiador perfecto o cuerpo negro es el que emite la máxima cantidad de energía radiante desde su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, es decir

$$q'' = \sigma T^4 \quad (2.16)$$

esta ecuación se conoce como *ley de Stefan-Boltzmann*, donde  $\sigma$  es una constante que adquiere un valor igual a  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  en el SI y que recibe el nombre de *constante de Stefan-Boltzmann*. De la ecuación anterior se deduce que la superficie de todo cuerpo negro emite radiación si se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto, independientemente de las condiciones de los alrededores [16].

Por otra parte un cuerpo real no satisface las características de un cuerpo negro, ya que emite una menor cantidad de radiación. Así, el flujo de calor por unidad de área está dado por la siguiente expresión

$$q'' = \sigma \epsilon T^4 \quad (2.17)$$

donde  $\epsilon$  es una propiedad de la superficie y se denomina emisividad, esta propiedad superficial constituye una medida para evaluar cuán efectivamente emite radiación un cuerpo real respecto de uno negro. En este punto también es importante hacer mención de la absorptancia, que se define como la fracción de radiación que absorbe la superficie de un

material. Esta es una función de la radiación incidente, por lo que en general la emitancia y la absortancia tienen valores diferentes [11].

Cuando la energía radiante incide sobre una superficie material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte se transmite [17], como se muestra en la figura 2.8.

$$\rho + \alpha_T + \tau = 1 \quad (2.18)$$

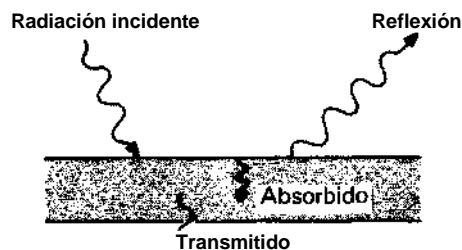


Figura 2.8. Efectos de la radiación incidente.

La mayor parte de los cuerpos sólidos no transmiten radiación térmica; de modo que para muchos de los problemas la transmisividad se puede tomar como cero.

$$\rho + \alpha_T = 1 \quad (2.19)$$

Cuando la radiación choca con una superficie, se pueden observar dos fenómenos. Si el ángulo de incidencia es igual al reflejado, a esta se le llama especular. Por otra parte, cuando un rayo incidente se distribuye de forma uniforme en todas direcciones después de la reflexión, a esta se le llama difusa. La influencia de la rugosidad de la superficie sobre las propiedades de radiación térmica de los materiales es un tema de gran interés y que sigue siendo objeto de investigación continua [15].

#### 2.4.4 CONDUCCIÓN DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO

A diferencia de los procesos de conducción en estado estable, en los de tipo transitorio hay un aumento o una disminución en la energía interna del sistema mientras ocurre el proceso. En este tipo de procesos, de calentamiento o enfriamiento, la temperatura está sujeta casi de manera exclusiva al tiempo. Para analizar este tipo de conducción se supone que la conductividad térmica del material que compone el sistema es suficientemente alta para que los gradientes de temperatura en el interior sean insignificantes [11].

Consideremos una placa que inicialmente se encuentra a una temperatura  $T_1$ , y supongamos que de pronto se sumerge en un fluido, por ejemplo aire, a una temperatura



$T_2$  constante. Si pensamos que la resistencia interna de conducción en el interior del cuerpo es insignificante respecto de la externa de convección, la temperatura del cuerpo está determinada solo por el tiempo. Ahora, si aplicamos la primera ley de la termodinámica, el calor disipado por convección en cualquier instante se refleja en una disminución de su energía interna

$$hA(T - T_2) = -\rho cV \frac{dT}{dt} \quad (2.20)$$

donde  $h$  es el coeficiente promedio de transferencia de calor,  $A$  es el área de intercambio de calor,  $\rho$  la densidad del material,  $V$  el volumen,  $c$  el calor específico del material.

haciendo un reacomodo de términos, y definiendo  $\theta = T - T_2$  la expresión anterior se puede escribir como

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{hA}{\rho cV} \theta = 0 \quad (2.21)$$

la solución general de la ecuación (18) es de la forma

$$\theta = C_1 e^{-\frac{hA}{\rho cV} t} \quad (2.22)$$

con la condición inicial de que  $\theta = \theta_0$  en  $t = 0$  se tiene que  $C_1 = \theta_0$ . Por lo tanto tenemos que

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{hA}{\rho cV} t}$$

o

$$\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = e^{-\frac{hA}{\rho cV} t} \quad (2.23)$$

la ecuación anterior permite determinar la temperatura  $T$  del cuerpo en cualquier instante  $t$ . También nos permite calcular un parámetro conocido como *constante de tiempo del sistema* y que constituye un índice de la rapidez con que varía la temperatura al someterse a una perturbación, el cual puede expresarse como

$$\tau = \frac{1}{hA} \rho cV = R_t C_t \quad (2.24)$$

donde  $R_t$  es una resistencia térmica, y  $C_t$  es una capacitancia térmica.

Asimismo la ecuación (2.22) es útil para calcular experimentalmente la constante de tiempo del sistema, haciendo uso de coordenadas semilogarítmicas. Despejando la temperatura  $T$  de 2.23 y renombrando términos llegamos a la siguiente expresión

$$T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.25)$$

donde

$$A = T_1$$

$$B = T_2 - T_1$$

$$\alpha = \frac{hA}{\rho cV}$$

## Capítulo 3

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para realizar este trabajo en el cual se estudia el comportamiento fototérmico del hollín, se implementó un montaje experimental para calentar las muestras, evitando las complicaciones que se tendrían en campo como son el viento y la nubosidad. El montaje consiste básicamente en una fuente de iluminación para lo cual se empleó una lámpara que nos sirve para calentar las muestras. Se utilizaron láminas de acero de 5x5 cm y 1 mm de espesor, con la finalidad de simular el material del recipiente de cocción. También se utilizó un sensor que mide la temperatura al reverso de la lámina con la finalidad de replicar la medición de temperatura dentro del recipiente como se hace en campo. Éste sensor mide la temperatura en función del tiempo ya que se busca obtener la razón de cambio de temperatura con respecto al tiempo lo cual es un parámetro importante en la evaluación del rendimiento y eficiencia del sistema termoconversor.

#### 3.1 SENSOR DE TEMPERATURA

Obtener una medida de la temperatura en función del tiempo es parte esencial en el desarrollo de este trabajo, por tanto se tuvo la necesidad de desarrollar un sensor capaz de tomar los datos de temperatura respecto al tiempo.

Al no contar en el laboratorio con un termómetro capaz de tomar datos en función del tiempo, es que se tomó la decisión de construir uno con esas características. Además de que éste cuenta con más de un termopar para tomar medidas en diferentes puntos, para tener datos de temperatura promedio de la placa y además generar gráficas tridimensionales, y determinar cualitativamente si existe difusión de calor en la superficie de la placa y a través de ésta. Por otro lado, tenemos que los termómetros digitales comerciales que cuentan con software para tomar los datos de temperatura en función del tiempo son costosos, y solo cuentan con dos o cuatro termopares.

Para el montaje del sensor se utilizó una placa Arduino UNO, como la mostrada en la figura 3.1, la cual puede ser alimentada a través de una conexión USB. Además cuenta con 14 pines digitales que pueden ser de entrada o de salida y 6 entradas analógicas. También se utilizaron seis termopares, una tablilla perforada para electrónica, pines, y cables de puenteo.



Figura 3.1. Placa Arduino.

El ensamblaje consistió, primeramente en colocar los pines en la tablilla perforada, de tal forma que coincidieran con los orificios de las entradas de alimentación de corriente, de tierra, las entradas analógicas, y las salidas digitales. Posteriormente, se conectaron los termopares a las entradas analógicas. El software de Arduino se descargó de [www.arduino.cc/en/](http://www.arduino.cc/en/). Con el cual se tiene la interfaz con la que podemos programar la placa y visualizar los datos de los sensores en la PC. La figura 3.2 muestra el sensor ya ensamblado.

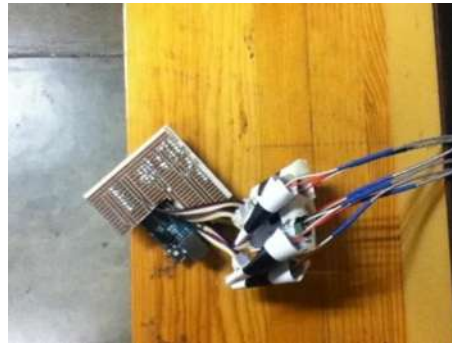


Figura 3.2. Montaje del sensor de temperatura.

Después de que se construyó el sensor, se procedió a llevar a cabo la calibración del mismo, ya que el sensor nos proporciona las lecturas en miliwatts, y necesitábamos los datos en grados centígrados. Para este propósito se utilizó el siguiente equipo: una parrilla eléctrica marca Fisher Scientific, y un termómetro digital marca Control Company con una resolución de 1 grado centígrado  $\pm 0.5$  °C.



Figura 3.3. Parrilla eléctrica.

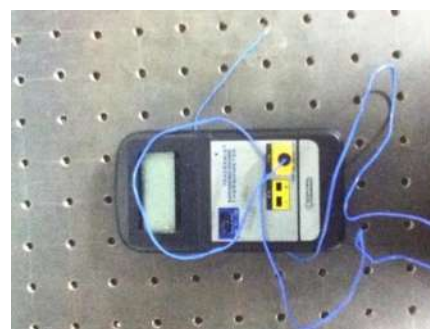


Figura 3.4. Termómetro digital.

Para realizar la calibración del sensor se colocaron las puntas de los termopares, y la del termómetro digital, sobre la parrilla eléctrica, posteriormente se comenzó a variar la temperatura de la parrilla, esto con la finalidad de obtener la equivalencia entre los grados centígrados y los miliwatts.

### 3.2 ARREGLO ÓPTICO

Otro de los aspectos a tener en cuenta en la elaboración de este trabajo era la de contar con condiciones controladas en laboratorio y también tener una área iluminada concreta de iluminación. Para tal fin se empleó una lámpara de 250 Watts marca Osram, una lente de Fresnel, y una lente convexa gruesa, con lo anterior se elaboró un arreglo óptico como se muestra en la siguiente figura.



Figura 3.5 (a). Imagen del arreglo óptico.

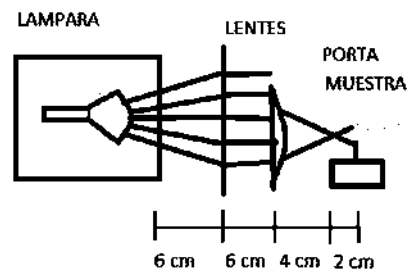


Figura 3.5 (b). Diagrama del arreglo óptico.

### 3.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para obtener el hollín se utilizó resina de pino que se incineró en un recipiente, del cual después de la combustión se recogió el hollín de sus paredes, en la figura 3.6 se muestra el hollín recolectado. También se utilizaron placas de acero inoxidable cuadradas de 5 cm de lado, y de 1 mm de espesor, figura 3.7. Las cuales se pulieron antes de colocar el recubrimiento. Se eligió este material por la razón de que es utilizado en recipientes de cocción.



Figura 3.6. Hollín.



Figura 3.7. Placas de acero.

La preparación de las muestras consistió en utilizar una cinta adhesiva marca Truper MSK-2 de 0.15 mm de espesor para realizar los recubrimientos. El hollín fue depositado a presión sobre las placas de acero. Después con la ayuda de un portaobjetos se retiró el exceso de hollín, de forma que coincidiera con el espesor de la cinta adhesiva. De esta manera se pudo controlar tanto el espesor como el área recubierta sobre la superficie de la placa de acero.

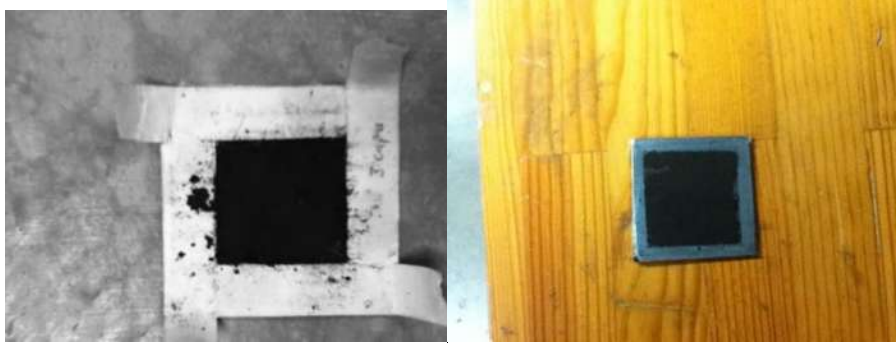


Figura 3.8. Preparación de muestras.

Con el objetivo de determinar el comportamiento fototérmico del hollín se decidió estudiar el efecto que tiene sobre éste la variación de parámetros tales como la superficie recubierta y el espesor. El primer parámetro a variar fue el área de recubrimiento. Se comenzó por recubrir un área de  $1 \text{ cm}^2$  en la parte central de la placa con el espesor fijo en 0.15 mm. Después se repitió el proceso para áreas de 4, 9, y  $16 \text{ cm}^2$ . El segundo parámetro a variar fue el espesor, para ello se fijó una área de  $9 \text{ cm}^2$  para posteriormente aumentar el espesor a 0.30 mm y después incrementarlo a 0.45 mm.

### 3.4 ADQUISICIÓN DE DATOS

Para llevar a cabo la caracterización, se comenzó por dividir la placa en cuadrantes, como se muestra en la figura 3.9. Con la finalidad de tener una lectura amplia de temperaturas sobre la placa y determinar su distribución se colocaron los termopares en los cuatro cuadrantes y en la zona central de la placa de acero.

(-16,18)	(-8,18)	(8,18)	(16,18)
(-16,12)	(-8,12)	(8,12)	(16,12)
(-16,6)	(-8,6)	(4,6)	(8,6)
	(-4,0)	(4,0)	
(-16,-6)	(-8,-6)	(4,-6)	(8,-6)
(-16,-12)	(-8,-12)	(8,-12)	(16,-12)
(-16,-18)	(-8,-18)	(8,-18)	(16,-18)

Figura 3.9. Coordenadas de los termopares sobre la placa en milímetros.

Primeramente se tomaron datos de la placa de acero inoxidable sin recubrimiento de hollín, para de esta manera poder compararla con los datos de las placas con el recubrimiento. Esto se hizo colocando los termopares primeramente sobre la zona centro, a continuación se prendió la lámpara durante 10 minutos para que se calentara la muestra, después se repitió el procedimiento anterior para los cuatro cuadrantes.

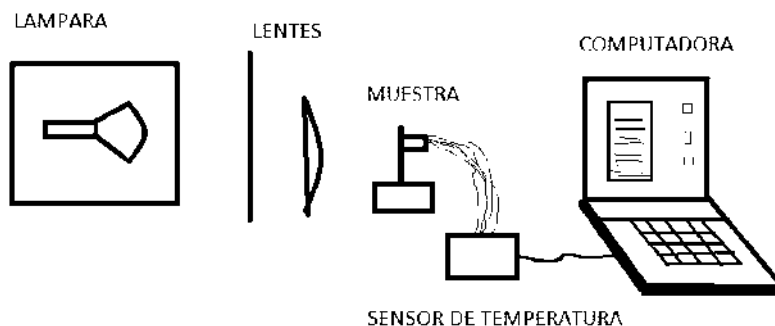


Figura 3.10. Arreglo experimental.

El procedimiento llevado a cabo para la placa sin recubrimiento se repitió para las placas recubiertas con hollín, tanto para el parámetro área como para el parámetro espesor.

## Capítulo 4

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 CALIBRACIÓN DEL SENSOR

Primeramente y con los datos obtenidos, se procedió a la calibración del sensor de temperatura, mediante un análisis de mínimos cuadrados, ya que en algunos casos los termopares tienen un comportamiento lineal para ciertos rangos de temperatura. En este caso se obtuvo un coeficiente de correlación  $r=0.91$ , lo que nos indica que tiene un comportamiento lineal en este rango de temperaturas.

Para el caso del sensor se obtuvieron los siguientes resultados, con los cuales pudimos realizar la conversión de miliwatts a grados Celsius introduciendo la función obtenida por mínimos cuadrados en el programa del sensor de temperatura, el cual se muestra en el ANEXO I.

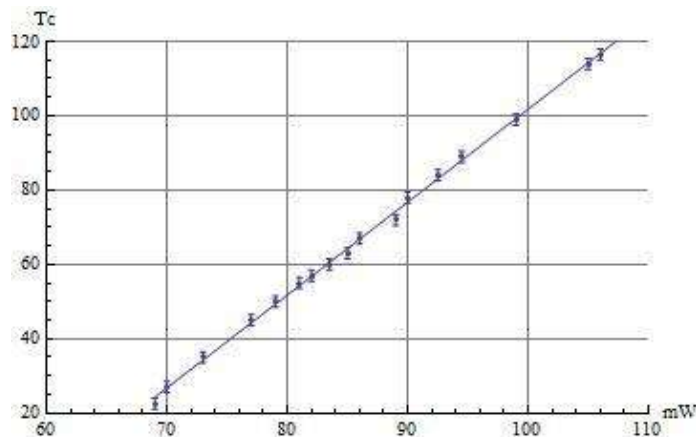


Figura 4.1. Grafica de ajuste de datos. Correspondencia entre los miliwatts del sensor y los grados centígrados del termómetro calibrador.

Al llevar a cabo el ajuste por mínimos cuadrados obtuvimos la siguiente expresión

$$T(mW) = (2.5 \pm 0.011)X - 148 \pm 0.781 \quad (4.1)$$

La expresión (4.1) se utilizó para la conversión de datos en el programa que aparece en el ANEXO I. Arduino al ser un software libre cuenta con gran cantidad de información en línea, donde existen programas para sensores de temperatura, pero solo cuentan con un sensor. En este trabajo se presenta una mejora al introducir 6 sensores que se leen simultáneamente, los cuales se pueden controlar desde la PC, ya que el programa cuenta con una interface en la cual se visualizan los datos y se tiene el encendido y apagado con las teclas 1 y 0 respectivamente.



## 4.2 RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ÁREA DE RECUBRIMIENTO DE HOLLÍN

Con la metodología propuesta para este estudio se llegó a los siguientes resultados, que muestran los efectos térmicos que se tienen sobre la placa de acero al variar la superficie recubierta de hollín sobre la placa de acero. Cabe mencionar que el haz proveniente de la lámpara no está iluminando totalmente los 25 cm<sup>2</sup> de superficie de la placa. El área del haz de luz es de 3.1416 cm<sup>2</sup> en el centro de la placa.

Se realizó un ajuste lineal debido a la importancia que tiene la razón de cambio  $\Delta T/\Delta t$  en las pruebas de campo, ya que dicho parámetro es importante para determinar la potencia de cocción del sistema termoconversor de una estufa solar, al mostrar el aumento de temperatura en intervalos de tiempo. Se tomaron los datos para calcular la pendiente  $\Delta T/\Delta t$  en base al comportamiento, en principio lineal, que muestran éstos antes de comenzar a alcanzar la temperatura de equilibrio.

Primeramente se analizó la placa sin recubrimiento, para tener una base de comparación. La temperatura máxima alcanzada sobre la placa fue de 41.2 °C, y tenemos una pendiente  $\Delta T/\Delta t$  de  $0.072 \pm 0.008$  (°C/s), con un coeficiente de correlación  $r=0.92$ , que se muestra en la figura 4.2. La temperatura máxima corresponde al promedio de los termopares colocados sobre la placa.

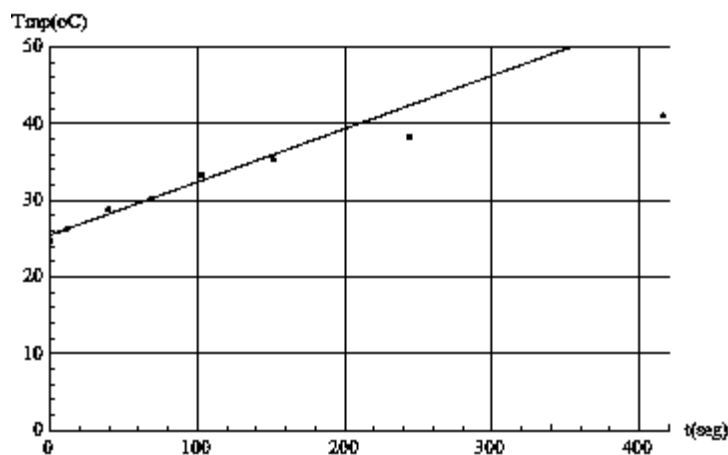


Figura 4.2. Perfil de temperatura en la placa sin recubrimiento.

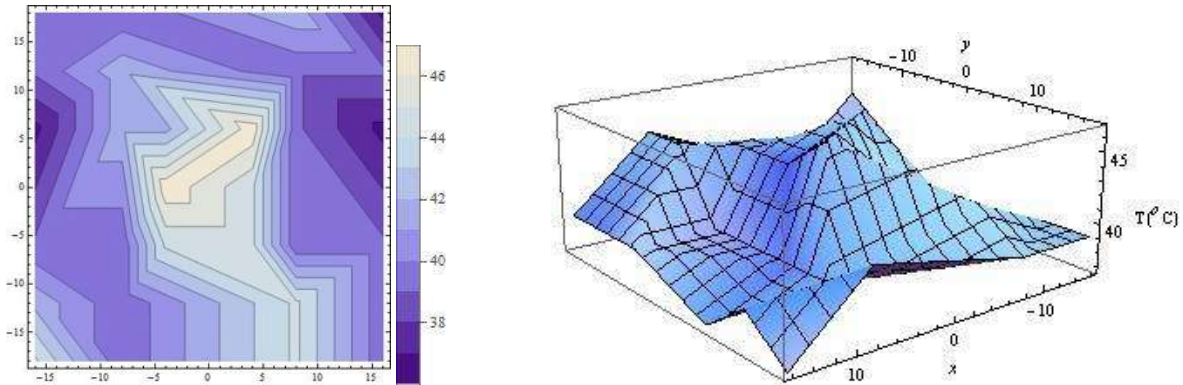


Figura 4.3. Distribución de la temperatura sobre la placa sin recubrimiento de hollín.

La distribución de temperaturas mostrada en la figura 4.3 y en las otras graficas similares, se obtuvo de las lecturas de los sensores colocados como aparece en la figura 3.9. en ésta se observa una mayor temperatura en el centro, esto es debido a que se tiene un haz de luz concentrado en el centro de la placa.

Para la placa con recubrimiento de 1 cm<sup>2</sup> de hollín se tuvo una temperatura maxima de 43.4 °C, 2.2 grados mas que la placa sin recubrimiento, y se obtuvo una pendiente de incremento de temperatura de 0.101±0.009 (°C/s). También se tuvo buena adherencia del hollín sobre la placa, teniendose una superficie uniforme sin grietas.

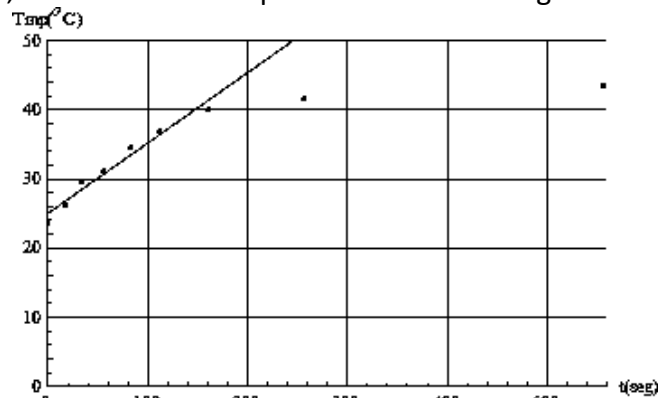


Figura 4.4. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de 1x1 cm, r=0.89.

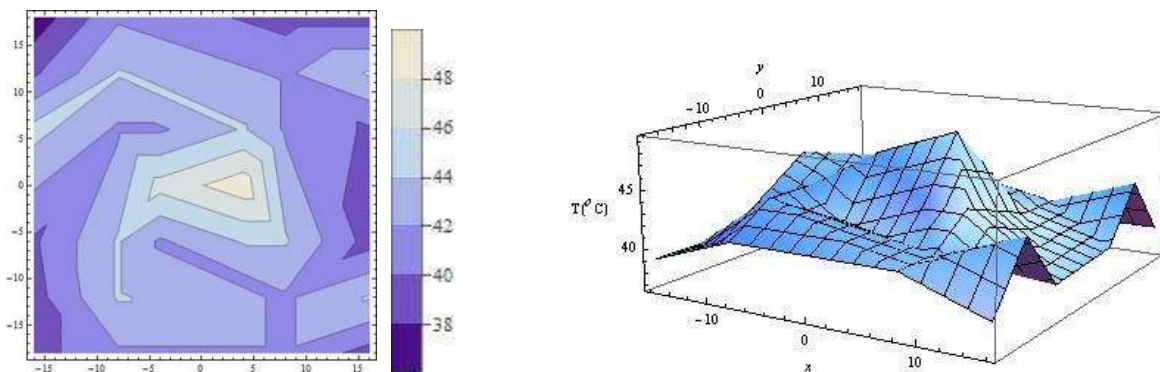


Figura 4.5. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de 1x1 cm.

Se presentó una mayor temperatura en el centro de la placa, como se puede observar en la figura 4.5. Esto es debido al hecho de que solo se tiene una área recubierta de hollín inferior al área iluminada por el haz proveniente de la lámpara.

Para la placa con recubrimiento de  $4 \text{ cm}^2$  de hollín se presentó una temperatura máxima de  $46.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 5 grados más que la placa sin recubrimiento, con una pendiente de  $0.108 \pm 0.006 \text{ (}^\circ\text{C/s)}$ , con lo cual se observa que tiene un mayor incremento de temperatura que las placas anteriores, en la figura 4.6 se muestra la pendiente.

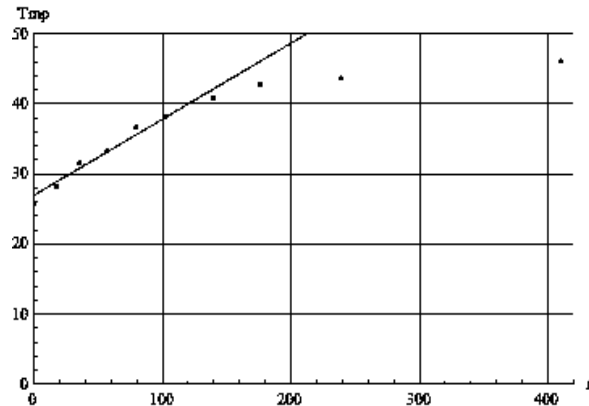


Figura 4.6. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de  $2 \times 2 \text{ cm}$ ,  $r=0.87$ .

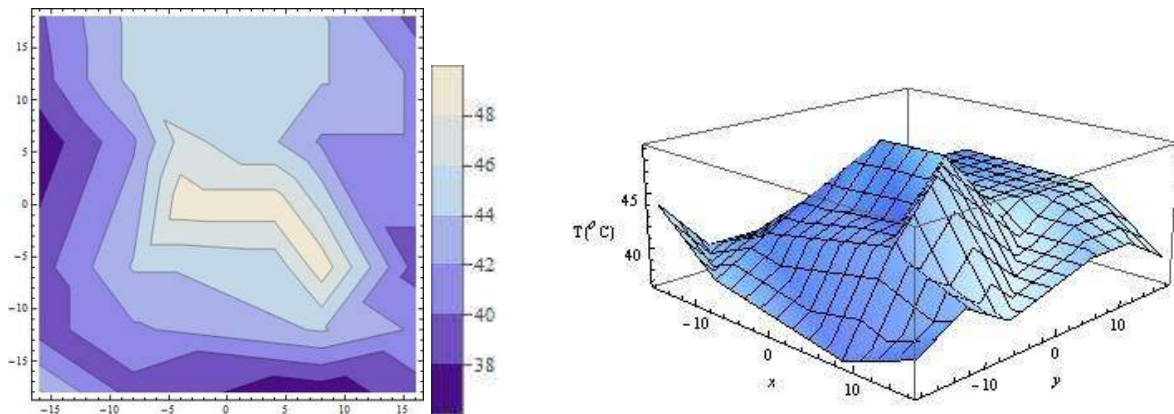


Figura 4.7. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de  $2 \times 2 \text{ cm}$ .

También como se puede observar en la figura 4.7, se tiene que la mayor temperatura se concentra en la parte central de la placa, en este caso tenemos que el área recubierta, de  $4 \text{ cm}^2$ , es ligeramente mayor al área de iluminación, de  $3.15 \text{ cm}^2$ .

La placa con recubrimiento de hollín de  $3 \times 3 \text{ cm}$  tuvo un incremento de temperatura de  $7.3$  grados respecto de la placa sin recubrimiento, presentando una temperatura máxima promedio de  $48.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , y una pendiente de  $0.122 \pm 0.007 \text{ (}^\circ\text{C/s)}$ . También se observa que la distribución de temperatura en la superficie de la placa es más uniforme que en las anteriores.

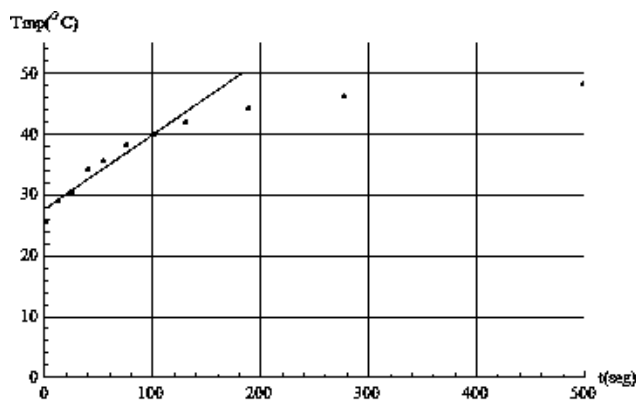


Figura 4.8. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de 3x3 cm,  $r=0.9$ .

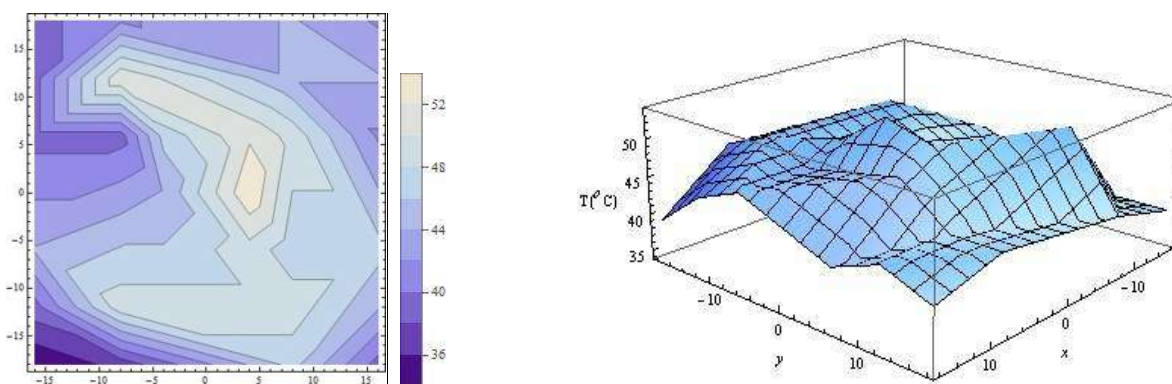


Figura 4.9. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de 3x3 cm.

Como se puede observar en la figura 4.9 para esta superficie recubierta de hollín se presentó una mejor distribución de la temperatura sobre la placa, en este caso tenemos que el área recubierta es mayor que el haz luminoso, por lo que cualitativamente podemos decir que existe una relación directamente proporcional entre la distribución de la temperatura sobre la placa y el área recubierta.

Finalmente para la placa con recubrimiento de 16 cm<sup>2</sup> de hollín que corresponde al 64 % del área total de la placa, se tuvo una temperatura máxima de 53.4 °C, con la cual se tiene una diferencia de temperatura de 12.2 grados con respecto a la placa sin recubrimiento, y una pendiente de  $0.138 \pm 0.008$  (°C/s), con lo cual se observa un mayor incremento de la temperatura con este recubrimiento. También se puede ver que la distribución de la temperatura es uniforme en comparación de las primeras placas. La adherencia que presentó el hollín sobre la placa fue buena.

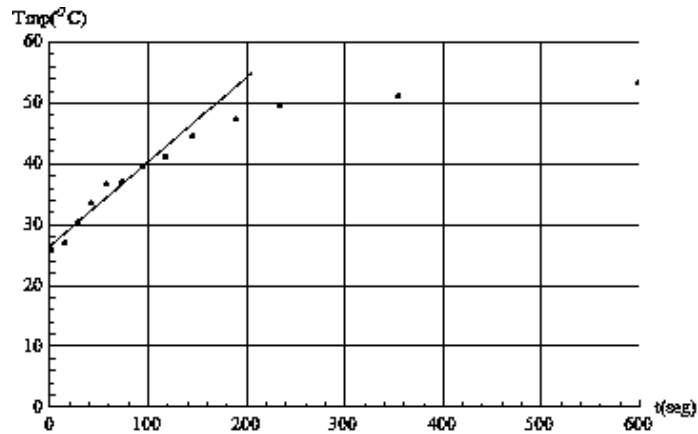


Figura 4.10. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de 4x4 cm,  $r=0.88$ .

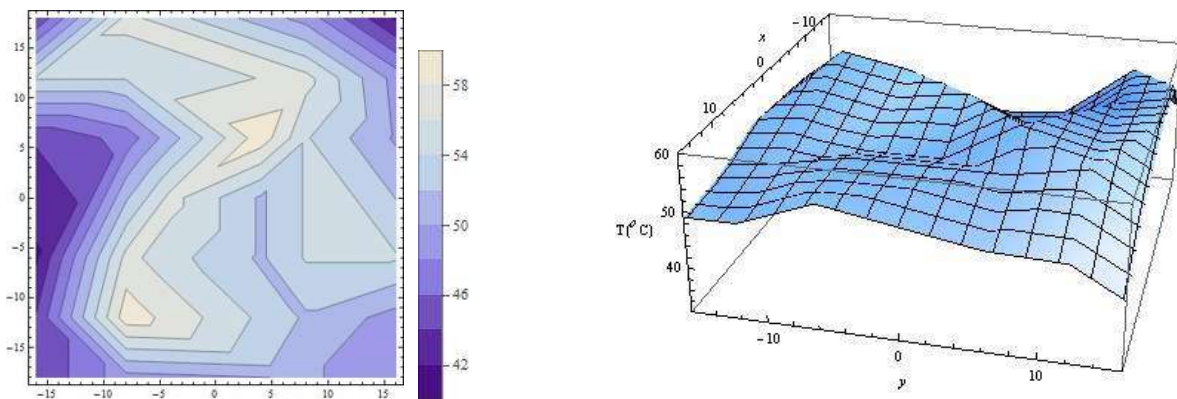


Figura 4.11. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de 4x4 cm.

Al realizar las pruebas sobre las muestras con recubrimiento de hollín, podemos observar que al ir incrementando el área recubierta de hollín sobre la placa, se tiene un aumento de la temperatura, de manera proporcional, de la placa. La siguiente tabla muestra el comportamiento de las muestras al ir aumentando el área recubierta.

Tabla 4.1. Resultados de la variación del área de recubrimiento.

Área del recubrimiento de hollín (cm <sup>2</sup> )	Temp. Máxima Promedio (°C)	Pendientes $\Delta T/\Delta t$ (°C/s)
0	41.2	0.072±0.008
1	43.4	0.101±0.009
4	46.2	0.108±0.006
9	48.5	0.122±0.007
16	53.4	0.138±0.008

En la figura 4.12 se muestra la gráfica que representa el comportamiento de la temperatura máxima promedio de la placa al ir aumentando el área de recubrimiento de hollín.

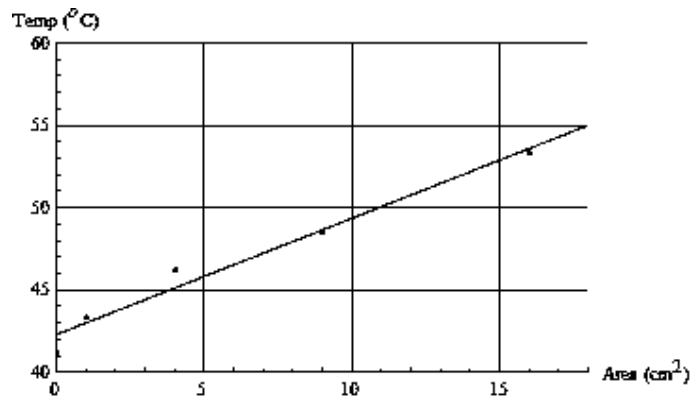


Figura 4.12. Dependencia de la temperatura respecto al área recubierta de hollín sobre la placa de acero inoxidable, coeficiente  $r=0.90$ .

Además se realizó un análisis de los datos anteriores para observar el comportamiento de la temperatura en la placa de acuerdo a la razón de áreas, el área recubierta de hollín y el área iluminada sobre la superficie de la placa que se encuentra recubierta. Los resultados se muestran en la siguiente figura

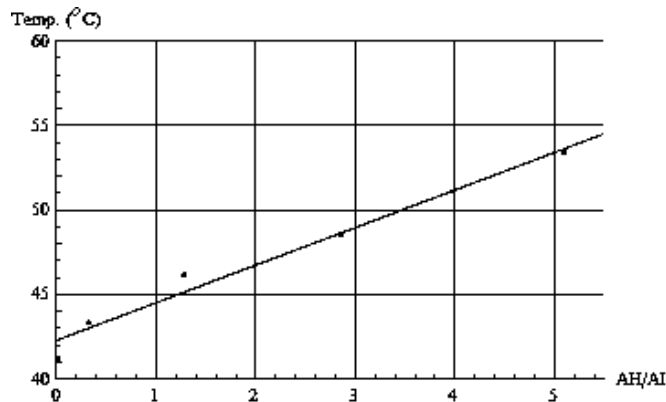


Figura 4.13. Gráfica de la temperatura en función de la razón de áreas, coeficiente  $r=0.91$ .

En este caso tenemos un aumento de la temperatura a medida que el área recubierta comienza a ser mayor que el área iluminada que, como se mencionó anteriormente, permanece constante. Al considerar una temperatura máxima promedio sobre la placa de acero, y al notar que ésta aumenta a medida que el área recubierta está variando mientras el área iluminada es constante, nos indica que existe una difusión de calor superficial, primeramente en el hollín, para posteriormente transferirse a través de éste hacia la placa de acero.

### 4.3 RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO DE HOLLÍN

Para la realización de esta prueba se fijó el área recubierta de hollín, y se comenzó a variar el parámetro del espesor. Donde después de realizadas las pruebas fototérmicas llegamos a los siguientes resultados

Como punto de referencia se tomó la placa con recubrimiento de  $9 \text{ cm}^2$ , la cual cuenta con un espesor de  $0.15 \text{ mm}$ . La cual presentó una temperatura máxima de  $48.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , y una pendiente de  $0.122 \pm 0.007 \text{ (}^\circ\text{C/s)}$ .

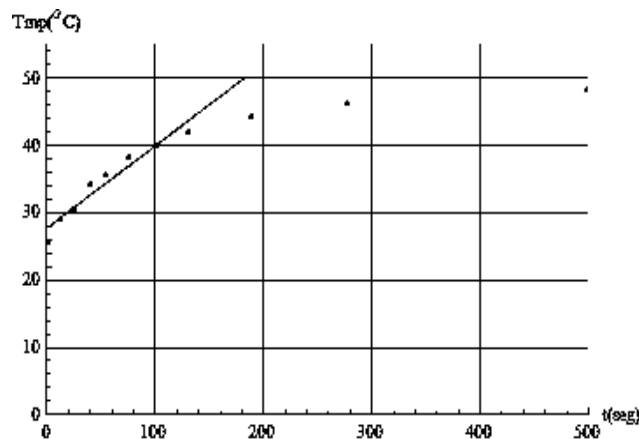


Figura 4.14. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de espesor de  $0.15 \text{ mm}$ ,  $r=0.89$ .

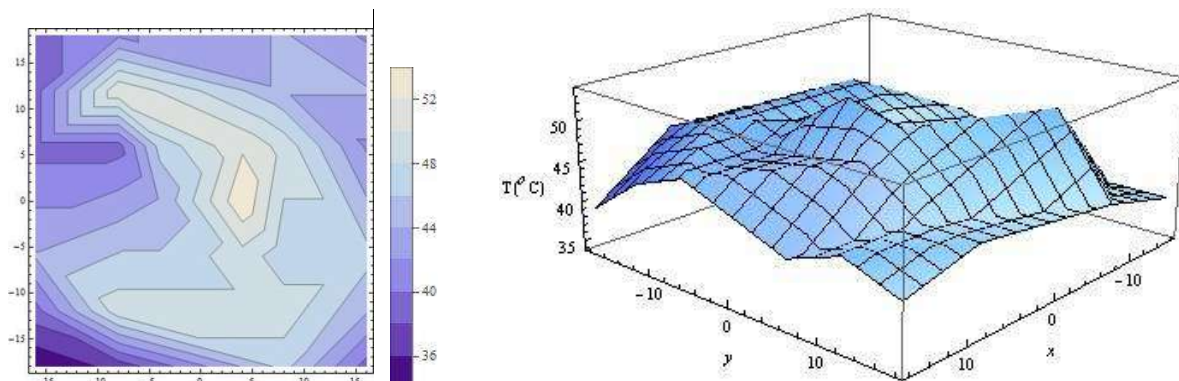


Figura 4.15 Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de espesor de  $0.15 \text{ mm}$ .

La siguiente placa que se analizó fue la que tenía un espesor de  $0.30 \text{ mm}$  de recubrimiento de hollín, la cual presentó una temperatura máxima de  $47.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , y una pendiente de  $0.109 \pm 0.008 \text{ (}^\circ\text{C/s)}$ . Cabe mencionar que la adherencia se dificultó para este espesor, con lo cual se observó cierta irregularidad en la superficie del hollín como la formación de grietas.

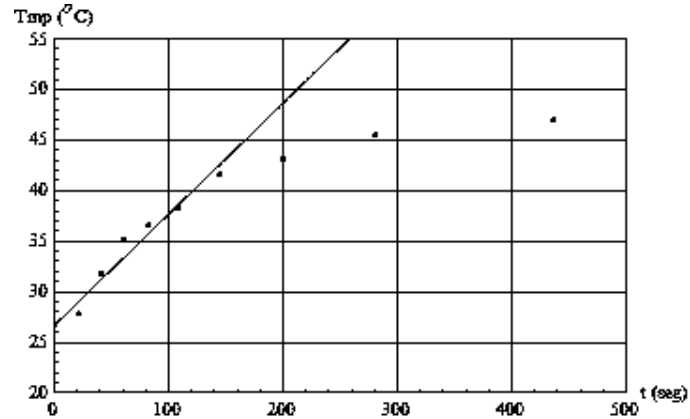


Figura 4.16 Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de espesor de 0.30 mm,  $r=0.87$ .

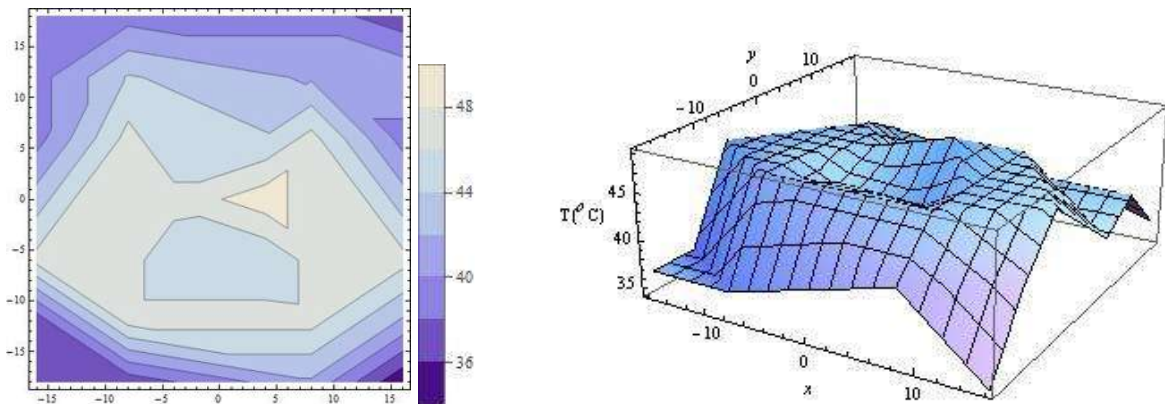


Figura 4.17. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de espesor de 0.30 mm.

Observando la figura anterior se puede ver que existe una distribución de la temperatura en gran parte de la superficie de la placa, pero es inferior la temperatura máxima que en la placa con el recubrimiento de menor espesor.

Finalmente se analizó la placa de acero con recubrimiento de hollín de 0.45 mm de espesor, la cual presentó una temperatura máxima de 45.7 °C y una pendiente de  $0.079 \pm 0.009$ . Por lo que se observó que el incremento de temperatura fue mas lento que el de espesor de 0.15 mm y además presentó una menor temperatura máxima. También se tuvo la complicación de la adherencia de este recubrimiento con ese espesor, presentandose en la superficie valles y picos.



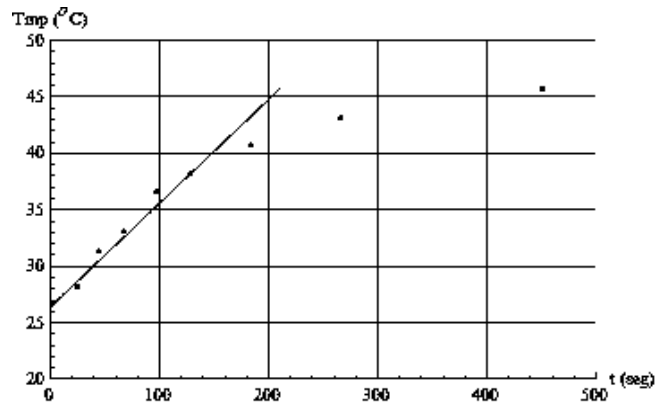


Figura 4.18. Perfil de temperatura en la placa con recubrimiento de espesor de 0.45 mm,  $r=0.88$ .

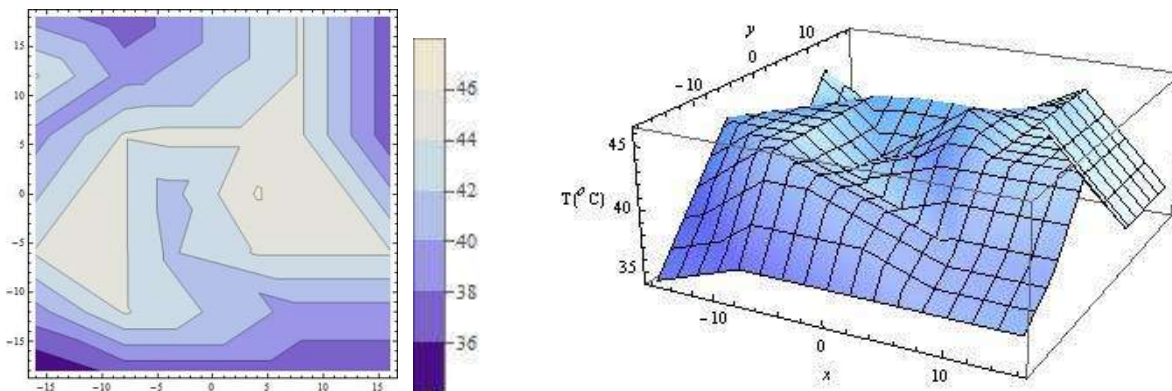


Figura 4.19. Distribución de la temperatura sobre la placa con recubrimiento de espesor de 0.45 mm.

Para este tipo de muestras, pudimos observar que a medida que se incrementaba el espesor del recubrimiento, la temperatura máxima alcanzada en la placa disminuyó. Por lo tanto tenemos que el menor espesor, de 0.15 mm, presentó las mejores características de transferencia de calor a través de la placa. Por otro lado, al incrementar el grosor del recubrimiento se presentó el problema de la adherencia de éste a la superficie de la placa, por lo que es más complicado hacer un recubrimiento con gran espesor.

En general pudimos observar que a medida que aumentamos la superficie recubierta de hollín tenemos un incremento de la pendiente  $\Delta T/\Delta t$ , y de forma análoga al incrementar el espesor del recubrimiento sobre la placa de acero obtuvimos un menor valor en las pendientes. De tal manera que podemos decir que realizar un análisis lineal, con los primeros datos antes de que comience a alcanzar la temperatura de equilibrio, es un método rápido y sencillo para obtener información acerca del recubrimiento, como lo es la pendiente  $\Delta T/\Delta t$ , que como se ha mencionado anteriormente nos indica que tan eficiente es el sistema termoconversor de una estufa solar.

Tabla 4.2. Espesor del recubrimiento, temperatura máxima y pendientes.

Espesor del recubrimiento (mm)	Temperatura máxima promedio (°C)	Pendiente $\Delta T/\Delta t$ (°C/s)
0	41.2	0.072±0.008
0.15	48.5	0.122±0.007
0.30	47.1	0.109±0.008
0.45	45.7	0.079±0.009

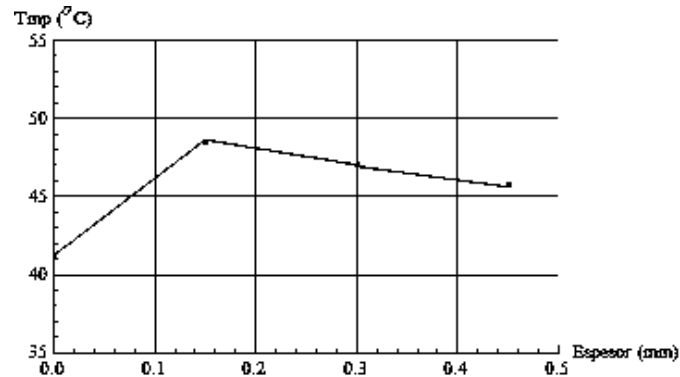


Figura 4.20. Dependencia de la temperatura máxima de la placa respecto del espesor del recubrimiento.

De los datos de la grafica anterior, figura 4.20 se puede decir que existe un espesor critico para el cual se tendra una temperatura máxima en la placa metálica, sin embargo en el laboratorio solo contabamos con el espesor mínimo presentado en este trabajo. Por otro lado tenemos que al colocar un espesor menor tenemos mayor temperatura y además presenta mejor adherencia a la superficie de la placa.

#### 4.4 VARIACIÓN DEL ESPESOR DE LA PLACA DE ACERO

Por último se aumentó el espesor de la placa de acero, con un recubrimiento de hollín de 16 cm<sup>2</sup> de superficie y 0.15 mm de espesor, esto con la finalidad de observar que parámetros son afectados por la variación del recubrimiento y cuales son afectados por la variación del espesor de la placa. El incremento de la placa de acero fue de 1 mm con lo cual tuvimos un espesor total de la placa de 2 mm. Y se llegó a los siguientes resultados. Se obtuvo una temperatura máxima de 45.1 grados centígrados, y una pendiente de temperatura de 0.059±0.006 (°C/s). El aumento de temperatura transcurrió de manera lenta en comparación con la de menor espesor de acero, como se puede observar en la siguiente figura

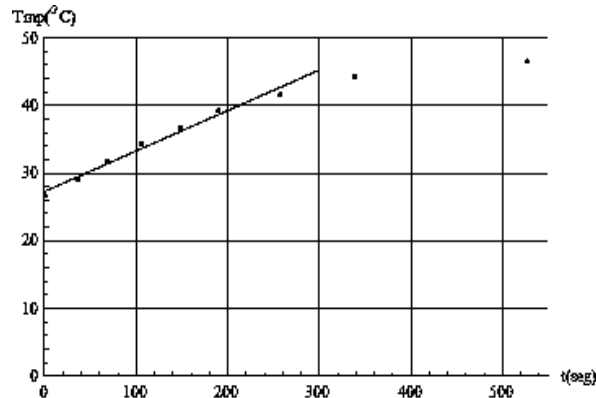


Figura 4.21. Perfil de temperatura en la placa con 2mm de espesor y recubrimiento de 4x4 cm de hollín,  $r=0.91$ .

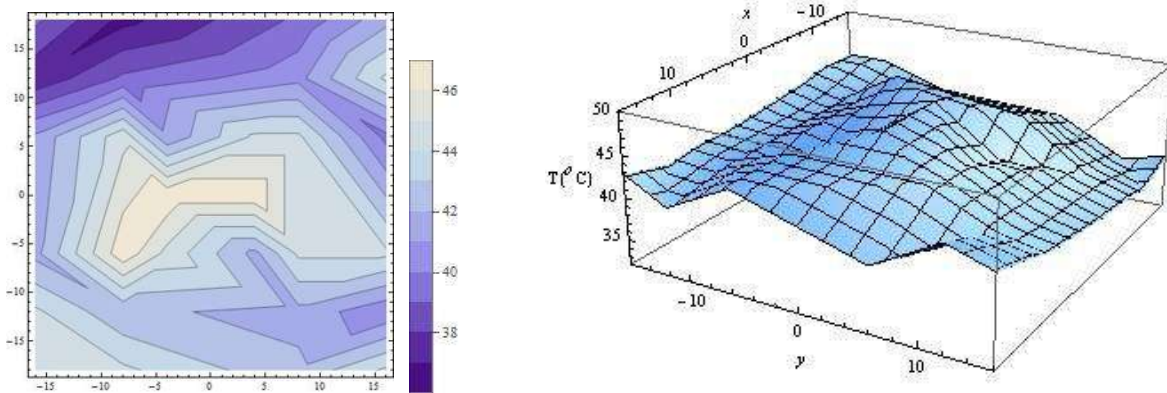


Figura 4.22. Distribución de la temperatura sobre la placa con 2mm de espesor y recubrimiento de 4x4 cm de hollín.

También se pudo observar una buena distribución de temperatura sobre la placa, lo cual nos indica que a pesar de que la temperatura máxima alcanzada es menor que con la mitad de espesor de metal, el recubrimiento distribuye bien el calor en la superficie.

Tabla 4.3. Comparación entre la placa de espesor de acero de 1mm y la de 2mm.

Espesor de la placa (mm)	Espesor del recubrimiento de hollín (mm)	Área recubierta de hollín (cm <sup>2</sup> )	Temp. Máxima promedio (°C)	Pendiente $\Delta T/\Delta t$ (°C/s)
1	0.15	16	53.4	0.138±0.008
2	0.15	16	45.1	0.059±0.006

#### 4.5 RESULTADOS DEL ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO TRANSITORIO

Con los resultados experimentales obtenidos se decidió llevar a cabo un ajuste de los datos observados sobre las placas sin y con el recubrimiento de hollín, para ello se optó por realizar un ajuste intuitivo teniendo en cuenta el perfil que muestran los datos experimentales.

Posteriormente corroboramos que los datos experimentales se ajustan de acuerdo al modelo de transferencia de calor en estado transitorio (2.25).

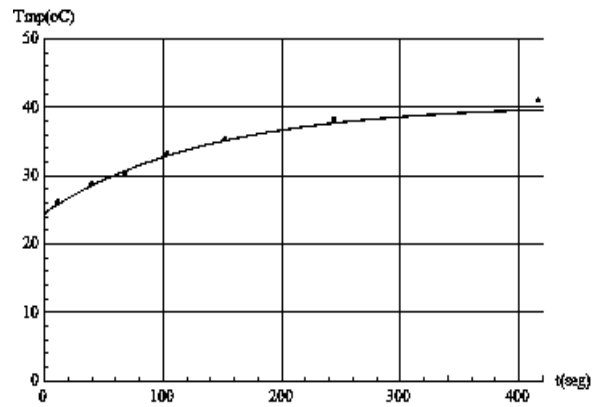


Figura 4.23. Ajuste de la temperatura en función del tiempo, para la placa sin recubrimiento de hollín.

Para la placa sin recubrimiento se obtuvo un ajuste que nos arrojó como resultado una  $\alpha$  de  $0.0078 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ , y una diferencia de temperaturas  $B$  de 15.86 grados centígrados de acuerdo con el modelo (2.25) que se ajusta a la curva mostrada en la figura 4.23.

Las siguientes graficas muestran el ajuste de los datos experimentales con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio para las placas con variación del área de recubrimiento de hollín.

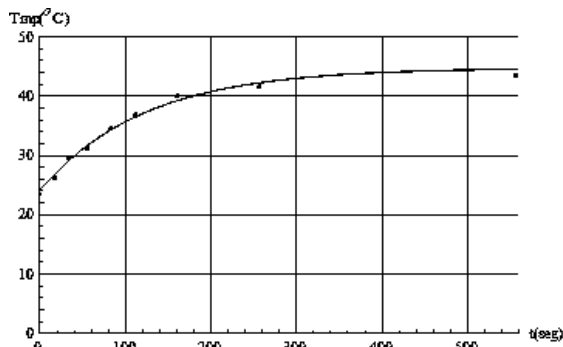


Figura 4.24. Ajuste de temperatura para la placa con recubrimiento de  $1 \text{ cm}^2$  de hollín.

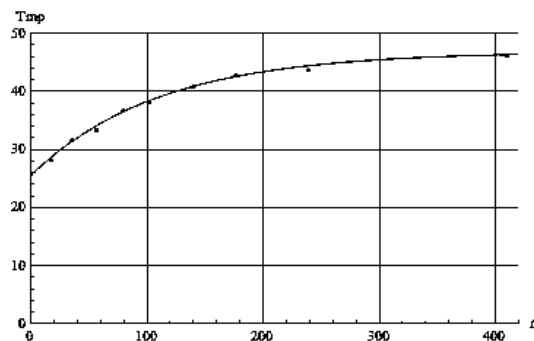


Figura 4.25. Ajuste de temperatura para la placa con recubrimiento de  $4 \text{ cm}^2$ .

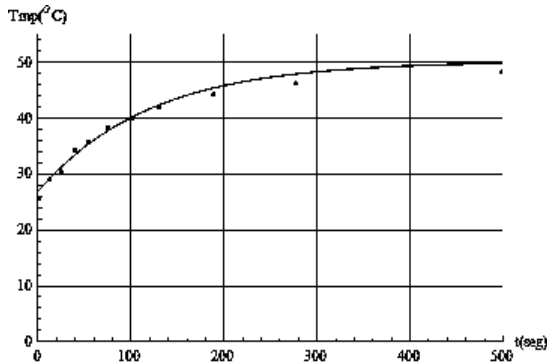


Figura 4.26. Ajuste de temperatura para la placa con recubrimiento de 9 cm<sup>2</sup> de hollín.

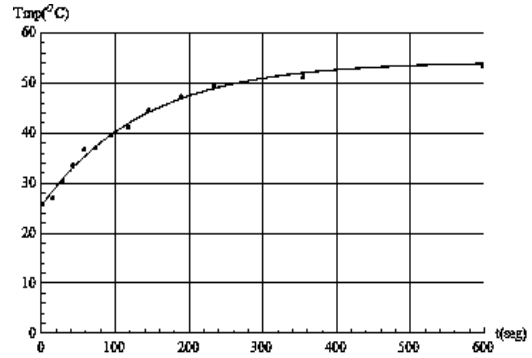


Figura 4.27. Ajuste de temperatura para la placa con recubrimiento de 16 cm<sup>2</sup>.

La siguiente tabla muestra el comportamiento de las muestras al ir aumentando el área recubierta, y los resultados obtenidos al ajustar los datos experimentales con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio.

Tabla 4.4. Resultados correspondientes al modelo de estado transitorio.

Área recubierta de hollín (cm <sup>2</sup> )	$B(^{\circ}\text{C})$	$\alpha$ (s <sup>-1</sup> )
0	15.86	0.0078
1	19.58	0.0082
4	21.27	0.0088
9	23.31	0.0084
16	28.75	0.0086

Como se puede observar en la figura 4.28 existe una dependencia del coeficiente  $B$  con respecto al área de hollín, de tal manera que a medida que aumentamos la superficie recubierta tenemos un aumento de  $B$ , lo que nos indica que este coeficiente está relacionado con el recubrimiento, ya que, como se mencionó en la metodología experimental, no se está midiendo la temperatura sobre el hollín, sino sobre la placa, que se ve afectada por el recubrimiento.

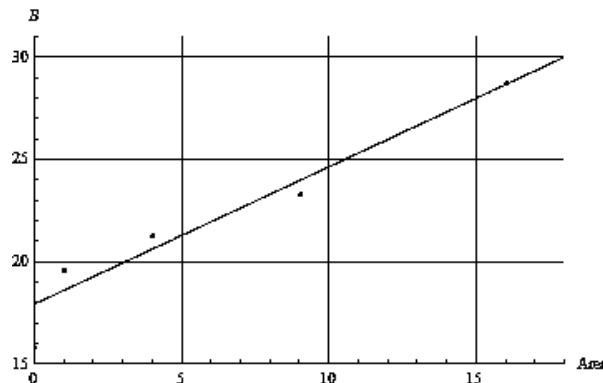


Figura 4.28. Relación entre  $B$  y el área recubierta de hollín,  $r=0.87$ .

Con respecto al parámetro alfa y su relación con el área podemos observar que no varía de forma significativa este coeficiente, teniendo un valor promedio de  $\alpha = 0.0083 \pm 0.0004 (s^{-1})$ .

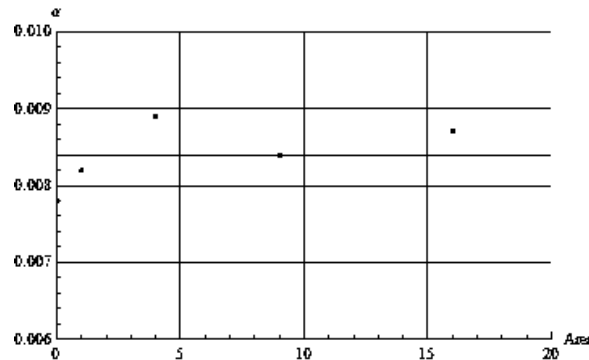


Figura 4.29. Relación entre  $\alpha$  y el área del recubrimiento de hollín.

El parámetro  $\alpha$  en relación con el espesor presentó un valor promedio de  $\alpha = 0.0079 \pm 0.0006 (s^{-1})$

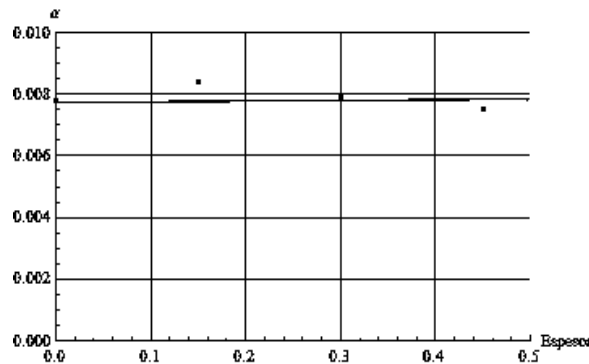


Figura 4.30. Relación entre  $\alpha$  y el espesor del recubrimiento de hollín.

La siguiente tabla muestra el comportamiento de la placa al ir variando el parámetro del espesor del recubrimiento, de acuerdo con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio (2.25).

Tabla 4.5. Resultados de la variación del espesor del recubrimiento de hollín.

Espesor (mm)	$B(^{\circ}C)$	$\alpha(s^{-1})$
0	15.86	0.0078
0.15	23.31	0.0084
0.30	21.41	0.0079
0.45	19.70	0.0077

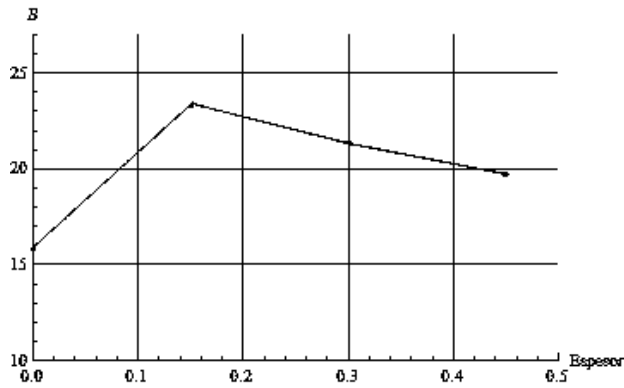


Figura 4.31. Relación entre el coeficiente  $B$  y el espesor del recubrimiento de hollín.

Como se puede observar en la figura 4.30 tenemos que el coeficiente  $B$  se ve influenciado por la variación del espesor del recubrimiento, de tal manera que nos provee información acerca de la óptima utilización del recubrimiento, ya que el valor más grande de  $B$  corresponde al recubrimiento con menor espesor.

Con respecto a la dependencia del coeficiente alfa, una vez más observamos que no existe una variación significativa, ya que en la variación del área de recubrimiento obtuvimos un valor promedio  $\alpha = 0.0083 \pm 0.0004 (s^{-1})$ , y para el caso del espesor un valor promedio de  $\alpha = 0.0079 \pm 0.0006 (s^{-1})$ , por lo que lo podemos tomar como una constante que nos indica la rapidez con la cual ocurre la transferencia de calor a través del material al someterse a un gradiente de temperatura.

Teniendo en cuenta tanto los valores obtenidos en la variación del espesor como los obtenidos en la variación del área de recubrimiento de hollín, tenemos un valor promedio de  $\alpha = 0.0081 \pm 0.0004 (s^{-1})$ .

Para la placa de acero con espesor de 2 mm y recubrimiento de hollín de 4x4 cm de área se obtuvo un  $\alpha=0.0048 s^{-1}$ , y una  $B=21.20$ . Con lo cual vemos que el parámetro alfa cambio significativamente al variar el espesor de la placa.

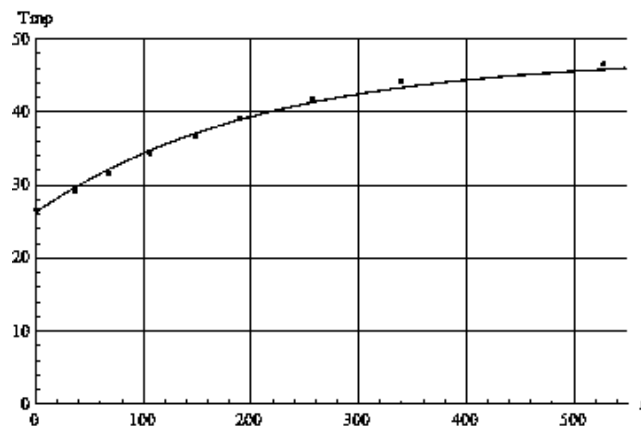


Figura 4.32. Ajuste de temperatura para la placa de acero con espesor de 2 mm.

Lo que se observa es que se tiene una temperatura inferior, de 45.1 °C, a la alcanzada con el mismo recubrimiento de hollín y con 1mm de espesor de la placa de acero, de 53.4 °C, por otro lado tenemos que es ligeramente mayor a la temperatura alcanzada por la placa sin recubrimiento que presentó una temperatura máxima promedio de 41.2 °C, esto debido a que se tiene la mayor parte de la placa recubierta. También se observa que el parámetro  $\alpha$  es prácticamente la mitad del valor promedio encontrado para los recubrimientos que presentan una placa de acero con 1 mm de espesor, que fue de  $\alpha = 0.0081 \pm 0.0004$ , con lo cual podemos decir que el parámetro  $\alpha$  determinado para la placa de 2 mm de espesor, con valor de  $\alpha = 0.0048$ , corresponde a una constante relacionada con la placa y con su espesor, no con el recubrimiento de hollín.

Por último, y de acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de transferencia de calor en estado transitorio, se observa que el recubrimiento está actuando como una fuente de calor que lo absorbe de la lámpara y posteriormente lo transmite a la placa, de tal manera que al comparar con la muestra sin recubrimiento vemos un aumento de temperatura, por otro lado se observa que lo hace con rapidez, ya que no se observan saltos significativos de temperatura. Además tenemos, de acuerdo al modelo teórico, que éste debe tener un medio infinito que le proporcione calor para que se mantenga estable la temperatura, de acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente tenemos que el recubrimiento tiene dicha propiedad al mantener la temperatura estable en la placa de acero. Por otro lado, determinamos que alfa corresponde a un parámetro relacionado con la placa y  $B$  con el recubrimiento, de acuerdo con el modelo físico  $T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t})$ , que aparece en la parte de teoría, alfa está relacionado con propiedades tales como; el calor específico, el volumen del material, su densidad y el coeficiente de transferencia de calor, y  $B$  está relacionada con una diferencia de temperaturas, la temperatura inicial del material, y la temperatura de equilibrio del material una vez que el medio, en este caso el recubrimiento, le ha transferido el calor.

Con respecto a los resultados de la variación del espesor de hollín, se infiere, de la información analizada, que existe un espesor crítico con el que se tiene la máxima temperatura en la placa, ya que a medida que hacemos más grueso el recubrimiento de hollín la temperatura máxima decrece, debido a que la resistencia térmica. Por otro lado, al disminuir el espesor de hollín, también inferimos, de acuerdo a los resultados de transferencia de calor en estado transitorio, que existe una disminución de la temperatura, porque aunque la resistencia térmica es menor, el medio, en este caso el recubrimiento de hollín, deja de cumplir con las condiciones del modelo, es decir deja de comportarse como un medio infinito, de modo que pierde la capacidad de transferirle el suficiente calor para que se mantenga la temperatura.



## Capítulo 5

### 5. CONCLUSIONES

Al llevar a cabo este trabajo de tesis acerca de los experimentos realizados sobre el hollín, podemos hacer las siguientes conclusiones.

- Primeramente nos planteamos como objetivo tener condiciones controladas, como son las altas variaciones de temperatura y viento que en pruebas de campo las invalidan y las hacen tardadas, las cuales pudimos llevar a cabo gracias a un sistema de lentes y una lámpara. De aquí observamos que se obtuvo un haz de luz de aproximadamente 2 cm de diámetro, el cual nos ayudó a calentar la placa de estudio, presentándose diferencias de temperatura significativas para poder hacer comparaciones entre las diferentes muestras. Por lo tanto podemos concluir que se obtuvo un resultado positivo con el arreglo experimental.
- Con respecto al sensor de temperatura que se desarrolló para este trabajo de tesis concluimos que, aunque está sujeto a modificaciones y mejoras, para nuestro propósito dio buenos resultados al proporcionarnos medidas de la temperatura en función del tiempo con un error de  $\pm 1.34$  °C, y también poder tener una visión de la distribución de la temperatura sobre la placa de forma rápida al contar con 6 termopares. Las ventajas que se obtuvieron están marcadas por el espacio que ocupa ya que es de tamaño compacto y además el número de termopares con el que cuenta. Por otro lado es de fácil manejo y proporciona la medición de la temperatura con respecto a tiempo, también por sus características se puede adaptar para hacer las mediciones directamente en la olla de la estufa solar si se quisiera realizar la prueba en campo, ya que no se diseñó exclusivamente para el montaje experimental de este trabajo, de modo que funciona como cualquier otro termómetro digital conectado a una PC.
- Con los ajustes lineales pudimos observar que, la pendiente  $\Delta T/\Delta t$  aumentaba de manera proporcional al incremento de la superficie recubierta de hollín, teniendo una pendiente de  $0.072 \pm 0.0014$  (°C/s) para la placa sin recubrimiento, y una de  $0.138 \pm 0.0018$  (°C/s), para la placa de mayor recubrimiento de 16 cm<sup>2</sup>. Por otro lado al aumentar el espesor del recubrimiento de hollín se presentó una disminución de las pendientes que nos están indicando la rapidez con la cual se calienta la placa, pasando de  $0.122 \pm 0.0017$  (°C/s) para el recubrimiento de 0.15 mm de espesor, a una pendiente de  $0.079 \pm 0.0028$  (°C/s) para el recubrimiento de espesor de 0.45 mm. De esta manera se concluye que obtener esta pendiente, con los primeros datos antes de que comience a estabilizarse la temperatura, es un método rápido y que nos proporciona información de la eficiencia de nuestro recubrimiento.

- La variación del área de recubrimiento afectó significativamente la temperatura alcanzada sobre la placa de acero. Teniendo una temperatura máxima de 41.2 °C sin recubrimiento a tener una temperatura máxima de 53.4 °C con un área recubierta de 16 cm<sup>2</sup>.
- Con la variación del espesor se vio un descenso de la temperatura de 48.5 °C con el de 0.15 mm a 45.7 °C con el de mayor espesor de 0.45 mm. Por los resultados obtenidos concluimos que, el descenso de temperatura es debido al aumento de la resistencia térmica a medida que se incrementa el espesor del recubrimiento. Además de que se presenta la complicación de la adherencia con un mayor grosor de la capa de recubrimiento. También podemos concluir que existe un valor crítico para el espesor del recubrimiento, aunque experimentalmente no fue posible llevar a cabo un recubrimiento de menor espesor que el presentado en este trabajo.
- Al analizar los resultados de la razón de áreas, área de recubrimiento entre área iluminada, podemos concluir que existe una difusión de calor sobre el recubrimiento, primeramente, y después a través del recubrimiento y la placa. Ya que a medida que aumentamos el área de recubrimiento aumenta la temperatura, pero el área iluminada permanece constante.
- En base a los resultados obtenidos mediante el ajuste de las curvas experimentales y de acuerdo al modelo de transferencia de calor en estado transitorio  $T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t})$ , se obtuvo la información de parámetros tales como la constante de tiempo  $\alpha$ , que resultó ser por los resultados, una característica del sustrato (placa de acero), ya que no se presentó una variación significativa al modificar tanto el área como el espesor del recubrimiento, teniéndose un alfa promedio de  $\alpha = 0.0081 \pm 0.0004 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ , solo se presentó el cambio al modificar el espesor de la placa de acero, obteniéndose  $\alpha = 0.0048 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ , por lo que concluimos que el recubrimiento actúa como el medio que le está transfiriendo calor a la placa de acero, además, de acuerdo al modelo, se comporta como un medio infinito para poder mantener estable la temperatura. Por otro lado, después de analizar los resultados, vemos que el parámetro  $B$  del modelo de estado transitorio, está relacionado con el recubrimiento, al ser éste el que se ve afectado al variar los parámetros tanto de área recubierta, como de espesor de la capa de hollín.
- Finalmente, con los resultados obtenidos con el experimento de la variación del espesor de hollín, y los resultados de los ajustes de la transferencia de calor en estado transitorio, concluimos que se tiene un espesor crítico con el cual se tendrá la máxima temperatura. Tenemos que a partir de este espesor crítico, se tiene una disminución de la temperatura provocado por el aumento de la resistencia térmica, y por otro lado al tender el espesor a cero, baja la temperatura a causa de que el recubrimiento no le transfiere el suficiente calor a la placa, debido a que deja de comportarse como un medio infinito.

## REFERENCIAS

- [1] Christelle Monin. Tesis doctoral. "Proceso de formación de hollín en una llama de difusión diésel a baja temperatura". Universidad Politécnica de Valencia. 2009.
- [2] Mauricio González-Avilés, Luis Bernardo López Sosa, Hermelinda Servin. Cocinas solares: alternativa energética para el medio rural. Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Editorial academica española.2014.
- [3] Manuel Álvarez González, Juan Bermúdez Torres, Yalile Alfonso Valdés. Obtención de la superficie selectiva cromo negro a nivel de planta piloto para colectores solares planos. 2014.
- [4] Richard H. Montgomery. Energía Solar, selección de equipo, instalación y aprovechamiento. Segunda edición. Editorial Limusa. México 1994.
- [5] Miguel Manchado Megía. Caracterización de una estufa solar parabólica. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.  
[www.e-archivo.uc3m.es/bistream/handle/10016/Miguel Manchado Megía.pdf](http://www.e-archivo.uc3m.es/bistream/handle/10016/Miguel_Manchado_Megía.pdf).
- [6] Thomas Nussbaumer. Bioenergyinternationale. Emisión de partículas por combustión de madera. 2015.  
[www.verenum.ch/publikationen/TN PM Bioenergy ESP2012.pdf](http://www.verenum.ch/publikationen/TN_PM_Bioenergy_ESP2012.pdf).
- [7] Pablo Salvo Barco. Universidad de Zaragoza. Formación de hollín en la pirolisis de diferentes biocombustibles oxigenados. Junio de 2014.  
[www.invenio2.unizar.es/record/14609/files/TAZ-Pfc-2014-289.pdf](http://www.invenio2.unizar.es/record/14609/files/TAZ-Pfc-2014-289.pdf).
- [8] Young, Hugh D, Roger A. Freedman. Física universitaria, con física moderna volumen 2. Decimosegunda edición. México 2009.
- [9] Askeland. Donald R, Phulé. Pradeep P. Ciencia e ingeniería de los materiales. Cuarta edición. Thompson. México 2004.
- [10] William D. Callister. Introduccion a la ciencia e ingeniería de los materiales. Cuarta edición. Reverte. México 2005.
- [11] José Ángel Manrique Valadez. Transferencia de calor. Segunda edición. Oxford. México 2011.
- [12] Raymond A. Serway. John W. Jewett Jr. Física para ciencias e ingeniería. Volumen 1. Séptima edición. Cengage Learning. México 2009.

[13] Herbert B. Callen. Termodinámica e introducción a la termoestadística. Segunda edición. John Wiley & Sons. 1975.

[14] Charles Kittel. Introducción a la física del estado sólido. Octava edición. John Wiley & Sons. 2005.

[15] J. P. Holman. Transferencia de calor. Decima edición. Compañía editorial continental. México 1999.

[16] Ralph H. Pretucci, F, Geoffrey Herring, Jeffry D. Madura, Carey Bissonnette. Química general: Principios y aplicaciones modernas. Décima edición. Pearson educación. Madrid 2011.

[17] Eugene Hecht, Mark Coffey, Paul Dolan. Óptica. Cuarta edición. Addison Wesley. 2002.

[18] Luis Bernardo López Sosa. Tesis de maestría "Caracterización y determinación de los parámetros óptimos de recubrimientos de bajo costo empleados en cocinas solares". FCFM-UMSNH. México 2016.

## ANEXO I

### CÓDIGO DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA PARA LA PLACA ARDUINO

```
#include "TimerOne.h"

int sensores[6];

int inByte = 0;

long time0 = 0;

const double m[]={2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5};

const double b[]={-148.3,-148.3,-148.3,-148.3,-148.3,-148.3};

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
  }
  establishContact();
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    inByte = Serial.read();
    if ( inByte == '1'){
      time0 = millis();
      Serial.println("Tiempo(ms),Sensor1,Sensor2,Sensor3,Sensor4,Sensor5,Sensor6");
      Timer1.initialize(1000000);
      Timer1.attachInterrupt(callback);
    }
    else if ( inByte == '0'){
      Serial.println("...");
      Timer1.detachInterrupt();}
    else if ( inByte == '2'){
      callback();}
  }
}
```

```
void callback(){
    long delta = millis() - time0;
    for(int i=0; i< 6; i++){
        sensores[i] = analogRead(A0+i);}
    Serial.print(delta);
    for(int i=0; i< 6; i++){
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensores[i]*m[i]+b[i]);}
    Serial.print("\n");
}
void establishContact() {
    while (Serial.available() <= 0) {
        Serial.println("Arduino disponible");
        delay(5000);
    }
}
```