



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



## FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

“Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez”

### DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA FÍSICA

“DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ÓPTICO Y TÉRMICO DE LA  
RESINA DE PINO PARA LA ELABORACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO DE  
BAJO COSTO PARA APLICACIONES SOLARES”

## TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA FÍSICA

PRESENTA:  
HERMINIO REBOLLO SANDOVAL

ASESOR:  
DOCTOR EN FÍSICA  
LUIS MARIANO HERNÁNDEZ RAMÍREZ

MORELIA, MICHOACÁN; MARZO DE 2020



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Objetivos y metas.....	6
1.1.1. Objetivo general.....	6
1.1.2. Objetivos específicos.....	6
1.1.3. Metas.....	6
1.2. Hipótesis.....	6
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1. Recubrimientos.....	7
2.1.1. Tipos de recubrimientos solares.....	8
2.1.2. Síntesis y caracterización de recubrimientos solares.....	11
2.1.3. Pruebas térmicas en recubrimientos absorbentes solares.....	14
2.2. Hollín.....	15
2.3. Resina de pino.....	20
3. MARCO TEÓRICO.....	23
3.1. Espectroscopia uv-vis.....	23
3.2. Espectroscopia uv-vis-nir.....	24
3.3. Microscopia Electrónica de Barrido.....	25
3.4. Protocolo ASAE S580.....	26
3.5. Modelo de transferencia de calor en estado transitorio.....	27
4. DETALLES EXPERIMENTALES.....	29
4.1. Metodología.....	29
4.2. Variación del espesor del recubrimiento de resina.....	29
4.3. Preparación de muestras resina/solvente.....	30
4.4. Preparación de muestras variando concentración de resina/hollín.....	31
4.5. Arreglo óptico.....	32
4.6. Evaluación de perfiles térmicos.....	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
5.1. Pruebas ópticas.....	34
5.1.1. Transmitancia para muestras de resina variando el espesor.....	34
5.1.2. Transmitancia en las muestras de resina-solvente y resina-hollín.....	36
5.1.3. Reflectancia, composición elemental y morfología.....	41
5.2. Pruebas térmicas.....	47
5.3. Costos del recubrimiento.....	59
6. CONCLUSIONES.....	60
REFERENCIAS	62

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por el apoyo brindado a través de la beca, para poder realizar los estudios de posgrado en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Física de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo.

## RESUMEN

Se estudia el comportamiento óptico y térmico de la resina de pino para su aplicación en un recubrimiento de bajo costo, elaborado con hollín, ya que tanto la resina como el hollín, son materiales de fácil acceso y bajo costo, de tal manera que el recubrimiento puede ser elaborado y aplicado por los usuarios, para su utilización en tecnologías solares, como pueden ser: estufas, hornos y secadores solares entre otros. La resina puede ser usada como aglutinante de forma directa, pero el uso de un solvente la hace más manejable, por lo tanto como primer paso se realizó un estudio del efecto del solvente en la resina. Se prepararon diferentes concentraciones de resina/solvente, y muestras de resina variando el espesor. Las muestras se analizaron con espectroscopia uv-vis. Al cambiar los parámetros de espesor de recubrimiento y concentración de solvente se modificó la transmitancia, de tal modo que al incrementar el espesor se obtuvo una disminución en el porcentaje de transmisión de luz, por otro lado al aumentar la concentración de solvente se observó una mayor transmitancia, esto debido a que al evaporarse el solvente queda un recubrimiento de menor espesor lo que se traduce en un mayor porcentaje de luz transmitida. Posteriormente se prepararon muestras de resina/hollín, las cuales se depositaron sobre sustratos metálicos de aluminio. Se analizaron con espectroscopia uv-vis, microscopia electrónica de barrido, uv-vis-nir, y se evaluaron fototérmicamente. Se presentó, por medio de uv-vis-nir, una reflectancia de alrededor de 6% para las muestras analizadas, y una distribución homogénea de sus componentes, con microscopia electrónica de barrido. Finalmente se hicieron pruebas fototérmicas, evaluándose diferentes concentraciones de resina/hollín, sus espesores, así como también recubrimientos de pintura, pintura/hollín, pintura/grafito, resina/grafito, donde se determinó que la concentración de 30 % hollín y 70 % resina, con un espesor de 0.15 mm. mostró las mejores características de absorción de calor.

Palabras clave: Resina de pino, hollín, recubrimiento, absorción, energía solar

## ABSTRACT

The optical and thermal behavior of pine resin is studied for application in a low-cost coating, made with soot, since both resin and soot, they are materials of easy access and low cost, in such a way that the coating can be elaborated and applied by the users, for use in solar technologies, such as: stoves, ovens and solar dryers among others. The resin can be used as a binder directly, but the use of a solvent makes it more manageable, Therefore, as a first step, a study of the effect of the solvent on the resin was carried out. Different sizes of resin/solvent were prepared, and resin samples varying the thickness. The samples are analyzed with uv-vis spectroscopy. By changing the parameters of coating thickness and solvent concentration, the transmittance was modified, in such a way that when increasing the thickness a decrease in the percentage of light transmission is obtained, on the other hand, increasing the concentration of solvent showed a greater transmittance, This is due to the evaporation of the solvent, a thinner coating remains, which translates into a higher percentage of transmitted light. Subsequently resin/soot samples were prepared, which were deposited on aluminum metal substrates. They were analyzed with uv-vis spectroscopy, scanning electron microscopy, uv-vis-nir, and were photothermally evaluated. A reflectance of about 6% for the analyzed samples is shown by uv-vis-nir, and a homogeneous distribution of its components, with scanning electron microscopy. Finally, photothermal tests were performed, evaluating different amounts of resin/soot, their thicknesses, as well as black paint coating, paint/soot, paint/graphite, paint/resin and resin/graphite coatings, where it is determined that the concentration of 30% soot and 70% resin, with a thickness of 0.15 mm, showed the best heat absorption characteristics.

Keywords: Pine resin, soot, coating, absorption, solar energy.

## 1. INTRODUCCIÓN

La extracción y la quema de combustibles fósiles para la generación de calor y la posterior transformación de ésta en otra, ha generado en la actualidad muchos problemas ambientales asociados al alto consumo energético y a la necesidad del hombre por satisfacerlo [1], además de las complicaciones económicas que pueden tener algunas regiones del planeta debido a que no cuentan con combustibles fósiles, haciendo que éstos tengan un elevado costo. La obtención de energía y el agotamiento de sus fuentes, están clasificados en un concepto importante para su entendimiento; que la energía es renovable o no. La energía no renovable tiene la característica que la fuente se almacena de forma subterránea o terrestre por millones de años y que es un recurso agotable con el tiempo; por ejemplo el carbón, gas natural, petróleo y uranio; solo por mencionar algunos [2]. A diferencia, la energía renovable tiene menos emisiones de carbono, es más respetuosa con el medio ambiente, no emite estos gases de efecto invernadero, es básica para frenar el calentamiento global y el cambio climático, ofrece un potencial prácticamente ilimitado y su regeneración parece no tener fin. Por lo anterior es que en los últimos años se han incrementado las investigaciones en el área de las fuentes renovables de energía para dar solución a los problemas medioambientales y energéticos que aquejan a las sociedades actuales.

La radiación solar es una de las formas de energía renovable más abundante en la tierra, la cual se puede clasificar de acuerdo a su uso en: energía solar activa, energía solar pasiva, térmica, fotovoltaica, híbrida, y eólica-solar [3]. En este trabajo nos enfocamos a la energía solar térmica, la cual consiste en el aprovechamiento de la radiación del sol para producir calor que puede utilizarse para cocinar alimentos, para calentar agua para uso doméstico o industrial, o para producción de energía mecánica y partir de ésta generar energía eléctrica. Los colectores de radiación solar térmica están divididos de acuerdo al rango de temperatura al que operan, así estos se dividen en sistemas de baja temperatura, que operan a 65 °C y que se utilizan de forma doméstica, sistemas de media temperatura, cuyo rango esta entre los 100 y los 300 °C, los cuales son utilizados para uso industrial, y los sistemas de alta temperatura que operan a temperaturas superiores de 500 °C y es utilizada para generar electricidad en las llamadas plantas termosolares.

Todas estas tecnologías solares térmicas tienen en común que necesitan de materiales y componentes para su funcionamiento y optimización, dentro de estas partes que ayudan a la optimización de estos aparatos esta lo que se conoce como el material absorbente, el cual como su nombre lo indica tiene la función de absorber la mayor cantidad de energía solar, la principal característica que debe tener es una gran absorción y una baja emisión térmica [4].

La presente investigación se centra en el desarrollo de un recubrimiento absorbente de bajo costo, el cual estará hecho a base de hollín como elemento absorbente y de resina de pino como aglutinante, el hollín ha sido estudiado de tal manera que se ha demostrado su capacidad para mejorar las características de absorción de energía solar [5-8]. La utilización de la resina de pino como aglutinante, se debe al hecho de que es de bajo costo, presenta buenas propiedades de adherencia, además de que también puede tener buenas propiedades ópticas.

## 1.1. Objetivos y metas

### 1.1.1. Objetivo general

Caracterizar de forma óptica y térmica la resina de pino, para implementarla como aglutinante en la elaboración de un recubrimiento con hollín para aplicaciones solares.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la transmitancia de la resina de pino, sin y con solvente, mediante uv-vis.
- Elaborar un recubrimiento de resina/hollín.
- Determinar la morfología y composición elemental del recubrimiento mediante microscopía electrónica de barrido.
- Caracterización térmica del recubrimiento mediante un montaje experimental de condiciones controladas en laboratorio, utilizando un modelo físico de transferencia de calor en estado transitorio

### 1.1.3. Metas

- Utilizar resina de pino como aglutinante para preparar un recubrimiento, hecho con hollín, para aplicarlo como absorbente solar de bajo costo en sistemas termosolares.
- Comparar térmicamente el recubrimiento elaborado en este proyecto, con recubrimientos elaborados con pintura negra comercial, pintura con hollín, pintura con grafito y resina con grafito, para evaluar su posible utilización en aplicaciones solares.

## 1.2. Hipótesis

- Partiendo de los estudios ya hechos en cuanto a los recubrimientos con hollín, queremos demostrar que se puede generar un recubrimiento eficiente y de bajo costo, utilizando la resina de pino como aglutinante natural, que presente buenas características estructurales, como pueden ser su adhesión a la placa metálica. Así como también poseer buena absorción de radiación solar.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Recubrimientos

Los recubrimientos tienen como función mejorar las características ópticas, mecánicas, eléctricas y/o de resistencia al interperismo de las superficies donde estos son depositados; las técnicas utilizadas para la síntesis y depósito del recubrimiento sobre la superficie le dan al recubrimiento sus características físicas y le asignan una función a cumplir dentro del sistema; algunas de las cuales son la de proteger la superficie contra la corrosión, absorber la radiación solar incidente, dureza a la superficie, entre otras [9].

La obtención de energía y el agotamiento de sus fuentes, están clasificados en un concepto importante para su entendimiento; que la energía es renovable o no. La energía no renovable tiene la característica que la fuente se almacena de forma subterránea o terrestre por millones de años y que es un recurso agotable con el tiempo; por ejemplo el carbón, gas natural, petróleo y uranio; solo por mencionar algunos. A diferencia, la energía renovable tiene menos emisiones de carbono, es más respetuosa con el medio ambiente, no emite estos gases efecto invernadero, es básica para frenar el calentamiento global y el cambio climático, ofrece un potencial prácticamente ilimitado y su regeneración parece no tener fin. Dado que las fuentes de energía no renovable se van agotando con su consumo; las energías renovables constituyen una opción indispensable. Aquí entra en función la principal fuente de energía renovable, esta es la energía solar; fuente limpia, natural e inagotable utilizada para la obtención de energía térmica [10].

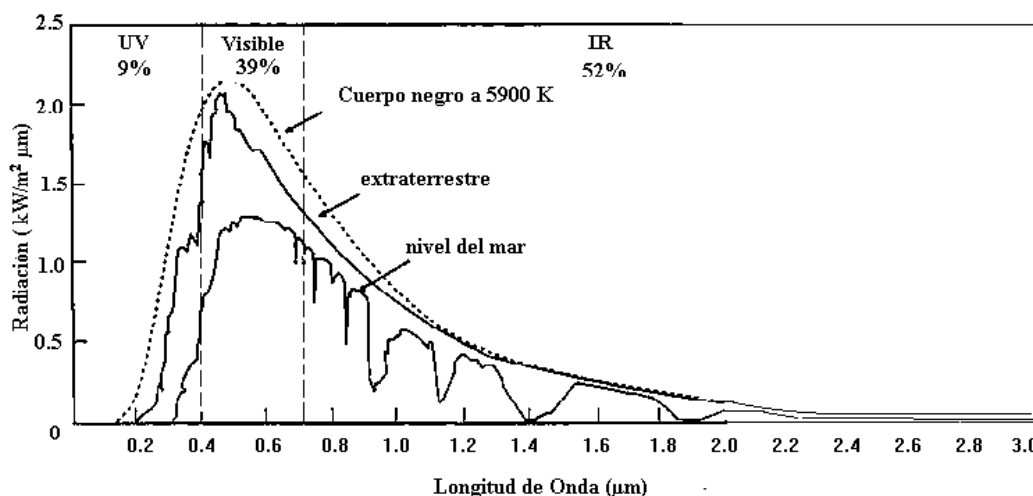


Figura 2.1. Espectro solar.

La energía del sol es emitida en todas las direcciones y sólo una fracción, alrededor de  $1.366 \text{ kWm}^{-2}$  es interceptada por la Tierra. Este valor se conoce como la constante solar y su valor fluctúa  $\pm 3 \%$  debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol [11]. Debido a esto, el Sol se considera la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta y se considera que treinta minutos de radiación solar impactando en la Tierra es igual a la demanda energética mundial por un año.



En la actualidad, las técnicas para lograr la conversión de energía solar-térmica ha encontrado numerosas aplicaciones que van desde sistemas de baja a muy alta temperatura. La mayor eficiencia para la conversión de energía solar-térmica se logra gracias a la aplicación de recubrimientos selectivos solares sobre superficies metálicas altamente reflejantes.

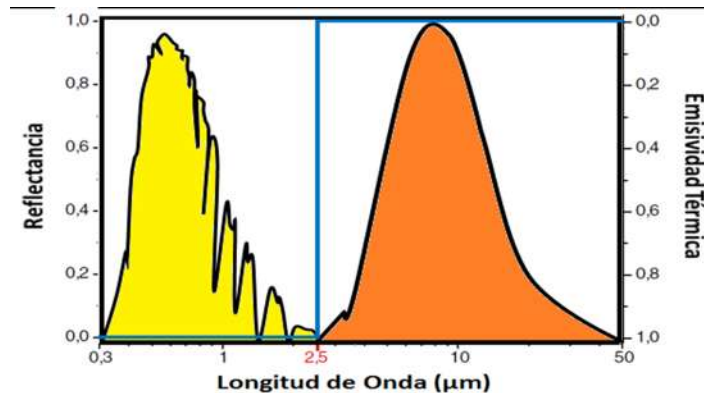


Figura 2.2. Reflectancia y emisividad térmica para un recubrimiento selectivo ideal

Al incidir los fotones que componen la radiación solar sobre una superficie, se produce una excitación de los electrones de los átomos que la componen. El decaimiento del electrón excitado a su estado normal se produce liberando la energía absorbida, que es transferida a los vínculos interatómicos, es decir generan vibraciones en toda la estructura del sólido. En definitiva, el fotón absorbido es utilizado para aumentar la temperatura del cuerpo a través de las vibraciones de los átomos que lo componen [12]. De esta forma la energía solar es convertida en energía térmica al incidir sobre una superficie absorbente, proceso que se denomina conversión fototérmica.

En el rango del espectro solar (0.3-2.5  $\mu\text{m}$ ) un material selectivo ideal se caracteriza por una muy baja reflectancia, lo que indica una alta absorción solar, es decir, que el recubrimiento absorbe casi toda la luz que incide sobre él. A diferencia, en el rango de 2.5-50  $\mu\text{m}$ , el cual está relacionado con la radiación térmica emitida por una superficie en relación a la de un cuerpo negro, la reflectancia debe ser alta, que se traduce en una muy baja emisividad térmica. En resumen, un recubrimiento ideal tendría una baja reflectancia en el rango solar y alta reflectancia en el rango infrarrojo (IR).

### 2.1.1. Tipos de recubrimientos solares

En la literatura se presentan diferentes propuestas de recubrimientos absorbentes solares, los que se elaboran con diferentes tipos de materiales, como composites C-NiO [13], óxidos metálicos como el óxido de cromo [14], también se tienen recubrimientos hechos a base de pinturas negras, que se elaboran a partir de la calcinación de algunos metales, como el cobalto [15], para ser utilizados como pigmentos para las pinturas absorbentes. Por otro lado se tiene también la influencia de la estructura de los recubrimientos que juega un papel importante en la absorción de radiación, que van desde la rugosidad [16], a la combinación de diferentes materiales, entremezclados o en multicapas. Los recubrimientos absorbentes solares se pueden clasificar en 6 tipos: a) intrínsecos, b) tipo semiconductor-metal, c) de multicapas, d) compuestos multi-dieléctricos, e) texturizados, f) de transmisión absorbente de cuerpo negro.

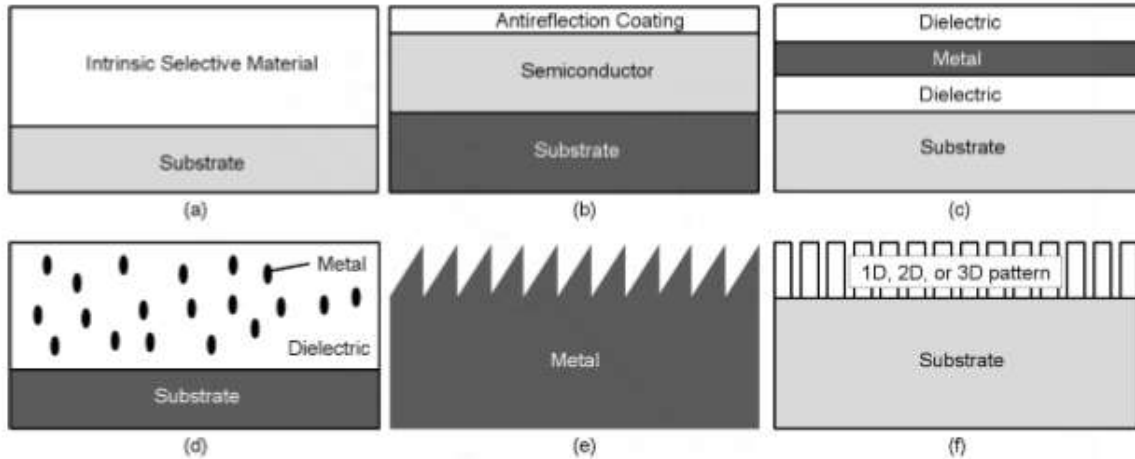


Figura 2.3. Diferentes tipos de recubrimientos selectivos solares, a) intrínseco, b) semiconductor-metal, c) multicapas, d) cermet, e) texturizado, f) cristal fónico.

Los absorbedores intrínsecos o de masa absorbente utilizan un material que tiene propiedades intrínsecas que resultan en la selectividad espectral deseada. Estos materiales no se producen de forma natural, pero algunas propiedades selectivas solares se encuentran en metales de transición y semiconductores, ambos pueden ser modificados para servir como un absorbedor intrínseco. En esta categoría se encuentra el W [17], MoO<sub>3</sub> [18], CaF<sub>2</sub> y el ZrB<sub>2</sub> [19].

El grupo Semiconductor-metal. Semiconductores con bandas prohibidas alrededor de ~ 0.5 eV (2,5 micras) a 1,26 eV (1,0 micras) absorben radiación de onda corta, y el metal subyacente proporciona baja emisión térmica para dar la selectividad espectral deseada para grupos semiconductor-metal. Los semiconductores de interés para estos recubrimientos son: Si (1,1 eV), Ge (0,7 eV) [20].

Recubrimientos absorbentes de capas múltiples se pueden diseñar para que sean absorbentes selectivos eficientes. El efecto selectivo se debe a que la reflectancia múltiple pasa a través de la capa dieléctrica inferior (E) y es independiente de la selectividad del dieléctrico, como se muestra en la Fig. 2.4. Una capa delgada semitransparente reflectante (D), típicamente un metal, separa dos capas dieléctricas de un cuarto de onda (C y E). La capa reflectante de abajo (D) tiene una alta reflectancia en la región infrarroja (IR) y es ligeramente menos reflectante en la región visible. La capa dieléctrica superior (C) reduce la reflectancia visible. El espesor de esta determina la forma y posición de la curva de reflectancia. Un elemento semitransparente adicional (Capa de metal B) reduce aún más la reflectancia en la región visible, y una capa dieléctrica adicional (A) aumenta la absorción en la región visible y amplía la zona de alta absorción. Estos recubrimientos tienen una alta absorción solar, de baja emisión térmica y son estables a temperaturas elevadas ( $\geq 400^{\circ}\text{C}$ ) dependiendo de los materiales utilizados. Varios absorbentes multicapa utilizando diferentes metales (por ejemplo, Mo, Ag, Cu, Ni) y capas dieléctricas (por ejemplo, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>, ZnS) se han citado en la literatura para aplicaciones de alta temperatura [21].



Figura 2.4. Esquema de recubrimiento multicapas.

Recubrimientos compuestos Multi-dieléctricos o grupos absorbedor-reflector tienen un recubrimiento altamente absorbente en el espectro solar, que es transparente en el IR, depositado sobre un sustrato metálico altamente IR-reflectante. El material compuesto altamente absorbente dieléctrico, consta de partículas metálicas finas en una matriz dieléctrica o de cerámica, o un óxido poroso impregnado con metal. Estas películas son transparentes en la región IR térmico, mientras que son fuertemente absorbentes en la región solar debido a transiciones inter-bandas en el metal. Cuando se depositan en un espejo altamente reflectante, el grupo forma una superficie selectiva con alta absorción solar y de baja emisión térmica. La alta absorbancia puede ser intrínseca, geoméricamente mejorada, o ambos. La capa dieléctrica-metal absorbente, compuesta por materiales para alta temperatura puede tener un contenido gradual y uniforme de metal. El concepto de metal-dieléctrico ofrece un alto grado de flexibilidad, y la selectividad solar se puede optimizar mediante la elección adecuada de los componentes del espesor de revestimiento de la concentración de partículas del tamaño de la forma de la orientación [47].

El texturizado de superficies es una técnica común para obtener selectividad espectral por la captura óptica de la energía solar. Adecuadamente superficies con textura rugosa absorben la energía solar. La emitancia se puede ajustar (mayor o menor) mediante la modificación de la microestructura (microcristales) de los recubrimientos con tratamientos de haces de iones [22]. Algunas superficies pueden exhibir propiedades selectivas si tienen la rugosidad adecuada, debido a que las propiedades selectivas dependen de las proporciones de desviaciones medias de altura y la distancia de auto correlación para la longitud de onda [23]. Correctamente la orientación del material de la textura puede mejorar la absorción y la emisividad de un material espectral y selectivamente. Por ejemplo, en los colectores de placa plana, ranuras trapezoidales rectas pueden mejorar las características de una placa de absorción gris comparables a la de una placa de absorción selectiva de placa plana [24].

Los cristales fotónicos son caminos estructurados diseñados sobre la superficie del material a manera de autopistas por donde los fotones se ven condicionados a transitar, es decir, se reflejan en la dirección que estos caminos se lo permiten. Los fotones se ven obligados a recorrer los caminos descritos por el patrón diseñado sobre la superficie absorbente debido a que estos caminos o autopistas tienen el mismo tamaño de una longitud de onda del tipo de radiación que se desea atrapar, esto permite controlar cuáles longitudes de onda serán absorbidos y cuáles serán redireccionadas en una dirección que esta predeterminada por el camino diseñado. La dificultad son las técnicas para diseñar estos caminos para los fotones, se deben utilizar depósitos de películas asistidos por un láser o fotolitografía [9].

### 2.1.2. Síntesis y caracterización de recubrimientos solares

Encontramos que de manera frecuente se distinguen tres formas de elaborar recubrimientos, que van desde técnicas físicas como el sputtering, la deposición química de vapor y su variante, la aspersion pirolítica, y la técnica sol-gel.

La técnica sputtering es un proceso importante para la obtención de películas delgadas, es comúnmente usado en la industria de semiconductores y recubrimientos duros, además es usado en recubrimientos para joyería. Por medio de esta técnica, se obtienen recubrimientos de alta calidad de compuestos refractarios y metales, con buena adhesión y control de espesor sin los requerimientos de alta temperatura de la técnica de *CVD*. Esta técnica consiste en colocar una fuente (objetivo) en una cámara de alto vacío y bombardearla con iones de gas (usualmente argón) los cuales se han acelerado con alto voltaje, produciendo una descarga luminiscente o plasma. Los átomos de la fuente son físicamente proyectados por transferencia de momento y se depositan en el sustrato a través de la cámara de vacío. A diferencia del *CVD*, este proceso no es activado por temperatura.

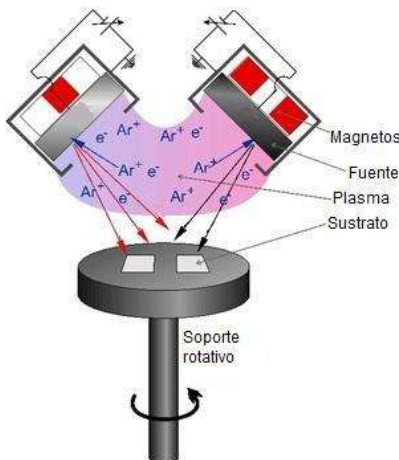


Figura 2.5. Esquema de la técnica de sputtering [3].

La técnica chemical vapor deposition o *CVD* es actualmente la más usada para producir películas delgadas, consiste en reaccionar químicamente el compuesto volátil del material a ser depositado con otros gases, para producir un sólido no volátil que se deposite atómicamente en un sustrato colocado adecuadamente. Una variación de la técnica es el llamado depósito químico asistido por aerosol (*AACVD*) también conocida como aspersion pirolítica (*spray pyrolysis*); consiste principalmente en producir una nube de gotas muy finas de una solución conformada por el material precursor y un solvente apropiado a través de un nebulizador. Existen varios tipos de nebulizadores para producir la nube de gotas: neumáticos, ultrasónicos o electrostáticos. Entre los más eficientes se encuentran los nebulizadores ultrasónicos, que generan gotas con dimensiones de algunos micrómetros y con una distribución de tamaños cerrada. En estos nebulizadores la nube de gotas, es producida por las vibraciones (algunos MHz) de un cristal piezoeléctrico, cuyas ondas ultrasónicas son concentradas en la superficie de la solución, la que por cavitación genera la nube de gotas micrométricas. El tamaño de gota depende principalmente de la frecuencia del piezoeléctrico (en relación inversa), de la viscosidad y densidad de la solución. El tamaño de

gota y esencialmente su distribución de tamaños influye determinadamente en las condiciones (temperatura de sustrato, flujo de gas portador) del depósito y en la calidad del material obtenido. Una distribución de tamaño de gota muy extendida impide la optimización de las condiciones de síntesis, debido a que una gota grande necesita condiciones diferentes a las de una gota pequeña; dando como resultado un recubrimiento de mala calidad. Esta nube es introducida por medio de un gas de arrastre (aire o N<sub>2</sub>) en una cámara de temperatura controlada donde se encuentra el sustrato para la obtención de la película delgada.

La técnica sol-gel usa precursores líquidos que son convertidos en productos finales a través de medios térmicos y químicos. El precursor químico se prepara formando una suspensión coloidal (sol) que pasa por un estado coagulante (gel) seguido de secado y unión al sustrato. Este proceso sólo requiere de temperaturas moderadas y permite el control de la composición y estructura del depósito a nivel molecular. Esta técnica, representada en la figura 2.6, ha despertado gran interés en la industria de alta tecnología como la de semiconductores, optoelectrónica, óptica y cerámicos estructurados.

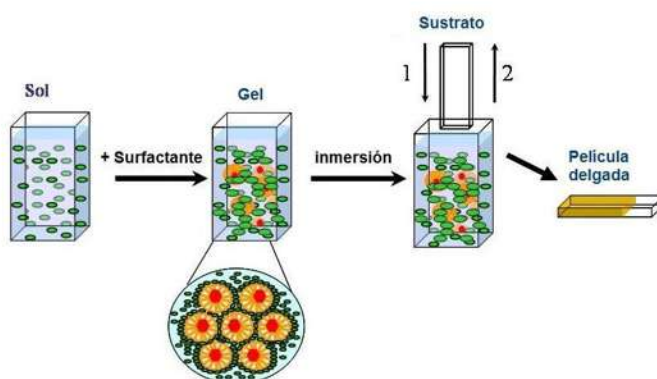


Figura 2.6. Esquema de la técnica sol-gel [3].

Las técnicas de caracterización más comúnmente utilizadas para evaluar recubrimientos selectivos solares son principalmente la espectroscopia uv-vis, que consiste en hacer incidir un rayo de luz sobre una superficie o material que se quiere estudiar, y de esta manera obtener información, ya sea de cuanta luz se transmite, o cuanta se refleja y absorbe. La difracción de rayos x es una técnica muy utilizada ya que proporciona información acerca de la estructura de los recubrimientos. También la microscopía electrónica de barrido es una forma de caracterizar los materiales, ya que se obtienen imágenes de la morfología y de la distribución de los diferentes elementos que los conforman. Estas y otras técnicas son ampliamente utilizadas en la caracterización de recubrimientos.

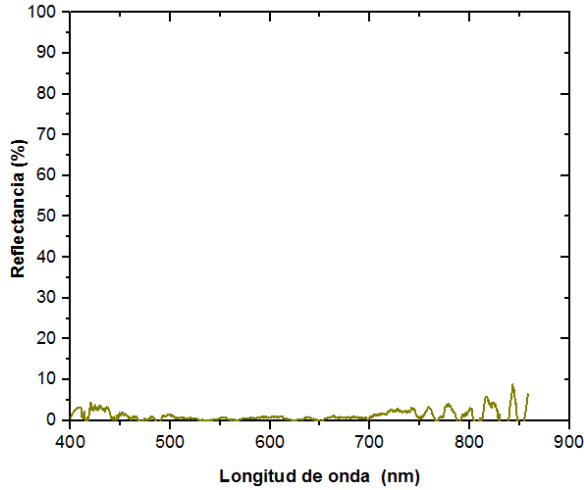


Figura 2.7. Reflectancia de un recubrimiento Absorbente [25].

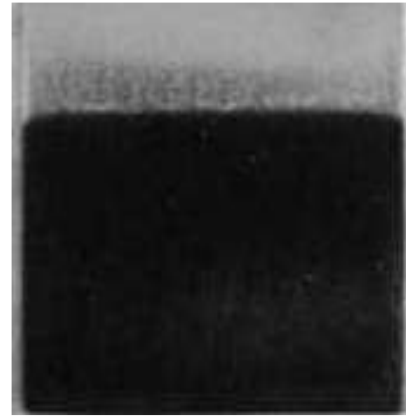


Figura 2.8. Fotografía de un recubrimiento elaborado por inmersión [25].

En general, encontramos en la literatura que se realizan pruebas de espectroscopia uv-vis-nir, en el rango del de espectro solar, para determinar sus propiedades ópticas, como su reflectancia y posteriormente su absorbancia, utilizando la ley de kirchoff, donde se tiene que

$$\alpha(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (2.1)$$

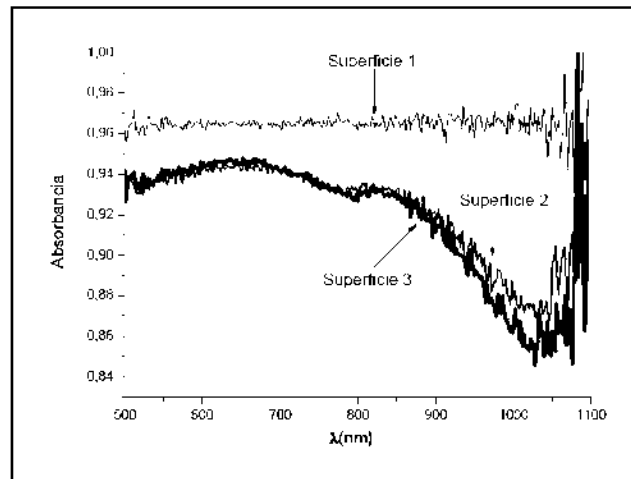


Figura 2.9. Absorbancia de tres superficies absorbentes solares [13].

Y aunque técnicas como la preparación de pinturas y la técnica sol-gel son de bajo costo, comparadas con otros recubrimientos, en los últimos años se han realizados estudios para la generación de recubrimientos absorbentes a partir de materiales de desecho, como el hollín de biomasa forestal, que han resultado ser una opción de bajo costo, tanto por su reutilización, como por su fácil aplicación, al utilizar pintura como aglutinante [26].

### 2.1.3. Pruebas térmicas en recubrimientos absorbentes solares

Se tienen algunos trabajos en los cuales se han realizado pruebas térmicas, ya sea para la evaluación de solo los recubrimientos, como por ejemplo en placas muestra que sirven para realizar los experimentos, o en conjunto con el tipo de tecnología en los cuales se planea implementarlos, como en colectores solares [27], y estufas solares [5,6].

En el trabajo [28] se utilizaron lámparas para la simulación térmica, y poder evaluar diferentes tipos de recubrimientos sobre un colector solar.



Figura 2.10. Montaje experimental en laboratorio [28].

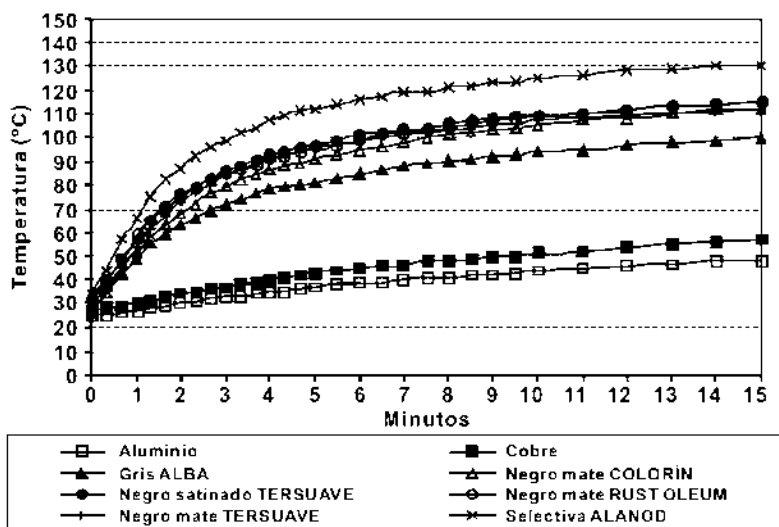


Figura 2.11. Gráfica comparativa de temperaturas para diferentes tipos de recubrimientos [28].

También existen trabajos en los cuales se evalúan térmicamente los recubrimientos utilizando directamente la luz del sol [29], en estos trabajos vemos que solo son de manera comparativa, sin realizar algún tipo de ajuste sobre las curvas.



Figura 2.12. Evaluación térmica directamente usando luz solar [29].

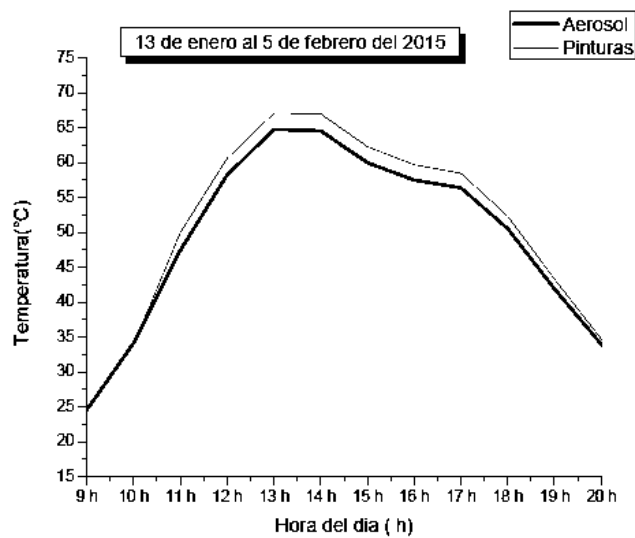


Figura 2.13. Gráfica de temperatura contra tiempo para dos superficies [29].

## 2.2. Hollín

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 [8]. 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. 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 [30, 31], y en hornillas de combustión de leña [30], 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 atmósfera.

El trabajo de Bernardo Sosa [6], 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. Encontrándose



que una mezcla de 60% acrílico y 40% hollín presentó las mejores propiedades de absorción al someterse a pruebas fototérmicas.

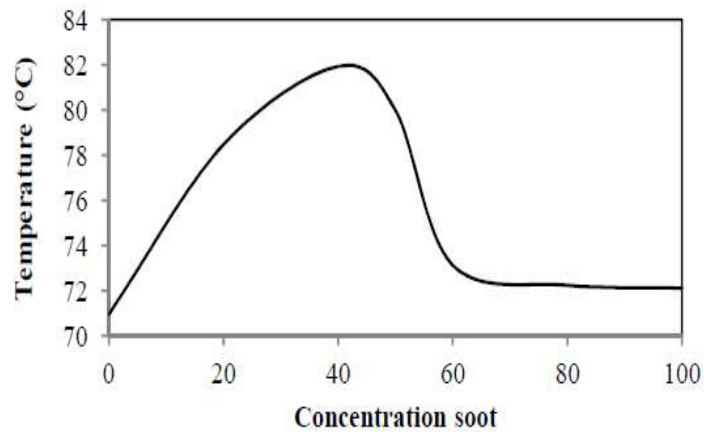


Figura 2.14. Dependencia de la temperatura respecto de la concentración acrílico-hollín [6].

En el trabajo realizado por Servín Campuzano [7], se estudiaron diferentes tipos de hollín, a los cuales se les caracterizó por diferentes técnicas, ópticas y térmicas, enfocándose en su aplicación en estufas solares. Los resultados mostraron que los diferentes hollines investigados presentaron tamaños nanométricos para las partículas individuales, así como aglomerados de tamaños micrométricos.

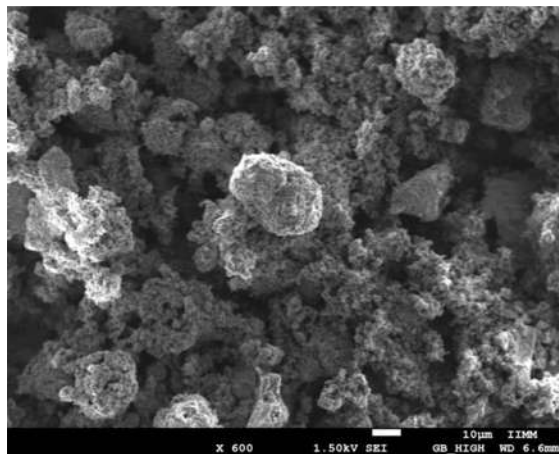


Figura 1.15. Partículas aglomeradas de hollín [7].

Por medio de espectroscopia RAMAN se observó que el carbono, para los diferentes tipos de hollín, es amorfo con estructuras aleatorias, teniendo bandas ordenadas y desordenadas,  $D_1$  y G, respectivamente.

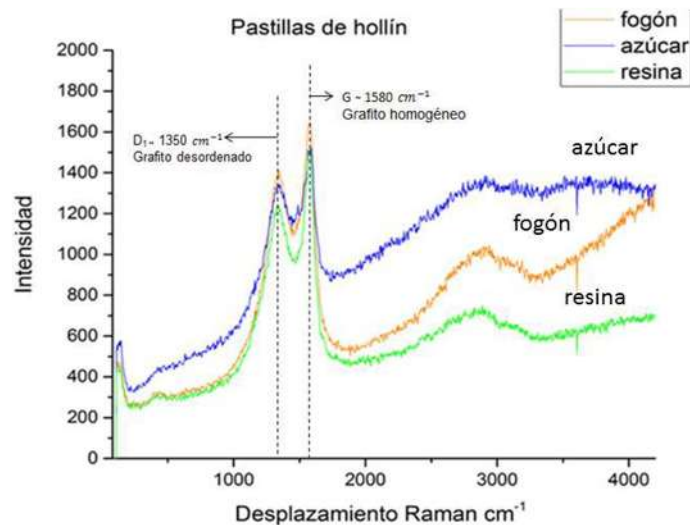


Figura 2.16. Espectro RAMAN para los diferentes tipos de hollín [7].

Por otro lado, los principales elementos que contienen los tres tipos de hollines son: C, Al, Ca, Fe y K. El elemento mayoritario en los tres tipos de hollín es el carbono, encontrándose en mayor cantidad en el de resina de pino, alrededor del 85 % en masa. La concentración de los otros elementos encontrados varía dependiendo del tipo de hollín.

Tabla 2.1. Composición elemental de los hollines [7].

Tipo de muestra	C (%) Total	N (%) Total
Hollín de caña de azúcar gr	49.46	0.39
Hollín de caña de azúcar ch	28.82	0.30
Hollín de madera de fogón gr	61.32	4.08
Hollín de madera de fogón m	57.11	4.05
Hollín de resina gr	85.23	0.15
Hollín de resina ch	75.73	0.18

Por medio de la técnica de termogravimetría, se encontró que la temperatura de descomposición del hollín, está alrededor de los 800 °C, permitiendo que pueda ser utilizado en aplicaciones de baja y media temperatura.

En cuanto a los resultados de la reflectancia se encontró que el hollín de resina de pino presentó la menor reflectancia, de 1.4.

Tabla 2.3. Reflectancia para los diferentes hollines [7].

Tipo de hollín	Tamaño de partícula	Reflectancia espectral $\rho$ (%)
Caña de azúcar	Menores a 32 $\mu\text{m}$	2.9
	Entre 150 y 250 $\mu\text{m}$	3.5
Fogón de madera	Menores a 75 $\mu\text{m}$	2.3
	Entre 150 y 250 $\mu\text{m}$	2.7
Resina de pino	Menores a 32 $\mu\text{m}$	1.3
	Entre 150 y 250 $\mu\text{m}$	1.4

También se han hecho estudios sobre el hollín sin ningún tipo de aglutinante [8], en el cual únicamente se ha utilizado el hollín como recubrimiento, en dicho trabajo se estudió el efecto de la variación de parámetros tales como el espesor y el área recubierta de hollín sobre el sustrato y su efecto en la absorción y transmisión de calor; obteniéndose como resultado que las condiciones óptimas se alcanzan con la mayor superficie recubierta.

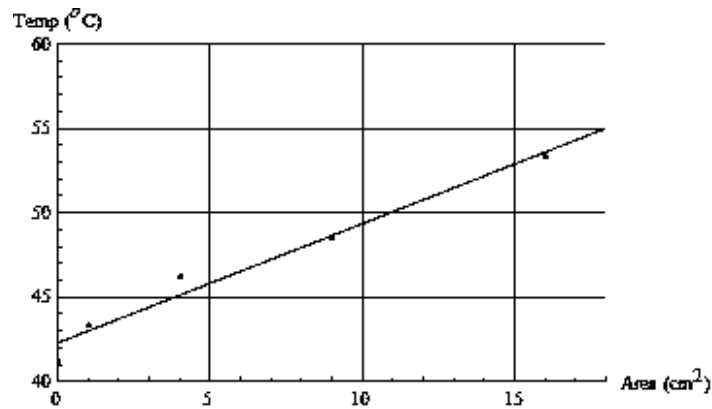


Figura 2.17. Dependencia de la temperatura respecto del área recubierta de hollín.

En cuanto al espesor se llegó a la conclusión de que existe un espesor crítico con el cual se tendrá la mayor absorción de calor.

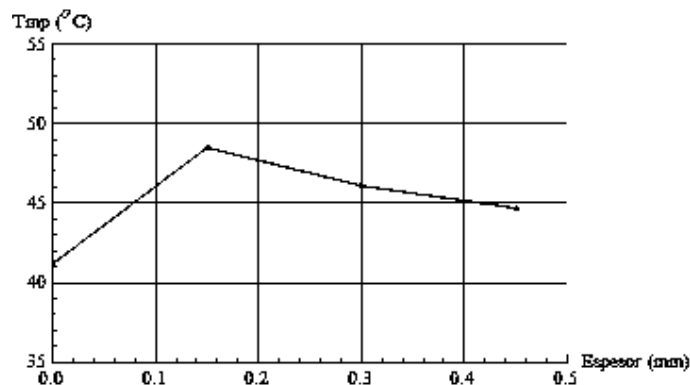


Figura 2.18. Dependencia de la temperatura respecto del espesor del recubrimiento de hollín.

En este trabajo al igual que en el de sosa [6], se empleó un arreglo experimental en laboratorio con condiciones controladas, el cual es factible llevar a cabo, ya que se corroboró su eficacia con experimentación en campo, arrojando resultados similares a los realizados en laboratorio comparados con los hechos en campo.

Con base a lo anterior se propone, en este proyecto de tesis, la utilización de resina de pino como aglutinante en la elaboración de un recubrimiento con hollín, para aplicaciones termosolares.

También se puede mencionar que se ha aplicado el recubrimiento de hollín en tecnologías solares como: estufas solares, que fueron entregadas a familias en la comunidad de del estado de Michoacán, y un secador solar de madera, diseñado en la ENES con el objetivo de contribuir al mejoramiento de este tipo de tecnologías [26, 32]. Donde se ha podido ver su impacto social al ser una tecnología que ha salido de la experimentación en laboratorio a ser aplicada en dispositivos solares de usos cotidianos, como las estufas, y de carácter industrial-económico, como es el caso de los secadores de madera.



Figura 2.19. Estufas solares con recubrimiento de hollín [26].



Figura 2.20. Secador de madera diseñado en la ENES [32].

### 2.3. Resina de pino

Las resinas son secreciones vegetales derivadas de las actividades fisiológicas de los árboles de pino, almacenadas en canales resinosos de raíz, tronco y ramas; estos canales se localizan en las colonias de células vivas del tejido parenquimatoso, distribuidos dentro de la madera. El escurrimiento de resina (oleorresina) es parte de la reacción fisiológica de las células vivas que cumplen una función defensiva contra organismos patógenos y de cicatrización de una herida en el árbol.



Figura 2.21. Resina de pino.

En cuanto a la composición de la resina de pino, tenemos que está compuesta por una mezcla compleja de terpenos, ácidos resínicos, y agua. La proporción varía de acuerdo a la especie y lugar geográfico, en general se tienen los siguientes valores típicos, lo que presentan la mayoría de las especies de pinos, de 60-75 % de ácidos resínicos, 10-15 % terpenos, y de 5-10 % de sustancias diversas y agua. Al ser destilada, es posible separar dos fracciones: de 60-70 % de colofonia, y de 15-25 % de aguarrás [17].

Las propiedades de las resinas se determinan para clasificarlas, siendo las más importantes las características de color, densidad, contenido de humedad, índice de refracción, viscosidad, cenizas, índice de acidez, índice de saponificación [33, 16]. La resina es una mezcla compleja de terpenos, ácidos resínicos, ácidos grasos y otros componentes complejos: alcoholes, ésteres. La proporción de cada componente es función de la especie arbórea y el origen geográfico. Los valores típicos son: de 60-75 % ácidos resínicos, de 10-15% de terpenos, y de 5-10% sustancias variadas y agua. Al ser destilada, es posible separar dos fracciones: de 60-70 % de colofonia, y de 15-25 % de aguarrás [34].

La mayoría de las colofonias es utilizada en forma de colofonias modificadas químicamente. Están constituidas principalmente de una mezcla de ácidos de los tipos pimárico y abiético, con pequeñas cantidades de compuestos neutros. Sus usos más importantes son: manufactura de adhesivos, tinta para imprenta, materiales aislantes para la industria electrónica, goma sintética, goma de mascar, jabones y detergentes [35].



Figura 2.22. Colofonia, obtenida por destilación de la resina.

La trementina es un líquido claro, inflamable, con olor picante y agrio al gusto. Es inmisible en el agua y tiene un punto de ebullición por encima de 150 °C. En forma íntegra, la trementina es usualmente empleada como solvente para pinturas y barnices o como agente de limpieza. Sin embargo, al igual que la colofonia; es un material versátil químicamente. La trementina es bastante rica en alfa y beta pineno. Los derivados son ampliamente usados en fragancias y vitaminas. El principal derivado de la trementina es el aceite de pino sintético, usado en desinfectantes, agentes de limpieza y otros productos con olor a pino. Los componentes principales de los aceites de todas las procedencias son uno, dos o tres terpenos bicíclicos insaturados de los tipos:  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -pineno y 3-careno. La presencia o ausencia de alguno de esos terpenos puede servir para identificar el origen de un aceite. El  $\alpha$ -pineno es común en todas las trementinas.

De manera directa, esto es sin destilar, la resina ha tenido diferentes usos a través de la historia. Los usos de la resina de pino han estado mediatizados por el conocimiento de sus atributos y por los métodos para sacar provecho de ellos. Durante mucho tiempo su utilización se sostuvo en el saber más o menos preciso de su naturaleza externa, de lo perceptible a través de los sentidos: olor, tacto y gusto [36]. La experiencia en la combinación de sustancias y el desarrollo de nuevas técnicas para fraccionarlas permitieron empezar a reconocer sus constituyentes, como la colofonia y la esencia de trementina. Se tiene registro desde la época de los antiguos griegos, que la resina de pino se utilizaba como impermeabilizante de embarcaciones, como fragancia, y cera depiladora. También era apreciada por sus propiedades medicinales, se utilizaba como cicatrizante, y como unguento expectorante para el tratamiento de enfermedades respiratorias [37]. Así mismo la resina de pino, se ha utilizado hasta nuestros días, para pintar utensilios de porcelana al ser mezclada con ciertos óxidos metálicos.

Industrialmente tenemos que son los productos destilados de la resina de pino, colofonia y esencia de trementina (también conocida como aguarrás), los que presentan una gran variedad de usos en diferentes tipos de industrias. Algunos de sus usos se muestran en las siguientes figuras.

<b>ESENCIA DE TREMENTINA</b>
Disolvente de pinturas y barnices
Eliminación de pinturas en tela, madera o pared
Quita grasas
Aromas
Elaboración de fragancias

Figura 2.23. Usos de la esencia de trementina [37].

<b>COLOFONIA</b>			
<b>MEDICINA</b>	<b>INDUSTRIA</b>	<b>COSMÉTICA</b>	<b>OTROS</b>
Matrices de medicamentos	Material de soldar	Ceras depilatorias	Polímeros
Productos dentarios	Abrillantadores, ceras y betún	Esmaltes de uñas	Bebidas
Dispositivos de ostomía	Papel fotográfico	Bálsamos y labiales	Alimentos
Antibacterianos	Discos de embrague	Laca y gominas	Chicles
Antivirales	Calafeteadores	Jabones corporales	Líquido para frotar los arcos del violín
Anticancerosos	Aislante	Máscaras y sombras de ojos	Polvos antiderrapantes para bailarines y deportistas
Tratamiento antiretroviral	Velas perfumadas	Maquillajes	Champús
Lentillas PMMA	Ambientadores		
Productos de higiene	Aceites de corte		Productos pirotécnicos

Figura 2.24. Usos de la colofonia [37].

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Espectroscopia uv-vis

La espectrofotometría es uno de los métodos de análisis más usados, y se basa en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática (de una sola longitud de onda) sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y otra transmitida, como consecuencia de la intensidad del rayo de luz sea atenuada desde  $I_0$  a  $I$ , siendo  $I_0$  la intensidad de la luz incidente y  $I$  la intensidad del rayo de luz transmitido. Dependiendo del compuesto y el tipo de absorción a medir, la muestra puede estar en fase líquida, sólida o gaseosa. En las regiones visibles y ultravioleta del espectro electromagnético, la muestra es generalmente disuelta para formar una solución [38].

El fundamento de la espectroscopia se debe a la capacidad de las moléculas para absorber radiaciones, entre ellas las radiaciones dentro del espectro UV-visible. Las longitudes de onda de las radiaciones que una molécula puede absorber y la eficiencia con la que se absorben dependen de la estructura atómica y de las condiciones del medio (pH, temperatura, fuerza iónica, constante dieléctrica), por lo que dicha técnica constituye un valioso instrumento para la determinación y caracterización de biomoléculas. Las moléculas pueden absorber energía luminosa y almacenarla en forma de energía interna. Esto permite poner en funcionamiento ciclos vitales como la fotosíntesis en plantas y bacterias. Cuando la luz (considerada como energía) es absorbida por una molécula se origina un salto desde un estado energético basal o fundamental, a un estado de mayor energía (estado excitado). Y sólo se absorberá la energía que permita el salto al estado excitado. Cada molécula tiene una serie de estados excitados (o bandas) que la distingue del resto de moléculas. Como consecuencia, la absorción que a distintas longitudes de onda presenta una molécula -esto es, su espectro de absorción- constituye una señal de identidad de la misma. Por último, la molécula en forma excitada libera la energía absorbida hasta el estado energético fundamental [39].

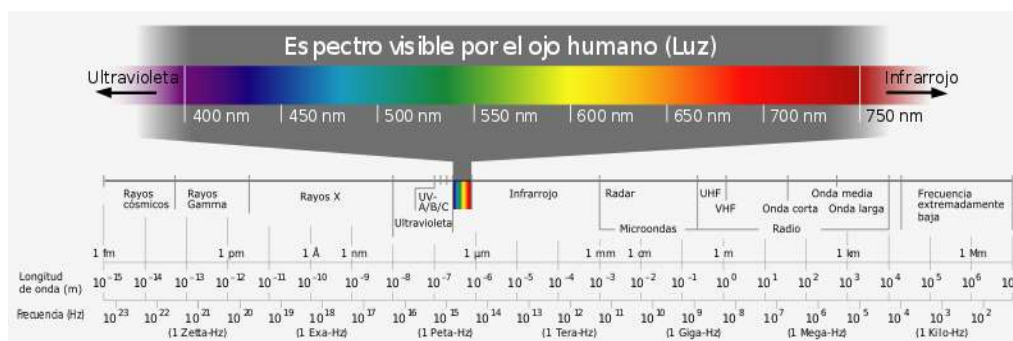


Figura 3.1. Espectro electromagnético.

La región UV se define como el rango de longitudes de onda de 195 a 400 nm. Es una región de energía muy alta. Provoca daño al ojo humano así como quemadura común. Los compuestos con dobles enlaces aislados, triples enlaces, enlaces peptídicos, sistemas aromáticos, grupos carbonilos y otros heteroátomos tienen su máxima absorbancia en la región UV, por lo que ésta es muy importante para la determinación cualitativa y cuantitativa de compuestos orgánicos. Diversos factores -como pH, concentración de sal y el disolvente- que alteran la carga de las moléculas, provocan desplazamientos de los espectros UV.



En la región visible apreciamos el color visible de una solución y que corresponde a las longitudes de onda de luz que transmite, no que absorbe. El color que absorbe es el complementario del color que transmite. Por tanto, para realizar mediciones de absorción es necesario utilizar la longitud de onda en la que absorbe luz la solución coloreada.

La transmitancia se define como la razón entre la luz monocromática transmitida ( $I$ ) por una muestra y la energía o luz incidente ( $I_0$ ) sobre ella. Tanto la energía radiante incidente como la transmitida deben ser medidas a la misma longitud de onda [40].

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3.1)$$

La absorbancia es un concepto más relacionado con la muestra puesto que nos indica la cantidad de luz absorbida por la misma, y se define como el logaritmo de  $1/T$ , en consecuencia:

$$A = -\log T = 2 - \log \%T \quad (3.2)$$

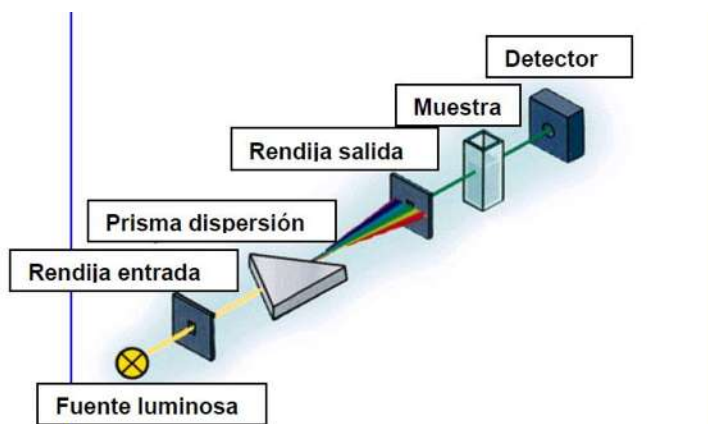


Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de un espectrofotómetro.

### 3.2. Espectroscopia uv-vis-nir

La espectroscopia uv-vis-nir, a diferencia de la uv-vis, maneja el rango también del infrarrojo cercano que está entre los 800-2500 nm. Con esta técnica es posible medir la reflectancia de una muestra en el espectro de los 300-2500 nm. Que para el estudio de los recubrimientos absorbentes solares, nos proporciona información acerca de su eficiencia para absorber radiación solar.

Cuando la luz incide sobre un material, una parte de ella es reflejada, otra fracción podría ser absorbida por el material, y dependiendo de la forma y tamaño de la muestra iluminada cabe la posibilidad de que una fracción de la luz incidente se transmita a través del material. Los procesos de reflexión, absorción y transmisión de la luz determinan en gran medida la apariencia de los objetos que nos rodean. En qué grado se dan estos tres procesos físicos depende de factores tales como: longitud de onda o frecuencia y polarización de la luz

incidente, material específico que es iluminado, y grosor del mismo. Mediante dispositivos denominados espectrofotómetros se mide la fracción de energía reflejada, y la fracción de energía transmitida, a través de una muestra específica, siendo, por conservación de energía, la absorción:

$$\alpha = 1 - \rho - \tau \quad (3.3)$$

Al incidir la luz sobre una muestra, se tiene el fenómeno de la reflexión, que para materiales con cierta rugosidad se presentan dos tipos de reflexión: la especular y la difusa. La medición experimental de las componentes difusas requiere de espectrofotómetros con una esfera integradora que “recoge” la radiación difusa. El medir experimentalmente la fracción del flujo de radiación difusa que es reflejada y transmitida por una muestra dada requiere del uso de un espectrofotómetro con esfera integradora [41]. La esfera integradora es una cavidad esférica cuya pared interior ha sido recubierta con un material blanco de muy poca absorción y alta reflexión difusa de luz, esto es, un material que se asemeje en lo posible a un difusor ideal. Para aplicaciones en el visible e infrarrojo cercano, usualmente se utilizan óxido de magnesio o sulfato de bario como materiales que recubren esa pared interior de la esfera.

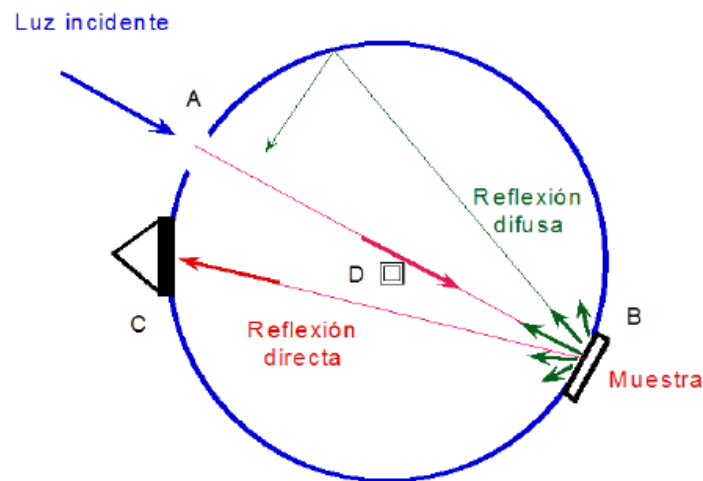


Figura 3.3. Diagrama del funcionamiento de una esfera integradora.

### 3.3. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido es una técnica de caracterización muy versátil en diferentes áreas de la ciencia, que nos permite determinar las características microestructurales como: topografía, morfología y tamaño de partícula [7]. Esta técnica tiene la ventaja de generar imágenes con alta resolución en instrumentos de emisión de campo, imágenes con profundidad de campo, y también imágenes en 3D.

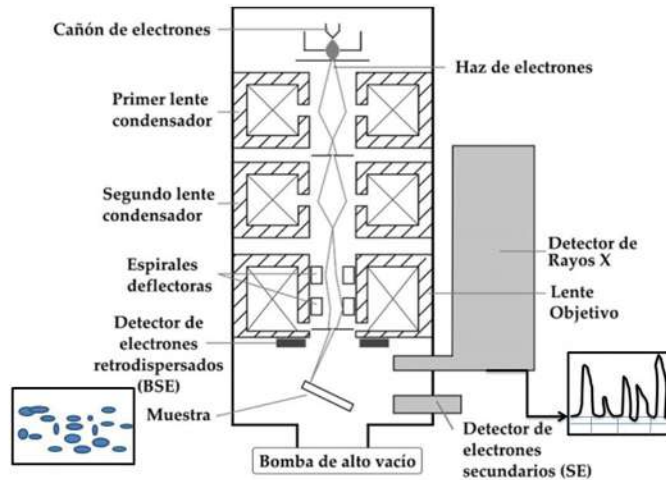


Figura 3.4. Esquema de funcionamiento de un MEB.

Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra. Este bombardeo de electrones provoca la aparición de diferentes señales que, captadas con detectores adecuados, proporcionan información acerca de la naturaleza de la muestra, los electrones secundarios son emitidos desde la muestra como consecuencia de las ionizaciones surgidas de las interacciones inelásticas. Poseen baja energía ( $< 50$  eV) y brindan una imagen de la morfología superficial de la muestra. La señal de Rayos X característicos se produce cuando un electrón de un orbital interno de un átomo es desalojado por un electrón del haz incidente. La vacancia es llenada con un electrón de un orbital más externo. En este salto el exceso de energía es liberado en forma de radiación electromagnética (Rayos X). Se sabe que cada orbital tiene una cantidad discreta de energía que es característica para cada elemento. Por lo tanto, la diferencia de energía entre orbitales es también una cantidad discreta y característica de un átomo en particular. La espectroscopía de Rayos X de energía dispersiva, brinda información sobre la composición elemental de la muestra [42].

### 3.4. Protocolo ASAE S580

Es el protocolo comparativo más utilizado para realizar la evaluación de dispositivos solares, como por ejemplo las estufas solares. Este protocolo consiste en la medición de la potencia que genera un aparato solar, y de esta manera evaluar en cierta forma su eficiencia. La manera en la que se realiza este protocolo es, términos sencillos, medir la temperatura en el dispositivo solar en intervalos de tiempo, reuniendo ciertas condiciones climatológicas como: la velocidad del viento, que no debe ser mayor a 2 m/s, baja insolación solar, y baja temperatura ambiente, que invalidan la prueba [43].

$$P = \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta T} \right) C \quad (3.4)$$

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.

### 3.5. Modelo de transferencia 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 [44].

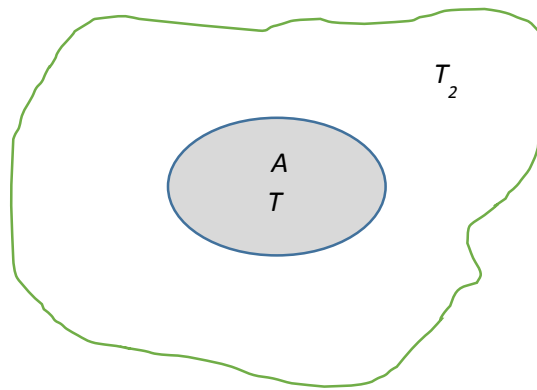


Figura 3.5. Esquema del modelo de transferencia de calor.

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

$$ha(T - T_2) = -\rho cV \frac{dT}{dt} \quad (3.5)$$

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

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{hA}{\rho cV} \theta = 0 \quad (3.6)$$

la solución general de la ecuación (3.6) es de la forma

$$\theta = C_1 e^{-\frac{hA}{\rho cV} t} \quad (3.7)$$

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

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{hA}{\rho cV} t} \quad (3.8)$$

0

$$\frac{T-T_2}{T_1-T_2} = e^{-\frac{hA}{\rho cV} t} \quad (3.9)$$

Despejando la temperatura  $T$  de (3.9) y renombrando términos llegamos a la siguiente expresión

$$T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t}) \quad (3.10)$$

Con la expresión anterior se lleva a cabo el proceso de ajuste de los datos experimentales, para los distintos recubrimientos, para determinar los parámetros que nos den información acerca del funcionamiento de los recubrimientos para absorber radiación solar térmica.

## 4. DETALLES EXPERIMENTALES

Como se vio en la sección anterior, existen trabajos recientes en el estudio del hollín como material para fabricar un recubrimiento de bajo costo, reutilizando un material de desecho como lo es el hollín de biomasa forestal. Tales estudios, se centraron en evaluar térmicamente el recubrimiento de hollín con y sin aglutinante [6,8], y también se analizaron propiedades ópticas y de composición y morfología [7].

### 4.1. Metodología

En este trabajo se propone utilizar la resina de pino como un aglutinante de bajo costo, para la elaboración de un recubrimiento que se pueda utilizar en tecnologías solares como el elemento absorbedor de radiación solar térmica. Para ello se utilizó la siguiente metodología:

- Variar el espesor de un recubrimiento de resina sin solvente y analizarlo con uv-vis.
- Preparar muestras de resina/solvente variando su concentración y analizarlas por medio de la técnica de uv-vi
- Preparar muestras resina/hollin variando su concentración para analizarlas por medio de microscopia electrónica de barrido
- Arreglo experimental fototérmico para evaluación térmica en condiciones controladas de laboratorio.
- Depositar sobre sustratos de aluminio las diferentes muestras de resina/hollín para su análisis con uv-vis-nir y pruebas fototérmicas.
- Preparar muestras de resina/grafito, y pintura negra comercial con hollín para realizar pruebas fototérmicas y compararlas con las muestras resina/hollín.
- Evaluar térmicamente las muestras depositadas sobre aluminio por medio del arreglo experimental mencionado anteriormente.
- Determinación de parámetros óptimos del recubrimiento.

### 4.2. Variación del espesor del recubrimiento de resina

Primeramente se comenzó por depositar la resina sobre un portaobjetos, al cual se le colocó previamente un perímetro de cinta adhesiva de espesor 0.12 mm, después con ayuda de una espátula se retiró el exceso de resina hasta dejar el recubrimiento del espesor de la cinta adhesiva. Posteriormente se aumentó el espesor poniendo otra capa de cinta adhesiva, y se

repitió el proceso de retirar el exceso de resina, de esta manera se elaboraron los diferentes recubrimientos de resina, también se preparó una muestra agregando partículas de hollín, para observar su efecto en la transmisión de la luz de manera preliminar sin controlar la concentración resina/hollín. Con la utilización del aparato de uv-vis del laboratorio de óptica de la FCFM de la UMSNH se analizaron las muestras con lo que se obtuvo la transmitancia en el rango de los 200-1100 nm.

Tabla 4.1. Variación del espesor de recubrimiento de resina.

Muestra	Espesor (mm)
R1	0.12
R2	0.24
R3	0.36
R4	0.12 con hollín



Figura 4.1. Muestras de resina con diferente espesor y con hollín.

#### 4.3. Preparación de muestras resina/solvente

Para esta parte del estudio de la resina se comenzó por preparar una serie de muestras de resina/solvente, ya que el uso de un solvente es necesario para diluir la resina de pino y así facilitar su manipulación a la hora de preparar el recubrimiento, con la finalidad de obtener información acerca del efecto que tiene el solvente en la resina de pino, en particular el efecto óptico de la transmitancia. Por consiguiente se elaboraron mezclas variando la proporción resina-solvente en peso. La resina usada se extrajo de la especie de pino *Oocarpa schide*, la cual es de la especie más frecuentemente utilizada a nivel nacional [45,46], como solvente se utilizó thinner de densidad  $0.8 \text{ gr/cm}^3$  que se puede adquirir en una ferretería común; la elaboración consistió en pesar la resina y posteriormente agregar el solvente hasta conseguir la proporción deseada, enseguida se agitó la mezcla para después depositar una pequeña cantidad sobre un portaobjetos de laboratorio, una vez que la mezcla se secó se procedió a

realizar las pruebas con el aparato de UV-VIS que se encuentra en el laboratorio de óptica de la FCFM de la UMSNH. Las muestras preparadas se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.2. Muestras preparadas variando concentración de solvente.

Muestra	% Resina	Observaciones
RS1	50	Fácil dilución y poco viscosa
RS2	70	Fácil dilución y poco más viscosa que la anterior
RS3	80	Mezcla más opaca y viscosa
RS4	90	Mezcla de difícil dilución y muy viscosa con formación de grumos

#### 4.4. Preparación de muestras variando concentración de resina/hollín

Una vez que se prepararon las muestras con solvente se prosigió a preparar las muestras con hollín, Para esta parte del estudio del recubrimiento se utilizó el siguiente material:

- Resina de pino
- Hollín de resina de pino
- Balanza analítica
- Recipiente para mezclar las sustancias
- Cinta adhesiva de espesor 0.15 mm
- Portaobjetos
- Placas cuadradas de 5x5 cm y 2 mm de espesor de aluminio



Figura 4.2. Balanza analítica



Figura 4.3. Material



La elaboración consistió en agregar a la resina el hollín, pesando primero la resina y después el hollín para posteriormente diluir con el solvente. Una vez hecha la mezcla se depositó en portaobjetos para su posterior análisis; otra parte de las muestras preparadas se depositaron sobre sustratos de aluminio, para llevar a cabo el control del espesor del recubrimiento se colocó cinta adhesiva en el perímetro de los portaobjetos así como en las placas de aluminio, en esta parte se utilizó un espesor de 0.15 mm y una área recubierta de 16 cm<sup>2</sup>, y se depositó la mezcla de resina/hollín, después con una espátula se raso el material hasta dejarlo del espesor de la cinta adhesiva. Una vez terminadas las muestras se analizaron por medio de uv-vis, uv-vis-nir, MEB, y pruebas fototérmicas. Para las pruebas fototérmicas se prepararon muestras con la misma concentración resina-hollín, pero diluyendo con diferentes cantidades de solvente.



Figura 4.4. Preparación de muestras resina-hollín.

Tabla 4.3. Muestras elaboradas variando la concentración de hollín.

Muestra	% Hollín	Observaciones
M1	40	Difícil de mezclar
M2	30	Formación de grietas
M3	20	Más uniforme
M4	10	Acabado liso
M5	1	Fácil de mezclar

#### 4.5. Arreglo óptico

Para llevar a cabo las pruebas fototérmicas se empleó un arreglo experimental en laboratorio, ya que como vimos en los antecedentes, realizar las pruebas estándar para verificar la eficiencia térmica en campo es complicada por cuestiones climatológicas, además es un método del que se tienen antecedentes de su utilización [4, 5, 7] para este tipo de estudios.

El arreglo consistió en la utilización de una lámpara de 250 watts marca osram, una lente de Fresnel, y un termómetro marca Control Company con resolución de  $1 \pm 0.5$  °C. El arreglo se muestra en la siguiente figura

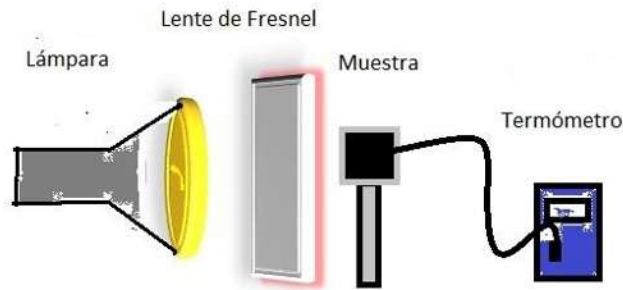


Figura 4.5. Arreglo óptico para pruebas fototérmicas.

#### 4.6. Evaluación de perfiles térmicos

Una vez montado el arreglo experimental se procedió a realizar las pruebas fototérmicas en las diferentes muestras de resina/hollín presentadas en la tabla 4.3. Después, ya con la concentración que presentó la mayor temperatura, se elaboraron muestras variando el espesor para enseguida realizar pruebas térmicas.

Tabla 4.4. Variación del espesor del recubrimiento.

Muestra	Espesor (mm)
Ms1	0.45
Ms2	0.30
Ms3	0.15
Ms4	0.10
Ms5	0.05

Después, cuando se determinaron los parámetros óptimos de espesor y concentración, se prepararon muestras de pintura negra comercial, pintura con hollín, pintura con grafito, y resina con grafito, a las cuales se les realizaron pruebas fototérmicas para poderlas comparar con las muestras de resina/hollín.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con las pruebas realizadas a las diferentes muestras mediante uv-vis, uv-vis-nir, MEB, y evaluación térmica, se obtuvieron los siguientes resultados.

### 5.1. Pruebas ópticas

#### 5.1.1. Transmitancia para muestras de resina variando el espesor

De las muestras analizadas por medio de uv-vis se obtuvieron los siguientes resultados

- La muestra con el espesor de 0.12 mm presentó una transmitancia promedio de 77.78% en el rango de los 1100 a los 300 nm, y presenta la menor transmitancia en el rango de los 300 a los 200 nm.

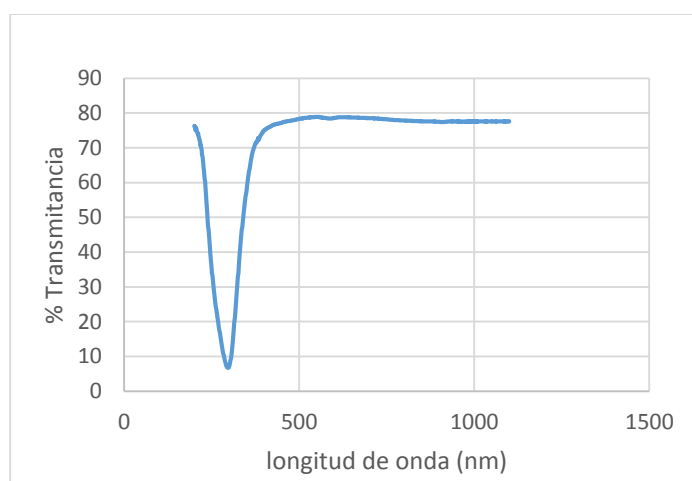


Figura 5.1. Gráfica de transmitancia para la muestra de espesor 0.12 mm.

- Para la muestra con espesor de 0.24 mm se obtuvo una transmitancia promedio de 66.62% en el rango de los 1100 a los 300 nm y una disminución de la transmitancia en el rango de los 300 a los 200 nm.

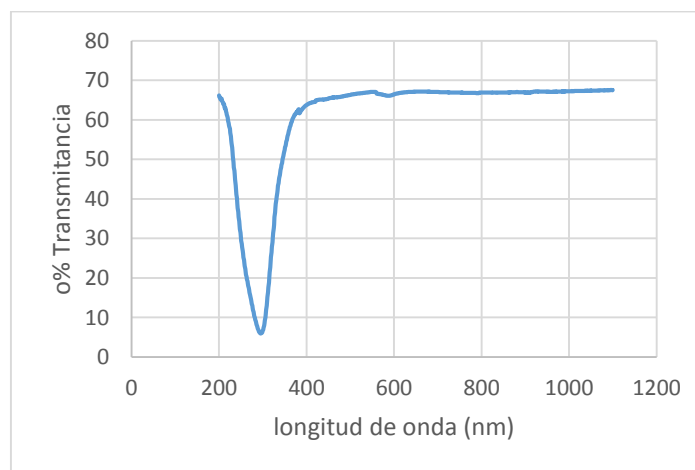


Figura 5.2. Gráfica de transmitancia para muestra con espesor de 0.24 mm.

- La muestra con el mayor espesor de 0.36 mm presentó una transmitancia promedio de 61.68% de los 1100 a los 300 nm para después presentar una disminución de transmitancia de los 300 a los 200 nm.

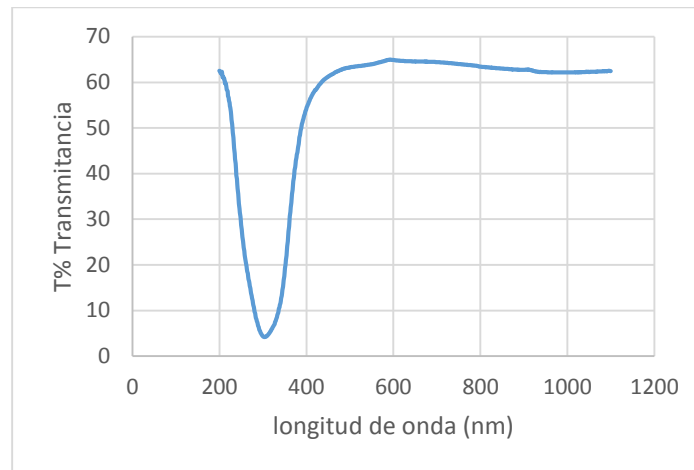


Figura 5.3. Gráfica de transmitancia para la muestra con espesor de 0.36 mm.

- Para la muestra con resina con espesor de 0.12 mm y con partículas de hollín se obtuvo una transmitancia promedio de 49.21% de los 1100 a los 300 nm, y un decaimiento más pronunciado a partir de los 300 a los 200 nm.

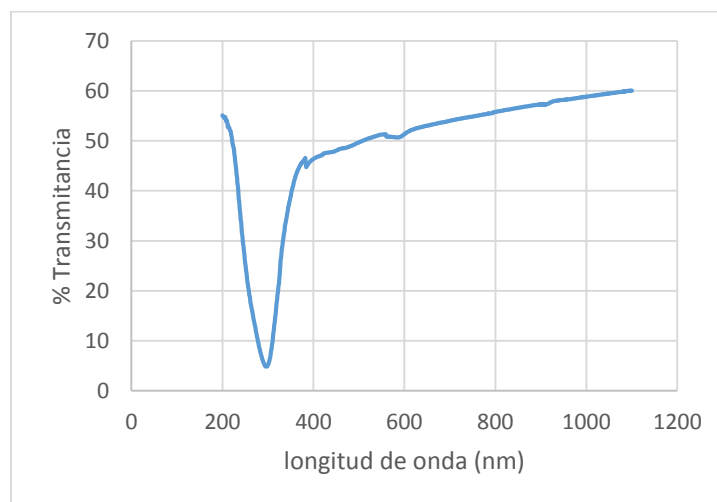


Figura 5.4. Gráfica de transmitancia para la muestra de resina con hollín.

En general se puede observar que al ir aumentando el espesor del recubrimiento de resina, la transmitancia disminuye. También vemos que las diferentes muestra presentan el mismo perfil con distinta magnitud de la transmitancia, de tal forma que de los 1100 a los 300 nm se mantiene constante la transmisión de la luz para enseguida presentar una menor transmitancia de los 300 a los 200 nm. Para la muestra con hollín se presenta un perfil similar al de las muestra de resina, aunque se puede apreciar en la gráfica que tiene un decaimiento desde el principio, esto es desde los 1100 nm, pero su menor intensidad la tiene en el rango de los 300 a los 200 nm, como en el caso de las muestra de solo resina.

Tabla 5.1. Transmitancia de las muestras variando el espesor del recubrimiento.

Espesor (mm)	% Transmitancia de 1100 a 400 nm
0.12	77.78
0.24	66.62
0.36	61.68
0.12 con hollín	49.21

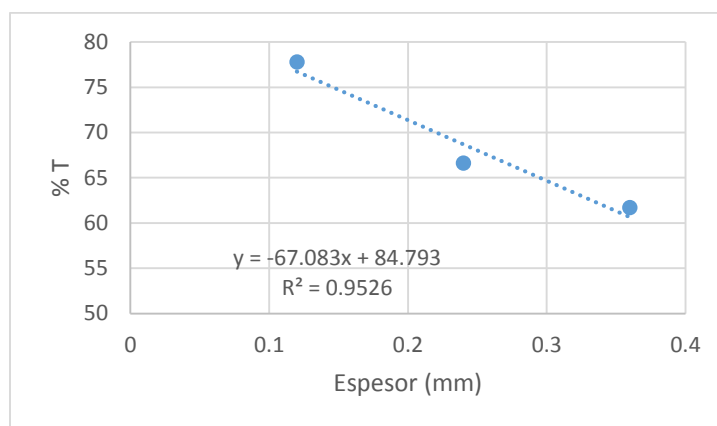


Figura 5.5. Dependencia de la transmitancia en función del espesor.

### 5.1.2. Transmitancia en las muestras de resina-solvente y resina-hollín

Para las muestras elaboradas variando la concentración de solvente, el cual sirve para poder diluir la resina y así poder manejarla para hacer el recubrimiento, se realizaron pruebas de espectroscopia uv-vis, los resultados obtenidos son los siguientes:

- La muestra de resina, que se diluyó con 50% en peso de solvente, presentó una transmitancia promedio de 85.68% en el rango de los 1100 a los 380 nm, para después tener una menor transmitancia de los 380 a los 200 nm.

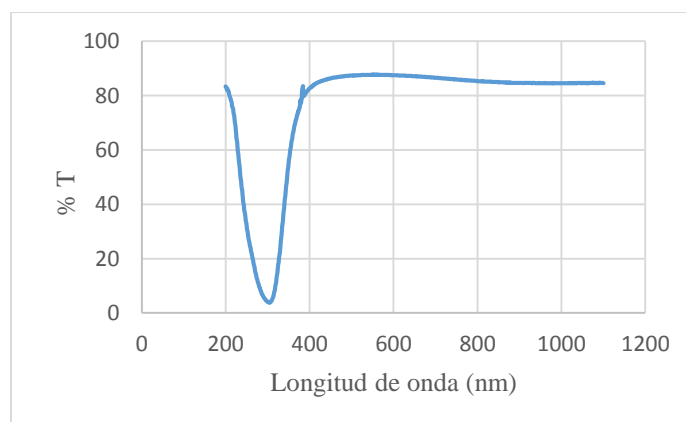


Figura 5.6. Transmitancia para la muestra con concentración 50% solvente.

- Para la muestra con concentración 30% solvente se obtuvo una transmitancia promedio de 82.94% de los 1100 a los 380 nm, a partir de los cuales se observa un descenso en la transmitancia.

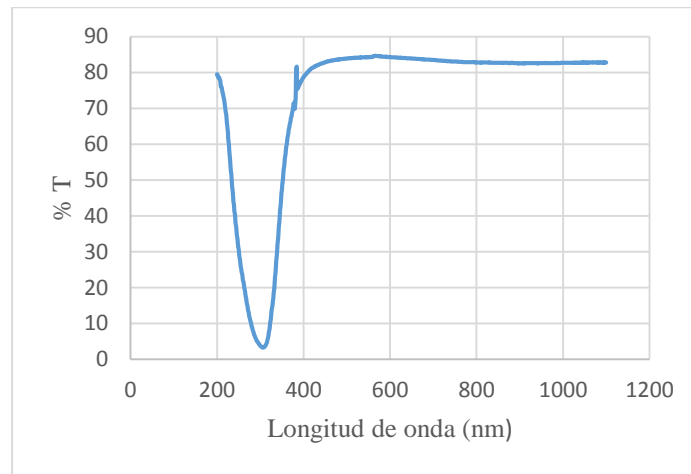


Figura 5.7. Transmitancia para la muestra con concentración de 30% solvente.

- La muestra con concentración de 20% solvente presentó una transmitancia promedio de 68.41%, para después presentar una disminución a partir de los 380 a los 200 nm.

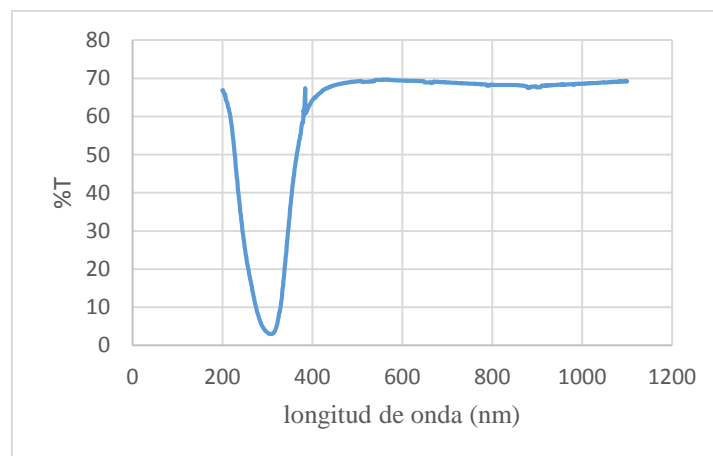


Figura 5.8. Transmitancia para la muestra con concentración de 20% solvente.

- Para la muestra con concentración de 10% solvente se obtuvo una transmitancia promedio de 61.18%, para después tener un descenso en la transmitancia a partir de los 380 a los 200 nm.

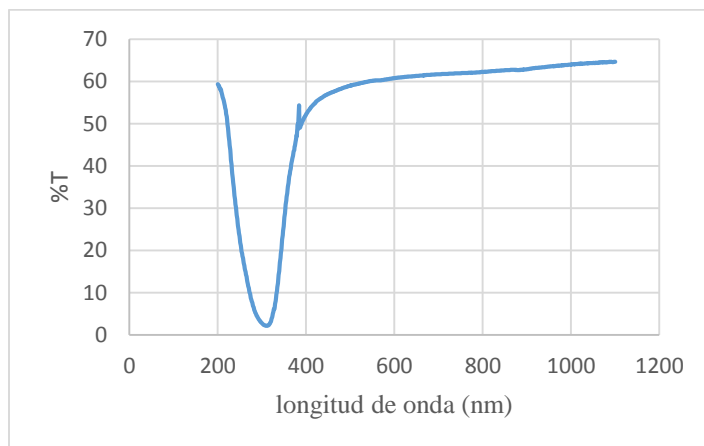


Figura 5.9. Transmitancia para la muestra con concentración de 10% de solvente.

En este caso de la variación de la concentración de solvente se puede observar, como en la parte referente a la variación del espesor, que los perfiles son similares difiriendo en su magnitud, esto dependiendo de la cantidad de solvente utilizada para diluir la resina. De tal forma que al ir disminuyendo la cantidad de solvente, también disminuye la transmitancia.

Tabla 5.2. Transmitancia de las muestras variando la concentración de solvente.

Concentración de solvente	Transmitancia promedio de 1100-400 nm
50%	85.68
30%	82.94
20%	68.41
10%	61.18

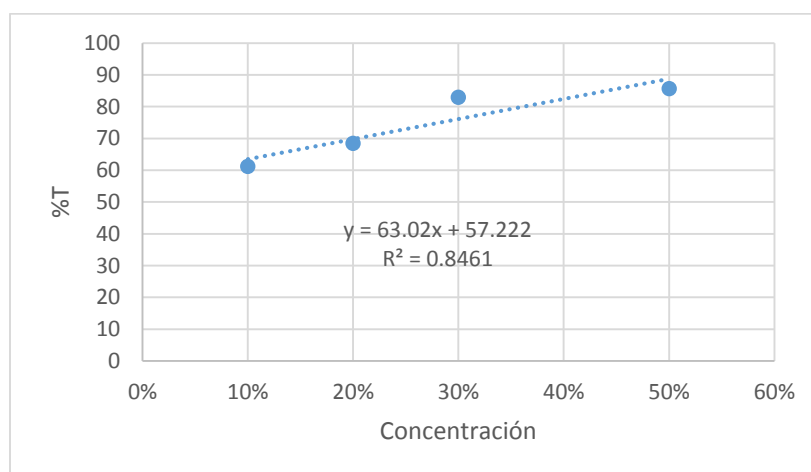


Figura 5.10. Dependencia de la transmitancia en función de la concentración de hollín.

La gráfica de la figura 5.10 nos muestra la dependencia lineal que tiene la transmitancia respecto de la concentración del solvente, lo cual también nos permite comparar con los resultados obtenidos con la variación de espesor; de tal manera que podemos comparar el porcentaje de transmitancia de los espesores con los de concentración de solvente. Por otro

lado observamos que con el 50% de solvente se diluye fácilmente la resina, y se va complicando a medida que bajamos la cantidad de solvente, aunque con un 20% se puede diluir bien la resina y se tiene una buena respuesta óptica para los fines que buscamos en este trabajo.

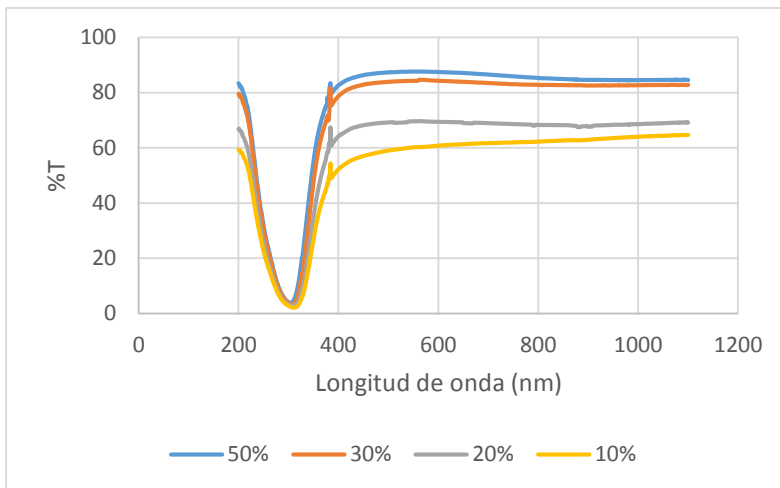


Figura 5.11. Gráfica comparativa entre las diferentes muestras de resina-solvente.

Juntando los resultados obtenidos, tanto en la variación del espesor, así como de la variación de la concentración de solvente, llegamos a un modelo por medio del cual podemos controlar el espesor con la concentración de solvente. La figura 5.12 presenta la gráfica de la dependencia del espesor con la concentración.

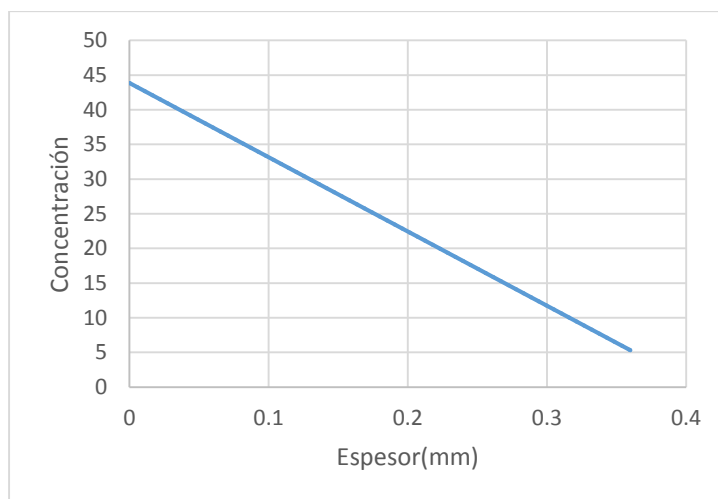


Figura 5.12. Control del espesor por medio de la concentración de solvente.



Para las muestras de resina-hollín analizadas por medio de uv-vis se obtuvieron los siguientes resultados:

- La muestra con contenido de hollín a una concentración en peso del 10%, se obtuvo una transmitancia promedio de 0.44% en el rango de los 1100 a los 200 nm ya que prácticamente se mantuvo constante, presentando únicamente un pequeño pico alrededor de los 360 nm, como se puede observar en la gráfica de la figura 4.12.

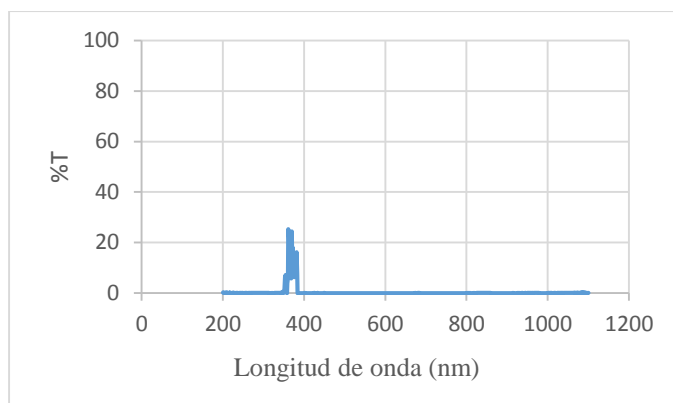


Figura 5.13. Transmitancia para la muestra con 10% de hollín.

- La muestra con una concentración del 20% hollín, presentó una transmitancia promedio de 0.42% en el rango de 1100 a los 200 nm, teniendo un pico alrededor de los 365 nm.

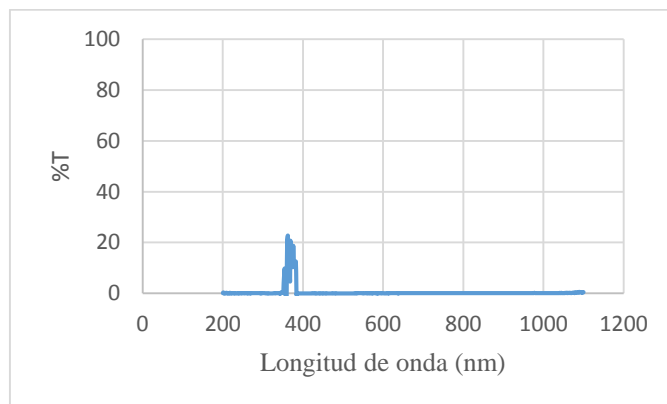


Figura 5.14. Transmitancia para la muestra con 20% hollín.

- Para la muestra con el 30% de hollín, se obtuvo una transmitancia promedio de 0.41% de los 1100 a los 200 nm, y al igual que en los casos anteriores, se presentó un pico alrededor de los 360 nm.

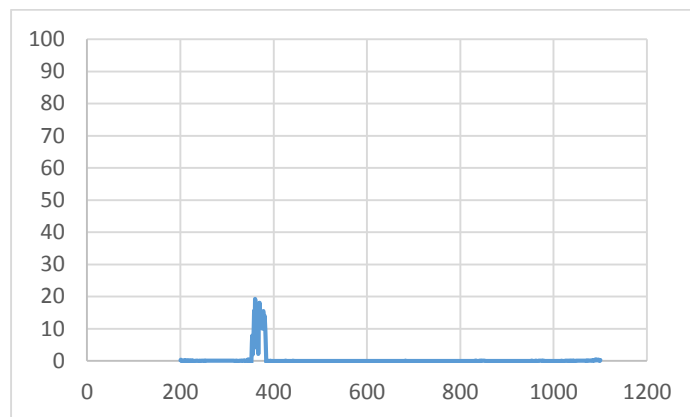


Figura 5.15. Transmitancia para la muestra con 30% de hollín.

Para estas muestras analizadas por medio de uv-vis, se puede observar que la diferencia es pequeña entre ellas, ya que la transmitancia promedio para las tres muestras oscila en el 0.42%, y el pico que se presenta en las tres graficas puede ser debido al cambio de lámpara del aparato.

### 5.1.3. Reflectancia, composición elemental y morfología

De las muestras preparadas de resina-hollín, que aparecen en la tabla 3.4 se analizaron las muestras M2 y M4, que contienen 10 y 30% de hollín respectivamente, por medio de uv-vis-nir y microscopia electrónica de barrido, tales pruebas se llevaron a cabo en el IFM y en IIMM de la UMSNH. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

- Para la muestra con 10% de hollín se obtuvo una reflectancia promedio de 6.15% de los 2500 a los 300 nm, donde se puede observar que no muestra mucha variación, manteniéndose casi constante en el intervalo de 5 a 7 % de reflectancia.

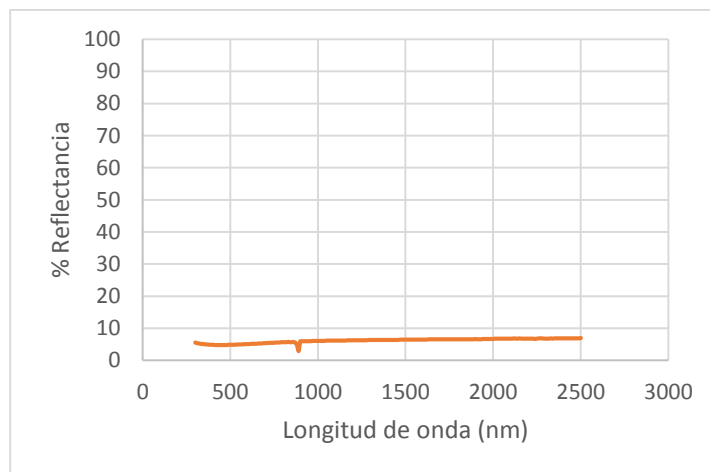


Figura 5.16. Reflectancia para la muestra con 10% hollín.

- La muestra con contenido de hollín al 30% presentó una reflectancia promedio de 5.8% de los 2500 a los 300 nm.

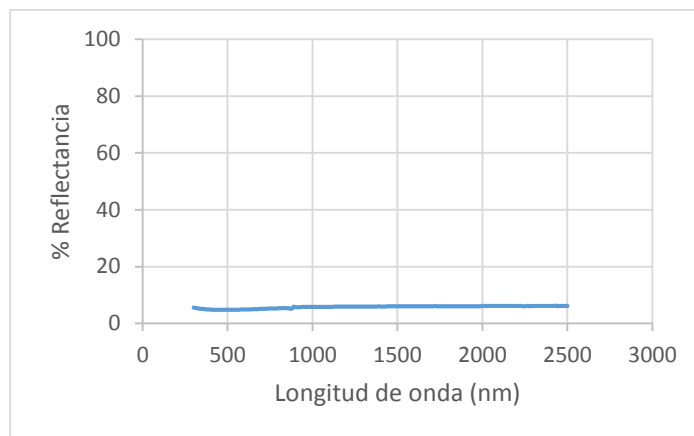


Figura 5.17. Reflectancia para muestra con 30% hollín.

Con los resultados de transmitancia y de reflectancia, para las muestras de 10 y 30 % hollín, podemos observar que presentan una absorción promedio, en el rango de los 300 a los 2500 nm, de alrededor de 94 %. Por otro lado se observa que entre una muestra y otra no existe una variación significativa en cuanto a sus valores promedio de reflectancia, esto debido a que la resina utilizada como aglutinante, y el hollín que se obtiene a partir de la combustión de la resina, actúan de manera complementaria.

- La composición elemental que se obtuvo por medio de EDS para la muestra con 10% de hollín, fue de 85.08% en masa de carbón, 14.28% en masa de oxígeno y 0.62% en masa de silicio.

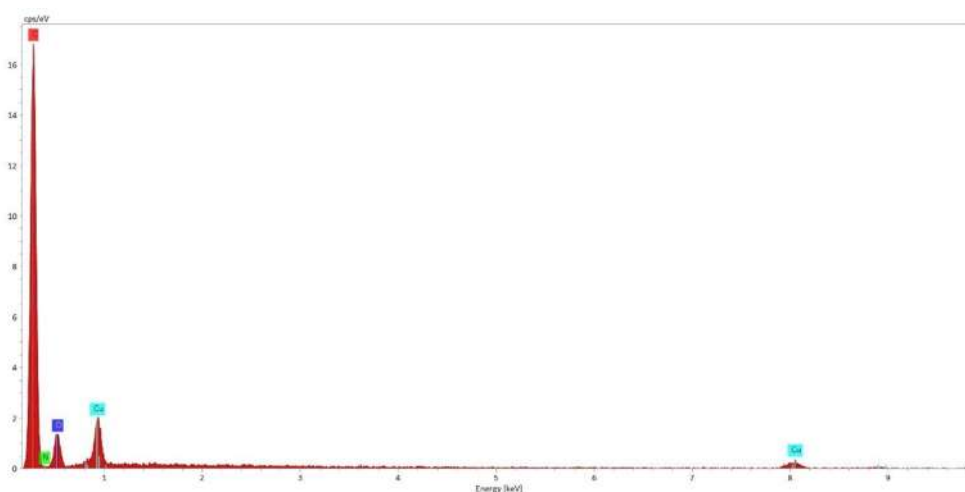


Figura 5.18. Composición elemental de la muestra con 10% hollín.

- La muestra con 30% hollín mostró presencia de carbón en un 86.36% en masa y oxígeno en un 13.64% en masa.

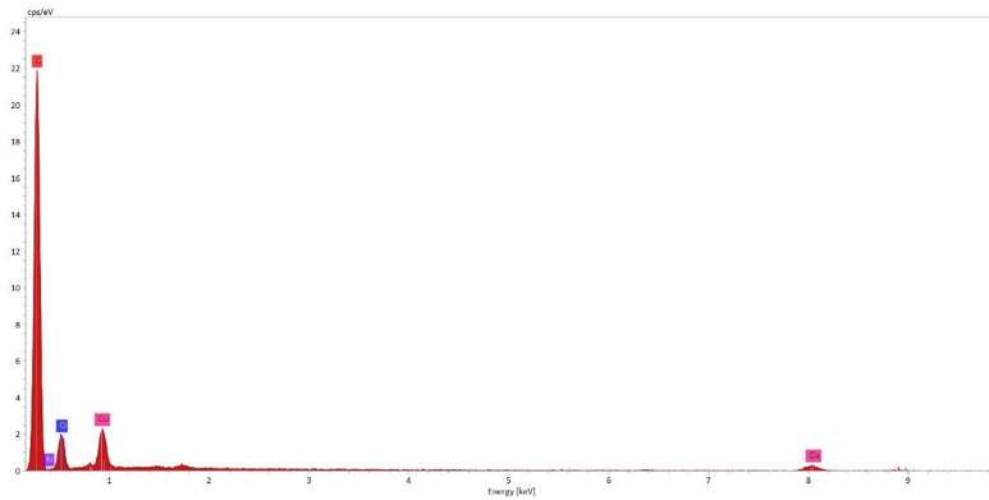


Figura 5.19. Composición elemental de la muestra con 30% hollín.

Se puede observar que no cambio significativamente la composición elemental, esto debido a que el hollín procede de la resina de pino, y en consecuencia se complementa la resina con el hollín.

- Por medio de microscopia electrónica de barrido se obtuvieron las siguientes imágenes para la muestra con 10% de hollín, en las cuales se puede observar que presenta una distribución homogénea tanto de carbón como de oxígeno.

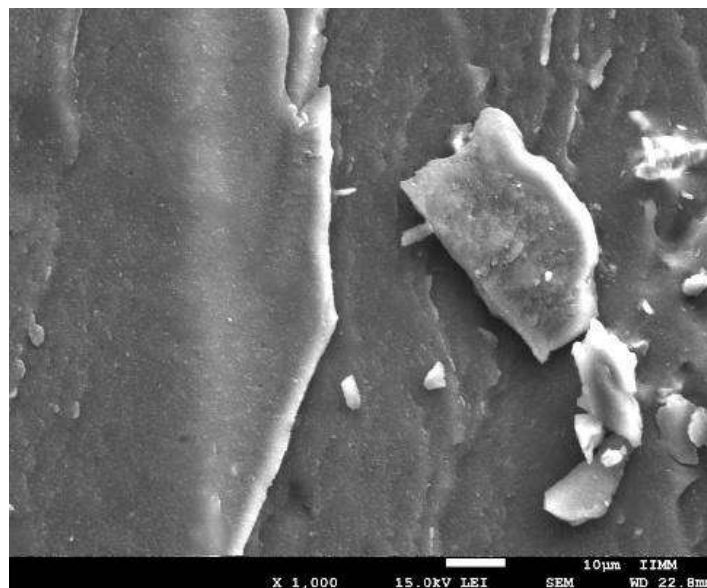


Figura 5.20. Micrografía del recubrimiento con 10 % de hollín.

Se puede observar que se presentan pocos aglomerados, y una superficie parcialmente lisa con pocas grietas.

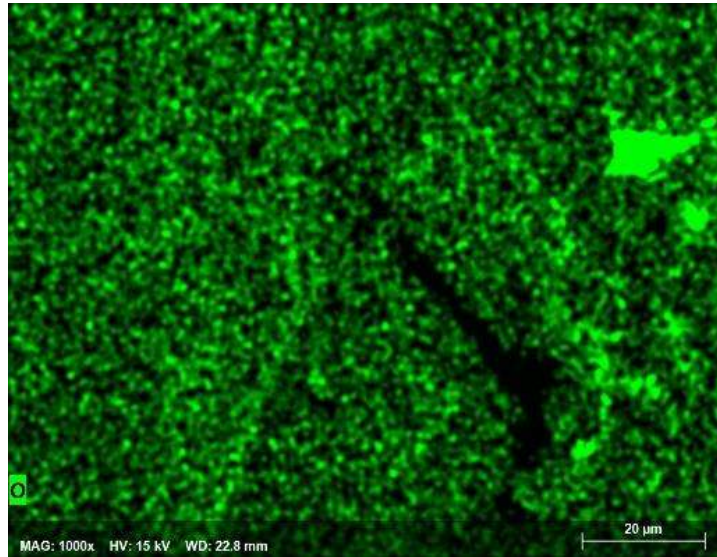


Figura 5.21. Distribución de oxígeno en la muestra con 10% hollín.

Se presenta una distribución uniforme del oxígeno en el recubrimiento, de tal manera que se observa en toda la superficie de la muestra.

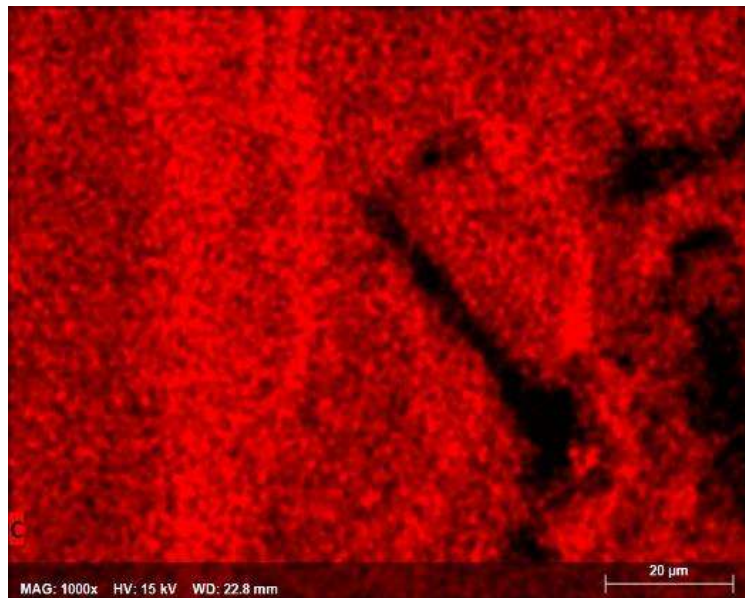


Figura 5.22. Distribución de carbón en la muestra con 10% hollín.

Al igual que en el caso del oxígeno, se presenta una distribución uniforme del elemento carbono.



Figura 5.23. Distribución de carbón y oxígeno en la muestra con 10% hollín.

En la figura 5.23. se muestra la distribución de los elementos carbón y oxígeno, donde se puede observar que se presenta una mezcla homogénea de los componentes del recubrimiento.

- Para la muestra con contenido de 30% de hollín se obtuvieron las siguientes imágenes por medio de microscopia electrónica de barrido.

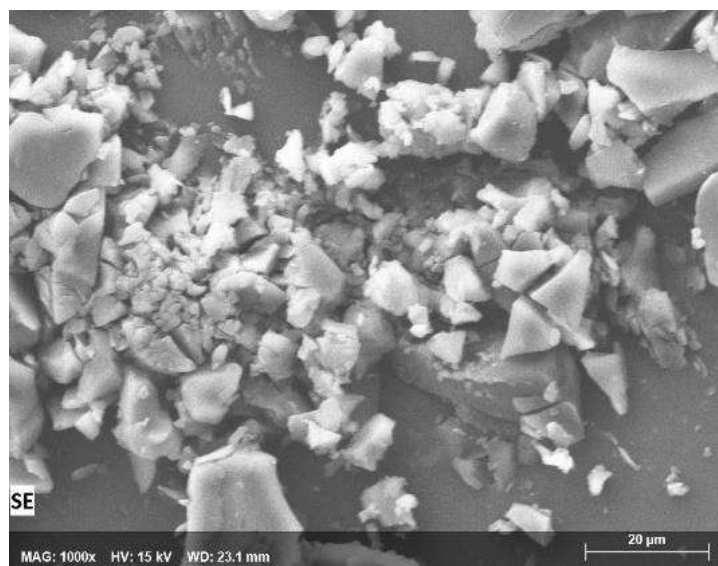


Figura 5.24. Micrografía de la muestra con 30% hollín.

Se presenta una mayor cantidad de aglomerados, debido a una mayor cantidad de hollín en la muestra.

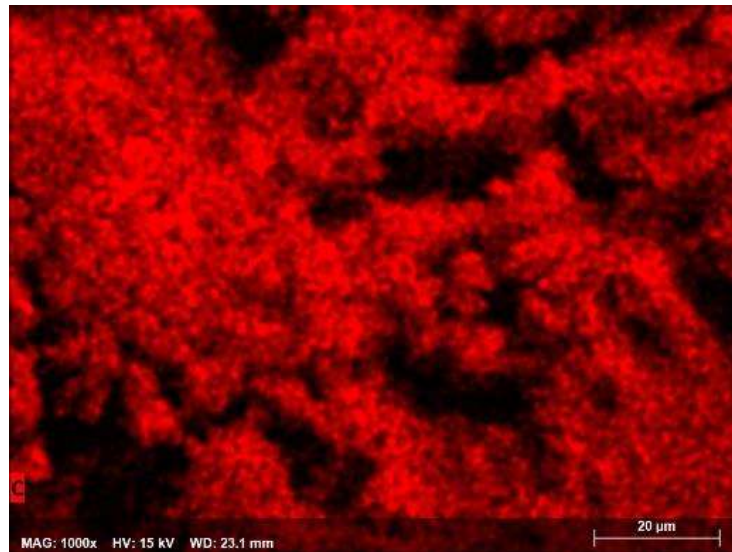


Figura 5.25. Distribución de carbón en la muestra con 30% hollín.

En la figura anterior se puede observar una distribución uniforme del carbón en la muestra, de tal manera que se encuentra presente en todo el recubrimiento.

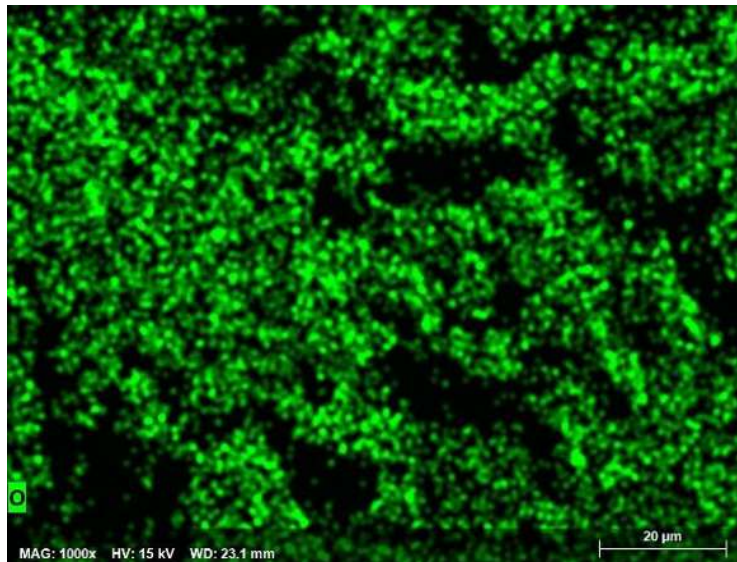


Figura 5.26. Distribución de oxígeno en la muestra con 30% hollín.

En la figura 5.26. se observa también una distribución homogénea del oxígeno en la muestra con 30% de hollín, al encontrarse presente en todo el recubrimiento.

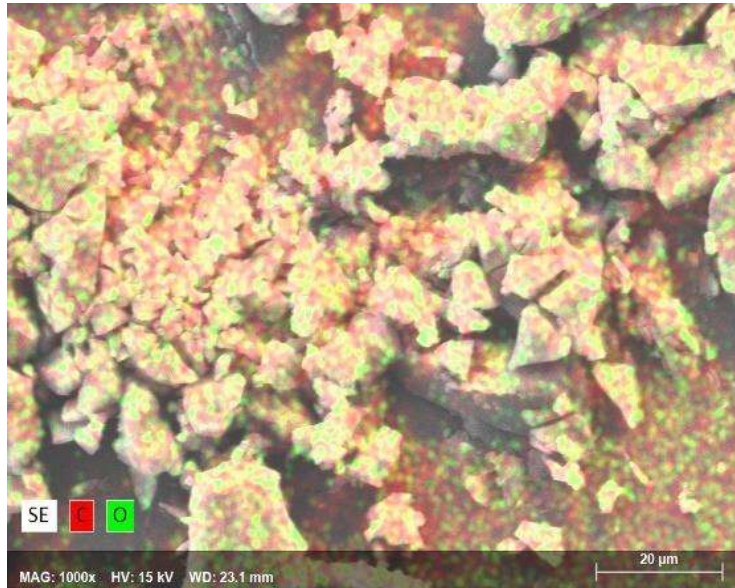


Figura 5.27. Distribución de carbón y oxígeno en la muestra con 30% hollín.

Podemos observar en la figura 5.27. que existe una distribución homogénea de los componentes de la muestra, carbón y oxígeno, mostrando que se tiene una combinación de resina y hollín de manera uniforme.

En general se puede observar que en cuanto a su composición elemental, ambas muestras, tanto la de 10 como la 30% hollín, presentan alrededor de 85% en masa de carbón así como un 14% en masa de oxígeno, en las gráficas de conteos cps se muestra también presencia de cobre y nitrógeno en menor medida.

En cuanto a las micrografías, observamos que la muestra con 10% hollín presenta una superficie lisa no homogénea con cierto relieve y pocos aglomerados. La muestra con 30% hollín presentó una mayor cantidad de aglomerados al contener una mayor cantidad de hollín.

También se observa que en ambas muestra existe una distribución uniforme de carbón y oxígeno, de tal manera que se tiene una mezcla homogénea del hollín con la resina de pino.

## 5.2. Pruebas térmicas

Para la realización de las pruebas térmicas se empleó el arreglo experimental mostrado en la figura 4.5 por medio de este montaje experimental se evaluaron los perfiles térmicos de muestras de resina-hollín, así como de pintura negra, y mezclas de pintura-hollín, pintura-grafito, resina-grafito. El procedimiento consistió en tomar los datos de la temperatura en función del tiempo, y a partir de estos, primeramente se realizó un ajuste de los datos en su parte con más parecido lineal, por ser la parte donde se tiene un aumento de temperatura de forma gradual, ya que después los datos comienzan a tener una curva en la cual la temperatura tiende a ser constante, la cual está relacionada con la temperatura máxima que alcanza la placa. Este ajuste lineal, nos proporciona la pendiente  $\Delta T/\Delta t$ , que como se vio en la parte de



teoría está relacionada con la potencia de cocción, que es un factor importante en la evaluación del funcionamiento de los sistemas solares térmicos. Después se ajustaron los datos de la curva de acuerdo al modelo de transferencia de calor en estado transitorio mostrado en la teoría de este trabajo, para obtener información de los parámetros B y  $\alpha$ .

Primeramente se tomaron datos de temperatura sobre la placa de aluminio, esto para poder comparar con las placas con recubrimiento. La placa de aluminio registró una temperatura máxima de 48 °C, y una pendiente de 0.065 °C/s.

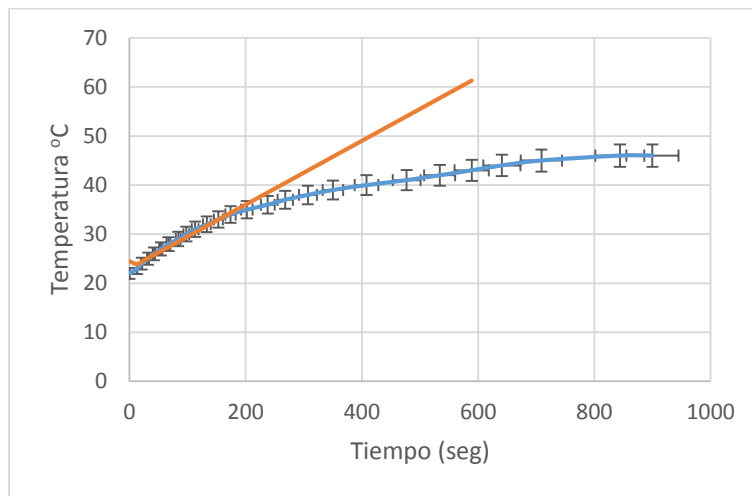


Figura 5.28. Ajuste de los datos de temperatura en su parte lineal.

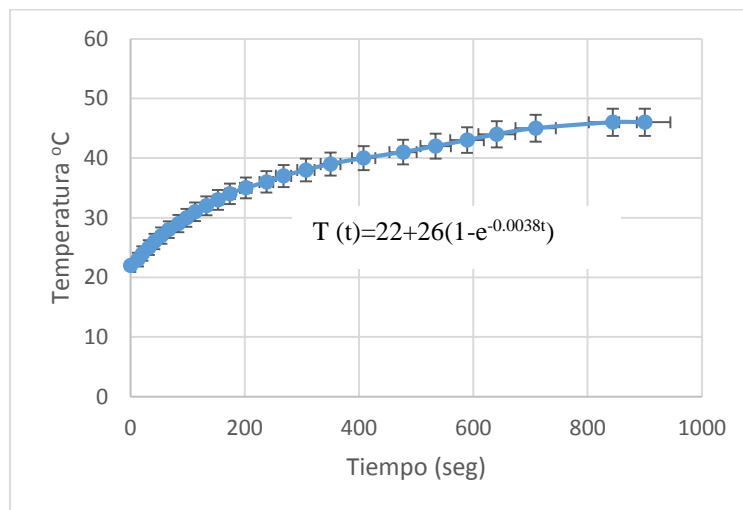


Figura 5.29. Ajuste de temperatura en función de tiempo para la placa sin recubrimiento.

Para poder observar la respuesta térmica y de reblandecimiento de la resina, se preparó una muestra con recubrimiento de resina, la cual fue sometida a evaluación fototérmica, teniendo una temperatura máxima de 59 °C, y una pendiente de 0.115 °C/s.

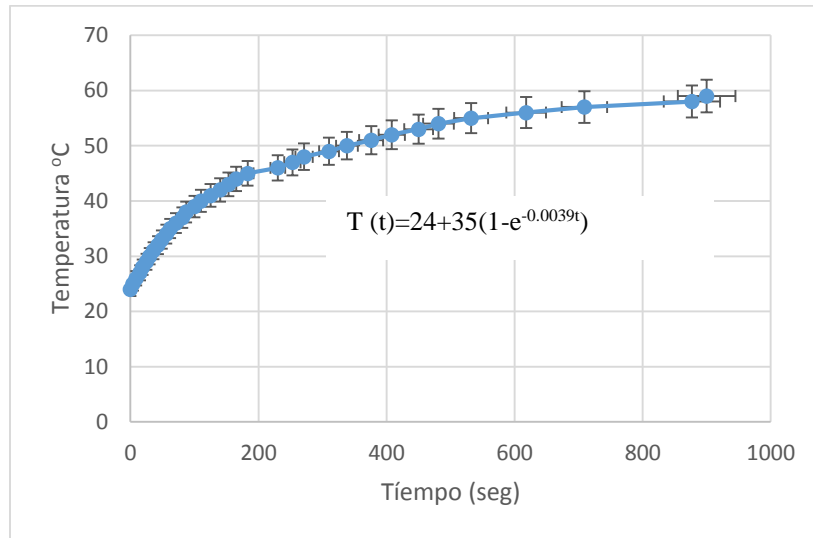


Figura 5.30. Ajuste de temperatura en función de tiempo para la placa con recubrimiento de resina.

El comportamiento térmico que mostró fue mejor que la placa de aluminio, ya que alcanzó una temperatura mayor a la presentada por el aluminio, también se observó que para la temperatura de 59 °C aun se mantenía fija la resina a la placa de aluminio. Como se vio en los resultados de las pruebas ópticas, la resina de pino muestra un comportamiento absorbente en el rango ultravioleta, lo que puede reflejarse en las parte térmica.

Después se hizo la evaluación térmica de las muestras con diferentes concentraciones de hollín, siendo las muestras de 1, 10, 20, 30, 40% en peso de contenido de hollín.

Para la muestra con 1% de contenido en peso de hollín, se obtuvo una temperatura máxima de 64 °C, y una pendiente de 0.161 °C/s. Esta muestra presentó un acabado liso, con poca rugosidad, y de fácil aplicación.

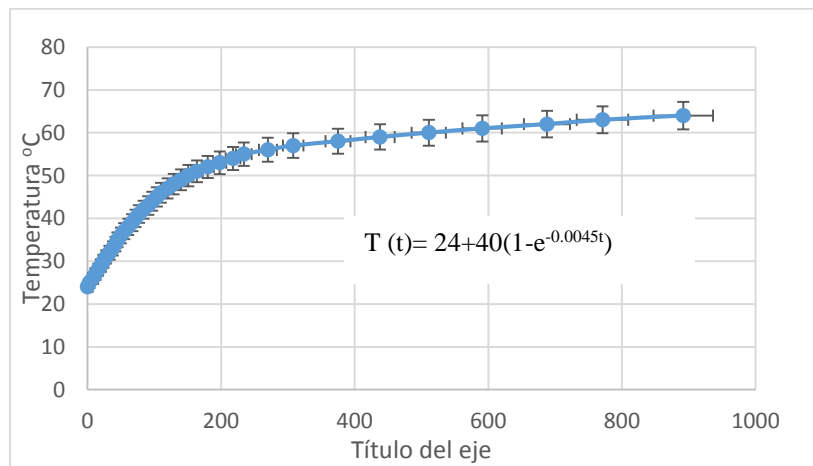


Figura 5.31. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con recubrimiento de hollín al 1%.

La muestra con contenido de 10% hollín y 90% resina, tuvo una temperatura máxima de 66 °C, y una pendiente de 0.154 °C/s. Presentó una superficie poco áspera y buena adherencia al sustrato.

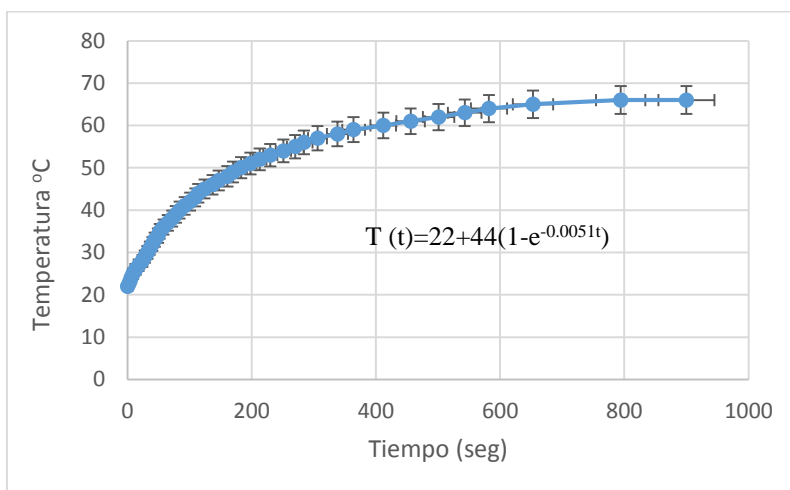


Figura 5.32. Ajuste de temperatura en función de tiempo para la placa con recubrimiento de hollín al 10%.

Para la muestra con 20% hollín se obtuvo una temperatura máxima de 69 °C y una pendiente de 0.167 °C/s. mostró un poco más de rugosidad que la muestra con 10% de hollín, también presentó buena adherencia.

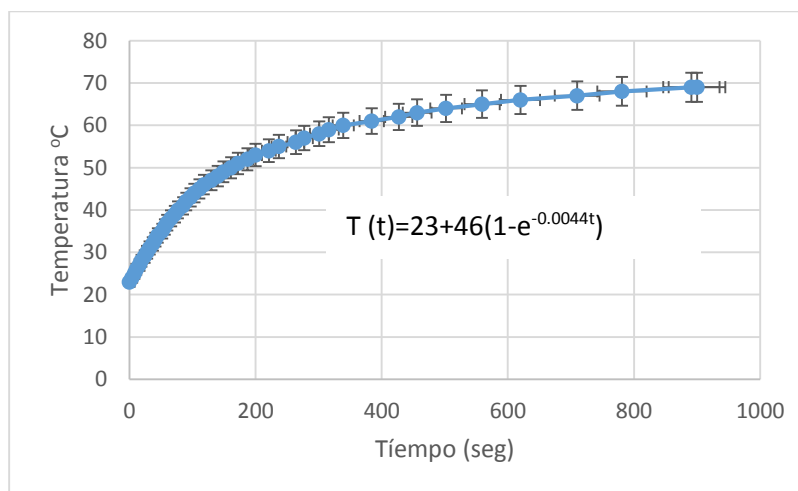


Figura 5.33. Ajuste de temperatura en función de tiempo para la placa con recubrimiento de hollín al 20%.

Para la muestra con una concentración del 30% de hollín, se tuvo una temperatura máxima de 72 °C, y una pendiente de 0.176 °C/s. esta muestra presentó una superficie un poco más irregular que las anteriores, mostró buena adherencia al sustrato.

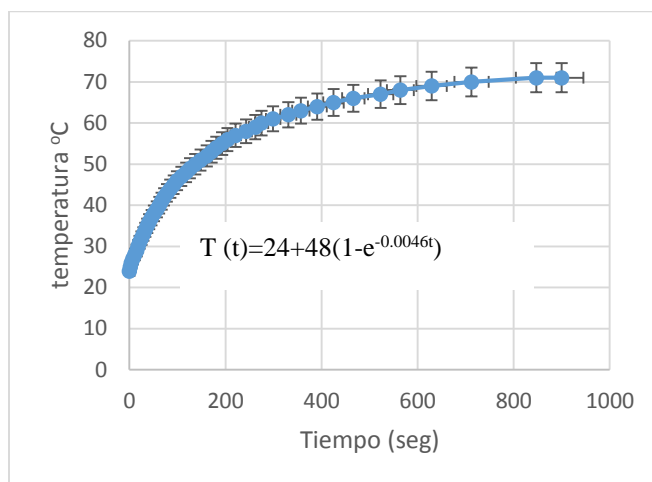
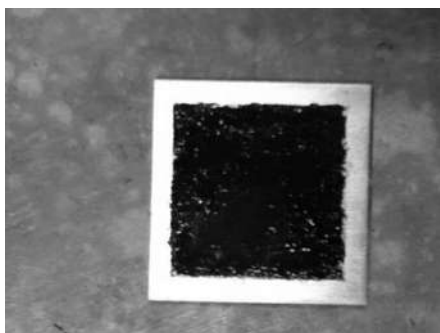


Figura 5.34. Muestra con 30% hollín.

Figura 5.35. Ajuste de temperatura en función de tiempo para la placa con recubrimiento de hollín al 30%.

La placa con recubrimiento que contiene 40% de hollín y 60% de resina, se obtuvo una temperatura máxima de 65 °C, y una pendiente de 0.151 °C/s. Para esta muestra se utilizó una mayor cantidad de solvente para poder diluir el hollín con la resina, lo que ocasiono que al secar la muestra presentara una superficie rasposa y con surcos donde fue pobre la presencia de material, y con lo cual tendió a desprenderse con facilidad.

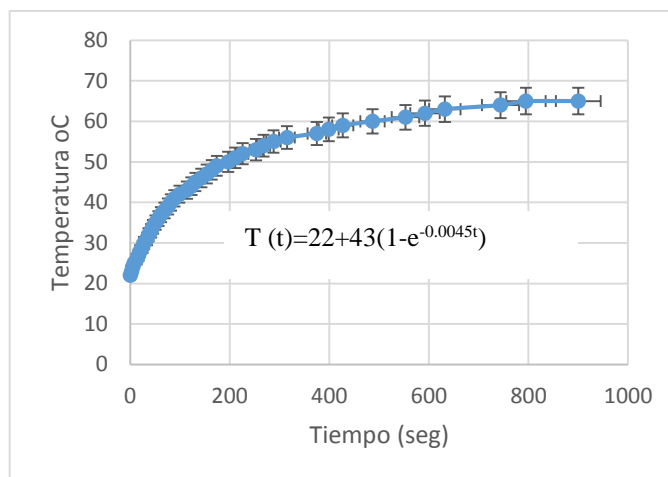
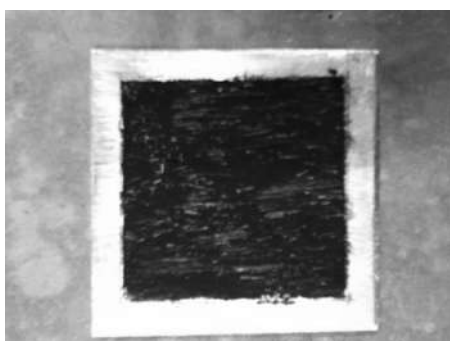


Figura 5.36. Muestra con hollín al 40%.

Figura 5.37. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con recubrimiento de hollín al 40%.

Al ir variando la concentración de hollín, podemos observar que la temperatura máxima alcanzada sobre la placa aumenta a medida que se incrementa la cantidad de hollín, hasta llegar a la concentración de 40%, la cual tiene una menor temperatura que la mostrada por la

muestra con el 30% de hollín. También podemos ver que las pendientes van incrementando con el aumento de la concentración de hollín, hasta llegar al 40% donde se tiene una menor pendiente que la muestra con 30% hollín, de manera que se tiene una concentración óptima que permite una mejor transferencia de calor.

Tabla 5.3. Temperatura máxima y pendientes para muestras con variación de concentración de hollín.

Muestra	Temp. Max (°C)	Pendiente (°C/s)
Sin recubrimiento	48	0.065
Resina	59	0.115
1% hollín	64	0.151
10% hollín	66	0.154
20% hollín	69	0.167
30% hollín	72	0.176
40% hollín	65	0.151

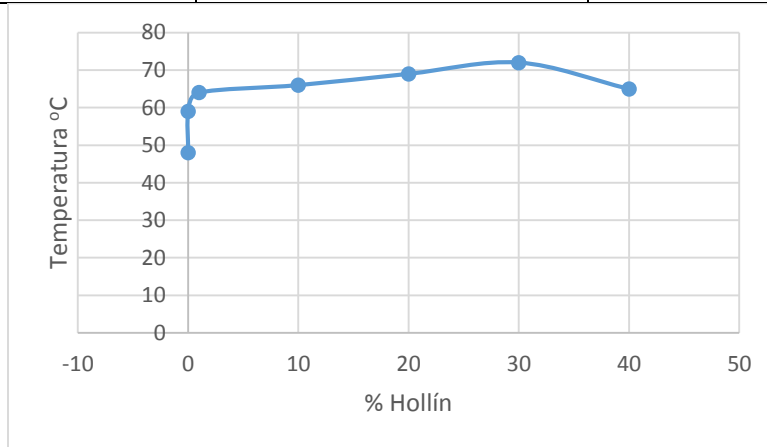


Figura 5.38. Temperatura máxima en función de la concentración de hollín.

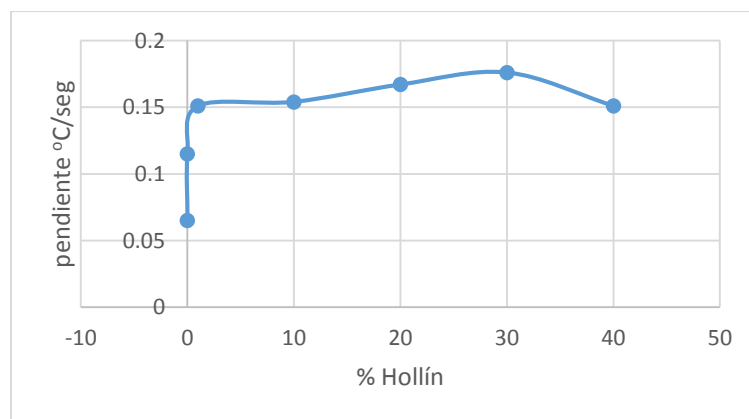


Figura 5.39. Pendientes en función de la concentración de hollín.

En cuanto a los resultados arrojados al hacer el ajuste con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio, podemos observar que el parámetro alfa no varía significativamente

para las diferentes muestras, mientras que el parametro B, que esta relacionado con la diferencia entre la temperatura final e inicil, si cambia al variar la concentración de hollín.

Tabla 5.4. Parámetros de modelo transferencia en estados transitorio.

Muestra	B (°C)	$\alpha$ (°C/s)
Sin recubrimiento	26	0.0038
Resina	35	0.0039
1% hollín	40	0.0045
10% hollín	44	0.0051
20% hollín	46	0.0044
30% hollín	48	0.0046
40% hollín	43	0.0045

Una vez que se estableció cual era la concentración que presentaba las mejores características térmicas, que en este caso fue la muestra con contenido de hollín al 30% y resina al 70% en peso, se procedió a elaborar muestras con esta misma concentración variando el espesor del recubrimiento; se prepararon muestras con espesores de 0.05, 0.100, 0.15, 0.30, y 0.45 mm de espesor. Dichas muestras se evaluaron térmicamente como en el caso de la variación de la concentración.

Para la muestra con un espesor de 0.05 mm se obtuvo una temperatura máxima de 66 °C, y una pendiente de 0.153 °C/s , así mismo se realizó un ajuste de los datos para tener una exprsesión de la temperatura en función del tiempo. Esta muestra presento buena adherencia y un acabado liso con poca rugosidad y sin grietas en la superficie.

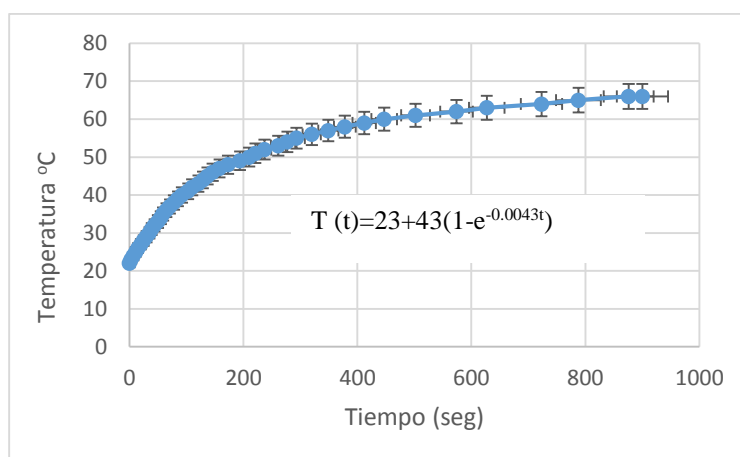


Figura 5.40. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con espesor de 0.05 mm.

Para la muestra con espesor de 0.1 mm se tuvo una temperatura máxima de 69 °C, y una pendiente de 0.158 °C, presentó buena adherencia al sustrato, con una superficie con poca rugosidad.

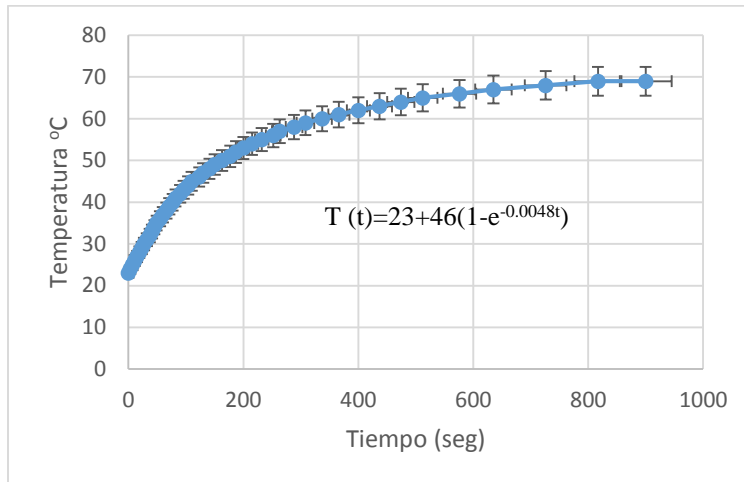


Figura 5.41. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con espesor de 0.1 mm.

La muestra con espesor de 0.30 mm mostró una temperatura máxima de 68 °C, y una pendiente de 0.165 °C, presentó un poco de dificultad en su aplicación sobre la placa de aluminio, y una superficie áspera con buena adherencia al sustrato.

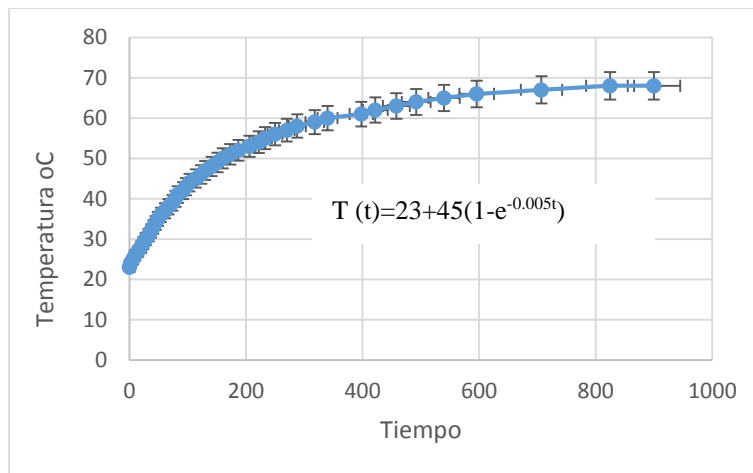


Figura 5.42. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con espesor de 0.30 mm.

Para la muestra con espesor de 0.45 mm se tuvo una temperatura máxima de 65 °C, y una pendiente de 0.148 °C, esta muestra presentó una mayor dificultad al ser aplicado sobre la placa de aluminio, y también mostró una superficie más rugosa que las demás placas con recubrimientos más delgadas.

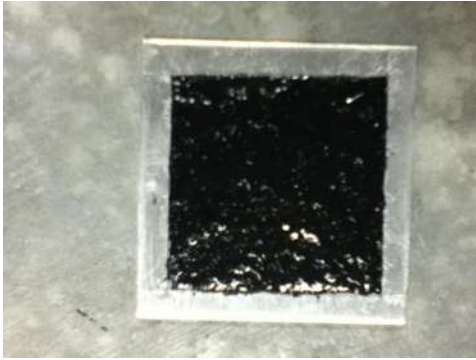


Figura 5.43. muestra de espesor 0.45 mm

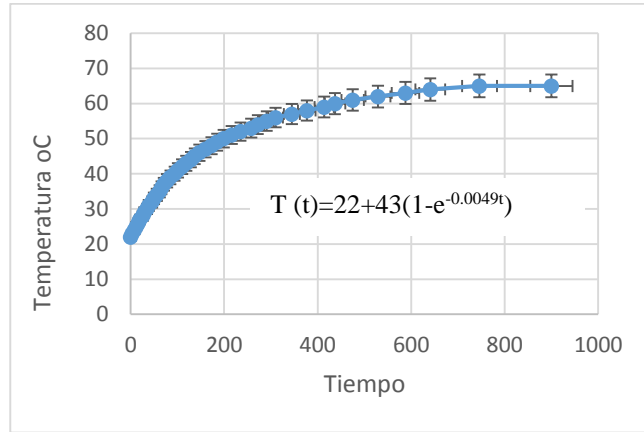


Figura 5.44. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la placa con espesor de 0.45 mm.

Tabla 5.5. Temperaturas máximas y pendientes para los diferentes espesores.

Espesor (mm)	Temp. Max. oC	Pendiente oC/s
0	48	0.065
0.05	66	0.153
0.1	69	0.158
0.15	72	0.176
0.30	68	0.165
0.45	65	0.148

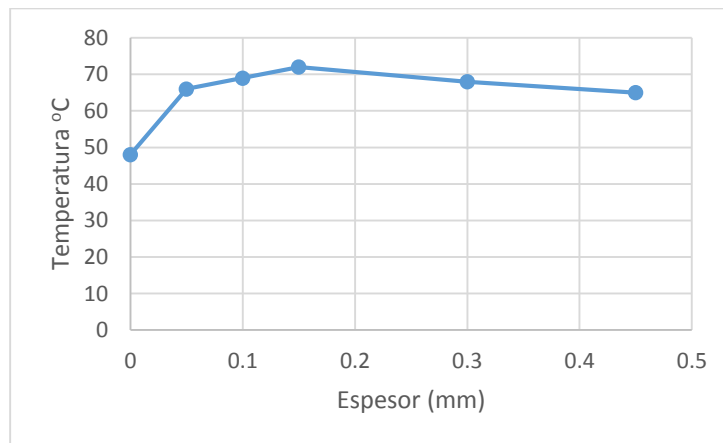


Figura 5.45. Dependencia de la temperatura respecto del espesor del recubrimiento.



Al realizar los ajustes de los datos obtenidos con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio, en el caso de la variación del espesor del recubrimiento, se puede observar que el parámetro  $\alpha$  no varía significativamente, solo el parámetro B es el que se ve afectado al ir cambiando el espesor.

Tabla 5.6. Parámetros del modelo transitorio para los diferentes espesores.

Espesor (mm)	B (°C)	$\alpha$ (°C/s)
0	26	0.0038
0.05	43	0.0043
0.1	46	0.0048
0.15	48	0.0046
0.30	45	0.005
0.45	43	0.0049

Después de determinar que espesor presentó las mejores características térmicas, en cuanto a su capacidad de transferir calor, se procedió a elaborar diferentes muestras de placas con recubrimientos de: pintura negra comercial, pintura utilizada como aglutinante mezclandola con hollín al 30% en peso, pintura con gráfita al 30%, y resina de pino con gráfita al 30% en peso, las cuales se sometieron a pruebas fototérmicas y posteriormente se calcularon sus pendientes, y se ajustaron los datos con el modelo de transferencia de calor en estado transitorio.

Para la muestra con pintura negra comercial se obtuvo una temperatura máxima de 67 °C, y una pendiente de 0.146 °C/s, esta muestra fue de fácil aplicación, se formaron pequeñas burbujas en su superficie.

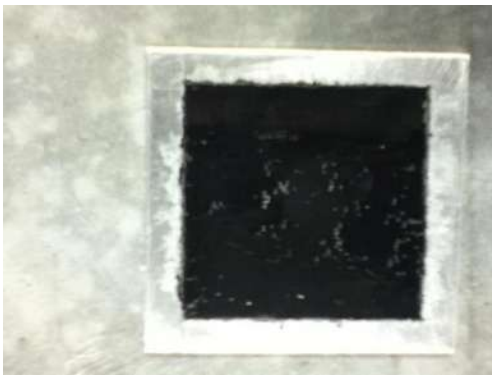


Figura 5.46. Placa con pintura negra.

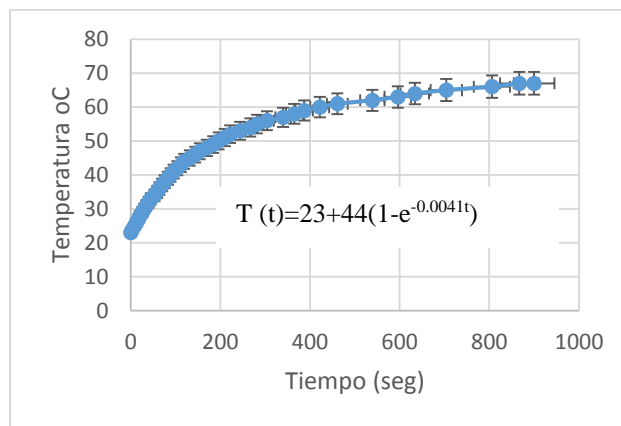


Figura 5.47. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la muestra de pintura negra.

Para la muestra preparada con pintura y hollín con concentración al 30% hollín, se obtuvo una temperatura máxima de 68 °C, y una pendiente de 0.169 °C/s. Esta muestra presentó una

mala adherencia al sustrato de aluminio, se formaron grietas en su superficie y algunas partes se desprendieron después de someterse a las pruebas fototermicas.

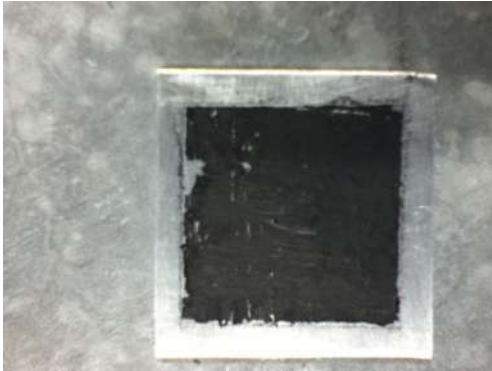


Figura 5.48. Placa con pintura y hollín.

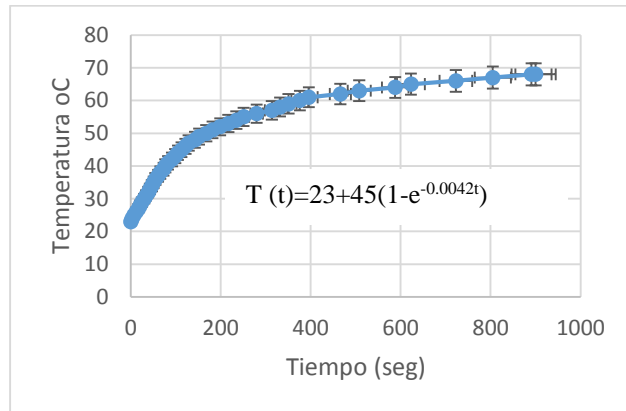


Figura 5.49. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la muestra de pintura y hollín.

La muestra hecha con pintura y grafito tuvo una temperatura máxima de 67 °C, y una pendiente de 0.150 °C/s. se obtuvo una superficie homogénea, sin presencia de grietas y buena adherencia al sustrato, mostró una tonalidad metálica.

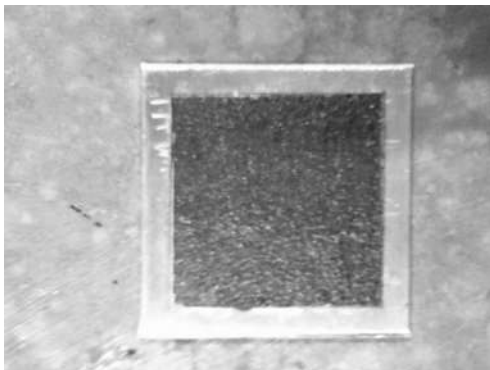


Figura 5.50. Placa con pintura y grafito.

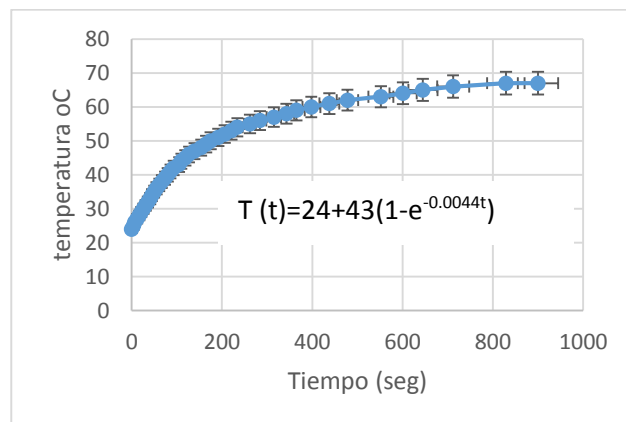


Figura 5.51. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la muestra de pintura y grafito.

La muestra preparada con resina y grafito presentó una temperatura de 69 °C, y una pendiente de 0.151 °C/s. esta muestra tuvo buena adherencia al sustrato, sin grietas en la superficie y también se aprecia una tonalidad grisácea.

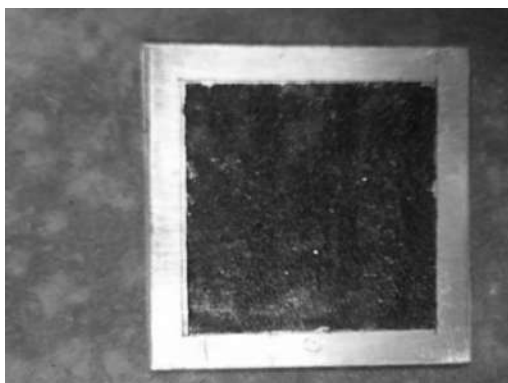


Figura 5.52. Placa con resina y grafito.

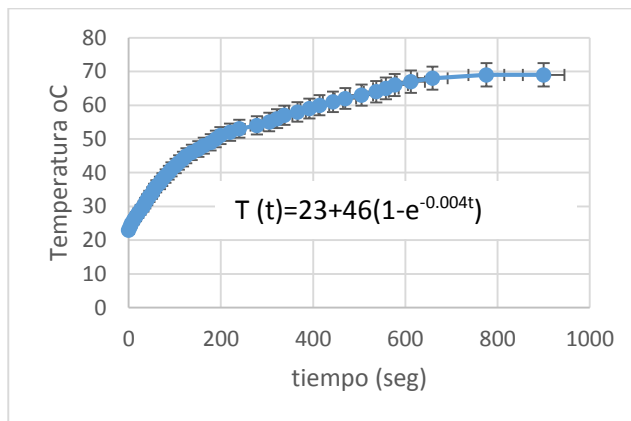


Figura 5.53. Ajuste de temperatura en función del tiempo para la muestra de resina y grafito.

Tabla 5.7. Temperatura máxima y pendientes para las muestras de pintura, pintura-hollín, pintura-grafito, resina-grafito, y resina-hollín.

Muestra	Temp. Max °C	Pendiente °C/s
Sin recubrimiento	48	0.065
Resina-hollín	72	0.176
Pintura negra	67	0.146
Pintura-hollín	68	0.169
Pintura-grafito	67	0.150
Resina-grafito	69	0.151

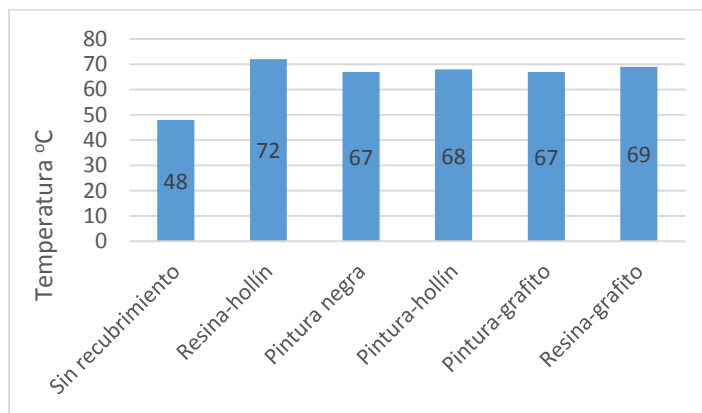


Figura 5.54. Temperaturas máximas para los diferentes tipos de recubrimientos.

En cuanto al ajuste de los datos en función del tiempo, usando el modelo propuesto en la teoría, se observa una vez más que el parámetro alfa no cambia significativamente, siendo el parámetro B el que varía con los diferentes recubrimientos.

Tabla 5.8. Parámetros del modelo de transferencia en estado transitorio para los diferentes recubrimientos.

Muestra	B (°C)	$\alpha$ (°C/s)
Sin recubrimiento	26	0.0038
Resina-hollín	48	0.0046
Pintura negra	44	0.0041
Pintura-hollín	45	0.0042
Pintura-grafito	43	0.0044
Resina-grafito	46	0.004

En general se puede observar, al realizar las pruebas térmicas sobre los recubrimientos elaborados con diferentes materiales, que las muestras con resina tuvieron las mejores características para absorber y transferir calor, al registrar las mayores temperaturas, además de contar con buena adherencia a la placa de aluminio.

### 5.3. Costos del recubrimiento

En cuanto a los costos, tenemos que para recubrir una superficie de 16 cm<sup>2</sup> con 0.15 mm de espesor, se emplean alrededor de 0.18 g de la mezcla resina-hollín, con las características óptimas de concentración, de tal manera que, calculando el costo de la resina, se tiene un costo de 1.7 pesos/m<sup>2</sup>. En cuanto a la pintura negra comercial se tiene un precio de 18 pesos/m<sup>2</sup>. Como se puede observar el recubrimiento hecho a base de hollín, utilizando resina de pino como aglutinante, tiene un precio menor que el de la pintura negra, además de que presenta mejores características de absorción de calor.

## 6. CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados obtenidos, al realizar las diferentes pruebas sobre las muestras elaboradas, se tienen las siguientes conclusiones:

- Primeramente, en relación con los estudios hechos sobre la resina, por medio de la espectroscopia uv-vis se mostró que el espesor influye en la transmisión, ya que al aumentarlo se tiene una menor intensidad, ya que la resina por si misma es capaz de absorber la luz y actuar como un recubrimiento térmico. Por otro lado, también en cuanto a la resina, vimos que el solvente modifica el espesor del recubrimiento y por eso se ve afectada la transmitancia, de tal manera que a medida que aumenta la concentración de solvente también aumenta la intensidad transmitida, esto debido a que, al secarse la muestra y evaporarse el solvente, disminuye la capa de recubrimiento, y como se mostró anteriormente, a menor espesor se tiene una mayor transmisión de la luz.
- Las pruebas de uv-vis, realizadas en las muestras de resina con hollín, dio como resultado una transmitancia muy baja, menor al 1% en el rango de los 1100 a los 200 nm, estos resultados junto con los obtenidos en las pruebas de reflectancia, que se realizaron en muestras con 10 y 30% de hollín dando como resultado una reflectancia promedio de 6.15 y 5.8% respectivamente en el rango de los 2500 a los 300 nm, nos muestran una absorbancia de alrededor del 93.41, para la de 10%, y de 93.79%, para la de 30% de contenido de hollín. Siendo la muestra con 70% resina y 30% hollín la que presenta las mejores características para la absorción de radiación de los 2500 a los 300 nm, que es donde se desea tenga ese comportamiento.
- En cuanto a las muestras, la 10 y 30% hollín, analizadas por medio de microscopia electrónica de barrido, se puede concluir que ambas muestras presentan una distribución homogénea de sus elementos constituyentes, los cuales son, en su mayoría, carbón en un 84% y oxígeno en un 15% para la muestra con 10% hollín, y un 86% de carbón y 14% oxígeno para la muestra con 30% hollín, Además de presentar otros elementos como cobre y nitrógeno en pequeñas cantidades. También se puede concluir que el recubrimiento con mayor concentración de hollín presenta una superficie más áspera y con formación de aglomerados. La alta cantidad de carbón es debida al hecho de que tanto el hollín como la resina de pino son compuestos orgánicos.
- En cuanto a las pruebas fototérmicas, las diferentes muestras presentaron, en mayor o menor medida, ser mejores que si no se tuviera el recubrimiento, en las muestras con diferente concentración de resina-hollín, la que contiene 30% en peso de hollín resultó tener la mayor temperatura, al alcanzar 72 °C y una pendiente de 0.176 °C/s, que es la característica más importante a tener en cuenta ya que nos dice cuán rápido se calienta la placa. De acuerdo al modelo en estado transitorio también esta muestra presentó los mejores parámetros con una B de 48. Al variar el espesor de los recubrimientos la muestra elaborada con 70% resina y 30% hollín con 0.15 mm de espesor tuvo la temperatura mas alta, para espesores menores se tuvo una menor temperatura, lo mismo ocurrió al incrementar el espesor, además de que al ser más

grueso el recubrimiento presentó mayor dificultad para adherirse a la placa de aluminio.

- Con el ajuste de los datos de temperatura en función del tiempo, se determinó que el parámetro B está relacionado con el recubrimiento y el parámetro  $\alpha$ , que se mantuvo constante, con el sustrato. De tal manera que se puede concluir que el recubrimiento actúa como el medio que le está transfiriendo calor a la placa.
- El recubrimiento presenta una baja resistencia térmica, de acuerdo al modelo de transferencia de calor en estado transitorio, ya que para que se cumpla se debe tener un medio, en teoría infinito, que le transfiera calor al cuerpo (placa) de manera instantánea para que se mantenga la temperatura.
- La pintura negra, al igual que sus mezclas con hollín y grafito, mostraron un comportamiento térmico inferior al mostrado por la muestra preparada con resina-hollín, con la misma concentración y espesor, ubicándose en menos de 70 °C las muestras con pintura negra comercial, y teniendo 72 °C la de resina-hollín.
- En cuanto a la muestra elaborada con resina y grafito, también se tuvo una menor temperatura, de 67 °C, que la mostrada por la mezcla resina-hollín de 72 °C con las mismas características de espesor y concentración de sus componentes. También presentó una menor pendiente y un parámetro B más bajo que la muestra resina-hollín.
- Se puede concluir, después de analizar las diferentes muestras, que el recubrimiento más óptimo es aquel que presenta un 70% de resina de pino, y un 30% de hollín, con espesor de 0.15 mm, éste presentó una temperatura máxima de 72 °C, y una pendiente de temperatura de 0.176 °C/s, que son mayores a las temperaturas y pendientes mostradas por los otros recubrimientos.
- Finalmente podemos concluir que la resina de pino como aglutinante resultó una buena elección, al presentar características ópticas y térmicas adecuadas para poderla mezclar con el hollín, y producir un recubrimiento absorbente para aplicaciones solares de bajo costo, ya que son materiales accesibles para poder elaborar y aplicar el recubrimiento por el propio usuario.

## REFERENCIAS

- [1] Jeiner Orlando Moreno Soto. Tesis de licenciatura “síntesis y caracterización de recubrimientos absorbentes selectivos para calentadores solares”. Universidad Tecnológica de Pereira, facultad de ingeniería eléctrica, electrónica, física y de sistemas. Colombia 2016.
- [2] D.M. Herrera-Zamora, F.I. Lizama-Tzec, M.A. Estrella-Gutiérrez, M. Cetina-Dorantes, J.D. Macías, R. de Coss-Gómez, J.J. Alvarado-Gil, O. Ares y G. Oskam. “Recubrimientos selectivos y la energía renovable, una opción para conversión de energía solar a energía térmica”. Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-IPN, Mérida, Yucatán 97310, México.
- [3] Diego Barrera Mendez. Tesis “simulación, diseño y construcción de un colector solar fototermico tubular”. Chihuahua, Chihuahua, 2011.
- [4] John A. Duffie. William A. Beckman. Solar Engineering of termal processes. Fourth edition wiley. 2013.
- [5] Mauricio González-Avilés, Luis Bernardo López Sosa, Hermelinda Servin. Cocinas solares: alternativa energética para el medio rural. Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Editorial académica española.2014.
- [6] 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.
- [7] Hermelinda Servin Campuzano. Tesis doctoral “Caracterizacion óptica y térmica de recubrimientos absorbentes a base de hollín para estufas solares”. FCFM-UMSNH. Mexico 2018.
- [8] Herminio Rebollo Sandoval. Tesis de licenciatura “Determinación del comportamiento fototermico de un recubrimiento hecho a base de hollín”. FCFM-UMSNH. Mexico 2017.
- [9] C.E. Kennedy, “Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials”, National Renewable Energy Laboratory, Golden CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-520-31267. July 2002
- [10] J. M. Vertiz, “Calentadores solares: Energía renovable en tu hogar” [Online], GreenPeace México, revisado en Enero de 2016, disponible en: [www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2006/1/calentadores-solares-energ-a.pdf](http://www.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/report/2006/1/calentadores-solares-energ-a.pdf)
- [11] Fernández Díez, P., “Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura”, Universidad de Cantabria, 2008.
- [12] Charles Kittel. Introducción a la física del estado sólido. Octava edición. John Wiley & Sons. 2005.

- [13] M.C. Gardey Merino. R. Belda. G. E. Lascalea. P. Vazquez. Síntesis y caracterización de pinturas selectivas de  $\text{Co}_2\text{O}_4$  para superficies selectivas. Avances en energías renovables. Vol 13 2009.
- [14] C.E. Kennedy. Progress to development advanced solar selective coating. National renewable energy laboratory. 2008.
- [15] K. T. Roro. N. Tile. B. Yalisi. M. De Gama. T Roberts. Selective solar absorber coating research at the CSIR. World Renewable Energy Congress 2011.
- [16] C.E. Kennedy. Temperature Solar Selective Absorber Materials. July 2002.
- [17] Seraphin, B. O. and Meinel, A. B. (1976) in Optical Properties of Solids: New Developments, B. O. Seraphin, ed., North Holland Publishing Co., Amsterdam.
- [18] Pellegrini, G. (1980). "Experimental methods for the preparation of selectively absorbing textured surfaces for photothermal solar conversion," Solar Energy Mater. pp. 3, 391.
- [19] Randich, E. and Allred, D. D. (1981). "Chemical vapor-deposited  $\text{ZrB}_2$  as a selective solar absorber," Thin Solid Films, 83, 393 (1981); E. Randich and R. B. Pettit, "Solar selective properties and high temperature stability of CVD  $\text{ZrB}_2$ ," Solar Energy Mater. pp. 5, 425.
- [20] Agnihotri, O. P. and Gupta, B. K. (1981). Solar Selective Surfaces. Wiley-Interscience Pub, New York, NY. p.126.
- [21] Schmidt, R. N., Park, K. C. , Torberg, R. H. and Jensen, J. E.. (1964). "High Temperature Solar Coatings," Part I, AST-TDR-63-579, Honeywell Corporation, Hopkins, MN, 1963; R. N. Schmidt, K. C. Park, and J. E. Jensen, "High Temperature Solar Coatings," Part II, ML-TDR-64-250, Honeywell Corporation, Hopkins, MN.
- [22] Kussmaul, M., Mirtich, M. J. , and Curren, A. (1992). "Ion beam treatment of potential space materials at the NASA Lewis Research Center," Surface & Coatings Technol. pp. 51, 299.
- [23] Cuomo, J. J., Ziegler, J.F. and Woodall, J.M. (1975). "A new concept for solar energy thermal conversion," Appl. Phys. Letters. Pp. 26, 10, 557.
- [24] Bannerot, R. B. (1974). "Moderately concentrating (not focusing) solar energy collectors," S. L. Sargent, ed., Proceedings of the Workshop on Solar Collectors for Heating and Cooling of Buildings. ASME, New York, NY. p. 306.
- [25] Sosa-Domínguez Adrián. Pérez Bueno, José de Jesús. Recubrimientos Ni-P negros de doble capa con capacidad absorbente solar. Revista de tecnología e innovación. Septiembre de 2016. Vol 3. No. 8. 50-55.



- [26] L.B., López-Sosa, L.M., Hernández-Ramírez, M., González-Avilés, H., Servín-Campuzano, J., Zárata-Medina. “Desarrollo de un recubrimiento absorbente solar de bajo costo basado en hollín de biomasa forestal: caracterización térmica y aplicación en un sistema de cocción solar”. Vol. 17 No. 2 (2018) 651-668. Revista Mexicana de Ingeniería Química.
- [27] Juan David Garzón Romero. “Determinación de la eficiencia térmica instantánea y la temperatura de salida del colector solar PSHC-1C, del sistema de entrenamiento en energía solar térmica, ubicado en la fundación universitaria los libertadores”. Facultad de ingeniería mecánica. Fundación universitaria los libertadores. Bogota, Colombia. 2016.
- [28] F. Garreta. C. Navntoft. Evaluacion de distintos recubrimientos y superficies para aplicaciones solares térmicas. Ciencia. Vol. 3. Octubre 2018.
- [29] M. C. Gardey Merino. A. Estrella. M. Rodríguez. A. Benito. M. Páez. Síntesis y caracterización de pinturas selectivas de CoCuMNO<sub>x</sub> para pinturas absorbentes solares. Avances en energías renovables y medioambiente. Vol. 19 pp 35-43. 2015.
- [30] Thomas Nussbaumer. Bioenergyinternatonale. 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).
- [31] 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).
- [32] Luis Bernardo López-Sosa, José Núñez-González, Alberto Beltrán, Mario Morales-Máximo, Mario Morales-Sánchez, Montserrat Serrano-Medrano, Carlos A. García. A New Methodology for the Development of Appropriate Technology: A Case Study for the Development of a Wood Solar Dryer. Sustainability 2019, 11, 5620.
- [33] Julio C. Riveros Alcedo, Graciela Egoavil Cueva-Gálvez y Héctor E. Gonzáles Mora. Evaluación de la oleorresina de pino en la zona de Oxapampa, Pasco, Perú. Revista Forestal del Perú. 2017.
- [34] Eugenio Larruga. Memorias políticas y económicas sobre los frutos, comercio. Vol. 11.
- [35] J. A. Gallo. R. A. Sarria Villa. Obtención de Colofonia y Trementina a Partir de Resina de Pino de la Especie patula y Posterior Evaluación de los Parámetros de Calidad. Journal de ciencia e ingeniería. Vol. 5. Agosto de 2013.
- [36] Juan Luis Delgado Macías. Tesis doctoral “Del bosque a la fábrica. Técnica y ciencia de la resina de pino en la España contemporánea”. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid 2015.
- [37] Andrea Lapeña Esteban. Grado de Ingeniería Química “Estudio de las utilizaciones y componentes de la resina natural de pino”. Universitat politècnica de Catalunya. 2017.

[38] Nieves Abril Díaz, J. Antonio Bárcena Ruiz, Emilio Fernández Reyes, Aurora Galván Cejudo, Jesús Jorrín Novo, José Peinado Peinado, Fermín Toribio Meléndez-Valdés, Isaac Túnez Fiñana. Manual de espectroscopia uv-vis. Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Facultad de medicina. Córdoba. Argentina.

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

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

[41] William E. Vargas. Difusión y absorción de luz en materiales no homogéneos: Modelo de Kubelka-Munk. Revista de óptica pura y aplicada de la Sociedad Española de Óptica. 44 (1) 163-183 (2011).

[42] V. Sorrivias de Losano, M. J. Yañez y A. Morales, principios y práctica de la microscopía electrónica, Buenos aires. UAT-CONICET. 2014.

[43] 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).

[44] José Ángel Manrique Valadez. Transferencia de calor. Segunda edición. Oxford. México 2011.

[45] Dirección general de gestión forestal y de suelos. Anuario estadístico de la producción forestal 2016. Primera edición 2016.

[46] Comisión nacional Forestal, Semarnat. La producción de resina de pino en México. Diciembre 2012.

[47] Y. Xue, et al, "Spectral properties and thermal stability of solar selective absorbing AlNi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cermet coating", Science Direct, Solar Energy 96 (2013) 113-118. Beijing, China.