



---

**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

---

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.

*"Matemático Luis Manuel Rivera Gutiérrez"*

*Posgrado en Ciencias en Ingeniería Física*

**CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LOS  
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE RECUBRIMIENTOS DE BAJO  
COSTO EMPLEADOS EN COCINAS SOLARES**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA FÍSICA**

PRESENTA:

L.D. S. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA

ASESOR:

DOCTOR EN CIENCIAS EN FÍSICA LUIS MARIANO HERNÁNDEZ RAMÍREZ

Morelia, Michoacán, Agosto de 2016

## CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
CAPÍTULO 1: Sistemas de Cocción Solar .....	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.1.1. La energía en el mundo .....	14
1.1.2. La energía como satisfactor de necesidades.....	17
1.1.3. Generalidades de los energéticos renovables y no renovables. ....	19
1.2. Energía solar.....	20
1.3. Sistemas de Cocción Solar.....	22
1.3.1. Sistemas de cocción solar con CPC. ....	24
1.3.2. Parámetros para la evaluación de sistemas de cocción solar.....	27
CAPÍTULO 2: Conceptos Básicos Sobre Recubrimientos Orgánicos y Superficies Selectivas. .....	33
2.1. Definición de recubrimiento.....	33
2.2. Tipos de recubrimientos.....	33
2.2.1. Recubrimientos orgánicos.....	34
2.2.2. Recubrimientos orgánicos, fundamentos.....	34
2.2.3. Formación de películas orgánicas sólidas .....	35
2.2.4. Relación recubrimiento sustrato.....	35
2.3. Recubrimientos selectivos absorbedores.....	36
2.3.1. Superficies Selectivas.....	36
2.3.2. Tipos de superficies selectivas.....	37
2.3.3. Superficies absorbentes.....	39
2.3.4. Superficies absorbentes selectivas.....	40
2.4. Aplicaciones de las superficies absorbentes.....	43
2.5. Rango de temperatura en superficies absorbedoras. ....	44

---

2.5.1.	Superficies selectivas de temperatura media.....	44
2.6.	Superficies para sistemas de cocción solar. ....	46
2.6.1.	El hollín como elemento de un nuevo recubrimiento.....	47
CAPÍTULO 3: Desarrollo Experimental.....		49
3.1.	Metodología .....	50
3.1.1.	Arreglo experimental para la obtención de perfiles de temperatura.....	50
3.1.2.	Placas metálicas.....	52
3.1.3.	Variación de concentración de materiales utilizados para la elaboración de un recubrimiento con base en hollín de resina .....	52
3.1.4.	Deposición de recubrimientos sobre placas metálicas .....	54
3.1.5.	Evaluación de perfiles de temperatura en las diferentes muestras de variación de concentración de materiales. ....	55
3.2.	Arreglo experimental para la obtención de potencia de cocción estandarizada .....	56
3.3.	Análisis térmico de régimen transitorio en la placa .....	56
3.3.1.	Flujo total de calor. ....	59
CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión.....		62
4.1.	Comportamiento Térmico de recubrimientos.....	62
4.2.	Perfil térmico general comparativo.....	75
4.3.	Resultados experimentales del análisis térmico de conducción transitoria en las placas metálicas.....	76
4.4.	Parámetros óptimos del recubrimiento. ....	81
4.5.	Análisis de potencia de cocción estandarizada .....	81
4.6.	Rendimiento térmico.....	83
4.7.	Tiempo de Calentamiento y Cocción.....	84
4.8.	Resultados del flujo de calor total.....	85
4.9.	Integración de resultados.....	89
4.10.	Discusión .....	90
CAPÍTULO 5: Conclusiones.....		93
5.1.	Conclusiones .....	93
5.2.	Recomendaciones.....	95
Bibliografía.....		96
ANEXOS.....		104

---

ANEXO I. Tabla de superficies selectivas de media y alta temperatura.....	105
ANEXO II. Arreglo Experimental.....	107
ANEXO III. Instrumentación.....	108
ANEXO IV. Perfil general de temperaturas.....	109
ANEXO V. Prueba de potencia de cocción .....	110
ANEXO VI. Datos de prueba de potencia de cocción .....	111
ANEXO VII. Irradiación solar.....	113
ANEXO VIII. Uniformidad de las superficies.....	117
ANEXO IX. Datos de Rendimiento térmico.....	118
ANEXO X. Datos del análisis térmico.....	119

## INDICE DE FIGURAS

	<b>FIGURA</b>	<b>Página</b>
<b>Fig. 1.1</b>	Producción mundial de energía primaria, 2013. 13,611.81 MMtep	14
<b>Fig. 1.2</b>	Consumo mundial de energía por energético, 2013-9,172.80 MMtep	15
<b>Fig. 1.3</b>	Producción de energía primaria, 2014	15
<b>Fig. 1.4</b>	Consumo final energético por sector y energético	16
<b>Fig. 1.5</b>	Necesidades básicas para el bienestar humano	18
<b>Fig. 1.6</b>	Ejemplos de ecotécnicas para la satisfacción de necesidades básicas	19
<b>Fig. 1.7</b>	Distribución mundial de la radiación solar	21
<b>Fig. 1.8</b>	Distribución de la radiación solar en México	21
<b>Fig. 1.9</b>	Clasificación de los sistemas de cocción solar de acuerdo a su forma de operación	23
<b>Fig. 1.10</b>	Costo por tipo de sistemas de cocción solar	24
<b>Fig. 1.11</b>	CPC de revolución	25
<b>Fig. 1.12</b>	a) CSR y b) CSJ	26
<b>Fig. 1.13</b>	Implementación de los sistemas CSR y CSJ	26
<b>Fig. 1.14</b>	Gráfica válida de la potencia de cocción de la CSR.	30
<b>Fig. 2.1</b>	Relación sustrato recubrimiento	36
<b>Fig. 2.2</b>	Espectro solar	37
<b>Fig. 2.3</b>	Comportamiento de la radiación solar incidente en una superficie con corrugaciones en V.	38
<b>Fig. 2.4</b>	Diseños esquemáticos de seis tipos de recubrimientos y tratamientos superficiales de la absorción selectiva de la energía.	4
<b>Fig. 2.5</b>	Recubrimientos absorbentes de capas múltiples.	42
<b>Fig. 2.6</b>	Tecnologías solares térmicas con colectores solares de absorción de energía	44
<b>Fig. 2.7</b>	Análisis termogravimétrico en atmósfera inerte para las muestras de diferentes tipos de hollín	48
<b>Fig. 3.1.</b>	Arreglo experimental.	51
<b>Fig. 3.2</b>	Arreglo de termopares.	52
<b>Fig. 3.3.</b>	Deposición de recubrimiento sobre placa metálica	54
<b>Fig. 3.4.</b>	Plano referencial de la distribución de temperatura	55
<b>Fig. 3.5.</b>	Balace de energía en la placa de aluminio	57
<b>Fig. 3.6</b>	Comportamiento térmico de la placa en un intervalo de tiempo $0 \rightarrow t$	59
<b>Fig. 4.1</b>	Incremento de temperatura en la placa sin recubrimiento	63
<b>Fig. 4.2</b>	Ajuste para la placa sin recubrimiento	63

<b>Fig. 4.3</b>	Distribución de temperatura máxima en la placa sin recubrimiento	63
<b>Fig. 4.4</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 100% acrílico	64
<b>Fig. 4.5</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 100% acrílico	65
<b>Fig. 4.6</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 100% acrílico	65
<b>Fig. 4.7</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín	65
<b>Fig. 4.8</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín	66
<b>Fig. 4.9</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín	66
<b>Fig. 4.10</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	67
<b>Fig. 4.11</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	67
<b>Fig. 4.12</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	68
<b>Fig. 4.13</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín	68
<b>Fig. 4.14</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín	69
<b>Fig. 4.15</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín	69
<b>Fig. 4.16</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín	70
<b>Fig. 4.17</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín	70
<b>Fig. 4.18</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín	70
<b>Fig. 4.19</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín	71
<b>Fig. 4.20</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín	71
<b>Fig. 4.21</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín	72
<b>Fig. 4.22</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 100% hollín	72
<b>Fig. 4.23</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento 100% hollín	73
<b>Fig. 4.24</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento 100% hollín	73
<b>Fig. 4.25</b>	Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento de pintura para alta temperatura	74
<b>Fig. 4.26</b>	Ajuste para la placa con recubrimiento de pintura para alta temperatura	74

<b>Fig. 4.27</b>	Distribución de temperatura máxima en la con recubrimiento de pintura para alta temperatura	74
<b>Fig. 4.28</b>	Comparativo de incremento de temperatura en las placas	75
<b>Fig. 4.29</b>	Grafica de temperaturas máximas variando la concentración	75
<b>Fig. 4.30</b>	Ajuste en la placa sin recubrimiento	76
<b>Fig. 4.31</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 100% acrílico	77
<b>Fig. 4.32</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín	77
<b>Fig. 4.33</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	78
<b>Fig. 4.34</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín	78
<b>Fig. 4.35</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín	79
<b>Fig. 4.36</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín	79
<b>Fig. 4.37</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento 100% hollín	79
<b>Fig. 4.38</b>	Ajuste en la placa con recubrimiento alta temperatura	80
<b>Fig. 4.39</b>	Análisis de concentración, temperatura máxima y pendiente	81
<b>Fig. 4.40</b>	Potencia de cocción estandarizada con el recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	82
<b>Fig. 4.41</b>	Potencia de cocción estandarizada con el recubrimiento de alta temperatura	83
<b>Fig. 4.42</b>	Tiempos de calentamiento y de cocción para la placa metálica con el recubrimiento de pintura de alta temperatura	84
<b>Fig. 4.43</b>	Tiempos de calentamiento y de cocción para la placa metálica con el recubrimiento 60% acrílico-40% hollín	85
<b>Fig. 4.44</b>	Coefficientes de transferencia de calor de concentraciones y pintura de alta temperatura	87
<b>Fig. 4.45</b>	Flujo total de calor cedido en un instante “t”	87
<b>Fig. 4.46</b>	Calor total “q” cedido en un intervalo de tiempo (0 → t)	87
<b>Fig. 4.47</b>	Análisis térmico de sección transversal en una olla de presión.	88
<b>Fig. 4.48</b>	Análisis comparativo general del uso del recubrimiento 40% hollín-60% acrílico y la pintura para altas temperaturas	89
<b>Fig. 4.49</b>	Análisis comparativo general del uso del recubrimiento 40% hollín-60% acrílico y la pintura para altas temperaturas.	90

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Arreglo de termopares	53
<b>Tabla 3.2</b>	Variación de concentración	54
<b>Tabla 4.1</b>	Rendimiento térmico en superficies analizadas.	84
<b>Tabla 4.2</b>	Propiedades del aluminio	86
<b>Tabla 4.3</b>	Coefficiente de transferencia de calor en las placas de aluminio	86

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>W</b>	watt	<b>A</b>	Área (m <sup>2</sup> )
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado	<b>T<sub>w1</sub></b>	Temperatura inicial del agua (°C)
<b>KWh</b>	Kilowatt hora	<b>T<sub>w2</sub></b>	Temperatura final del agua (°C)
<b>tep</b>	Tonelada Equivalente de petróleo	<b>η</b>	Rendimiento térmico
<b>E</b>	Energía	<b>R<sup>2</sup></b>	Correlación
<b>m</b>	Masa (Kg)	<b>g<sub>λ</sub></b>	Densidad espectral de energía de la radiación incidente por unidad de tiempo
<b>PJ</b>	Peta Joule	<b>α<sub>λ</sub></b>	Absortancia hemisférica monocromática
<b>CPC</b>	Concentrador Parabólico Compuesto	<b>ε<sub>λ</sub></b>	Emitancia hemisférica monocromática
<b>T</b>	Temperatura (°C)	<b>e<sub>bλ</sub></b>	Potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a una temperatura y a una longitud de onda dada
<b>T<sub>agua</sub></b>	Temperatura de agua (°C)	<b>e<sub>λ</sub></b>	Densidad espectral
<b>T<sub>amb</sub></b>	Temperatura ambiente (°C)	<b>ρ</b>	Densidad
<b>C<sub>p</sub></b>	Capacidad calorífica (J/kg°C)	<b>V</b>	Volumen
<b>J</b>	Joule	<b>h</b>	Coefficiente de transferencia de calor
<b>Kg</b>	Kilogramo	<b>A<sub>s</sub></b>	Área Superficial
<b>C</b>	Velocidad de la luz	<b>K</b>	Conductividad Térmica $\left(\frac{W}{m^{\circ}C}\right)$
<b>K</b>	Grado Kelvin	<b>α<sub>t</sub></b>	Difusividad térmica $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
<b>t</b>	Tiempo	<b>L</b>	Longitud característica
<b>S</b>	Segundo	<b>Bi</b>	Número de Biot
<b>P<sub>c</sub></b>	Potencia de cocción	<b>Fo</b>	Número de Fourier
<b>I</b>	Insolación promedio	<b>T<sub>i</sub></b>	Temperatura inicial
<b>P<sub>s</sub></b>	Potencia de cocción estandarizada	<b>T<sub>∞</sub></b>	Temperatura de equilibrio térmico
<b>α</b>	Pendiente	<b>L</b>	longitud característica [m]
<b>ε</b>	Emitancia		
<b>σ</b>	Constante de Stefan Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ )		
<b>I</b>	Irradiación		

## Resumen

El presente trabajo muestra la elaboración de un recubrimiento con base en la mezcla de hollín de resina y acrílico negro mate para la construcción de una superficie absorbadora de bajo costo, con sustrato de aluminio 3003-H14, para almacenadores de alimentos de sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

Así mismo, se propuso una metodología teórica-experimental para conocer el comportamiento térmico de la superficie (Placa-Recubrimiento). Esta metodología se realiza en laboratorio con la presencia de una fuente de luz de 200 w, y puede predecir el comportamiento térmico en campo de superficies absorbadoras para cocinas solares. El uso de esta metodología permite variar el sustrato y el recubrimiento de la superficie absorbadora, sin necesidad de hacerlo en un sistema de cocción solar, optimizando el uso de materiales y evitando las pruebas de potencia de cocción, tiempo de calentamiento y tiempo de cocción, pruebas que son difíciles de llevar a cabo.

Térmicamente, el recubrimiento más funcional en las pruebas de laboratorio, variando en peso la concentración de la mezcla hollín-acrílico, fue 40% hollín-60% acrílico; la superficie con este recubrimiento fue comparada con un recubrimiento comercial para alta temperatura. En las pruebas de efectividad, potencia de cocción estandarizada y tiempos de calentamiento y tiempo de cocción en un sistema de cocción solar, se corroboraron los datos de la metodología sugerida. En ambos casos se observó mayor temperatura en un intervalo de tiempo menor en la superficie con el recubrimiento propuesto; lo anterior se traduce en tiempos de cocción menores, alrededor de 20 minutos menos.

Por lo tanto, la metodología es funcional y abre muchas posibilidades de investigación para considerar la variación de sustratos y recubrimientos, con la finalidad de generar una combinación óptima de estos parámetros.

**Palabras clave:** cocina, solar, hollín, recubrimiento, absorbador.

**Abstract.**

This work shows the development of a coating based on the mixture of soot and resin matte black acrylic for the construction of an absorber surface low cost, aluminum substrate 3003-H14, to pots of solar cookers small dimensions.

Also, a theoretical-experimental methodology is proposed to determine the thermal behavior of the surface (plate-coating). This methodology is performed in the laboratory with the presence of a light source 200 w, and can predict the thermal behavior of absorbing surfaces for solar cookers, for example the cooking power. The use of this methodology allows varying the substrate and the coating of the absorber surface, without use a solar cooking, optimizing the use of materials and avoiding tests of cooking power, heating time and cooking tests, they are difficult to carry out.

Thermally, the most functional coating in laboratory tests by varying the concentration by weight of soot-acrylic mixture was 40% soot-60% acrylic; the surface with this coating was compared to a commercial coating for high temperature. In tests of effectiveness, power cooking standardized and times heating and cooking, calculated in a solar cooking, the methodology data were corroborated; higher temperature in both cases was observed in a shorter time interval on the surface with the proposed coating; this translates into less time cooking, about 20 minutes less.

Therefore, the methodology is functional and opens up many possibilities for research considering varying substrates and coatings, in order to generate an optimal combination of these parameters for solar cookers of small dimensions and solar thermal technologies.

**Keywords:** *solar cookers, soot, coating, absorber.*

## Introducción

En México aproximadamente 16.4 millones de personas, según el INEGI (2010), consumen leña como único combustible para cocinar. En Michoacán, familias que tienen en promedio 5 integrantes, pertenecientes a comunidades indígenas purépechas, consumen cerca de 7 toneladas de recursos maderables al año (González, et al 2013), lo que representa un consumo exponencial considerando el total de familias que conforma cada comunidad; esto contribuye, aunado a la tala clandestina, al deterioro ambiental del territorio que habitan poblaciones indígenas. La combustión de recursos maderables extraídos de los bosques que rodean a comunidades marginadas, es utilizada en mayor medida para la cocción de alimentos.

El deterioro ambiental no es el único factor que afecta a las poblaciones que consumen recursos forestales maderables, la salud de sus consumidores se ve afectada a través del humo de combustión, que rodea los hogares de las amas de casa que cocinan con leña.

Las principales causas asociadas a infecciones respiratorias agudas por la inhalación del humo de combustión de leña son (Riojas, et al 2006):

- Bronquitis crónica y obstrucción bronquial crónica
- Bajo peso al nacer y trastornos perinatales
- Cáncer de pulmón y nasofaríngeo
- Fibrosis pulmonar

Así, el aprovechamiento de recursos forestales maderables genera perjuicios socio-ambientales que aumentan progresivamente. Por lo tanto, se han hecho esfuerzos por mitigar dichos perjuicios a través del desarrollo, implementación y monitoreo de tecnologías que aprovechan Fuentes Renovables de Energía (FRE). Los sistemas de cocción solar, por ejemplo, representan una alternativa que ha generado resultados favorables en comunidades indígenas Michoacanas, que muestran adopción y beneficios socio-ambientales cuantificables (López, et al,

2014), por lo que el uso de esta tecnología es un caso efectivo del aprovechamiento y transferencia de FRE sustentable (Económicamente viable, socialmente aceptable y ecológicamente amigable).

Por lo tanto, pensar en el mejoramiento de los sistemas de cocción solar es un campo de estudio útil para la generación de sistemas eficientes, económicos y de fácil construcción; tecnologías sustentables accesibles.

Los sistemas de cocción solar son termoconvertidores que aprovechan la radiación solar y la transforman en poder calorífico suficiente para lograr la cocción de los alimentos en intervalos de tiempo variados (López, 2013). Sistemas como las cocinas solares directas de pequeñas dimensiones, generalmente se conforman por tres elementos: sistemas de seguimiento e inclinación solar, reflectores de concentración de radiación solar y almacenador de alimentos. El almacenador de alimentos es el absorbedor térmico del sistema que permite la cocción de los alimentos. Así, la investigación sobre cocinas solares versa en el estudio de los tres componentes antes mencionados, aunque pocas investigaciones se concentran en el mejoramiento del recubrimiento que posee el almacenador de alimentos.

Estudios realizados para cocinas solares con Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) de pequeñas dimensiones, usando recubrimientos absorbentes solares de bajo costo, muestran mejores resultados considerando recubrimientos selectivos absorbentes solares con base a hollín de recursos maderables forestales. Los estudios concluyen mostrando mejores propiedades térmicas para el hollín de resina, en comparación del obtenido del ocote y del residual en los fogones de los hogares (Correa, et al., 2014). La premisa de realizar tecnologías de bajo costo desde el absorbedor térmico justifica la investigación realizada.

De forma operativa, los recubrimientos antes mencionados, han generado buenos resultados en los sistemas de cocción solar empleados, arrojando potencias de cocción estandarizadas (ASAE S580) aceptables para la cocción de alimentos (López, 2013). En algunos casos se han utilizado recubrimientos con base en

hollín añadiendo acrílico (pintura negro mate) para cocinas solares de pequeñas dimensiones con resultados favorables (González, 2013).

La investigación no está terminada, se requiere la caracterización del recubrimiento a partir de análisis térmicos más detallados, que proporcionen información para conocer la funcionalidad del hollín de resina o mezclas derivadas del hollín.

La presente propuesta versa en la caracterización de recubrimientos empleados en sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones a partir del hollín de resina y mezclas derivadas. Este trabajo muestra el uso de hollín como pigmentos menores a  $500 \mu m$  y un aglutinante acrílico de pintura base, para la generación de un nuevo recubrimiento. Se realiza una variación de concentración desde el acrílico hasta el hollín, obteniendo mejores resultados para la concentración 40% hollín, 60% acrílico.

Además, se sugiere una metodología nueva para predecir y evaluar el comportamiento térmico de recubrimientos, para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones, sin necesidad de realizar las pruebas de efectividad como el cálculo de potencia de cocción, tiempos de calentamiento, tiempo de cocción y rendimiento térmico. Dado que las pruebas de efectividad no siempre se pueden realizar con facilidad, la metodología experimental a través de perfiles de temperatura permite obtener resultados anticipados para reducir el número de pruebas de efectividad.

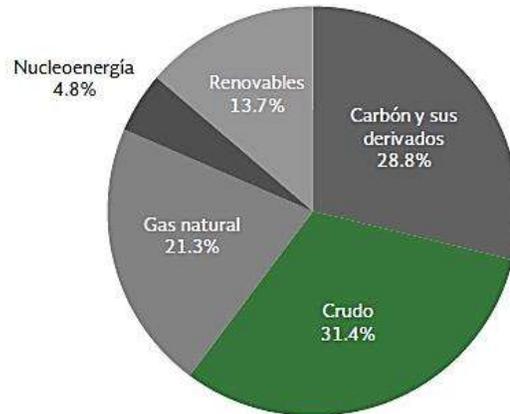
Los resultados obtenidos de la metodología experimental en laboratorio se contrastaron con los resultados de las pruebas de efectividad, mostrando mejores resultados para el recubrimiento con base en hollín de resina, como se anticipó en la pruebas de laboratorio. Lo anterior demuestra la utilidad de la metodología y los posibles trabajos que pueden desarrollarse a futuro.

# CAPÍTULO 1: Sistemas de Cocción Solar

## 1.1. Antecedentes

### 1.1.1. La energía en el mundo

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE), el petróleo crudo representó el mayor porcentaje (31.4%) en la producción total de energía primaria para 2015 a nivel mundial (Fig. 1.1).

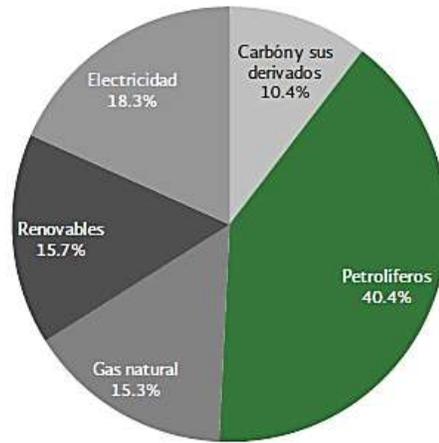


Fuente: World Energy Balances, IEA, edición 2015.

**Fig. 1.1. Producción mundial de energía primaria, 2013. 13,611.81 MMtep<sup>1</sup>.**

A decir del consumo, existe una directa relación con la producción antes mencionada. Del consumo mundial de energía en 2015, el 40.4% provino de los petrolíferos (Fig. 1.2), lo que muestra la prioridad de producción y consumo hacia esta fuente de energía convencional, no renovable.

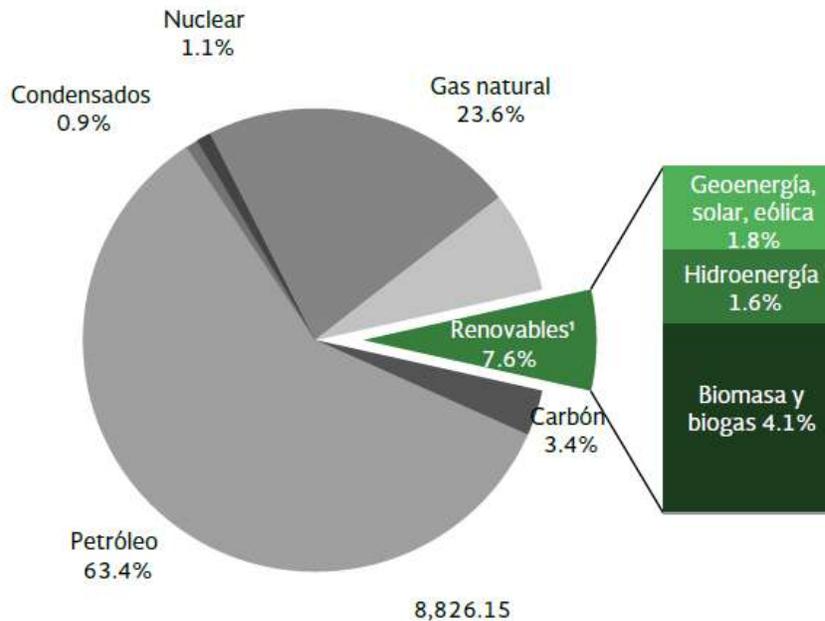
<sup>1</sup> MMtep: Millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo.



Fuente: World Energy Balances, IEA, edición 2015.

**Fig. 1.2. Consumo mundial de energía por energético, 2013-9, 172.80 MMtep.**

En México la tendencia no es muy diferente. De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2014, la producción de petróleo supera el 60% del total de la energía producida en todo el país (Fig. 1.3).

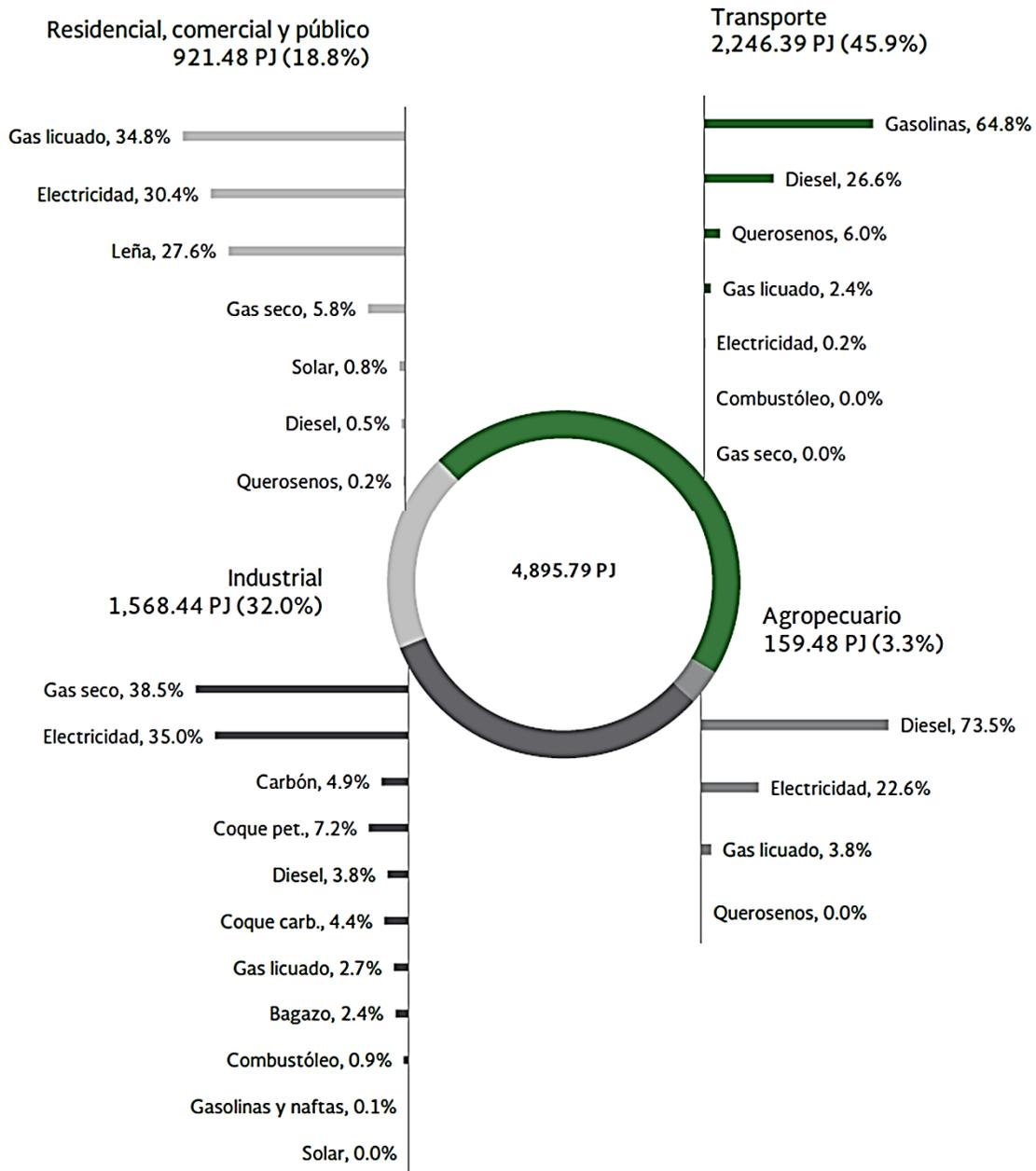


Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

**Fig. 1.3. Producción de energía primaria, 2014.**

Se puede notar que el porcentaje que proporcionan las Fuentes Renovables de

Energía (FRE) no es muy significativo, únicamente alcanza el 7.6% de la producción total. El balance nacional de energía también permite conocer el consumo de energía por sectores (Fig. 1.4).



Fuente: Balance Nacional de Energía 2014.

Fig. 1.4. Consumo final energético por sector y energético.

Se puede apreciar que las FRE tienen presencia únicamente en el sector

residencial, comercial, público e industrial. Particularmente en el sector residencial, que representa el 18.8% del consumo nacional de energía, la presencia de energía solar no es representativo, menos del 1%. Lo anterior lleva a la siguiente conjetura: en México, las FRE no figuran en el acervo energético de la producción y consumo en ningún sector.

### **1.1.2. La energía como satisfactor de necesidades.**

La dependencia hacia los hidrocarburos propicia inseguridad energética, perjuicios medioambientales debido a las altas emisiones de bióxido de carbono<sup>2</sup> e inestabilidad en el costo de los combustibles y la energía eléctrica, que satisface principalmente las necesidades básicas del sector residencial.

Por otra parte, los elevados precios de los combustibles fósiles, aunados a la creciente preocupación de las naciones por el cambio climático y asegurar estratégicamente su seguridad energética, han obligado a impulsar programas de energías renovables en varias partes del mundo. En el 2007 la FRE representaron el 18% de la producción mundial de energía eléctrica (Solís, 2014); se estima que éstas alcanzarán el 22% de la producción total de energía eléctrica en 2030, lo que será un gran avance en materia de seguridad energética. El tema de la energía distribuida, descentralizada, es de suma importancia, únicamente así es posible erradicar el monopolio de la distribución y venta de energía en México.

Pero los hidrocarburos no son la panacea energética; directa e indirectamente se aprovechan los recursos naturales para satisfacer, en principio, “necesidades humanas básicas“. El concepto de necesidades básicas se introdujo por primera vez en la Conferencia Mundial del Empleo de 1976, de la Organización Mundial del Trabajo (Jolly, 1976). A través del tiempo el concepto ha cambiado, en particular se converge con Careaga (2012) en cinco necesidades básicas para el bienestar humano: alimentación, agua, manejo de residuos, vivienda y energía

---

<sup>2</sup> Las emisiones de bióxido de carbono son causadas mayormente por la generación de energía, el 68% de las emisiones a nivel mundial provienen de los procesos de producción de energía, según la Agencia Internacional de Energía en su informe global en 2015 (AIE, 2015).

(Fig. 1.5). Así pues, se debe concebir el concepto de *necesidades energéticas* como aquellas que pueden ser satisfechas a través de la distribución de energía convencional a través de instituciones del sector público y privado (Privadas por ejemplo como Comisión Federal de Electricidad).



**Fig. 1.5. Necesidades básicas para el bienestar humano.**

Para satisfacer las “necesidades energéticas” se precisa la presencia de dispositivos tecnológicos eficientes y accesibles, tecnología para todos. Las ecotécnicas<sup>3</sup>, por ejemplo son una alternativa sustentable<sup>4</sup> para la satisfacción distribuida de las cinco necesidades antes enunciadas. Algunas que se categorizan como satisfactores de más de una necesidad (Fig. 1.6).

<sup>3</sup> La Ecotecnología se define como dispositivos, métodos y procesos que propician una relación armónica con el ambiente y buscan brindar beneficios sociales y económicos tangibles a sus usuarios, con referencia a un contexto socio-económico específico (Ortiz, 2014). Un término que se acompaña comúnmente como sinónimo a la Ecotecnología es la Ecotécnica. Este último término no ha sido definido por la comunidad científica, sin embargo su uso coloquial es tan común como la Ecotecnología. Por lo tanto, considerando los usos del término se puede definir la ecotécnica como las aplicaciones prácticas de la Ecotecnología; es decir, los artefactos, dispositivos y en general los productos ecotecnológicos tangibles.

<sup>4</sup> Sobre el desarrollo sustentable se han hecho declaraciones y definiciones mundiales desde 1987; sin embargo definir una tecnología sustentable no necesariamente involucra la satisfacción de necesidades. Una tecnología sustentable puede definirse como aquella que es económicamente rentable, ecológicamente viable y socialmente aceptable. Cumplir en equilibrio con las tres sentencias garantiza seguridad energética y satisfacción de necesidades con los menores impactos económico-socio-ambientales.

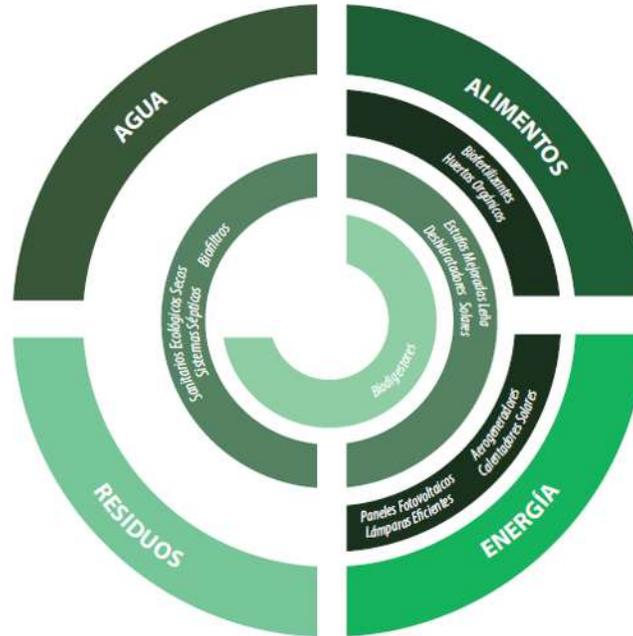


Fig. 1.6. Ejemplos de ecotécnicas para la satisfacción de necesidades básicas.

### 1.1.3. Generalidades de los energéticos renovables y no renovables.

Muchas ecotécnicas que logran la satisfacción de necesidades pueden atender directamente al sector residencial. La existencia de estos sistemas tecnológicos muestra el funcionamiento *ad hoc* del aprovechamiento y consumo inmediato de energía distribuida. Es de pensar que el óptimo uso de los energéticos puede lograrse desde las viviendas y del uso en el sector doméstico rural y urbano.

Los energéticos son sustancias con energía de alguna forma, capaz de producir calor, trabajo mecánico o electricidad. El energético, para poder generar energía en tránsito en cualquiera de las tres formas anotadas, debe de estar en un estado de desequilibrio con otros objetos a su alrededor. Una vez que el energético alcanza el equilibrio con los otros cuerpos, desaparece o se destruye. Los energéticos pueden clasificarse en:

- a) Primarios Agotables: carbón, petróleo, gas natural, uranio.
- b) Primarios inagotables o renovables: geotermia, biomasa, viento, olas, mareas, gradiente marino de temperatura, hidrogeno y radiación solar.

De los energéticos primarios agotables y renovables se obtienen, mediante variados sistemas técnicos, los energéticos secundarios que se presentan generalmente en forma de calor, trabajo y electricidad; así como en materiales combustibles.

A diferencia de los energéticos primarios agotables, los primarios renovables son susceptibles de aprovecharse en el sector doméstico, a través de diversos tipos de ecotécnicas. Por ejemplo, el viento mediante aerogeneradores, biomasa a través de estufas ahorradoras de leña o radiación solar a través de sistemas de cocción solar.

## **1.2. Energía solar.**

La radiación solar, como se ha mencionado, es un energético primario inagotable; tiene presencia en la tierra a causa de la generación de energía que proviene de la pérdida de masa del sol (Según la ecuación Einstein  $E=mc^2$ ), debido a las reacciones nucleares sucesivas de fusión, que se producen en las regiones centrales de este astro y que viajan en el vacío  $15 \times 10^7$  km para llegar a la atmósfera terrestre como  $1365 \text{ W/m}^2$  (Constante solar).

La pérdida de energía a través de la atmósfera es inevitable, lo que hace posible recibir en la superficie terrestre aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$  (Guillen, 2004), energía que se distribuye por todo el planeta de diferente manera (Fig. 1.7). Se puede notar que existe una mayor incidencia de la radiación solar en la región terrestre que se localiza geográficamente, hacia el norte, cercano al trópico de cáncer y, hacia el sur, cercano al trópico de capricornio, situando en el centro al ecuador, esta franja recibe el nombre de “franja de mayor incidencia solar”. México se sitúa dentro de esta franja, tiene una radiación promedio de  $5 \text{ kWh/m}^2\text{día}$  (SENER-2004).

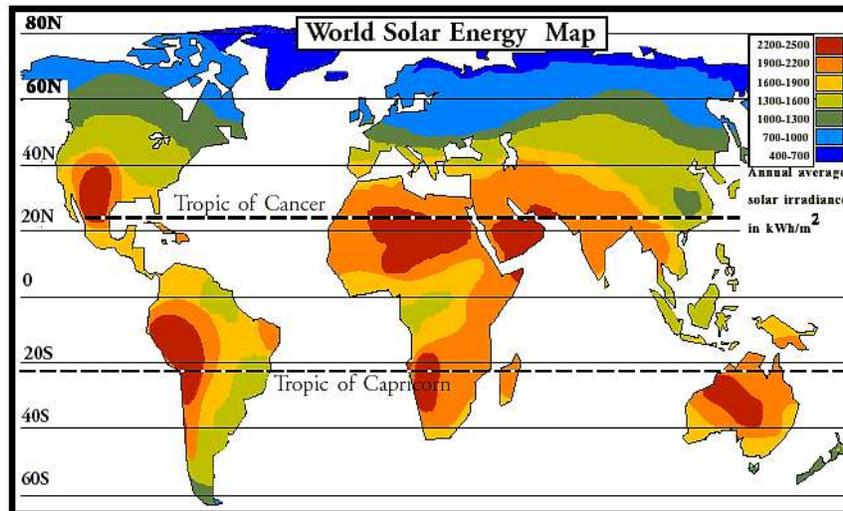


Fig. 1.7. Distribución mundial de la radiación solar.

Análogo a la distribución de radiación solar a nivel mundial, en México varía la intensidad de ésta. Incluso por estado, la diferencia se puede apreciar en las distintas intensidades de radiación solar en territorios cercanos (Fig. 1.8).



Fig. 1.8. Distribución de la radiación solar en México (Fuente: SENER).

En Michoacán por ejemplo, se tiene una radiación solar promedio mayor a 4.7 kWh/m<sup>2</sup>-día, una de las más altas que se registran en el país. La presencia en México de gran potencial de energía solar incidente por metro cuadrado cada día, hace factible su aprovechamiento a gran y pequeña escala, para su uso a través

de sistemas fotovoltaicos<sup>5</sup> y sistemas fototérmicos<sup>6</sup>. Para el sector residencial y uso doméstico, es posible utilizar sistemas fotovoltaicos a través de sistemas de interconexión o aislados de paneles solares para la generación de electricidad, y fototérmicos a través de sistemas de cocción solar. Aunque en el sector residencial el aprovechamiento de la energía solar es poco significativo (0.8%), saber que se cuenta con un gran potencial de radiación solar, vislumbra un escenario de seguridad energética y bajos impactos (mitigación ambiental) bastante prometedor. Por lo tanto incentivar el desarrollo científico-técnico de ecotécnicas o tecnologías que aprovechan FRE, como la energía solar, es una alternativa energética inmediata para el sector doméstico.

### **1.3. Sistemas de Cocción Solar.**

Una forma de aprovechamiento de la radiación solar es la cocción de alimentos a través de sistemas de cocción solar. Los sistemas de cocción solar son termoconvertidores que aprovechan la radiación solar y la transforman en poder calorífico suficiente para lograr la cocción de los alimentos en intervalos de tiempo variados (López, 2014). Estos sistemas se han utilizado en zonas urbanas y rurales con mayor frecuencia en los últimos 20 años.

Aunque no existe una clasificación estándar, y muchos autores los clasifiquen en sistemas abiertos (de concentración) y cerrados (acumuladores térmicos tipo horno), los sistemas de cocción solar se pueden clasificar de acuerdo a su forma de operación en (Fig. 1.9):

- a) Sistemas de cocción solar directos
- b) Sistemas de cocción solar indirectos.

---

<sup>5</sup> Los sistemas fotovoltaicos, generalmente son estructuras de semiconductores, por ejemplo silicio (Con estructuras Monocristalinas, policristalinas o amorfas), que aprovechan la radiación del sol para generar impulsos de corriente directa, que puede ser almacenada en bancos de baterías para sistemas aislados o interconectadas a un sistema de distribución de energía convencional.

<sup>6</sup> Los sistemas fototérmicos aprovechan la radiación solar para concentrarla, a través de diversos tipos de colectores que hace posible el calentamiento a altas temperaturas de fluidos que pueden tener fines como: generar electricidad, lograr la cocción de alimentos o realizar calentamiento de agua.



Fig. 1.9. Clasificación de los sistemas de cocción solar de acuerdo a su forma de operación.

Dentro de la clasificación de los sistemas de cocción solar directos se encuentran las cocinas solares de tipo caja, de concentración parabólica, de Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) abiertos y de tipo horno. Así, los sistemas de cocción solar indirectos son dispositivos que permiten la cocción de los alimentos en espacios cerrados, logrando una cocción de alimentos de forma convencional sin la exposición a los rayos del sol. La desventaja de la implementación y uso de los sistemas de cocción solar indirectos radica en sus costos de implementación y mantenimiento elevados, que restringe su acceso a programas con subsidios altos o personas con gran poder adquisitivo, se vuelve una tecnología poco apropiada.

Por otra parte, una característica para que los sistemas de cocción solar se consideren tecnología sustentable<sup>7</sup> debe ser su accesibilidad económica. La fig. 1.10, muestra el costo que tienen diferentes tipos de sistemas de cocción solar de acuerdo con algunos modelos específicos comerciales.

		> \$50 US	\$ 190	\$225US	\$279 US	\$330 US <
Modelo	Tipo	CAJA	CPC	Concentración	CPC aislado con vacío	CPC-CAJA-Multicompuesto
	Modelo	Hot-Pot (olla Solar)	CSR Cocina Solar Rural	CSELI56 Cocina Solar	Go-Sun	Tolokatsin

Fig. 1.10. Costo por tipo de sistemas de cocción solar.

### 1.3.1. Sistemas de cocción solar con CPC.

Los sistemas de cocción solar que utilizan CPC, son tecnologías eficientes económicamente accesibles; dispositivos que se localizan a la mitad en la escala de menor a mayor costo.

<sup>7</sup> En términos simples, la tecnología sustentable es aquella que tiene un comportamiento que está dentro de los límites de la sustentabilidad o contribuye a que se alcancen dichas condiciones, donde sus interacciones con la sociedad, la economía, el medio ambiente, y otras tecnologías, deben tener el menor impacto nocivo posible (Amemiya, 2012).

Un CPC es un medio eficiente de concentración solar utilizado desde hace varios años. Además, por ser una aplicación de la óptica anidólica<sup>8</sup>, ofrece al usuario diversas ventajas: no emisión de destellos luminosos que puedan dañar la vista; buen desempeño en tiempo de lluvias, porque aprovechan la radiación difusa y no requieren de un tiempo excesivo para la cocción de alimentos.

En particular un CPC de revolución en tres dimensiones (Senthilkumar, 2009), muestra un mayor rendimiento óptico y térmico que el CPC en dos dimensiones usado como canal parabólico compuesto (Fig. 1.11).

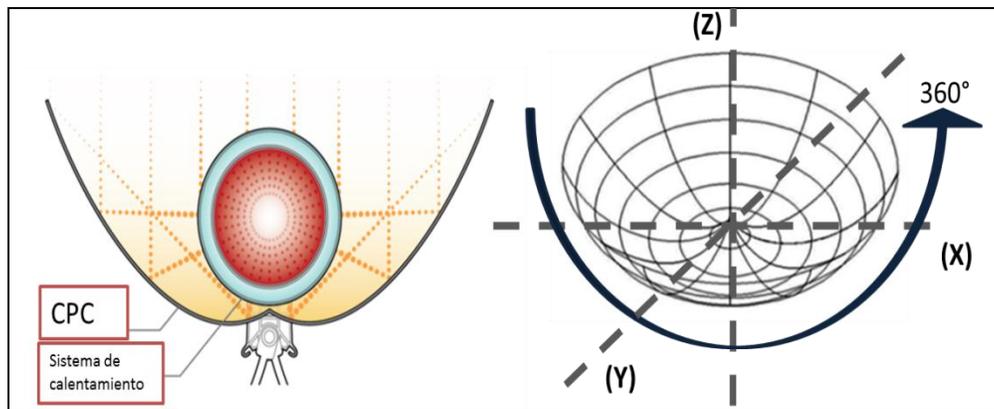


Fig. 1.11. CPC de revolución.

Un ejemplo del buen funcionamiento de los CPC de revolución, se muestra en la Cocina Solar Rural (CSR) y la Cocina Solar Jorejpataranskua (CSJ), tecnologías que fueron desarrolladas para la cocción de alimentos y reducción de la extracción de recursos forestales maderables empleados para la cocción de alimentos; así como mitigación de las emisiones de bióxido de carbono causado por el humo de combustión (López, 2013). La óptica geométrica y los componentes de estos sistemas los hacen eficientes y totalmente funcionales, logrando la cocción de los alimentos en intervalos promedio de tiempo de 2 horas. Además estos dispositivos

<sup>8</sup> En la óptica anidólica, u óptica sin imágenes, en vez de un objeto se tiene una fuente de luz y en vez de una imagen se tiene un receptor donde se producirá un mapa de irradiancia proveniente de la fuente. La óptica anidólica se basa en el diseño de sistemas ópticos en los que no es necesaria la formación de imagen (proveniente del Griego, *an + eidolon*, significando sin imagen). Permite mayor flexibilidad en el diseño de sistemas ópticos que la óptica formadora de imagen ya que no requiere mantener la conjugación entre los puntos del espacio imagen y espacio objeto (Winston, 1970).

son eficientes y su costo es relativamente bajo comparado con otros dispositivos en el mercado; tienen un costo de \$1200 y \$3500 pesos (MXN) para la CSJ y CSR respectivamente (Servín, 2012), como se muestra en la figura 1.12.



Fig. 1.12. a) CSR y b) CSJ.

Así mismo estos dispositivos han generado un caso de éxito en su uso continuo. Un proyecto de implementación en una comunidad indígena (Santa fe de la laguna) del estado de Michoacán (Fig. 1.13), mostró la funcionalidad, uso y susceptibilidad de apropiación en las familias beneficiadas (López, 2014).



Fig. 1.13. Implementación de los sistemas CSR y CSJ.

La CSR y la CSJ son dispositivos que se componen por:

- i) Un sistema de seguimiento e inclinación solar manual, de acero al

carbón, que le permite tener una orientación y cocción de los alimentos adecuada.

- ii) Colector de CPC de revolución con reflector de aluminio anodizado acabado espejo, con una reflectancia aproximada del 95% (Meinel, 1982), que hace posible la concentración solar y que posee un área de captación<sup>9</sup> solar menor a un metro cuadrado.
- iii) Absorbedor solar almacenador de alimentos con recubrimiento absorbedor selectivo con base en hollín de resina.

El colector y el sistema de almacenamiento y cocción de alimentos pueden modificarse con la finalidad de aumentar su potencia de cocción.

Aunque son pocas, existen láminas metálicas comerciales con acabado espejo, por ejemplo el acero inoxidable, que tiene una baja reflectancia del orden del 65 % (Echazú, 2000), razón por la que el aluminio anodizado sigue siendo un excelente reflector para su uso en sistemas de cocción solar.

Para modificar el almacenador y cocedor de alimentos, se pueden utilizar distintos recipientes de materiales metálicos y cerámicos; en particular, la olla de presión que posee la CSR y CSJ es de aluminio con un recubrimiento negro mate y ha sido funcional para establecer tiempos de cocción aceptables.

Lo que puede contribuir a aumentar la potencia de cocción y, por ende, disminuir el tiempo de cocción, es el mejoramiento del recubrimiento selectivo absorbedor, generando un recubrimiento de bajo costo y con favorables propiedades térmicas.

### **1.3.2. Parámetros para la evaluación de sistemas de cocción solar.**

Determinar el buen funcionamiento de los sistemas de cocción solar es indispensable para mejorar su funcionamiento energético y operativo. Existen parámetros estándar que permiten conocer qué tan eficientes son estas tecnologías. Dentro de las normas internacionales más conocidas están por

---

<sup>9</sup> En sistemas de cocción solar, el área de captación es la superficie del dispositivo visto desde un plano superior, sobre la que incide la radiación solar. En sistemas como la CSR, el área de captación se calcula como el área de un círculo  $\pi r^2$ , pues la geometría del colector visto desde un plano superior se aprecia como una superficie circular.

ejemplo el trabajo elaborado por Funk (2000) y Larson (1998), que establece un procedimiento riguroso para la realización de pruebas térmicas de cocinas solares y proporciona un marco para el establecimiento de la “potencia de cocción” normalizado a una insolación uniforme, conocida como potencia de cocción estandarizada. Otra norma es la elaborada por el Comité Europeo para la Investigación de Cocinas Solares en 1992 (ECSCR<sup>10</sup>, 1992), que incluye varios parámetros, con muchos factores cualitativos tales como la facilidad de uso y seguridad. También existe una norma internacional que se realizó en la India, la cual utiliza un método de análisis basado en el trabajo de Mullick *et al.* (1987) con cifras derivadas de los factores de mérito basados en el rendimiento térmico para evaluar cocinas solares. Lo que no tienen estas normas es compatibilidad, debido a que varían entre sí. Sin embargo, cada una tiene fortalezas y debilidades, esto trae como consecuencia problemas para el usuario de sistemas de cocción solar al no poder realizar comparaciones integradoras.

Hasta ahora la potencia de cocción, determinada por el protocolo de la norma ASAE<sup>11</sup> S580 (2003) ha sido el parámetro comparativo más utilizado en sistemas de cocción solar (desde ahora SCS). Los criterios más importantes, para determinar la potencia de cocción estandarizada, según marca el protocolo son:

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

El cálculo para su obtención se hace multiplicando la diferencia de temperatura  $\Delta T = T_{\text{agua}} - T_{\text{amb}}$ , en los 5 minutos, por la masa de agua contenida (m) en la olla,

---

<sup>10</sup> ECSCR, por sus siglas en inglés Comité Europeo para la Investigación de Cocinas Solares

<sup>11</sup> ASAE: por sus siglas en inglés, American Society of Agricultural Engineers

por el calor específico del agua ( $C_p=4186 \text{ Jkg/K}$ ) dividido entre el tiempo transcurrido  $\Delta t = 300$  segundos.

$$P_c = mc_p \frac{dT}{dt}, \quad (1.1)$$

La ecuación (1.1), representa la potencia de cocción,

donde

- T= Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $C_p$ = Capacidad calorífica (Jkg/K)
- t= Tiempo (s)
- $P_c$ = Potencia de cocción (W).

Para el cálculo de la derivada se han usado fórmulas numéricas en tres puntos (Ver por ejemplo Burden & Fires, 2009):

En el punto inicial:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{-3T_{i+1} - T_{i+2}}{2\Delta\tau} \quad (1.2)$$

En los puntos centrales:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta\tau} \quad (1.3)$$

En el punto final:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i-2} - 4T_{i-1} + 3T_i}{2\Delta\tau} \quad (1.4)$$

Se han usado estas expresiones porque aproximan mejor la derivada de la Ec. (1.1) que la usada comúnmente en este tipo de pruebas:

$$\frac{dT}{d\tau} \approx \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta\tau} \quad (1.5)$$

Luego, para obtener la potencia de cocción estandarizada ( $P_s$ ), se debe considerar

que  $P_c$  está normalizado a un valor de  $700 \text{ W/m}^2$  a través de la siguiente expresión:

$$P_s = P_c \frac{700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{I} \quad (1.6)$$

donde

$I$  = insolación promedio en el intervalo de tiempo de la prueba  $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$

$P_c$  = Potencia de cocción (W)

$P_s$  = Potencia de cocción estandarizada  $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$

Para presentar los resultados, se realiza la gráfica de la potencia de cocción estandarizada  $P_s$  como función de la diferencia de temperatura del agua y del ambiente  $\Delta T = T_{\text{agua}} - T_{\text{ambiente}}$ , aplicando la técnica de regresión lineal (Gráfica 1.14). La prueba es válida si el coeficiente de determinación  $R^2$  es mayor de 0.7.

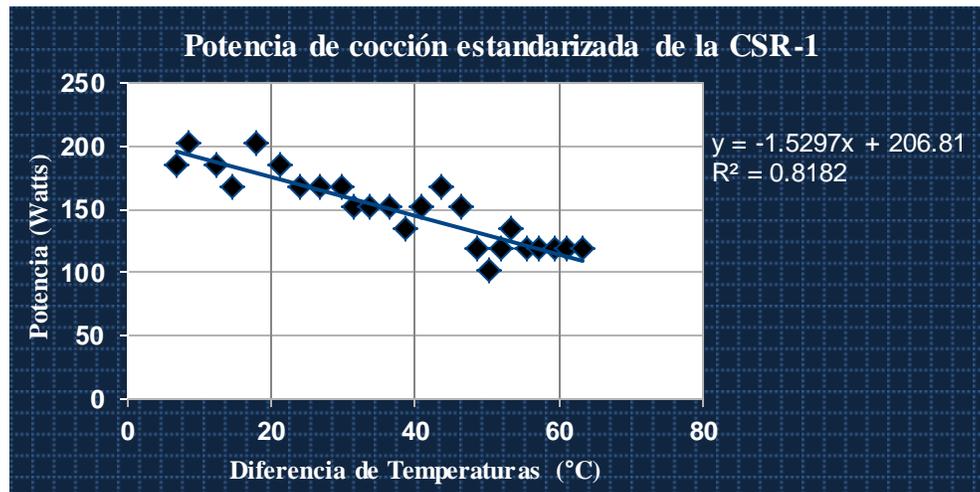


Fig. 1.14. Gráfica válida de la potencia de cocción de la CSR.

Para estandarizar procedimientos, se establece que se debe reportar la potencia de cocción estándar (ASAE, 2003), que corresponde a una diferencia de temperatura de  $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La potencia de cocción estandarizada determina qué tan funcional es o no un

sistema de cocción solar de pequeñas dimensiones (menor a un metro cuadrado de área de captación). El resultado se expresa en watts [W]. Hasta ahora para cocinas solares de pequeñas dimensiones se han estimado potencias de cocción máximas que oscilan entre los 130 W y 205 W (Morales & López, 2013).

El error, en la potencia de cocción, se determina a partir de considerar cada uno de los elementos que requieren de instrumentos de medición para su obtención. Para obtener el error total en el cálculo de la potencia de cocción estandarizada (Ec. 1.6), se debe tomar en cuenta que se tiene varias magnitudes de medición. En cada medición se puede considerar un error en forma diferencial (Sánchez, 1989), por lo que de la Ec. (1.6) se puede reescribir:

$$\Delta p_s = \left| \frac{\partial p_s}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial p_s}{\partial T_i} \right| \Delta T + \left| \frac{\partial p_s}{\partial T} \right| \Delta T + \left| \frac{\partial p_s}{\partial I} \right| \Delta I \quad (1.7)$$

La expresión anterior permitirá, en capítulos posteriores obtener el error en la potencia de cocción estandarizada.

Otro parámetro a considerar para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones es el *rendimiento térmico*. Éste es la eficiencia con que el sistema transforma el calor en trabajo, (Kundapur, Ashock, & Sudhir., 2009).

$$\eta = \frac{m_w C_p (T_{w2} - T_{w1})}{A \int I d\tau} \quad (1.8)$$

donde

$\eta$ = Rendimiento térmico

$m_w$ = Masa del agua (kg)

$C_p$ = Capacidad calorífica (Cal /°C)

$T_{w1}$ = Temperatura inicial del agua (°C)

$T_{w2}$ = Temperatura final del agua (°C)

A= Área ( $m^2$ )

I= Irradiancia ( $W/m^2$ )

Los últimos factores de evaluación importantes son los tiempos de calentamiento y de cocción. El tiempo de calentamiento se obtiene al tiempo que corresponde al 95% de la máxima temperatura (Pejack, 2003). El tiempo restante se denomina tiempo de cocción.

Así, se debe enfatizar que la evaluación de la potencia de cocción incorpora condiciones meteorológicas que operativamente determinan qué tan funcional es o no un sistema de cocción solar, pero se limita a determinar su eficiencia de cocción de alimentos. El rendimiento térmico y los tiempos de calentamiento y tiempo de cocción son parámetros comparativos importantes pero que no son del todo integradores porque estriban en un análisis energético del sistema.

La presencia de una herramienta integradora como un marco de evaluación, contribuye generar una metodología de evaluación que incorpora factores socio-ambientales y económicos; como el “*marco de evaluación de cocinas solares de pequeñas dimensiones*” (López, 2015).

# CAPÍTULO 2: Conceptos Básicos Sobre Recubrimientos Orgánicos y Superficies Selectivas.

---

## 2.1. Definición de recubrimiento

Para cualquier aplicación metálica, principalmente en la industria, la corrosión representa un grave problema. Siempre se busca colocar protección a los metales para evitar su degradación y prolongar su tiempo de vida útil. Algunas veces se recurre al uso de recubrimientos para tales fines.

Un recubrimiento es un material (por lo general, un líquido) que se aplica a una superficie, muchas veces metálica, cuyo estado final forma una capa "seca" sólida resultante (Zero, 2007). Los recubrimientos pueden definirse de acuerdo a su apariencia (Claro, pigmentado, terso), o por su función (anticorrosivo, antiabrasivo, antiderrapante).

## 2.2. Tipos de recubrimientos.

Los recubrimientos resistentes a la corrosión generalmente pueden clasificarse en las siguientes categorías (Cruz, 2010):

- Aceites y grasas.
- Recubrimientos orgánicos.
- Recubrimientos inorgánicos o recubrimientos de conversión.
- Recubrimientos de esmalte vítreo.

- Recubrimientos metálicos.
- Recubrimientos por deposición química fase vapor CVD y deposición física fase vapor PVD (Mikell, 1997).

### **2.2.1. Recubrimientos orgánicos**

Los recubrimientos orgánicos son quizá lo más variados y complejos de los recubrimientos; originalmente se inventaron con el objetivo de evitar la corrosión; con el paso del tiempo fueron perfeccionando hasta desarrollar recubrimientos orgánicos para múltiples aplicaciones, por ejemplo la absorción de energía solar.

Básicamente, los recubrimientos orgánicos, consisten de una capa polimérica orgánica que contienen pigmento disperso a lo largo de todo su espesor. A fin de evitar completamente la aparición de poros, se acostumbra aplicar varias capas, ya sea con una brocha, rodillo o mediante rocío, teniendo cuidado que las capas sucesivas se adhieran a las previas para producir un recubrimiento de una pieza.

### **2.2.2. Recubrimientos orgánicos, fundamentos.**

En su concepción más general, la pintura es una forma de recubrimiento formado por una mezcla líquida que al ser aplicada sobre una superficie, llamada sustrato, tiene la propiedad de formar una capa continua y de transformarse en una película sólida. La pintura líquida consta de tres componentes fundamentales:

- Aglutinante o resina, vehículo no volátil.
- Disolvente, vehículo volátil.
- Pigmento o mezcla de pigmentos.

Aunque no siempre es un elemento necesario, en ocasiones se requiere de algunos aditivos para agregar propiedades específicas a la pintura (diluyentes, plastificantes, relleno, etcétera).

El componente formador de película o aglutinante, frecuentemente de naturaleza orgánica decide en gran medida las propiedades básicas, físicas y químicas de la pintura (Cruz, 2010).

### 2.2.3. Formación de películas orgánicas sólidas

La formación de películas sólida, se realiza mediante diversos mecanismos, por ejemplo:

**Oxidación.** En este caso la película se forma como resultado de la reacción del aglutinante de la pintura con el oxígeno del aire, polimerización auto oxidante. Aceites secantes o resinas alquídicas modificadas con aceites.

**Evaporación.** El agente formador de la película, resina, queda sobre la superficie una vez que el disolvente de la película líquida depositada ha escapado a la atmósfera. Aquí se agrupan las lacas vinílicas, acrílicos y derivados del caucho.

**Condensación.** El polímero se forma por la reacción de dos o más componentes de la pintura, no siendo ninguno de ellos, por sí mismo formador de película. En esta categoría destacan las pinturas epóxicas.

**Coalescencia.** La película sólida es el resultado de la coalescencia de partículas dispersas cuando el material dispersante abandona la película líquida. El agente dispersante es usualmente agua, aunque también puede serlo un disolvente débil. Por ejemplo, látex siendo las emulsiones acrílicas y las vinil-acrílicas.

### 2.2.4. Relación recubrimiento sustrato.

Todo recubrimiento tiene la finalidad de cubrir una superficie y cumplir objetivos para los que originalmente fue propuesto (anticorrosivo, colorante, antiderrapante, etc.). La superficie donde se aplica el recubrimiento se denomina sustrato y en muchos casos son metálicos. El sustrato puede tener un tratamiento previo: de limpieza láser, química, manual o con chorro de arena. La finalidad de dar un tratamiento previo al sustrato estriba en mejorar las propiedades de adherencia del recubrimiento; es decir, la interface sustrato recubrimiento (Fig. 2.1) debe generar

un enlace fuerte y permanente.

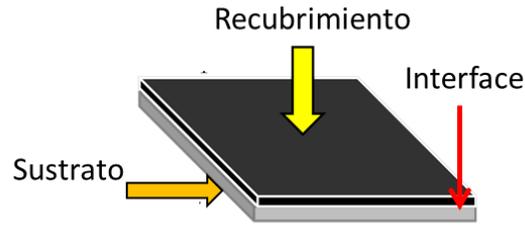


Fig. 2.1. Relación sustrato recubrimiento.

### 2.3. Recubrimientos selectivos absorbedores.

Cuando se estudian colectores solares para diversas aplicaciones y se realizan balances energéticos de los mismos, el principal problema que se presenta es disponer de superficies que tengan una alta absorción para la radiación solar visible y una baja emitancia para las radiaciones de onda larga (infrarrojo), lo cual se consigue ennegreciendo la superficie.

#### 2.3.1. Superficies Selectivas.

Los colectores solares en un sistema de conversión de energía fototérmica la mayoría de la veces constituyen la parte más costosa de todo el sistema; para que un colector sea eficiente, desde el punto de vista térmico, se requiere que absorba la máxima cantidad posible de radiación en el espectro solar (Fig. 2.2) y emita la mínima posible a mayores longitudes de onda. Esta combinación es posible de alcanzar puesto que aproximadamente 96% de la radiación solar incidente se encuentra distribuida en longitudes de onda menores a  $2.5 \mu m$ , mientras que un 99% de la radiación emitida por un cuerpo negro o gris, que opera a temperatura de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , se encuentra distribuida en longitudes de onda mayores que  $2.5 \mu m$  (Manrique, 1984).

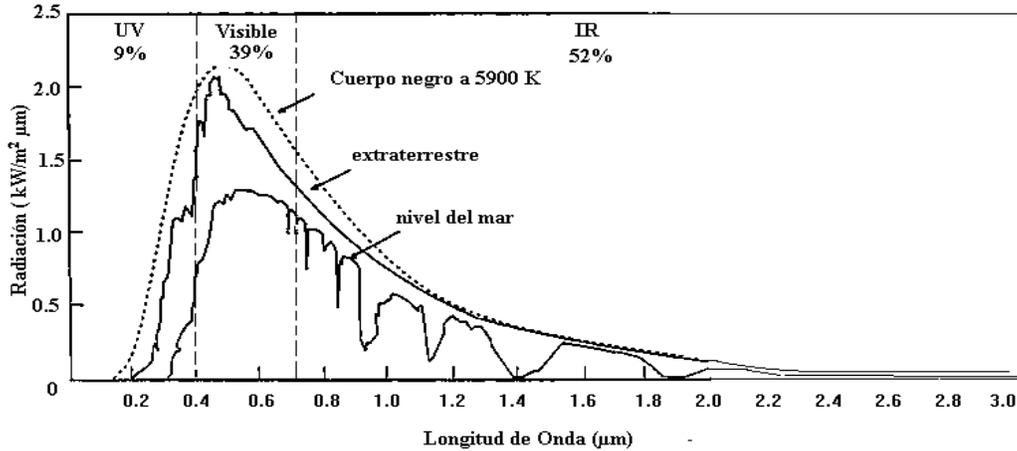


Fig. 2.2. Espectro solar (Fuente: <http://escritura.proyectolatin.org/> ).

A razón de los conceptos anteriores, una superficie selectiva debe tener una alta absorptancia monocromática<sup>12</sup> en el espectro solar, en el intervalo de 0.3 a 2.5  $\mu\text{m}$ , y una emitancia monocromática<sup>13</sup> muy baja en el infrarrojo. Es decir, una superficie selectiva debe comportarse como un filtro de reflexión; en el espectro solar debe ser no reflejante, mientras que a longitudes de onda mayores debe comportarse como un reflector perfecto.

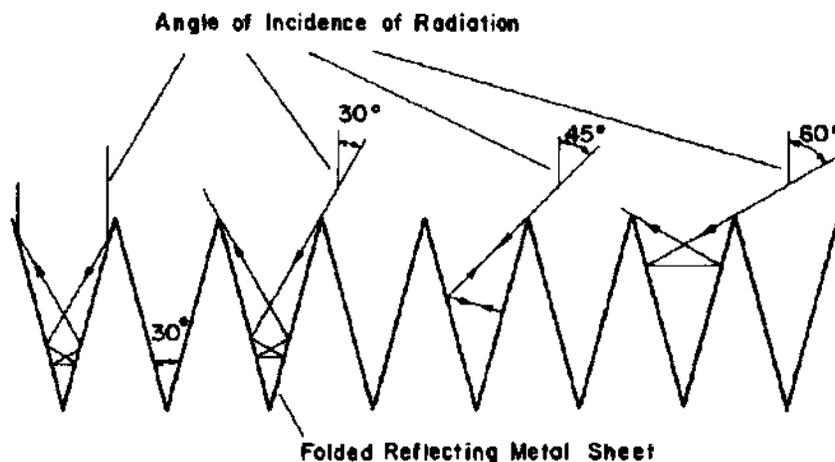
### 2.3.2. Tipos de superficies selectivas.

Dado que sólo las superficies con alta conductividad térmica tienen una emitancia térmica baja, la base para cualquier superficie selectiva de baja emitancia en el infrarrojo debe ser usualmente metálica. Por lo tanto, un plástico o un vidrio, debe ser primero metalizado. Lo anterior conduce a tres tipos fundamentales de superficies selectivas (Manrique, 1984):

<sup>12</sup> Absorptancia monocromática: es la fracción de energía incidente que proviene de todas las direcciones y que se absorbe en una longitud de onda determinada; no es una propiedad de la superficie, sino una función de distribución de las longitudes de onda de la radiación incidente; lo cual puede expresarse como:  $\alpha_\lambda = \frac{\text{energía absorbida/área-tiempo-longitud de onda}}{g_\lambda(\text{densidad espectral de energía por unidad de tiempo})}$ .

<sup>13</sup> Emitancia monocromática: es el cociente entre la densidad espectral de energía entre la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a una temperatura y a una longitud de onda dada. Se denota por la ecuación  $\varepsilon_\lambda = \frac{e_\lambda}{e_{b\lambda}}$ .

- a) Cuando se aplica adicionalmente a la base una película delgada que absorbe la radiación solar y transmite la infrarroja.
- b) Cuando la superficie metálica se convierte químicamente en un compuesto que tenga las propiedades del tipo a).
- c) Cuando la topología de la superficie se ajusta para lograr las propiedades ópticas deseadas. Por ejemplo, una simple superficie lisa con corrugaciones en forma de V, puede diseñarse para que la radiación solar incidente experimente únicamente dos reflexiones antes de salir de la V (Fig. 2.3). Con esta técnica se puede mejorar sustancialmente las propiedades térmicas de absorción de la superficie (Duffie & Beckman, 1974).



**Fig. 2.3. Comportamiento de la radiación solar incidente en una superficie con corrugaciones en V.**

En realidad, una superficie selectiva no tiene una longitud de onda crítica bien definida, así como propiedades uniformes en la gama de longitudes de onda corta y larga, por lo que los valores de la emitancia serán más sensibles a las temperaturas superficiales, que las de una superficie semigris ideal. Este concepto tiene una gran importancia en el diseño de superficies para aplicaciones de la energía solar, habiéndose desarrollado una serie de modelos y productos que permiten hacer combinaciones de propiedades de las mismas, por ejemplo las

superficies absorbentes (Fernández, 1992).

### 2.3.3. Superficies absorbentes

Estas superficies tienen como objetivo absorber la mayor cantidad de energía aunque el sustrato no sea un buen absorbente, al tiempo que proporcionan una baja emitancia. De forma general se pueden destacar las siguientes:

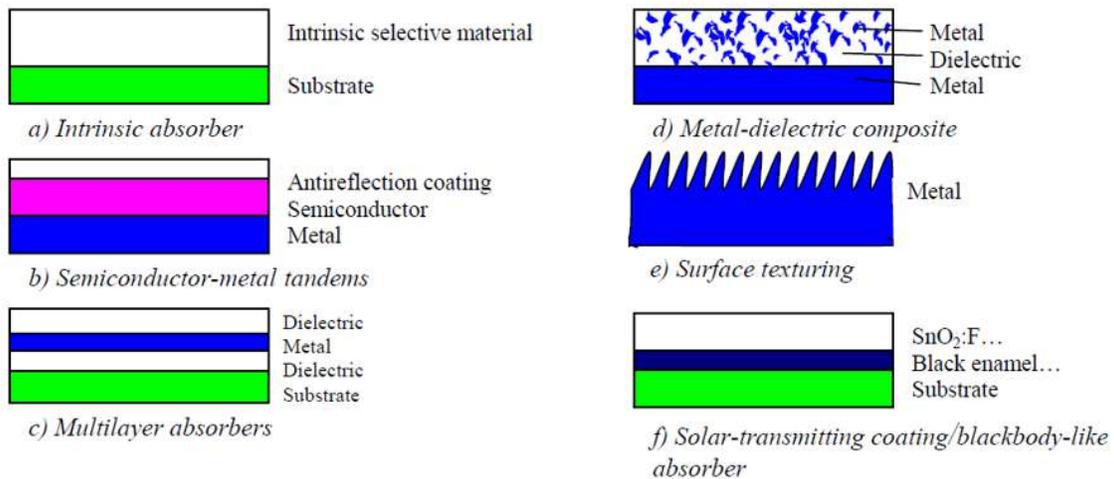
- I. **Pinturas** que tengan una alta absorción respecto a la radiación solar y una alta transmitancia para radiaciones de onda larga y que pueden aplicarse a sustratos con emitancia baja. La pintura absorbe la energía solar y el sustrato se comporta como un pobre emisor de radiación de onda larga.
- II. **Filtros de interferencia** sobre sustratos de baja emitancia. Los filtros se forman poniendo capas alternas metálicas y dieléctricas en películas de espesor igual a la cuarta parte de la longitud de onda para el visible y el infrarrojo cercano.
- III. Se suelen utilizar **pinturas de tres capas** tipo (SiO<sub>2</sub> - Al - SiO<sub>2</sub>) sobre sustratos de aluminio, que permiten una reflectancia inferior a 0.1 para frecuencias de energía solar y reflectancias superiores a 0.9 para radiaciones de onda larga en el infrarrojo.
- IV. También es interesante **mecanizar** adecuadamente la estructura superficial de un metal de alta reflectancia, para hacer de la misma un buen absorbente de radiación de onda corta,  $\lambda < 3 \text{ mm}$ . Esto se consigue haciendo en ella un picado, cavidades o surcos, de dimensiones próximas a  $\lambda_c$ . Las cavidades funcionan absorbiendo las radiaciones de onda corta (como se explicó en el apartado anterior), mientras que para las radiaciones de onda larga, se comportan como superficies lisas o planas (reflectoras).

### 2.3.4. Superficies absorbentes selectivas

En forma específica y de acuerdo a las características del recubrimiento absorbente las superficies con recubrimientos de absorción selectiva se pueden clasificar en seis tipos distintos (C. E. Kennedy, 2002):

- a) Intrínsecas,
- b) Grupo semiconductor-metal,
- c) Absorbentes de múltiples capas,
- d) Recubrimientos compuestos Multi-dieléctricos,
- e) De superficie con textura, y
- f) Recubrimiento selectivos solar de transmisión absorbente de cuerpo negro.

La Fig. 2.4 esquematiza la clasificación anterior.



**Fig. 2.4. Diseños esquemáticos de seis tipos de recubrimientos y tratamientos superficiales de la absorción selectiva de la energía.**

Los *absorbedores intrínsecos* o de masa absorbente utilizan un material que tiene propiedades intrínsecas que resultan en la selectividad espectral deseada. La selectividad es una propiedad intrínseca de los materiales. Estos recubrimientos son estructuralmente más estables, pero ópticamente menos eficaces que los de multicapa. 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 (Seraphin, 1979),  $\text{MoO}_3$  (Pellegrini, 1980),  $\text{CaF}_2$  (Meinel, 1976) y el  $\text{ZrB}_2$  (Randich, 1981), por citar algunos ejemplos.

El grupo *Semiconductor-metal*. Semiconductores con bandas prohibidas alrededor de  $\sim 0.5$  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) y PBS (0,4 eV) (Agnihotri, 1981).

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. 2.5. 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 ésta 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 (Ver Fig. 2.5). 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,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ) se han citado en la literatura para aplicaciones de alta temperatura (Schmidt *et al*, 1964).



**Fig. 2.5. Recubrimientos absorbentes de capas múltiples.**

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.

*Superficies texturizadas* 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 (Kussmaul, 1992). Algunas superficies pueden exhibir propiedades selectivas si tienen la rugosidad adecuada, como se mencionó anteriormente (Aparatado 2.4.2), debido a que las propiedades

selectivas dependen de las proporciones de desviaciones medias de altura y la distancia de autocorrelación para la longitud de onda (Cuomo, 1975). 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 rectos pueden mejorar las características de una placa de absorción gris comparables a la de una placa de absorción selectiva de placa plana (Bannerot, 1974).

Una capa selectiva solar transmisora absorbente de cuerpo negro, puede ser un semiconductor altamente dopado (por ejemplo,  $\text{SnO}_2$ : F,  $\text{SnO}_2$ : Sb,  $\text{In}_2\text{SO}_3$ : Sn, y  $\text{ZnO}$ : Al). Algunos colectores de placa plana de baja temperatura han utilizado esmalte negro como el material absorbente (Granqvist, 1989). Semiconductores altamente dopados pueden ser útiles para materiales absorbentes negros de alta temperatura.

#### **2.4. Aplicaciones de las superficies absorbentes.**

Los colectores solares requieren de superficie selectivas absorbedoras para generar tecnologías eficientes, funcionales y susceptibles de innovación tecnológica. Estas tecnologías solares térmicas se dividen en de gran y pequeña escala. El uso más común a pequeña escala, para el sector residencial, está en las ecotécnicas solares como: calentadores, deshidratadores estacionarios y de flujo continuo, calefacción residencial, refrigeración solar y sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones (Fig. 2.6). En todos los casos se busca que la tecnología sea eficiente, de bajo costo y de fácil acceso en la adquisición de los materiales empleados para la construcción; por lo que, en materia de colectores solares con superficies selectivas absorbedoras, se busca que los recubrimientos empleados sigan la misma dinámica para la construcción de tecnologías de bajo costo.



Fig. 2.6. Tecnologías solares térmicas con colectores solares de absorción de energía.

## 2.5. Rango de temperatura en superficies absorbedoras.

Existe una categorización de recubrimientos de acuerdo a su potencial de aprovechamiento, es decir, superficies selectivas de baja, media y alta temperatura. Para fines del presente trabajo se considera mencionar los recubrimientos de media temperatura, que se contemplan para sistemas que funcionan entre 100 °C y 400 °C. Algunos recubrimientos de alta y media temperatura se muestran en el ANEXO I.

La caracterización de este tipo de superficies selectivas absorbedoras se muestra típicamente considerando la relación de selectividad de  $\frac{\alpha}{\varepsilon}$  (absortancia-emitancia), que es una aproximación que permite conocer la eficiencia del recubrimiento; generalmente la emitancia se calcula a 100 °C ( $\frac{\alpha}{\varepsilon}$ ), y usualmente se utiliza un emisómetro.

### 2.5.1. Superficies selectivas de temperatura media.

Dependiendo de la aplicación, en determinadas tecnologías, así son las características de las que son superficies selectivas. Para media temperatura son utilizadas superficies que se utilizan para sistemas térmicos que operan entre 100 °C y 400°C. Éstas pueden ser:

a) *Grupo semiconductor metal*,  $\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{0.99}{0.21}$ ,  $>300$  °C (Williams & Duffie, 1963).

b) *Recubrimiento compuesto Metal-dieléctrico*

#### De Conversión química.

- **Acero inoxidable de color**.  $\frac{\alpha}{\varepsilon} = \frac{0.90}{0.10}$ ,  $>100$  °C (Agnihotri & Gupta, 1981)
- **Níquel negro** (NIS-ZnS).  $\frac{\alpha}{\varepsilon} = 0.88- 0.96 / 0,03-0,10$  para  $T <200$  °C (Wäckelgård, 1998).
- **Cobre negro texturizado** (BLCU-Cu<sub>2</sub>O: Cu).  $\frac{\alpha}{\varepsilon} = 0,97$  hasta  $0,98 / 0,02$ .  $T <250$  °C (Richharia & Chopra, 1989).
- **Negro cromo** (Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).  $\frac{\alpha}{\varepsilon}$  (100 °C) =  $0,97 / 0,09$   $T <400$  °C (Muehlratzer et al, 2000).
- **Níquel (Ni) pigmentado con alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**.  $\frac{\alpha}{\varepsilon}$  (100 °C) =  $0,85-0,97 / 0,08-0,21$  para los  $300$  °C  $<T <500$  °C (Tsfamichael and Wäckelgård, 1998).

#### Recubrimiento de pintura

- Los *recubrimientos de pintura de bajo espesor*, generan superficies selectivas sensibles espectralmente. Son alternativas para la absorción térmica de baja temperatura. Recubrimientos de este tipo como el Solariselect-Z® poseen una relación  $\alpha / \varepsilon$  (100 °C) =  $0,92 / 0,38$ . Cuando se aplica de 2 a 3  $\mu\text{m}$  de espesor a sustratos de aluminio, se vuelven espectralmente sensible (Orel et al, 1990). Recientemente se han introducido dos productos comerciales para los colectores de placa plana de baja temperatura, Solarect-Z® desarrollado en el Instituto Nacional de Química en Ljubljana, Eslovenia y pintura SolkoteHI / SORB-II® vendido por SOLEC (Solar Energy Corporation) de EUA. La optimización de las propiedades ópticas ( $\alpha / \varepsilon$  (100 °C) -  $0,92 / <0,015$ ) de la capa de recubrimiento de pintura se obtuvo mediante la adición de sílice de combustión y un agente de

acoplamiento de silano (Hidruro de silicio) en una proporción de PVC de aproximadamente 35 % (Teschmichael & Wäckelgård, 2000). La pintura es estable hasta 135 ° C, y comienza a desgasificarse a 220 °C (Orel & Gunde, 2001).

- *Pintura de semiconductores pigmentada* que consta de pequeñas partículas de Ge, Si, o PbS mezclados con un aglutinante de silicona de alta temperatura aplicada a sustratos de cobre o de acero inoxidable pulido. Se ha probado este recubrimiento como un absorbedor solar de bajo costo; entre sus características se encontró que era estable a 350 °C durante al menos 12 horas a la intemperie (Mattox & Sowell 1974). Un estudio demostró que aunque en un ángulo de incidencia normal, la absorción solar de todas las pinturas fue alta [ $\alpha$  (PbS) = 0,96,  $\alpha$  (Ge) = 0,91,  $\alpha$  (Si) = 0,83], la emitancia hemisférica total de las pinturas fue mayor que 0,70 desde la temperatura ambiente hasta los 300 °C debido a la emitancia del aglutinante de silicona (Pettit & Sowell, 1976). Estas pinturas no son adecuadas como recubrimiento solar selectivo a menos que la cantidad de aglutinante de silicona sea reducida.

## 2.6. Superficies para sistemas de cocción solar.

Se ha mencionado al respecto de diversos recubrimientos y superficies selectivas absorbedoras, que sirven para sistemas solares térmicos. Toca el turno de mencionar a los sistemas de cocción solar (desde ahora SCS). Como se han mencionado en el primer capítulo, una de las premisas para hacer transferible los SCS, es su bajo costo, mientras esto permanezca la viabilidad crece, por ende, será más sencillo replicar implementaciones y tener mayor impacto con este tipo de tecnologías. Sin embargo, no siempre se puede lograr una alta eficiencia sin que el costo sea elevado. Los costos de los recubrimientos absorbedores con una baja emitancia y alta absorbancia son elevados, incluso, la mayoría de las veces de difícil aplicación sobre el sustrato de aluminio del que está elaborada la olla de

presión con la que operan los SCS. La capacidad de fácil de re-aplicación, debe ser una característica que conserven los recubrimientos de la olla para los SCS, esto se debe a que no son sistemas estacionarios; el desgaste por causas mecánicas produce en corto tiempo el desprendimiento del recubrimiento aplicado. Por lo tanto, el problema persiste, cómo crear un recubrimiento que posea características térmicas adecuadas para operar un SCS, de fácil aplicación y sea de bajo costo. La respuesta no es sencilla.

Alanod ®, por ejemplo, es un empresa que vende láminas de recubrimiento selectivos absorbedor multicapa, con una emitancia cercana de 0.9 y una absorptancia menor a 0.2, sin embargo es un recubrimiento costoso y de difícil aplicación. La superficie de dimensiones más pequeñas de venta tiene costo aproximado de 155 dólares.

Hasta ahora, para SCS, sólo se ha trabajado algunas pinturas negro mate, que poseen un alta emitancia en el infrarrojo pero son de bajo costo (Servín, 2012). En los últimos años se ha utilizado una pintura de bajo costo, que las empresas como COMEX ® y Zynolyte ® le han denominado como de *alta temperatura (de color negro mate)*, y que ha sido utilizada en algunos cocedores solares obteniendo resultados aceptables para lograr la cocción de los alimentos (Del Rio & Tapia, 2010). La pintura para alta temperatura es un producto que no está caracterizado pero ha sido funcional para SCS y es de un costo relativamente bajo.

En resumen, no existe un recubrimiento de bajo costo diseñado para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

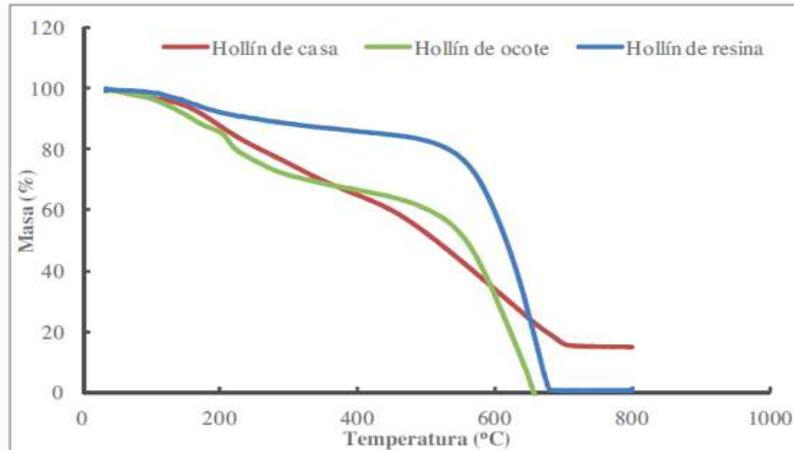
### **2.6.1. El hollín como elemento de un nuevo recubrimiento**

Dado los usos múltiples de pinturas de color negro como recubrimientos absorbedores para el almacenador de alimentos en los SCS. Existe un caso de estudio donde se decidió incorporar pigmentos de hollín<sup>14</sup> sobre un acrílico para un

---

<sup>14</sup> El hollín son partículas pequeñas de color negro que se desprenden de la combustión de biomasa, generalmente foresta, utilizada para la cocción de alimentos y calentamiento de agua. La resina de pino, fue de la especie "*Pinus oocarpa Schiede*".

nuevo recubrimiento absorbedor (López, 2013). En este caso, el absorbedor es una película selectiva que comprende partículas distribuidas de manera uniforme en una matriz, que se deposita sobre un sustrato metálico. El primer estudio que se llevó a cabo para conocer las características del recubrimiento fue un análisis termogravimétrico, que permitió analizar diferentes tipos de hollín (Correa, 2014).



**Fig. 2.7. Análisis termogravimétrico en atmósfera inerte para las muestras de diferentes tipos de hollín.**

El resultado falló a favor del hollín de resina de pino; éste demoró más en degradarse, lo que en principio puede sugerir que es más resistente y útil para los sistemas de cocción solar que concentran la radiación.

El estudio concluye que el hollín de resina puede utilizarse como elemento de un recubrimiento selectivo absorbedor, y deja un campo abierto para dar continuidad con este trabajo.

Lo anterior, representa un preámbulo para analizar al hollín como un pigmento térmicamente eficiente para generar un nuevo recubrimiento absorbedor para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones. En los siguientes capítulos se muestra un análisis térmico y de funcionalidad del hollín como elemento que genera selectividad y absorción.

# CAPÍTULO 3: Desarrollo Experimental.

---

El estudio de diferentes recubrimientos para tecnologías solares térmicas ha sido muy variado, como se mencionó en el capítulo anterior. Particularmente para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones, poco se ha estudiado en términos de recubrimientos de bajo costo incorporando materiales de desecho o materiales orgánicos reutilizados.

La presente propuesta, sugiere la elaboración de un nuevo recubrimiento, incorporando materiales orgánicos de desecho, para generar mejores propiedades térmicas originando un recubrimiento selectivo absorbedor, para el almacenador de alimentos utilizado en un sistema de cocción solar de pequeñas dimensiones.

Los parámetros que determinan la selectividad y absorción de un recubrimiento son la emitancia y la absorbancia y el cociente entre estos. Para el cálculo de estos parámetros siempre se hace necesario el uso de dispositivos de medición especializados como espectralradiómetros o emisómetros (Quiñonez & Hernández, 2014). Debido a que no siempre se cuentan estos dispositivos y que la aplicación funcional del recubrimiento es en sistemas termodinámicos, se puede pensar en un análisis térmico.

En este trabajo se sugiere una metodología teórico-experimental para evaluar recubrimientos empleados como absorbedores solares térmicos, para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

Esta metodología es útil porque considera condiciones controladas, en laboratorio,

para predecir el comportamiento térmico de diversas superficies. Además, permite variar tanto el sustrato como el recubrimiento de forma teórica, realizar pocas pruebas de efectividad en campo que son difíciles de llevar a cabo para múltiples superficies, optimiza el uso de materiales porque la metodología sugiere análisis en muestras pequeñas menores a  $0.25 \text{ m}^2$  y, puede establecer los parámetros óptimos de las variaciones mencionadas.

### **3.1. Metodología**

La metodología es la siguiente:

- I. Montaje del arreglo experimental para evaluar perfiles de temperatura para diversos recubrimientos.
- II. Variación de concentración de materiales utilizados para la elaboración de un recubrimiento con base en hollín de resina.
- III. Deposición de recubrimientos sobre placas metálicas.
- IV. Evaluación de perfiles de temperatura en las diferentes muestras de variación de concentración de materiales.
- V. Determinación de los parámetros óptimos del recubrimiento.
- VI. Pruebas de efectividad en campo.
- VII. Verificación y análisis de resultados.

#### **3.1.1. Arreglo experimental para la obtención de perfiles de temperatura**

Para evaluar energéticamente los sistemas de cocción solar se necesitan: días soleados, poco índice de nubosidad, velocidad de viento menor a  $2 \text{ m/s}$  y temperatura ambiente sin cambios bruscos, esto para obtener la potencia de cocción estandarizada. Por lo tanto, no siempre es posible evaluar los sistemas de cocción solar. Lo anterior hace inferir que siempre que se pretende hacer mejoras en los SCS, se buscará validar éstas mediante pruebas de efectividad como la estimación de la potencia de cocción. Con la intención de evaluar diversos

recubrimientos y conociendo que no siempre es posible hacer pruebas de efectividad, se sugiere un montaje experimental para tal efecto.

Existen casos de estudio donde se han utilizado fuentes de luz para realizar análisis térmicos de tecnologías solares (Passamai, 2007). Así pues, con la finalidad de elaborar una metodología práctica y de fácil acceso, para el montaje experimental del presente trabajo se decidió utilizar una fuente de luz de 200 w.

El montaje experimental pretende evaluar el comportamiento térmico de sustratos metálicos sobre los que se depositan diversos recubrimientos. Para este fin fue necesario contar con software-dataloger y termómetros de contacto con termopares tipo K.

En el arreglo experimental, mostrado en la Fig. 3.1), se colocó la fuente incidente perpendicular a la placa metálica a la cara del recubrimiento, ésta última localizada a una distancia de 25 centímetros de la fuente.

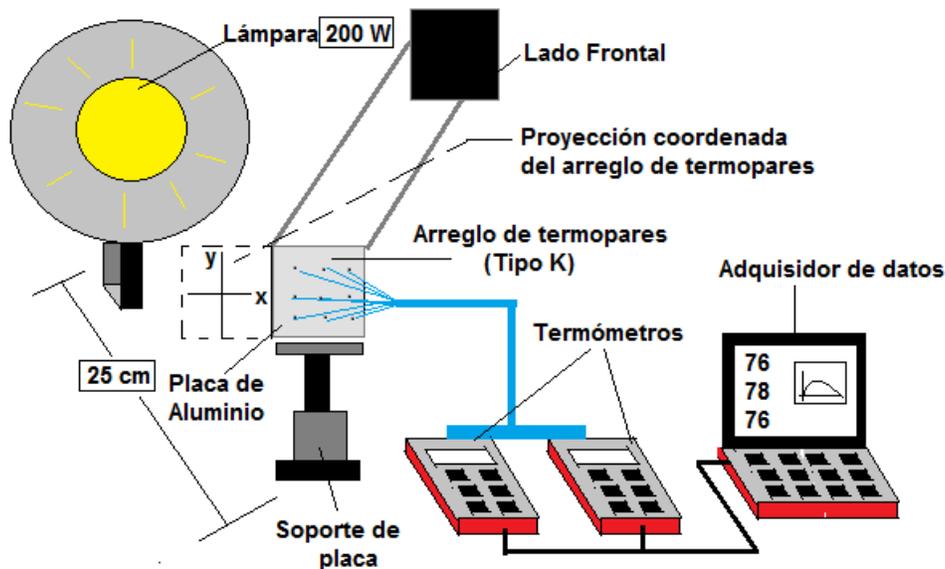


Fig. 3.1. Arreglo experimental.

Al reverso de la placa de cara a la fuente se situó un arreglo de termopares tipo K que permiten elaborar perfiles de temperatura, los termopares están conectados a termómetros de contacto que envían las mediciones de temperatura de las

diferentes superficies analizadas a un software que permite almacenar y procesar los datos (UT.325-Software). Para medir las temperaturas se utilizó un termómetro UT-325, con una resolución de  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ver ANEXO II.

El arreglo de termopares se construyó como una construcción cartesiana de 9 puntos, distribuidos en toda la placa metálica como se muestra en la Fig. 3.2.

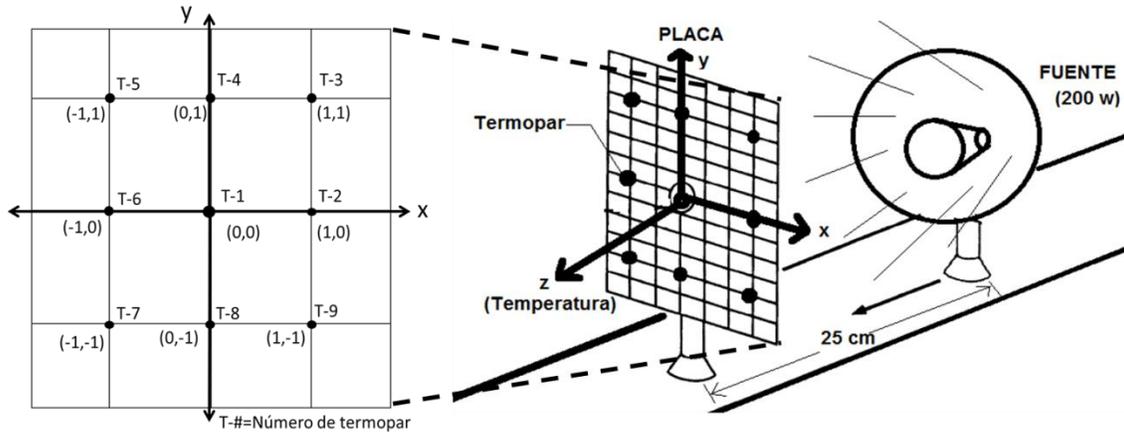


Fig. 3.2. Arreglo de termopares.

Este arreglo permitirá conocer la distribución de temperatura en la placa y la temperatura máxima en intervalos de tiempo variado. Para fines prácticos se puede nombrar a cada termopar de acuerdo a su ubicación del plano cartesiano de la Fig. 3.2, T-1, T-2, T-3, etcétera.

### 3.1.2. Placas metálicas

Los SCS operan con un recipiente almacenador de alimentos de aluminio, cuyo espesor es de 2 milímetros. Bajo la anterior consideración, se utilizaron para el modelo experimental placas de aluminio cuadradas de  $5\text{ cm}^2$  ( $2.70\text{ gr/cm}^3$  peso específico, pureza 99.5 %, aleación 3003, temple H14, calibre 14-a 2 mm).

### 3.1.3. Variación de concentración de materiales utilizados para la elaboración de un recubrimiento con base en hollín de resina

Con base en el estudio para incorporar hollín como elemento de un recubrimiento

absorbedor (Correa, 2014), se decidió utilizar hollín de resina para generar una propuesta de un nuevo recubrimiento. Sin embargo, el hollín no es fácil de adherir, necesita de algún aglutinante que le permita adherirse al sustrato metálico. Como primera propuesta de trabajo, y debido a que no existe en la literatura ningún trabajo similar, se optó por considerar al hollín como un pigmento y a una pintura base de color negro mate (PRIMER) como aglutinante.

Para conocer las propiedades del hollín como elemento del nuevo recubrimiento se decidió variar con base en el peso la concentración de la mezcla hollín-acrílico (Tabla. 3.1), para determinar su comportamiento térmico a través de la cantidad presente de hollín en diversos recubrimientos resultantes de cada relación porcentual.

<b>Placa</b>	<b>Hollín</b>	<b>Acrílico</b>
<b>Placa 1</b>	100%	0%
<b>Placa 2</b>	80%	20%
<b>Placa 3</b>	60%	40%
<b>Placa 4</b>	50%	50%
<b>Placa 5</b>	40%	60%
<b>Placa 6</b>	20%	80%
<b>Placa 7</b>	0%	100%

**Tabla. 3.1. Variación de concentración**

Es decir, la variación de concentración generó 7 recubrimientos desde el hollín 100% hasta la nula cantidad de éste. Cada recubrimiento al secarse mostró diversos resultados, en algunos la presencia de grietas se hizo bastante notorio, lo mismo que la adherencia y resistencia mecánica (Tabla 3.2). Adicionalmente se trabajó también con un recubrimiento de alta temperatura comex ®.

<b>Placa</b>	<b>Hollín</b>	<b>Acrílico</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Placa 1</b>	0%	100%	Fácil aplicación
<b>Placa 2</b>	20%	80%	Formación de grietas al secarse
<b>Placa 3</b>	40%	60%	Dificultad de aplicación

<b>Placa 4</b>	50%	50%	Dificultad de adherencia
<b>Placa 5</b>	60%	40%	Dificultad de adherencia
<b>Placa 6</b>	80%	20%	Dificultad de adherencia
<b>Placa 7</b>	100%	0%	Mayor Dificultad de adherencia

Tabla. 3.2. Observación en los recubrimientos con la variación de concentración.

### 3.1.4. Deposición de recubrimientos sobre placas metálicas

Las variaciones de concentración se depositaron sobre placas metálicas procurando generar una superficie uniforme. Una cinta adhesiva fue el referente de espesor para depositar por secciones el recubrimiento, a través de franjas de 5 milímetros de longitud a lo largo de la placa metálica, hasta cubrirla totalmente. Con el espesor de la cinta se puede inferir el espesor del recubrimiento, 150  $\mu\text{m}$  (Fig. 3.3).

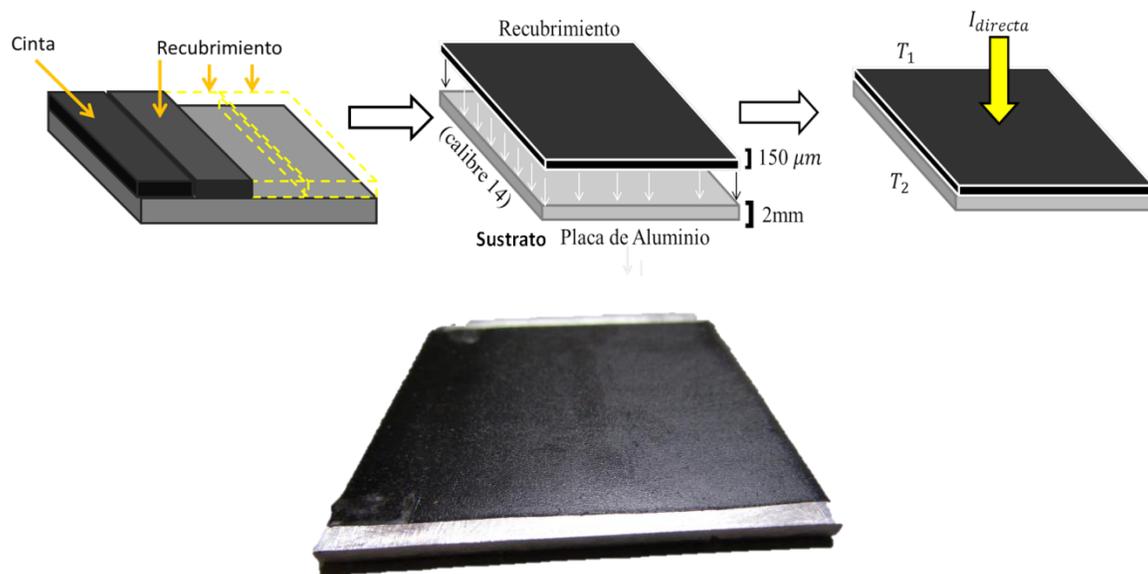
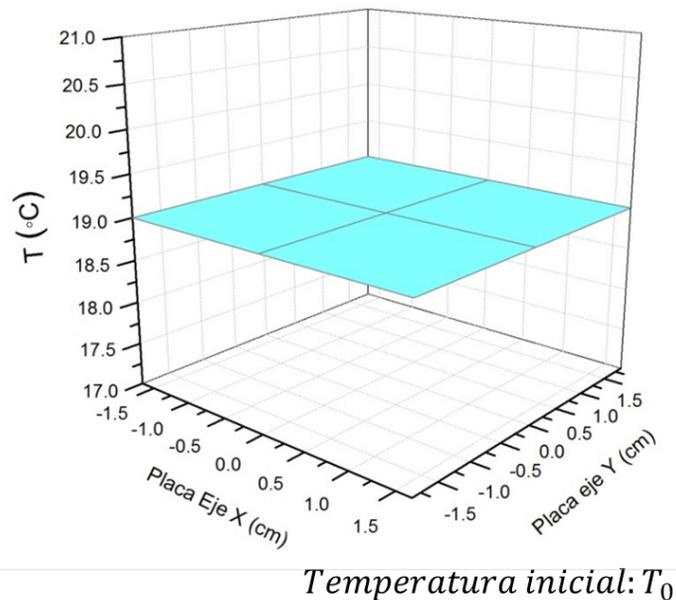


Fig. 3.3. Deposición de recubrimiento sobre placa metálica.

La cara con recubrimiento es la que se coloca en el arreglo experimental frente a la fuente incandescente como se muestra en la Fig. 3.2.

### 3.1.5. Evaluación de perfiles de temperatura en las diferentes muestras de variación de concentración de materiales.

Para evaluar los perfiles de temperatura es necesario el procesamiento de los datos obtenidos a partir de la distribución cartesiana de los termopares, los cuales representan la posición del lugar donde están situados, y registran la temperatura de dicha posición en un intervalo de tiempo "t", lo cual podrá genera un perfil base como el de la Fig. 3.4.



**Fig. 3.4. Plano referencial de la distribución de temperatura**

El montaje experimental opera cuando se colocan las placas metálicas frente a la fuente y ésta comienza a irradiar energía. Por un intervalo de tiempo de 30 minutos se registra el comportamiento térmico detrás de la placa a través del arreglo de termopares para cada uno de los recubrimientos. Se registra la temperatura máxima y la distribución de temperatura mediante curvas de nivel, generando perfiles de temperatura útiles para determinar los parámetros óptimos del nuevo recubrimiento con base en pigmentos de hollín de resina.

### 3.2. Arreglo experimental para la obtención de potencia de cocción estandarizada

Para calcular la potencia de cocción estandarizada (Parámetro comparativo más importante para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones), es necesario de un arreglo experimental (ANEXO III y V):

- a) Termómetro con termopar tipo K.
- b) Termómetro para temperatura ambiente.
- c) Piranómetro para radiación solar.
- d) Dataloger para cada dispositivo de medición.

### 3.3. Análisis térmico de régimen transitorio en la placa

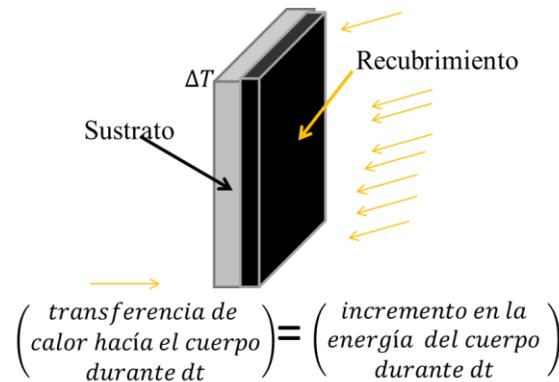
El modelo experimental propuesto, aunque no determina la emitancia de la superficie analizada, pretende determinar el flujo total de calor cedido por la placa y el calor total cedido en un intervalo de tiempo  $0 \rightarrow t$ . Para esto será necesario analizar algunos fenómenos de transferencia de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

Para determinar la distribución de temperaturas en régimen transitorio y, finalmente, la transferencia de calor por unidad de tiempo, se necesita resolver la ecuación general de la conducción, en la cual se considera la transmisión y acumulación del calor. Así mismo, el análisis de la placa metálica utilizada en la experimentación del presente trabajo, se considera como un problema de tipo de “*sistemas concentrados*” (también llamados sistemas de parámetros concentrados o de resistencia interna despreciable), en los cuales la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo pero permanece uniforme en cualquier instante (Cengel, 2007).

Analizando la placa de aluminio, bajo el concepto de régimen transitorio, se considera un sólido (A la placa) de masa “m”, volumen V, área superficial  $A_s$ ,

densidad  $\rho$  y calor específico  $c_p$ , con una temperatura inicial  $T_i$  o  $T(0)$ ; que en el instante en que el cuerpo alcanza su temperatura de equilibrio, se dice que el cuerpo está a la temperatura  $T_\infty$ . Por lo tanto la placa lleva a cabo transferencia de calor con el ambiente que lo rodea, mediante un coeficiente de transferencia de calor "h". Así, en beneficio del análisis del problema se supondrá que  $T_\infty > T_i$ . Se considerará también que el análisis de sistemas concentrados es aplicable; la temperatura permanece uniforme dentro del cuerpo en todo momento (En este caso el cuerpo es la placa), de forma que únicamente cambia con el tiempo  $T = T(t)$ .

En un intervalo diferencial de tiempo ( $dt$ ), la temperatura de la placa incrementa en una cantidad diferencial ( $dT$ ). Un balance de energía en la placa para el intervalo de tiempo  $dt$  se puede expresar como se muestra en la Figura 3.5.



**Fig. 3.5. Balance de energía en la placa de aluminio**

O bien se puede expresar como

$$hA_s(T_\infty - T)dt = mc_p dT \quad (3.1)$$

Dado que  $m = \rho V$  (donde  $m$  = masa,  $\rho$  = densidad y  $V$  = volumen),  $dT = d(T - T_\infty)$  y  $T_\infty = \text{constante}$ , la Ec. (3.1) puede reescribirse como

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

Integrando desde  $t = 0$ , donde  $T = T_i = T(0)$ , hasta cualquier instante "t", en el

cual  $T = T(t)$ , tenemos que

$$\ln \frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = -\frac{hA_s}{\rho V c_p} t$$

Aplicando la función exponencial en ambos miembros y reescribiendo se obtiene:

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-\frac{hA_s}{\rho V c_p} t}, \text{ o bien } \frac{T_{\infty} - T(t)}{T_{\infty} - T(0)} = e^{-\frac{hA_s}{\rho V c_p} t}, \quad (3.2)$$

Si renombramos  $\alpha = \frac{hA_s}{\rho V c_p}$ , entonces:

$$\frac{T_{\infty} - T(t)}{T_{\infty} - T(0)} = e^{-\alpha t} \quad (3.3)$$

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

Trabajando la Ec. (3.2) se tiene que:

$$T_{\infty} - T(t) = e^{-\alpha t} [T_{\infty} - T(0)]$$

$$T(t) = T_{\infty} - e^{-\alpha t} [T_{\infty} - T(0)]$$

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

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

$$T(t) = T(0) - T(0) (1 - e^{-\alpha t}) + T_{\infty} (1 - e^{-\alpha t}),$$

$$T(t) = T(0) + (1 - e^{-\alpha t})(T_{\infty} - T(0))$$

$$T(t) = T(0) + (1 - e^{-\alpha t})\Delta T(0) \quad (3.4)$$

renombrando las variables como  $A = T(0)$  y  $B = T(0)$  se tiene que

$$T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t}) \quad (3.5)$$

La Ec. (3.3), representa la historia de la temperatura del sólido en el instante “ $t$ ” en función de su temperatura inicial y la del fluido que la rodea, de manera que cuando el intervalo tiende al infinito el sólido se equilibra con el entorno.

El análisis anterior sugiere una expresión que predice el comportamiento térmico de la placa metálica con recubrimiento (Ec. 3.3), en un intervalo de tiempo determinado. La gráfica resultante será del tipo que se muestra en la Fig. 3.6.

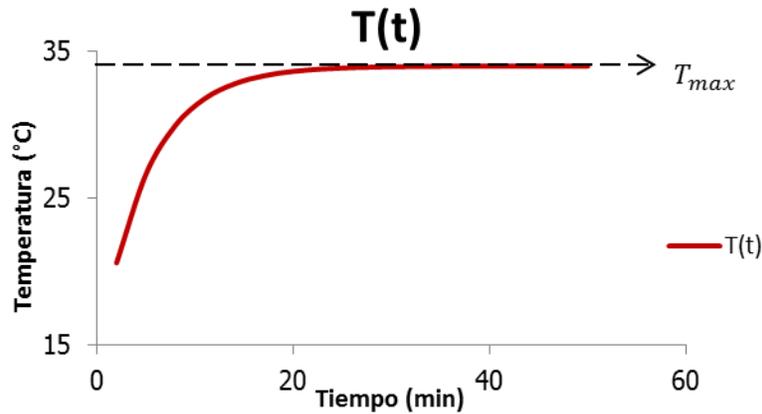


Fig. 3.6. Comportamiento térmico de la placa en un intervalo de tiempo  $0 \rightarrow t$

Si la predicción del análisis es correcta, los datos obtenidos experimentalmente generarán gráficas como la anterior. Lo cual será de utilidad para determinar flujos totales de calor.

### 3.3.1. Flujo total de calor.

Utilizando las Ec. (3.2) y (3.4) se tiene que:

$$T(t) = T(0) + \left(1 - e^{-\frac{hA_s t}{\rho V c_p}}\right) \Delta T(0) \quad 3.6$$

De la Ec. (3.6) se puede conocer el coeficiente de transferencia de calor y conociendo la diferencia de temperatura instantánea se puede calcular el flujo total de calor en un instante, y el calor total cedido en un intervalo ( $0 \rightarrow t$ ) se determina por el enfriamiento de la placa en dicho periodo (Ec. 3.8). Para ello se requiere hacer uso de los números de Biot y de Fourier (Cengel, 2007).

$$W(t) = A_s h \Delta T(t) [w] \quad (3.7)$$

$$q(0 \rightarrow t) = \rho V c_p (T_0 - T_t) [j] \quad (3.8)$$

El número de Biot<sup>15</sup>, el cual se concibe como la razón entre la convección en la superficie del cuerpo con respecto a la conducción dentro de éste, y se expresa como

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (3.9)$$

con  $L = \frac{V}{A_s}$ ,

siendo  $k$  la conductividad térmica y  $L$  la longitud característica.

Por otra parte, el número de Fourier, en el instante  $t$ , se puede concebir como la razón entre la razón de conducción del calor y la razón del almacenamiento de calor en ese instante, y se representa como:

$$Fo = \frac{\alpha_t t}{L^2} \quad (3.10)$$

Siendo el numerador de la Ec. (3.10) el calor conducido " $Q_{\text{conducido}}$ ", el denominador el calor almacenado " $Q_{\text{almacenado}}$ " y  $\alpha_t$  la difusividad térmica.

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que se expresa como:

$$\alpha_t = \frac{K}{\rho c_p} \quad (3.11)$$

Sustituyendo  $L = \frac{V}{A_s}$  y multiplicando por  $\frac{L}{L}$  en la Ec. (3.6) para no alterarla, se tiene que:

$$T(t) = T(0) + \left[ 1 - e^{-\frac{ht}{\rho L c_p} \left(\frac{L}{L}\right)} \right] \Delta T(0)$$

Luego, sustituyendo la Ec. (3.11)

<sup>15</sup> Es necesario hacer mención que cuando  $Bi < 0.1$ , la variación de la temperatura con la ubicación dentro del cuerpo es ligera y, de manera razonable, se puede considerar como si fuera uniforme.

$$T(t) = T(0) + \left[ 1 - e^{-\frac{ht}{\rho L} \left( \frac{L}{k} \right)} \right] \Delta T(0)$$

Agrupando se puede apreciar que el argumento del exponencial representa los el producto de los números de Fourier y de Biot, es decir:

$$T(t) = T(0) + \left[ 1 - e^{-\left[ \left( \frac{hL}{k} \right) \left( \frac{\alpha t}{L^2} \right) \right]} \right] \Delta T(0),$$

$$T(t) = T(0) + \left[ 1 - e^{-(BiFo)} \right] \Delta T(0) \quad (3.12)$$

Conociendo algunas variables de la Ec. (3.12), es posible estimar el coeficiente de transferencia de calor y, consecuentemente, calcular los valores de las Ec. (3.7) y (3.8).

---

# CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión.

---

Con el arreglo experimental sugerido, fue posible elaborar perfiles de temperatura para cada uno de los recubrimientos. Lo cual permitió conocer cuáles recubrimientos podían ser susceptibles de implementar en algún sistema de cocción solar para conocer su funcionamiento en campo.

## 4.1. Comportamiento Térmico de recubrimientos

De la experimentación con las placas metálicas de aluminio se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Perfil de temperatura.
- b) Distribución de temperatura en la placa, mediante curvas de nivel.
- c) Temperatura máxima.
- d) Pendiente de velocidad del incremento de temperatura.

Los resultados fueron los siguientes:

- I. Inicialmente se analizó la placa sin recubrimiento para tener un punto de referencia. El incremento de temperatura fue lento y la temperatura máxima alcanzada apenas alcanza los 44.7 °C, la distribución de temperatura muestra un mayor incremento en el centro de la placa (Fig. 4.1, 4.2 y 4.3). Para las gráficas de incremento de temperatura y temperatura máxima, de todas las superficies analizadas, se consideró el promedio de temperatura de la región comprendida entre los puntos-termopares T-5, T-3, T-7 y T-9.

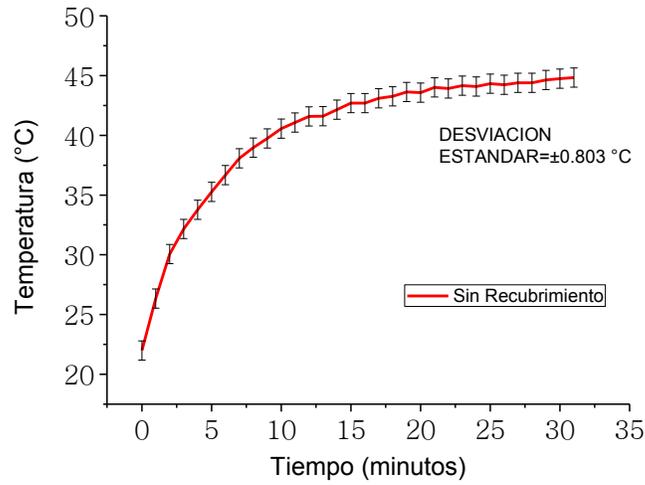


Fig. 4.1. Incremento de temperatura en la placa sin recubrimiento.

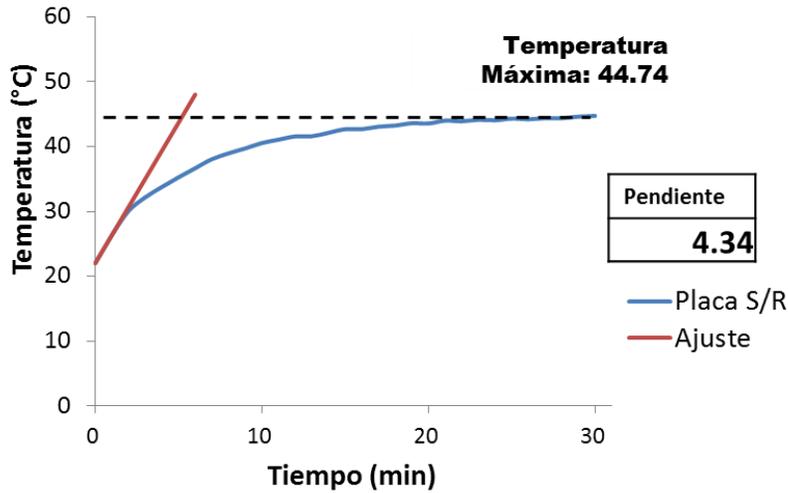


Fig. 4.2. Ajuste para la placa sin recubrimiento.

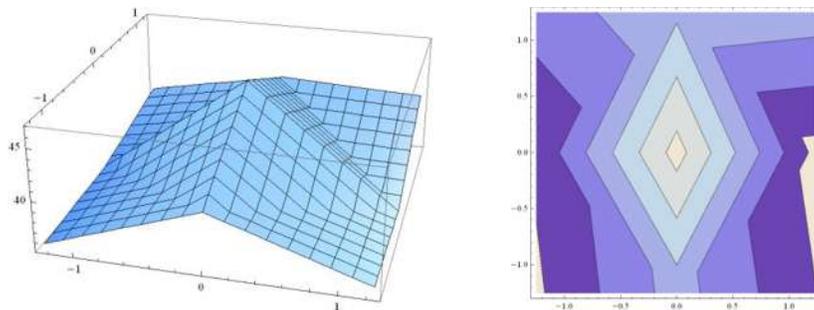


Fig. 4.3. Distribución de temperatura máxima en la placa sin recubrimiento.

II. La placa con recubrimiento 100% acrílico alcanzó una temperatura

máxima de 70.9 °C. El tiempo en la temperatura de equilibrio fue de aproximadamente 20 minutos y la distribución de temperatura ya fue muy uniforme, en el centro de la placa se puede notar una temperatura mayor (Fig. 4.4, 4.5 y 4.6). El recubrimiento se pudo apreciar muy uniforme en la placa sin la formación de grietas.

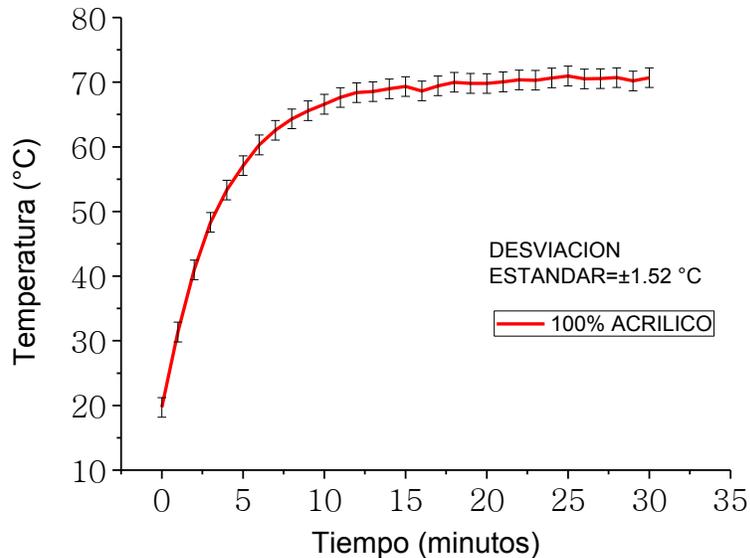


Fig. 4.4. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 100% acrílico.

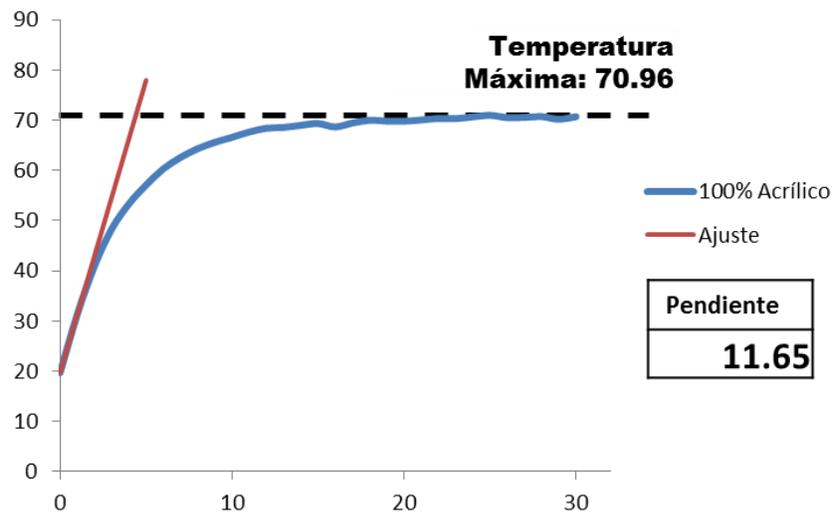
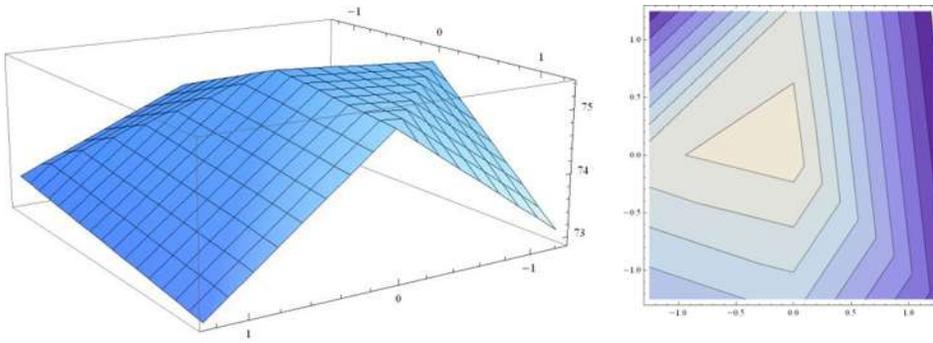


Fig. 4.5. Ajuste para la placa con recubrimiento 100% acrílico.



**Fig. 4.6. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 100% acrílico.**

- III. Placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín, comienza con la variación de concentración, la presencia de hollín en el recubrimiento muestra un incremento en la temperatura máxima, alcanzando 78.4 °C, aproximadamente 9 °C más que la placa anterior. La pendiente es más grande que el recubrimiento de acrílico 100%, lo que refleja un incremento rápido en la temperatura. Por otra parte, la distribución de temperatura no uniforme, pero la mayor temperatura se localiza en el centro y extremo derecho de la placa. La capa sobre el sustrato es firme y muestra pequeñas grietas (Fig. 4.7, 4.8 y 4.9)

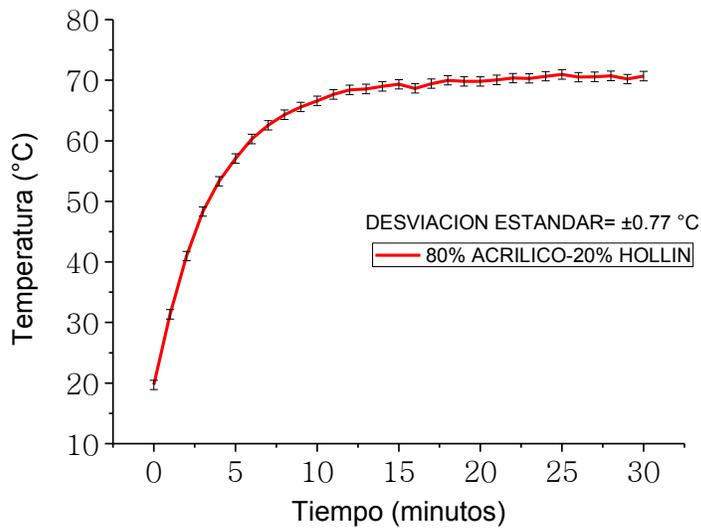


Fig. 4.7. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín.

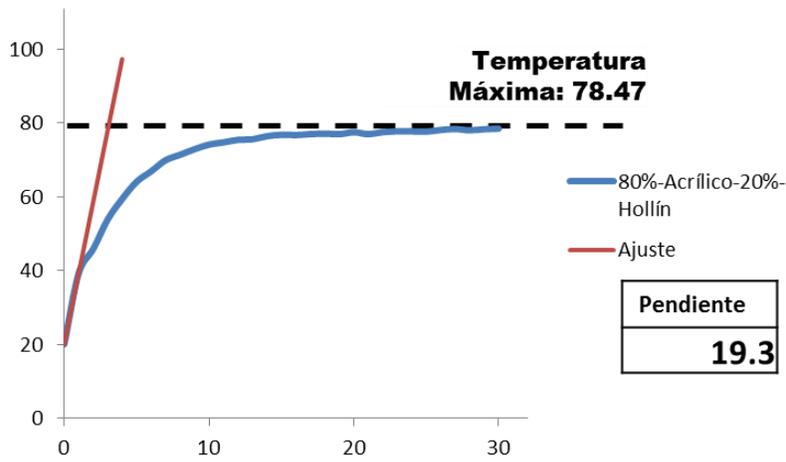


Fig. 4.8. Ajuste para la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín.

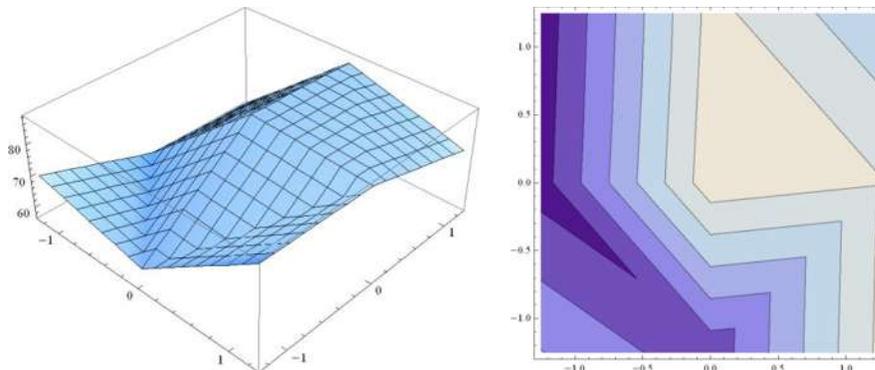


Fig. 4.9. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 80% acrílico-20% hollín.

- IV. La superficie con el recubrimiento 60% Acrílico-40% hollín muestra un incremento en la temperatura máxima respecto a la placa anterior, aproximadamente 3°C. En este punto de concentración se puede notar que conforme incrementa la concentración de hollín, la temperatura y la rapidez de incremento de temperatura también lo hacen. En 15 minutos alcanza la temperatura de equilibrio, más rápido que en los casos anteriores. La distribución de temperatura es decreciente del centro hacia los extremos de la placa (Fig. 4.10, 4.11 y 4.12)

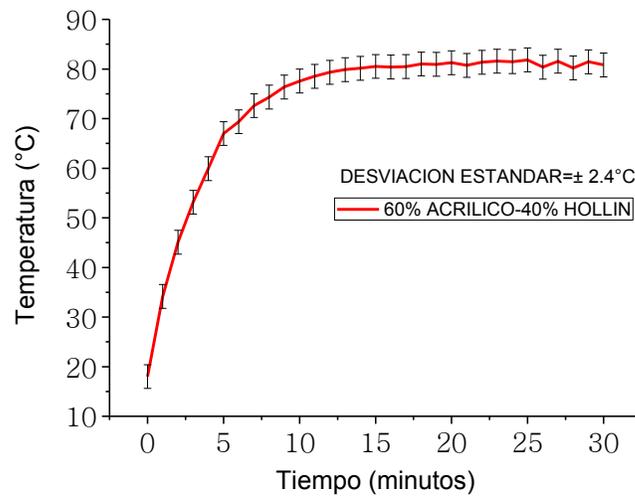


Fig. 4.10. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.

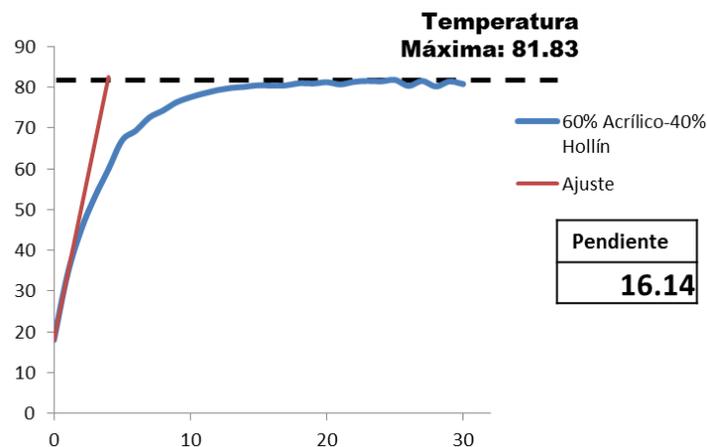
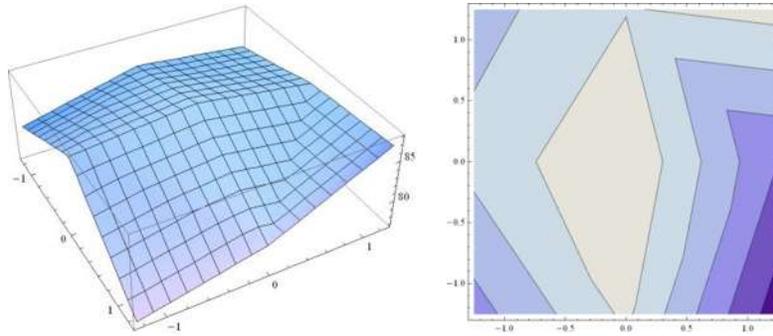
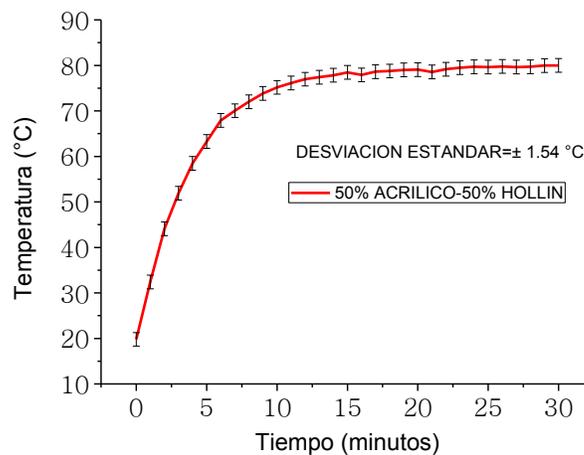


Fig. 4.11. Ajuste de la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.

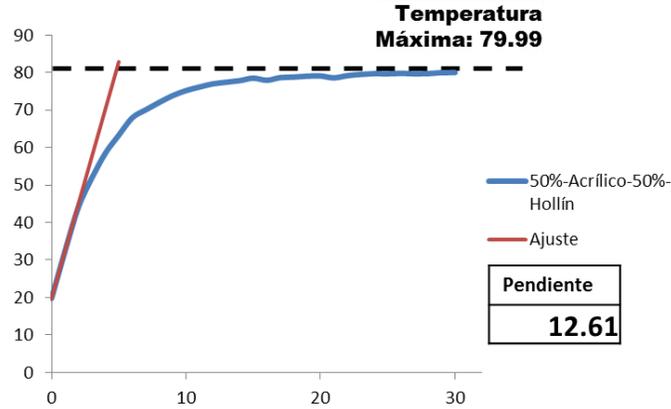


**Fig. 4.12. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.**

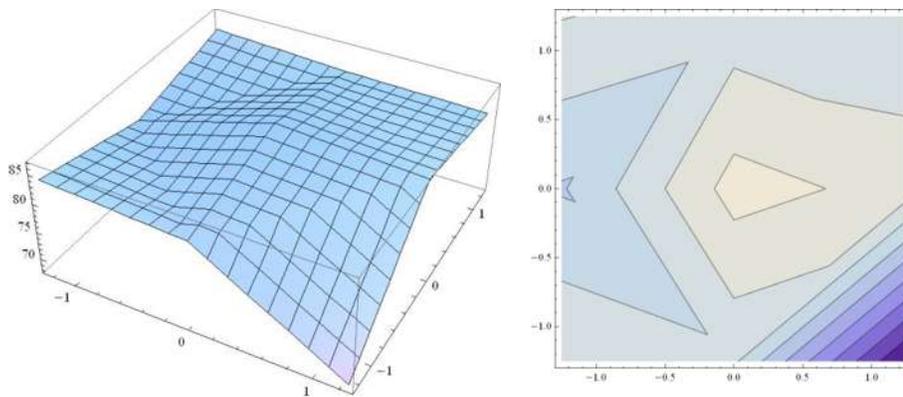
- V. La placa con recubrimiento 50% Acrílico-50% hollín bajó en su temperatura máxima en comparación con el recubrimiento 60% acrílico-40% hollín. Aunque el patrón sugería que a mayor concentración de hollín, mayor temperatura, en este recubrimiento la temperatura bajo  $2^{\circ}\text{C}$ . La distribución de temperatura máxima continua siendo descendente del centro hacia los extremos de la placa. La rapidez en el incremento de temperatura también descendió respecto al recubrimiento anterior. Lo que si continuo como un patrón muy definido es la formación de grietas conforme aumenta la concentración de hollín (Fig. 4.13, 4.14 y 4.15)



**Fig. 4.13. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín.**



**Fig. 4.14. Ajuste para la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín.**



**Fig. 4.15. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín.**

- VI. La temperatura máxima para la placa con recubrimiento 40% Acrílico-60% hollín ha bajado respecto a la placa anterior poco más de 6 °C. Todo indica que la temperatura baja para las siguientes concentraciones. El tiempo para alcanzar la temperatura máxima oscila alrededor de los 20 minutos y la distribución de la temperatura no está definida, debido a la rugosidad del recubrimiento. Este recubrimiento tiene más grietas que el anterior; por otra parte, el tiempo para alcanzar la temperatura de equilibrio supera los 20 minutos (Fig. 4.16, 4.17 y 4.18)

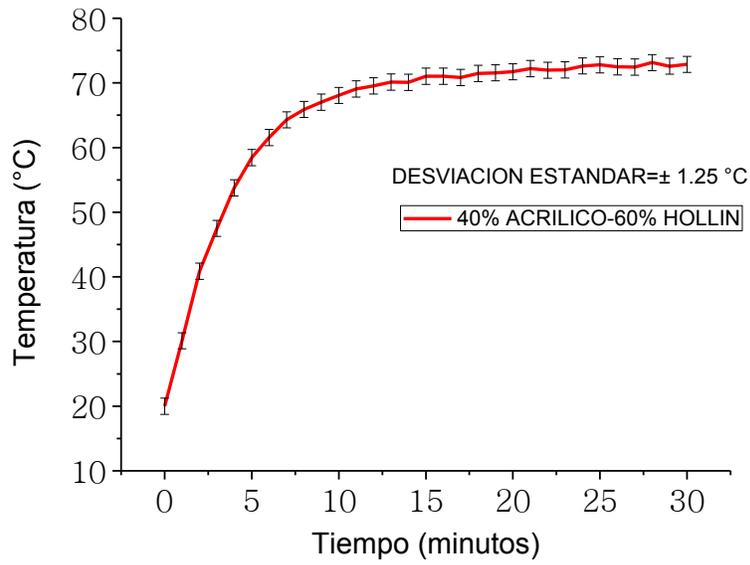


Fig. 4.16. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín.

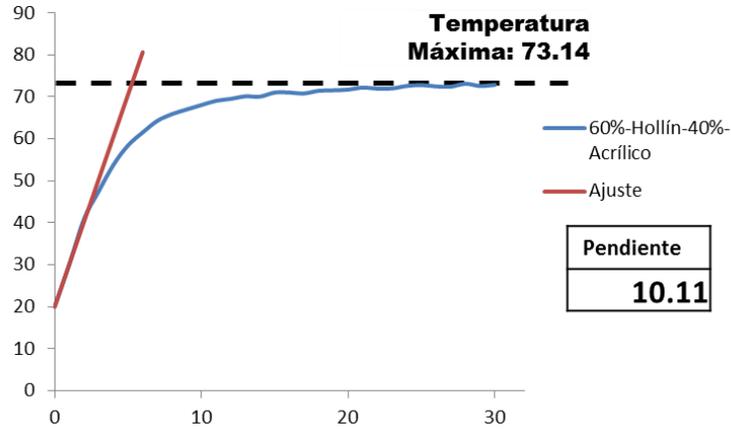


Fig. 4.17. Ajuste para la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín.

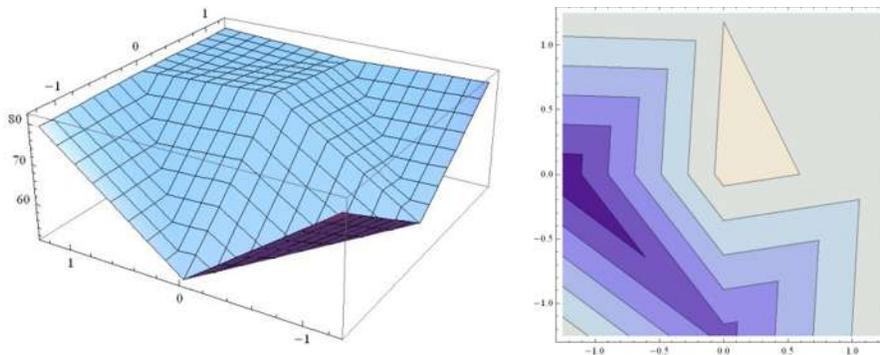


Fig. 4.18. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín.

- VII. La placa con recubrimiento 20% Acrílico-80% hollín tiene una temperatura menor que la placa anterior, bajo poco menos de 1°C. Debido a la alta concentración de hollín, el recubrimiento es difícil de aplicar, cuenta con muchas grietas, difícil adherencia y por lo tanto la distribución de temperatura máxima no define bajo ningún patrón. El recubrimiento es muy frágil a movimientos mecánicos repentinos. El tiempo en alcanzar la temperatura máxima es lento, se puede ver por la pendiente en el incremento de temperatura en el salto mayor (Fig. 4.19, 4.20 y 4.21)

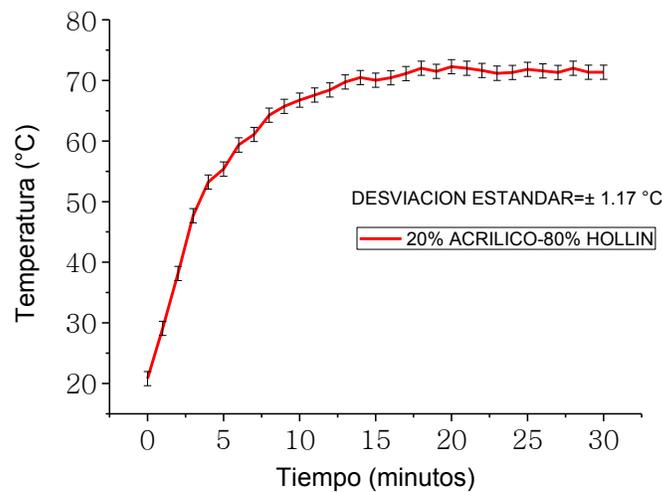


Fig. 4.19. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín.

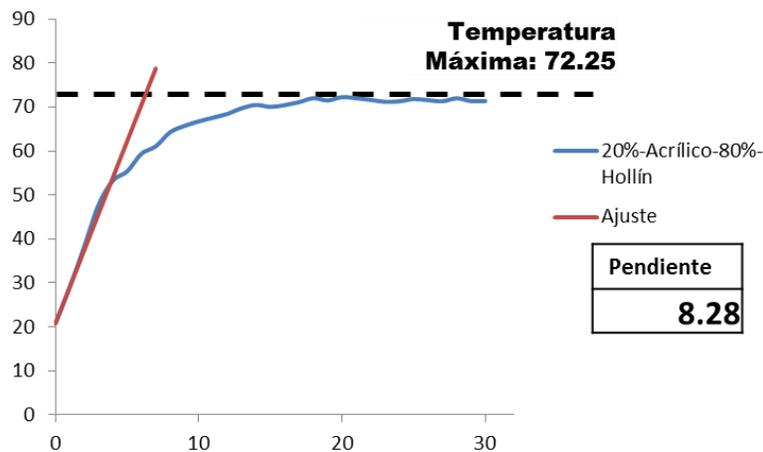


Fig. 4.20. Ajuste para la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín.

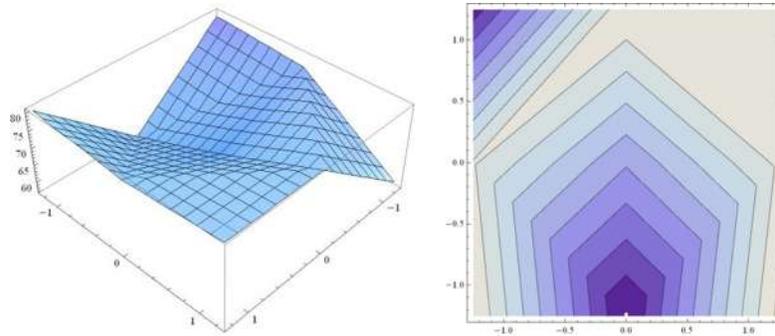


Fig. 4.21. distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín.

VIII. La superficie con el recubrimiento 100%- Hollín es el otro extremo en la variación de concentración. La temperatura máxima bajó respecto a la placa anterior. No existe una distribución de la temperatura máxima definida y la adherencia es muy difícil. No hay formación de grietas, lo que existe son cuarteaduras que surgen con movimientos mecánicos bruscos, lo que propicia que las pruebas se realicen con la mayor precaución posible.

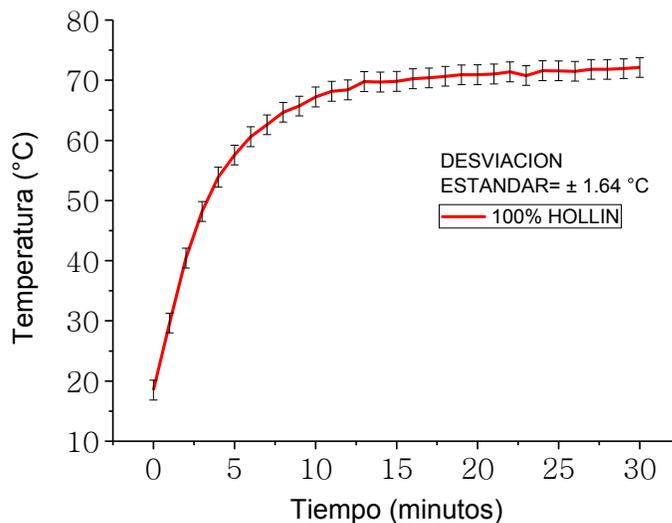
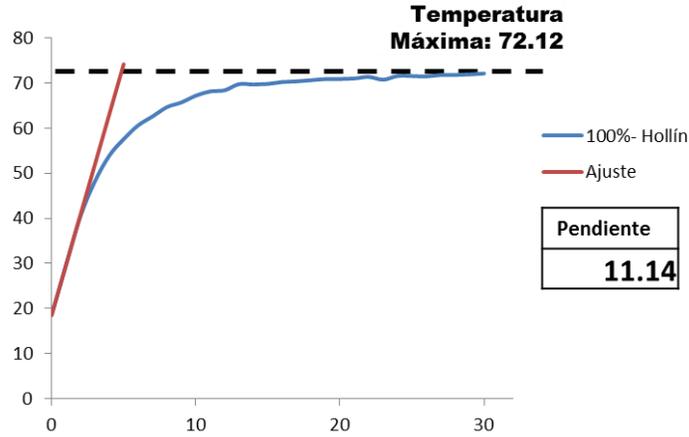
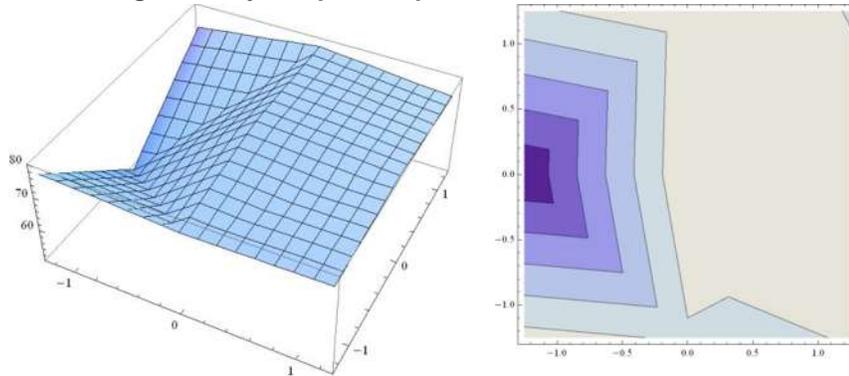


Fig. 4.22. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento 100 % hollín

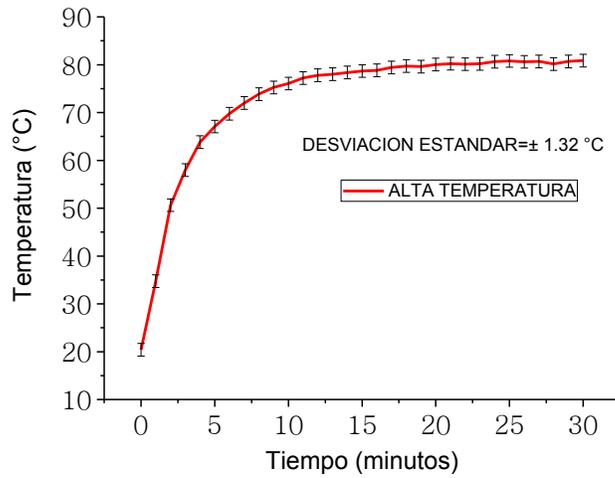


**Fig. 4.23. Ajuste para la placa con recubrimiento 100 % hollín**

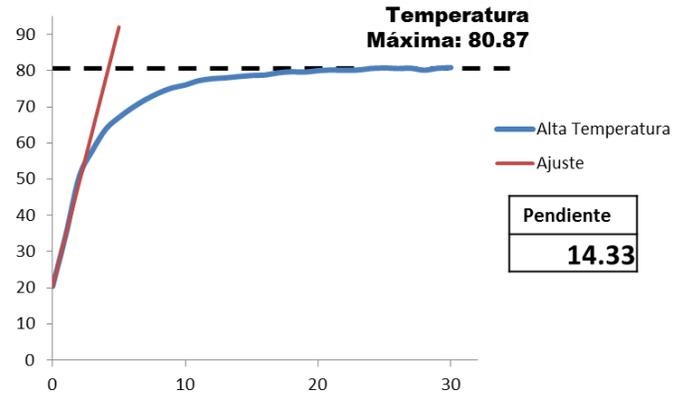


**Fig. 4.24. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento 100 % hollín.**

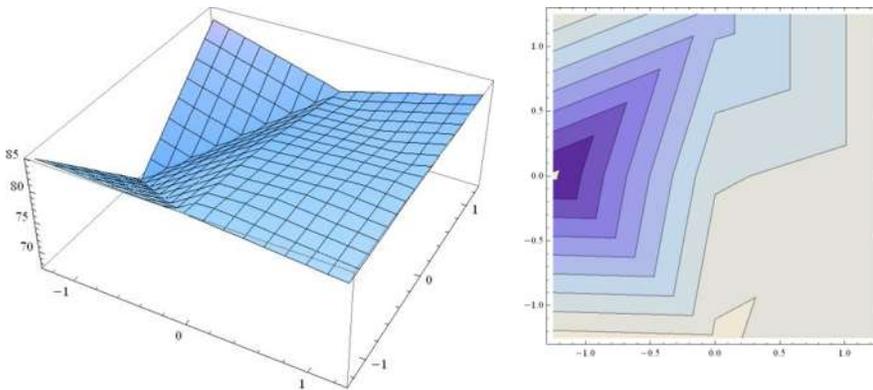
- IX. Para concluir con las pruebas en laboratorio, se decidió utilizar un comparativo con el recubrimiento de pintura comercial para alta temperatura. La temperatura máxima fue muy similar a la temperatura alcanzada por el recubrimiento 40% hollín-60% acrílico, no se distingue una variación. Sin embargo la distribución de temperatura máxima no es uniforme, probablemente causado por el acabado brillante, en contraste con los demás recubrimientos con base en hollín que poseen acabados mate. El incremento de la temperatura fue rápido, y el tiempo de equilibrio de la temperatura se dio a los 15 minutos (Fig. 4.25, 4.26 y 4.27)



**Fig. 4.25. Incremento de temperatura en la placa con recubrimiento de pintura para alta temperatura.**



**Fig. 4.26. Ajuste para la placa con recubrimiento de pintura para alta temperatura.**



**Fig. 4.27. Distribución de temperatura máxima en la placa con recubrimiento de pintura para alta temperatura.**

## 4.2. Perfil térmico general comparativo.

Los resultados anteriores mostraron las características térmicas generales de cada recubrimiento. Estos resultados pueden simplificarse en la Fig. 4.28, donde se compara el incremento de temperatura y temperatura máxima de todos los recubrimientos. Ver ANEXO IV.

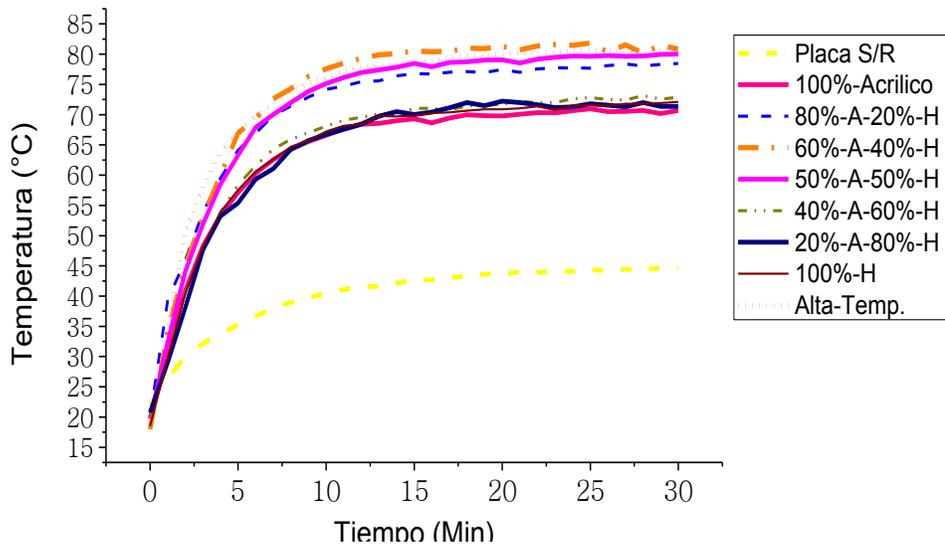


Fig. 4.28. Comparativo de incremento de temperatura en las placas.

El perfil general de temperatura máxima de acuerdo a la concentración puede apreciarse en la Fig. 4.29. El recubrimiento 40% hollín-60% acrílico fue el que alcanzó una temperatura mayor, a partir de esta concentración la temperatura desciende.

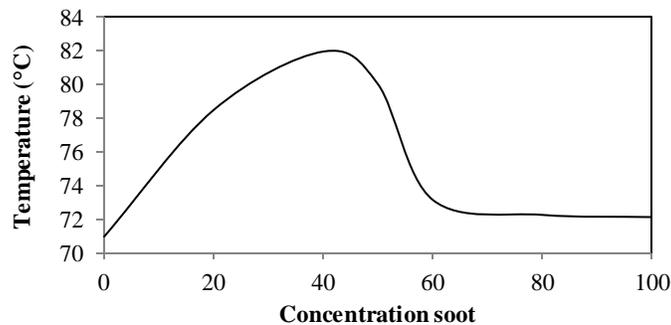


Fig. 4.29. Grafica de temperaturas máximas variando la concentración.

### 4.3. Resultados experimentales del análisis térmico de conducción transitoria en las placas metálicas

El incremento de la temperatura en las placas metálicas puede entenderse como el fenómeno de conducción transitoria en un sólido, tal como se explicó en el apartado 3.3.

Así pues, para corroborar si la Ec. (3.5) predice el comportamiento térmico de la placa metálica, en la experimentación sugerida, se realizó un ajuste de acuerdo a las temperaturas inicial y final de cada placa y considerando las pendientes iniciales del incremento de temperatura, que en la Ec. (3.5) reciben el nombre de parámetro  $\alpha$ .

Se pueden observar variaciones en las variables de la ecuación anterior en las siguientes gráficas.

- a) Para el caso de la placa sin recubrimiento (Fig. 4.30), el ajuste muestra un bajo incremento de temperatura inicial con respecto a la temperatura final, también un valor en el parámetro  $\alpha$  menor a 1.

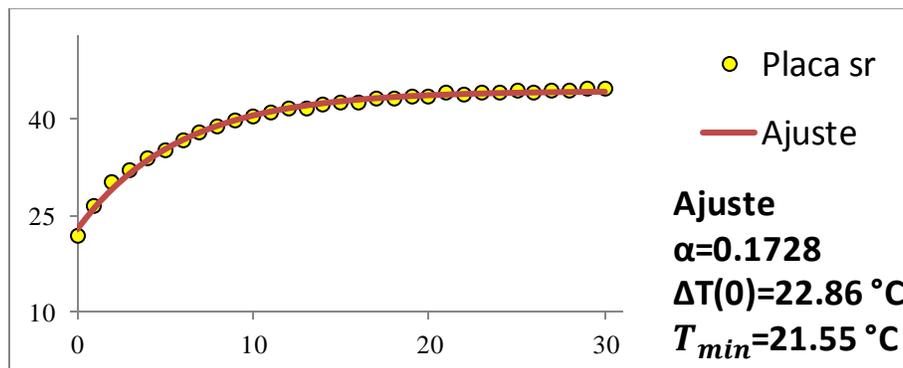


Fig. 4.30. Ajuste en la placa sin recubrimiento.

- b) En la placa con 100% acrílico (Fig. 4.31), se puede apreciar cambia un aumento considerable en la temperatura, superior a 50 °C, además el valor de  $\alpha$  continua siendo pequeño en comparación con la figura anterior.

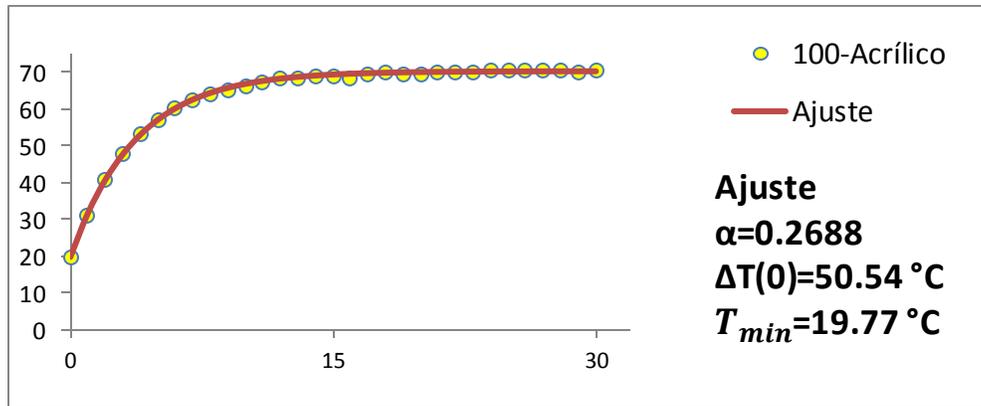


Fig. 4.31. Ajuste en la placa 100% acrílico.

- c) De acuerdo con el ajuste de la Fig. 4.32, la diferencia de temperatura final menos inicial es superior a 50°C.

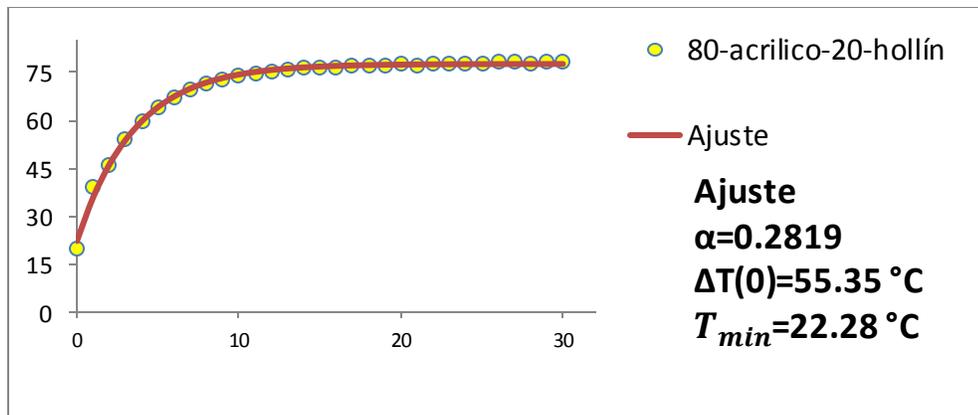


Fig. 4.32. Ajuste en la placa 80% acrílico-20% hollín.

- d) La placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín (Fig. 4.33), muestra que la variable de ajuste  $\alpha$  no ha cambiado mucho respecto a las otras placas, en cambio la diferencia de temperatura  $\Delta T(0)$  es el parámetro que más cambios ha sufrido, se puede inferir que la presencia de hollín contribuye a esto último.

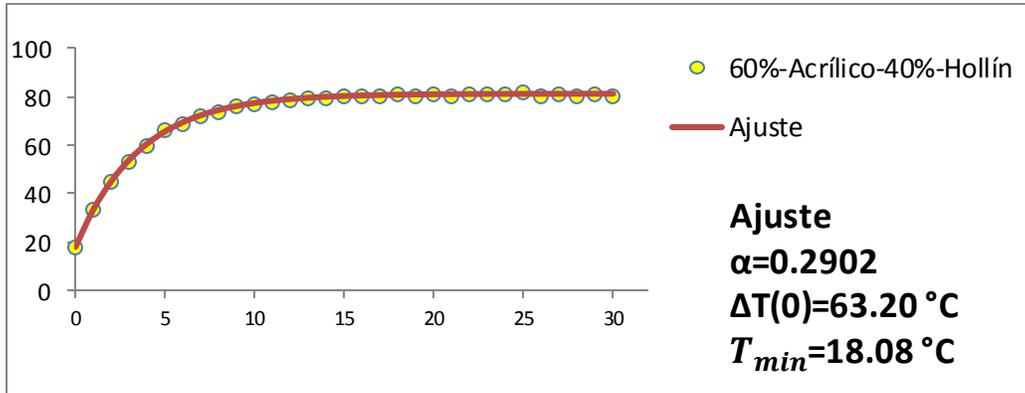


Fig. 4.33. Ajuste de la placa con recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.

- e) El ajuste de la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín mantiene una tendencia, únicamente cambia la diferencia de temperatura (Fig. 4.34), el parámetro  $\alpha$  no sufre cambios mayores a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

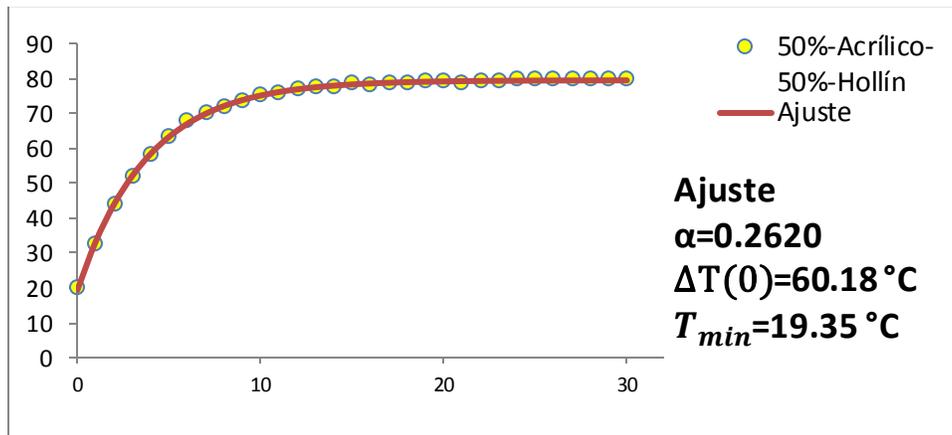


Fig. 4.34. Ajuste de la placa con recubrimiento 50% acrílico-50% hollín.

- f) Todo indica que la variable  $\alpha$  no cambia con el ajuste, eso puede generar conclusiones interesantes. Para el caso del recubrimiento 40% acrílico-60% hollín la tendencia continúa como en las placas anteriores (Fig. 4.35).

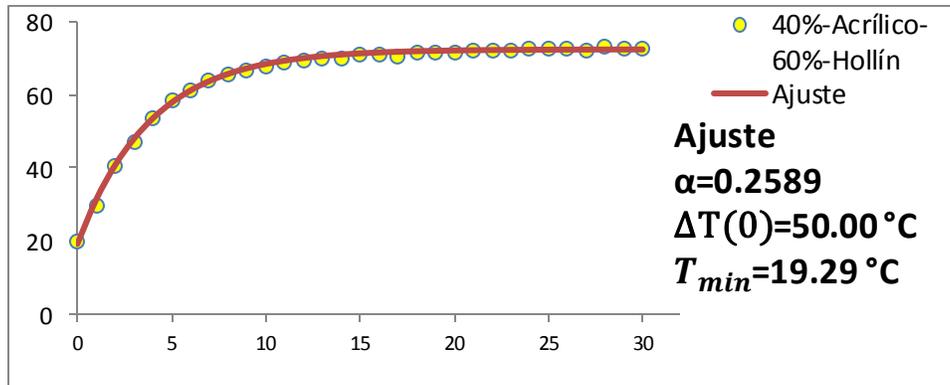


Fig. 4.35. Ajuste de la placa con recubrimiento 40% acrílico-60% hollín.

- g) Para la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín (Fig. 4.36), la diferencia de temperatura va a la baja.

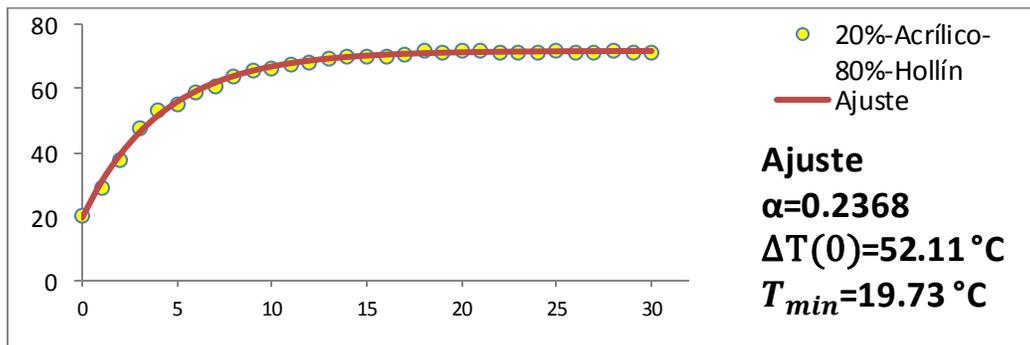


Fig. 4.36. Ajuste de la placa con recubrimiento 20% acrílico-80% hollín.

- h) Los datos del ajuste de la placa con recubrimiento 100% hollín se muestran en la Fig. 4.37.

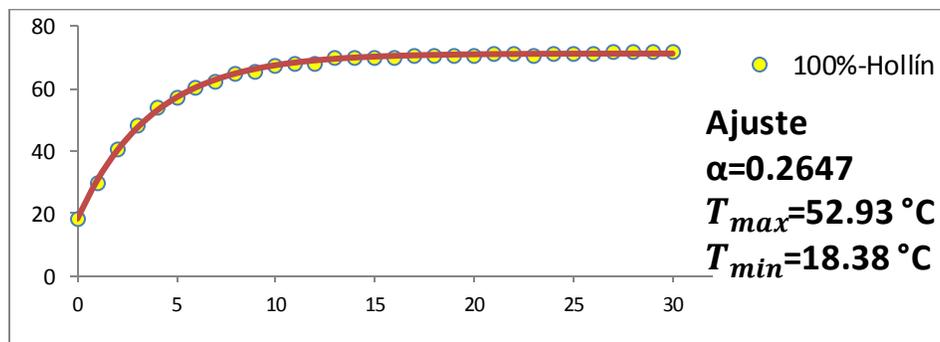


Fig. 4.37. Ajuste de la placa con recubrimiento 100% hollín.

- i) El referente para tener un punto comparativo es la placa con recubrimiento de pintura de alta temperatura. Esta placa es la única que sufrió un cambio pequeño en la variable  $\alpha$ .

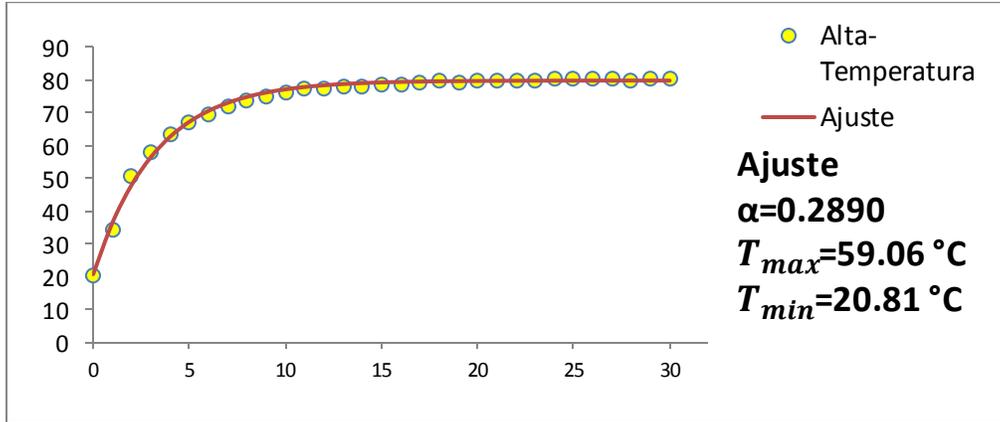


Fig. 4.38. Ajuste de la placa con recubrimiento de pintura de alta temperatura.

Los ajustes realizados a las gráficas de incremento de temperatura de las distintas placas muestran que el parámetro  $\alpha$  no cambia significativamente. Considerando que lo único que permanece en cada análisis de temperatura es la placa, se puede inferir que dicho parámetro representa el material de conducción térmica, en este caso el aluminio. El parámetro  $\alpha$  define algunas propiedades físicas del material al momento de realizar la experimentación, lo que implica que los parámetros A y B definen al recubrimiento, lo cual puede comprobarse con el análisis térmico teórico del capítulo anterior. Por lo tanto, además del modelo experimental de perfiles de temperatura para analizar recubrimientos, se puede sugerir un modelo matemático semiempírico, o un modelo teórico-experimental, para predecir el comportamiento térmico de diversos recubrimientos sobre distintos sustratos.

El uso de la metodología sugerida contribuye a realizar la menor cantidad de pruebas de campo que son difíciles de realizar (potencia de cocción estándar, tiempos de calentamiento y tiempo de cocción), ahorro de material y mejora en la eficiencia del desarrollo tecnológico para sistemas de cocción solar de pequeñas

dimensiones.

#### 4.4. Parámetros óptimos del recubrimiento.

Después de analizar los perfiles de temperatura mediante un nuevo diseño experimental, podemos sugerir que el hollín como pigmento para recubrimientos funciona en una proporción con acrílicos al 40%. Conociendo las pendientes con el ajuste para cada caso, se sabe que un factor importante es la rapidez en incremento de temperatura o pendiente. Al comprar los parámetros de temperatura máxima y pendiente, se obtiene que el factor  $T_{max}\alpha$  es mejor también para la concentración de 40% hollín.

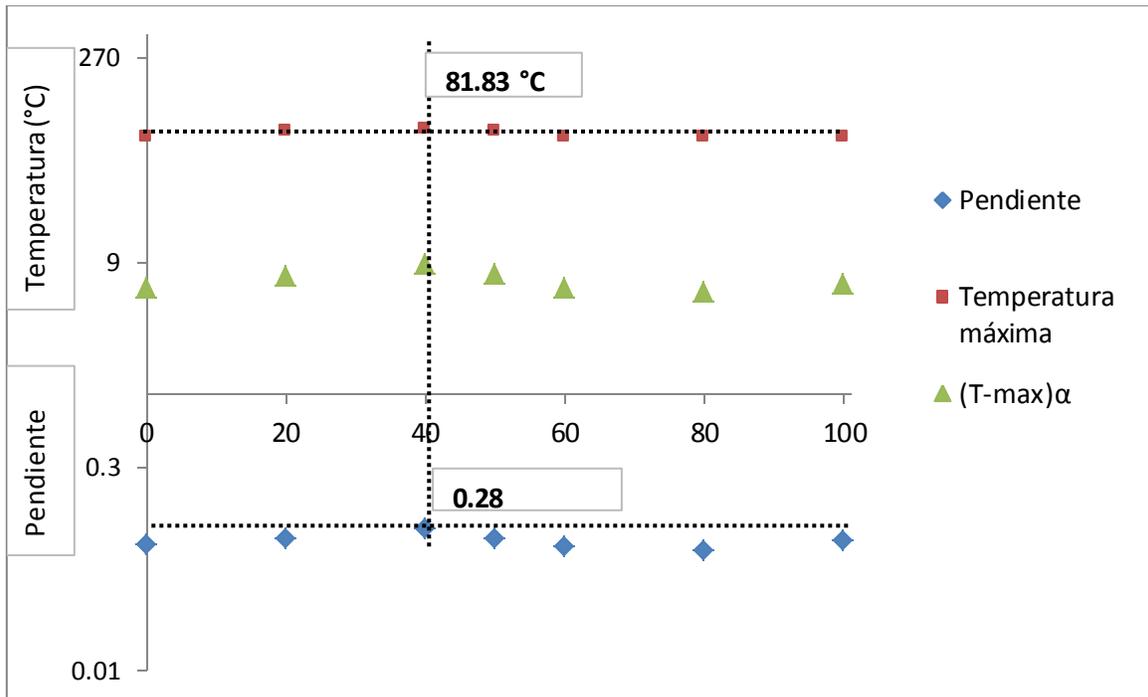


Fig. 4.39. Análisis de concentración, temperatura máxima y pendiente.

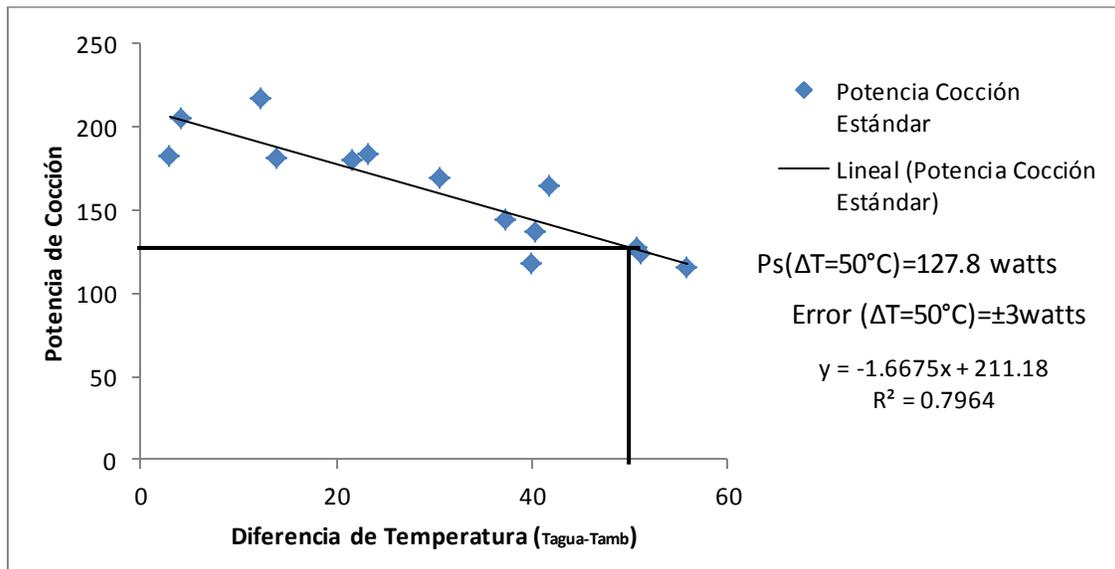
#### 4.5. Análisis de potencia de cocción estandarizada

La potencia de cocción estandarizada (Norma ASAE S580-2003), es el parámetro de evaluación de sistemas de cocción solar más representativa; evalúa el

funcionamiento en campo de ésta tecnología solar considerando condiciones climatológicas que estarán siempre presentes durante el intervalo solar de tiempo que permite diariamente la cocción de los alimentos.

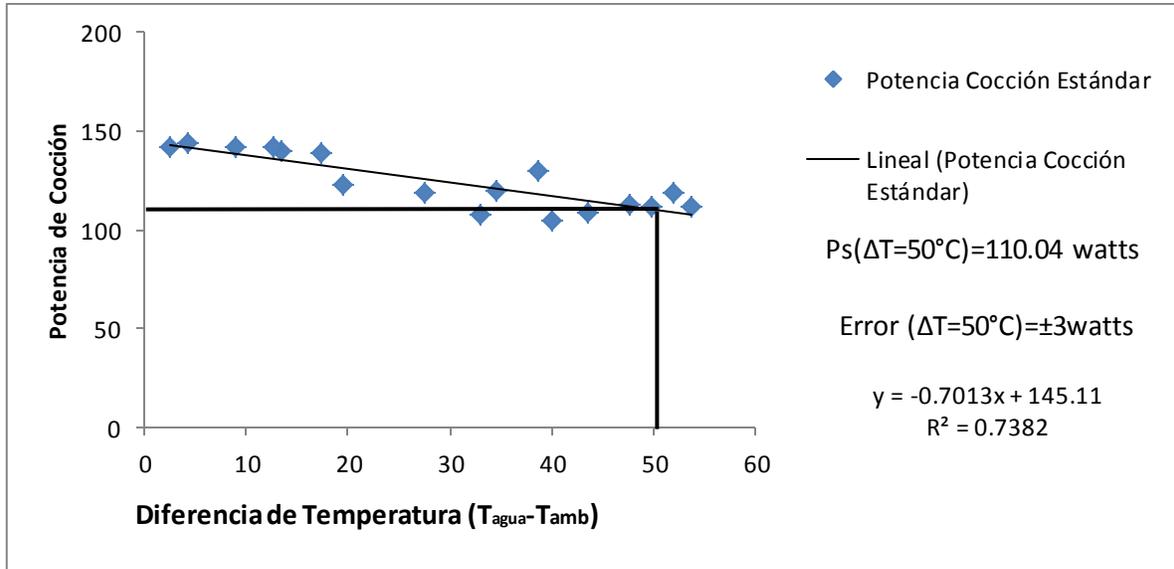
Se realizaron pruebas de potencia de cocción estandarizada, los días 21, 22, 23, 24 y 25 de mayo del 2016 (Ver ANEXO V), comenzando a las 10:00 horas solar y contando con una radiación solar entre 700 y 800 w/m<sup>2</sup> a cielo despejado (ANEXO VII), utilizando un sistema solar para la cocción de alimentos para comparar el funcionamiento del recubrimiento propuesto y la pintura de alta temperatura. Para tal efecto se utilizó la cocina solar rural –CSR- (López, 2013). La capacidad de carga de acuerdo al área de captación de la CSR fue de 3.8 litros.

Los resultados obtenidos muestran una mejor potencia de cocción estandarizada para el recubrimiento propuesto con concentración 40% hollín (Fig. 4.40), obteniendo una potencia de cocción estandarizada de  $P_s(\Delta T=50^\circ\text{C})=127.8$  watts.



**Fig. 4.40. Potencia de cocción estandarizada con el recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.**

Para el recubrimiento de la pintura para alta temperatura se obtuvo una potencia de cocción de  $P_s(\Delta T=50^\circ\text{C})=110.04$  watts (Fig. 4.41). Ver ANEXO VI.



**Fig. 4.41. Potencia de cocción estandarizada con el recubrimiento de pintura de alta temperatura.**

Las pruebas de potencia de cocción o pruebas de efectividad como se comentó al principio de este trabajo no siempre son fáciles de realizar, por lo que la metodología de evaluación térmica de recubrimientos fue de gran ayuda. Al final, la razón de que el recubrimiento pigmentando, con partículas de hollín de resina (menores a  $500 \mu\text{m}$ ), superará a la pintura comercial para alta temperatura pudo ser en gran medida por la generación de una superficie rugosa; superficies rugosas, como se mencionó en el capítulo 2, tienen mejor absorción por lo que generan superficies selectivas absorbedoras eficientes.

#### 4.6. Rendimiento térmico.

El rendimiento térmico es otro parámetro que se calcula para evaluar y comparar sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

Utilizando la Ec. (1.8) para la estimación del rendimiento térmico (Ver ANEXO IX), se obtuvo un mayor valor para el recubrimiento con hollín de resina que la superficie con recubrimiento de pintura de alta temperatura (Tabla 4.3).

<i>Superficie</i>	<i>Rendimiento térmico (%)</i>
Con recubrimiento de alta temperatura	<b>35</b>
Con recubrimiento 40% hollín-60% acrílico	<b>45</b>

Tabla 4.1. Rendimiento térmico en superficies analizadas.

#### 4.7. Tiempo de Calentamiento y Cocción.

Los últimos parámetros calculados fueron los tiempos de calentamiento y de cocción. La Fig. 4.42, muestra el tiempo de calentamiento utilizando el recubrimiento de pintura para alta temperatura. El tiempo de calentamiento es de 101.7 minutos, mientras que tiempo de cocción se considera a partir de finalizar el tiempo de calentamiento.

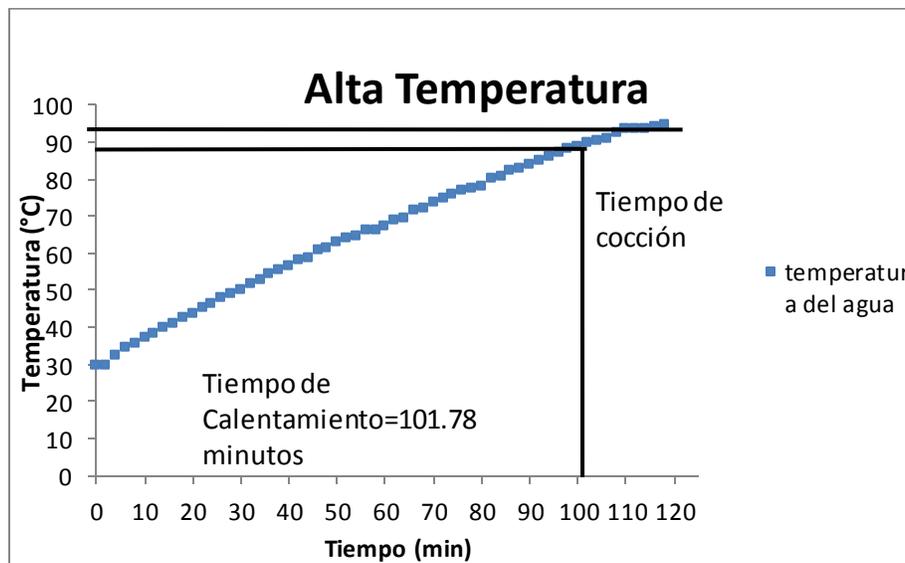


Fig. 4.42. Tiempos de calentamiento y de cocción para la placa metálica con el recubrimiento de pintura de alta temperatura

Para el recubrimiento propuesto, los resultados fueron mejores que los obtenidos con la pintura de alta temperatura. En este caso, el tiempo de calentamiento fue de 84.7 minutos, a partir de ahí el tiempo de cocción (Fig. 4.43). Lo que muestra es que, desde un análisis comparativo de cocción de alimentos, utilizar el recubrimiento propuesto demorará aproximadamente 18 minutos menos que si se

utiliza el recubrimiento de pintura para alta temperatura.

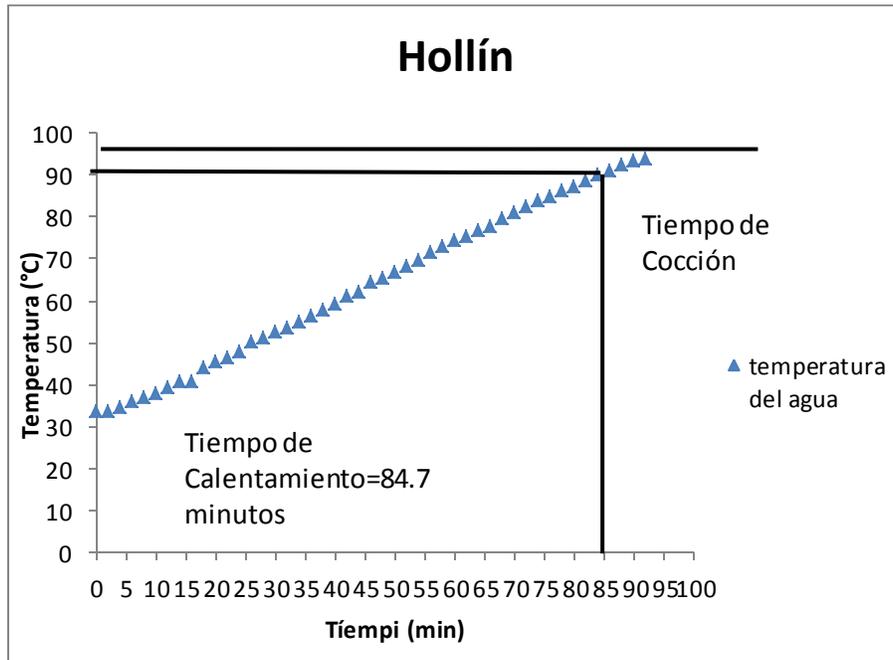


Fig. 4.43. Tiempos de calentamiento y de cocción para la placa metálica con el recubrimiento 60% acrílico-40% hollín.

#### 4.8. Resultados del flujo de calor total.

Como se mostró en la Fig. 3.2, el arreglo experimental propicia que la emisión de la fuente de luz incida sobre la superficie con recubrimiento. En un intervalo de tiempo “ $t$ ”, la superficie expuesta a la fuente de luz alcanza un equilibrio térmico con su entorno, por lo que el recubrimiento realiza un proceso de conversión de luz en calor, mismo que se transmite a la placa metálica, este fenómeno define a la superficie como una superficie absorbadora.

Como se explicó anteriormente la Ec. (3.5) predice el comportamiento térmico de la placa durante un intervalo de tiempo  $t$ ; por lo tanto, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor conociendo las propiedades del aluminio que se muestran en la tabla 4.1.

Material	Conductividad térmica $\left(\frac{w}{m^{\circ}c}\right)$	Difusividad térmica $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
Aluminio	222.11	$97.5 \times 10^{-6}$

**Tabla 4.2. Propiedades del aluminio**

Así mismo de las Ec. (3.3) y (3.12) se sabe que

$$\alpha = \frac{hA_s}{\rho V c_p} = \left(\frac{h}{k}\right) \left(\frac{\alpha_t}{L}\right)$$

Y considerando que anteriormente se obtuvieron los valores de  $\alpha$  para cada uno de los distintos recubrimientos sobre la placa, se puede calcular

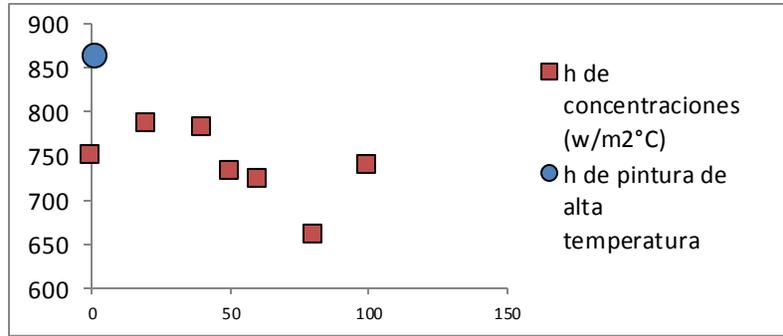
$$h = \frac{\alpha k L}{\alpha_t} \left[ \frac{w}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \right] \quad (4.1)$$

Luego, se han obtenido los valores del coeficiente de transferencia de calor para todas las superficies analizadas (Tabla 4.2).

Placa	Hollín	Acrílico	Coeficiente $h \left(\frac{w}{m^2 \cdot ^{\circ}C}\right)$
Placa 1	Sin recubrimiento		483.0424615
Placa 2	0%	751.3993846	704.1912123
Placa 3	20%	788.0189231	738.5100549
Placa 4	40%	783.2667692	734.0564646
Placa 5	50%	732.3907692	686.3768513
Placa 6	60%	723.7250769	678.2555985
Placa 7	80%	661.9470769	620.3589251
Placa 8	100%	739.9383077	693.4502005
Placa 9	alta temperatura		863.7738462

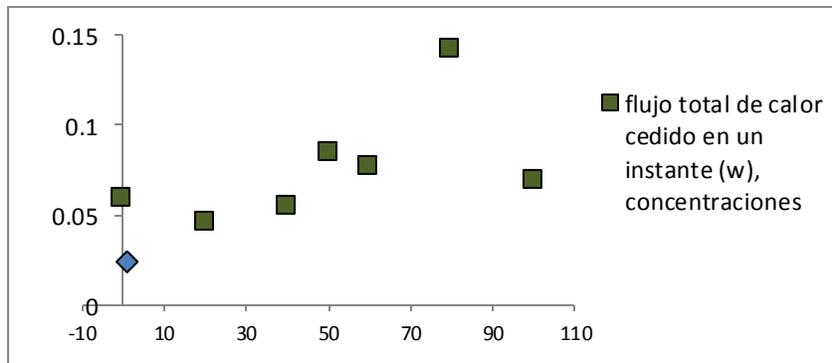
**Tabla 4.3. Coeficiente de transferencia de calor en las placas de aluminio**

La Fig. 4.44, muestra los valores del coeficiente de transferencia de calor para los recubrimientos variando las concentraciones de hollín y comparados con la pintura de alta temperatura.



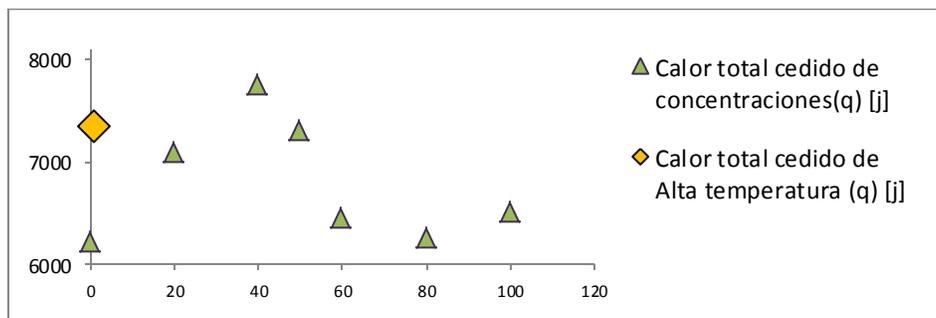
**Fig. 4.44. Coeficientes de transferencia de calor de concentraciones y pintura de alta temperatura.**

Por otra parte, con las Ec. (3.7) y (3.8) se obtuvo el flujo de calor cedido en un instante  $t$  (Fig. 4.45), y el calor total cedido (Fig. 4.46). Para conocer más sobre los valores del análisis térmico en régimen transitorio ver ANEXO X.



**Fig. 4.45. Flujo total de calor cedido en un instante “t”.**

La Fig. 4.46, muestra que la placa con recubrimiento 40% hollín-60% resina, posee una mayor cantidad de calor total cedido.



**Fig. 4.46. Calor total “q” cedido en un intervalo de tiempo (0 → t).**

En la Fig. 4.47 se puede observar el análisis térmico en una sección transversal, tal como funciona la transferencia de calor en una olla de presión de un sistema de cocción solar con un recubrimiento, formando el binomio “superficie absorbedora=sustrato+recubrimiento”

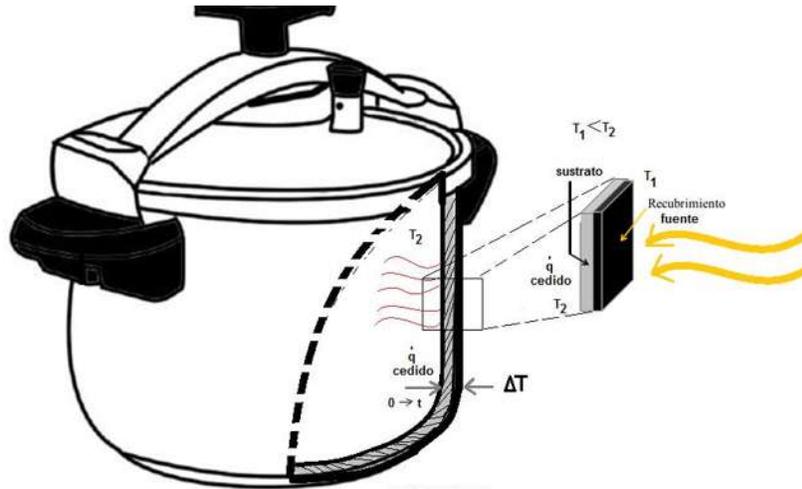


Fig. 4.47. Análisis térmico de sección trasversal en una olla de presión.

En este caso, la sección analizada muestra la placa metálica y el recubrimiento; la cara que recibe energía es la del recubrimiento, y por el análisis planteado bajo régimen transitorio en sistemas concentrados, se observa que el recubrimiento permite una absorción de calor que se ve reflejado en el incremento de temperatura al interior de la olla, particularmente como el calor total cedido. Así, la gráfica 4.44 deja ver que el recubrimiento, con el que se realizaron las pruebas de potencia de cocción, tiene una cantidad mayor de calor total cedido, incluso mayor que el cedido por la pintura para alta temperatura; los resultados son análogos a los que se obtuvieron con la estimación de la potencia de cocción.

El resultado anterior permite sugerir una metodología teórico-experimental, para evaluar absorbedores térmicos de sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones. Los datos obtenidos para las gráficas 4.42, 4.43 y 4.44, se determinaron con base en perfiles de temperatura resultantes de las pruebas en laboratorio. Como el análisis térmico de régimen transitorio requiere de

propiedades físicas del material (densidad, difusividad térmica, longitud característica, capacidad calorífica y conductividad térmica), para calcular los datos de las gráficas antes mencionadas, se pueden variar estas propiedades, por ende, cambiar el material. Variar el material utilizado como sustrato y el recubrimiento, a través de la metodología sugerida, permitirá conocer con pocas o nulas pruebas de efectividad la mejor combinación posible, térmicamente hablando, para su uso en sistemas de cocción solar.

#### 4.9. Integración de resultados.

En resumen, puede concluirse que la metodología propuesta integra diversos resultados que nos permiten conocer el comportamiento térmico de diferentes superficies aborbedoras solares, como se muestra en la Fig. 4.48.

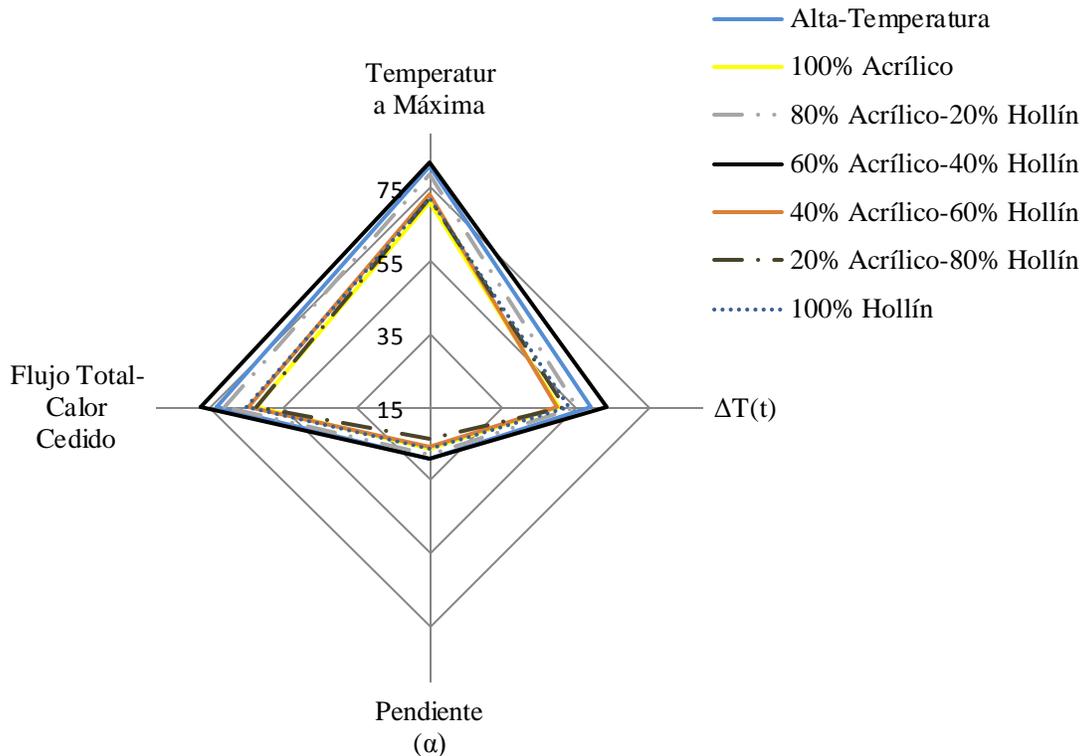
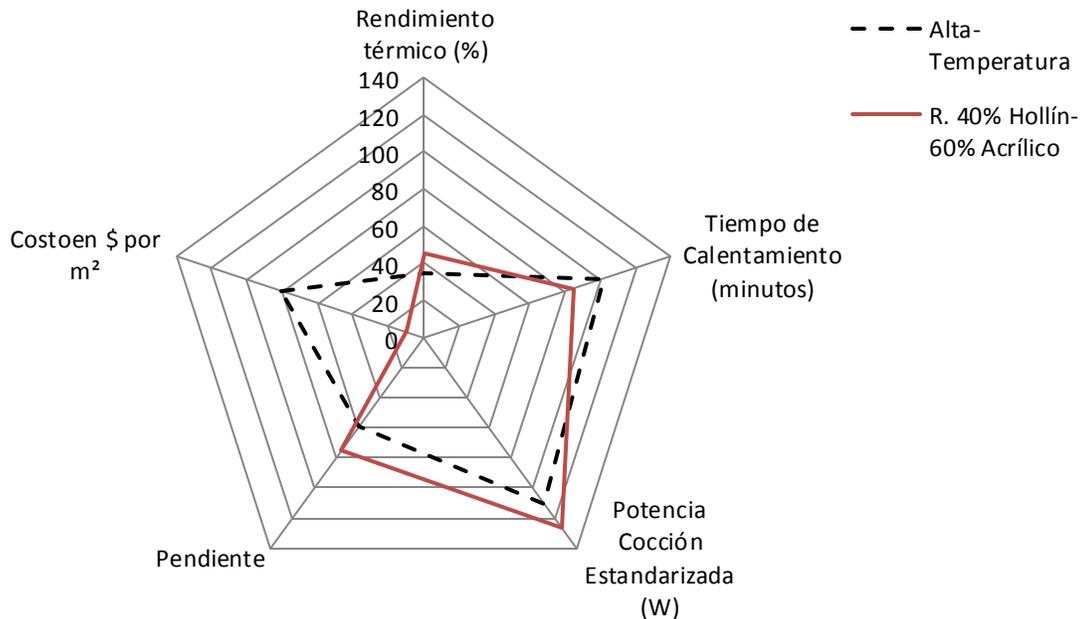


Fig. 4.48. Resumen comparativo de las superficies analizadas

El hollín de resina como recubrimiento absorbedor es mejor que la pintura comercial para alta temperatura. Los resultados en laboratorio con la metodología sugerida como en pruebas de campo son consistente y a favor del recubrimiento con la concentración 40% hollín-60% acrílico. De forma integradora los resultados de las pruebas de campo utilizando los recubrimientos antes mencionados se muestran en la Fig. 4. 49.



**Fig. 4.49. Análisis comparativo general del uso del recubrimiento 40% hollín-60% acrílico y la pintura para altas temperaturas.**

#### 4.10. Discusión

Hacer tecnología de bajo costo comúnmente involucra baja eficiencia. No siempre se pueden converger el bajo costo con una alta eficiencia, con la finalidad de generar tecnología apropiada. Sin embargo, utilizar productos de deshecho en la construcción de nuevas tecnologías, es un tópico que ha tenido auge en los últimos años, no sólo por optimizar los costos de producción de la tecnología, sino por la mitigación en la emisiones de bióxido de carbono que representa el rehúso de materiales.

Optimizar además el uso en el desarrollo tecnológico es aún mejor, porque involucra utilizar la cantidad de material mínima para el desarrollo de tecnología más eficiente.

Sugerir el rehúso de hollín, para su utilización en recubrimientos absorbedores solares, como partículas tipo pigmento representa una innovación; principalmente, si se considera que la superficie que genera es de tipo rugosa, lo que anticipa un buen funcionamiento. Además, por su color natural oscuro, por sí mismo ya es un absorbedor que tiene un desempeño adecuado para tecnologías solares de cocción de alimentos.

Para que el recubrimiento con base en hollín de resina posea adherencia y pueda depositarse sobre el sustrato de aluminio, se hace necesaria la incorporación de aglutinantes. Y aunque para la formación del recubrimiento se utilizó una pintura base negro mate como aglutinante, y podría suponerse que la pintura por si misma ya es un absorbedor, lo cierto es que se pudo apreciar que la adición de los pigmentos de hollín contribuyó a mejorar las propiedades de absorción de la superficie.

Es sabido que existen en el mercado infinidad de recubrimientos para generar superficies selectivas absorbedoras de la radiación solar; sin embargo, pensar en el bajo costo y accesibilidad de los materiales, así como la fácil manipulación de éstos, específicamente para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones, es un problema no resuelto. Considerando el nicho energético-social que poseen las cocinas solares, en zonas rurales, no es viable la incorporación de recubrimientos sofisticados, costosos y de difícil aplicación, si en intervalos de tiempo corto requerirá reaplicación sobre el almacenador de alimentos. Por lo tanto, sugerir un nuevo recubrimiento con base en hollín, es una propuesta que se vislumbra viable. Lo importante será buscar aglutinantes reutilizados, o naturales, con la finalidad de que, para futuras investigaciones, pueda elaborarse un recubrimiento absorbedor de fácil acceso y bajo costo.

Será necesario, en algún momento, realizar la caracterización del hollín para

conocer las propiedades físico-químicas de éste, y determinar la razón de su buen funcionamiento como pigmento. Pues, se pudo apreciar que una mezcla 40% hollín, 60% acrílico, generó buenos resultados. En pruebas de efectividad, en campo, el recubrimiento con base en hollín obtuvo mejores resultados que el referente con una pintura comercial negro mate para alta temperatura.

También se propuso una metodología que resulta ser eficaz y se realiza en laboratorio. Dicha metodología, propone mediante análisis de perfiles de temperatura evaluar el comportamiento térmico de superficies metálicas con diversos recubrimientos; con la finalidad de que las pruebas de efectividad, en campo, sean menores, puesto que realizar pruebas en campo no siempre resulta sencillo. Así mismo, un ajuste en el comportamiento térmico de las placas permitió analizar un posible modelo matemático, teórico-experimental, que puede predecir el comportamiento térmico real de superficies absorbedoras para sistemas de cocción solar, sin necesidad de hacer pruebas de efectividad, considerando variaciones de materiales y recubrimientos de forma teórica.

Todo indica que el estudio del hollín resulta muy interesante y prometedor, por lo que podría ser un campo de estudio versátil y extenso para poder ser utilizado no sólo en sistemas de cocción solar, sino toda la gama de tecnologías solares térmicas.

# CAPÍTULO 5:

## Conclusiones

---

### 5.1. Conclusiones

Del presente trabajo se concluye lo siguiente:

- I. La metodología teórica-experimental sugerida, a través de perfiles de temperatura en laboratorio, y cálculo de calor total cedido ha sido funcional; permite analizar diferentes recubrimientos sobre diversos sustratos, en superficies pequeñas, optimizando el uso de materiales para pruebas de efectividad, reduciendo éstas y aminorando costos.
- II. El análisis de los perfiles de temperatura proponen una ecuación para predecir el comportamiento térmico de superficies selectivas absorbedoras, variando el sustrato y el recubrimiento. Se han identificado parámetros que dependen tanto del sustrato como del recubrimiento, por lo que se puede pensar en un modelo matemático útil y efectivo.
- III. El hollín como elemento de un nuevo recubrimiento, funciona como pigmento absorbedor, adiciona mejores propiedades térmicas sobre un aglutinante oscuro.
- IV. Las superficies absorbedoras que se generan con el recubrimiento con base en hollín de resina, son rugosas, pero presentan grietas que

aumentan con el trabajo mecánico.

- V. La preparación del recubrimiento es sencilla, posee adherencia y es de fácil aplicación. Además, es de muy bajo costo, por casa almacenador de alimentos de  $0.1 \text{ m}^2$  de área por cubrir, el costo del recubrimiento no rebasa los 15 pesos.
- VI. En aglutinantes del tipo acrílico negro mate, la concentración en 40% de hollín genera las mejores propiedades térmicas, establece un recubrimiento absorbedor funcional para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.
- VII. En pruebas de efectividad, potencia de cocción y tiempos de calentamiento y cocción, en un sistema de cocción real (CSR), el recubrimiento propuesto con base en hollín es mejor que la pintura comercial para alta temperatura, lo que se puede traducir en la reducción de aproximadamente 20 minutos en el tiempo de cocción de alimentos.
- VIII. Los resultados obtenidos por el modelo teórico-experimental se contrastaron con las pruebas en campo, obteniendo resultados muy similares. Aunque las pruebas de efectividad validan el funcionamiento real de los sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones, el modelo permitió anticipar los resultados de dichas pruebas y reducir el análisis comparativo a dos recubrimientos, el propuesto y de pintura de alta temperatura. Se puede inferir entonces, que el modelo propuesto funciona, aunque puede perfeccionarse para futuras investigaciones.
- IX. En resumen, el recubrimiento con la presencia de hollín de resina tuvo buenos resultados en un sistema de cocción de tipo CPC-3D. Por lo tanto, se sugiere como elemento para recubrimientos selectivos absorbedores aplicados en sistemas de cocción solar. Además, se construyó un modelo

teórico-experimental para la evaluación de superficies absorbedoras para sistemas de cocción solar de pequeñas dimensiones.

## 5.2. Recomendaciones

El hollín como pigmento absorbedor se sugiere para realización de nuevas superficies selectivas absorbedoras sobre sustratos metálicos. Para dar continuidad al presente trabajo, aún hace falta la caracterización del hollín, conocer los elementos que lo conforman y poder determinar si la presencia de carbono genera la propiedad absorbedora.

Se hace necesario también determinar el aglutinante idóneo para la formación de un nuevo recubrimiento con adherencia y durabilidad, resistente al desgaste en la intemperie. De la misma forma, será útil conocer si el tamaño de grano del pigmento de hollín, influye en las propiedades térmicas, si esto es cierto, se deberá determinar el tamaño de grano necesario para la formación de un recubrimiento con mejores propiedades térmicas. Con la formación de un nuevo recubrimiento de bajo costo y eficiente, habrá que determinar su emitancia y la relación absorptancia/emitancia, ya sea con la ayuda de algún emisómetro o bien de forma teórica (con algún modelo), que para el objetivo del presente trabajo no se calculó.

Por otra parte, el modelo experimental puede y debe complementarse considerando la evaluación térmica del recubrimiento por sí mismo, con la intención de formar un modelo semi-empírico, que pueda predecir el comportamiento térmico de diferentes superficies, variando su rugosidad, el sustrato y el recubrimiento. Sin embargo, este trabajo establece las bases para una amplia gama de posibilidades de estudio.

## Bibliografía.

---

- Agnihotri, O. P. and Gupta, B. K. (1981). Solar Selective Surfaces. Wiley-Interscience Pub, New York, NY. p.126.
- Agnihotri, O. P. and Gupta, B. K. (1981). Solar Selective Surfaces, Wiley-Interscience Pub, New York, NY. p.124.
- Aries, L. and Traverse, J-P. U.S. Patent No. 4,405,414, 20 September 1983
- ASAE S580, (2003) Testing and Reporting Solar Cooker Performance. American Society of Agricultural Engineers, ASAES580 JAN03, pp.824-826
- 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.
- Braun, J. H. (1995). White Pigments, Federation of Societies for Coatings Technology, Blue Bell, PA.
- Burden, R.L. & Faires, J.D. (2009). *Análisis numérico*, 7ma. Ed., México, D.F., Zomson Learning Inc., pp. 394-397
- C. E. Kennedy, Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials, NREL/TP-520-31267, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- Cao, Y and Hu, X. (2000). "Absorbing film on metal for solar selective surface," Thin Solid Films. pp. 375, 155.
- Careaga, A. (2012). Las tecnologías digitales como ecotecnologías para el desarrollo sustentable comunitario. En: Memorias del Primer Encuentro Nacional de Ecotécnicas. Morelia.
- Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. McGraw-

Hill Interamericana. Tercera edición. pp. 218,236, 230.

Correa, F., González, M., Servín, H., Márquez, F., Rutiaga, J. G., Lemus, A. A., & Alonso, V. (2014). Development of a Selective Low Cost Absorbing Surface based on Soot for Solar Thermal Applications. *Energy Procedia*, 57, 1565-1572.

Cruz, J. (2010). Recubrimientos de fosfatados sobre acero 304 sensibilizado (Tesis-Maestría). IPN, Altamira, Tamaulipas.

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.

Del rio, J. Jaramillo, O. & Tapia, S. (2007). Cocedores solares. *Revista Digital Universitaria*. Volumen 11 Número 10. ISSN: 1067-6079.

Duffie, J. & Beckman, W. (1974). *Solar Engineering of Thermal Processes*. First Edition. Ed. Wiley. United States of America. pp. 146-198.

Echazú R., Cadena C. y Saravia L. (2000) Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares - ASADES 2000.

ECSCR (1992). *Solar Cooker Testing Procedure: Proposal*.

Fernández, D. (1992). *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*. Santander: Servicio de Publicaciones, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. ISBN: 9788460082446.

Funk. (2000). *Evaluating the International Standard Procedure for Testing Solar Cookers and Reporting Performance*.

Funk. Larson. (1998). *Parametric Model of Solar Cooker Performance*, *Solar Energy* Vol. 62, No. 1, pp. 63-68.

G. B. Smith and A. Ignatiev. (1981). "Black chromium-molybdenum: a new stable solar absorber," *Solar Energy Mat.* pp. 4, 119.

- González, M., López L. & Servín, H. (2014) Cocinas Solares: una alternativa energética para el medio rural (pp. 90-97), Primera Edición, Saarbrücken, Germany: Editorial Académica Española.
- Granqvist, C. G. (1989). "Spectrally selective surfaces for heating and cooling applications," Series ed. R. F. Potter, Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT 1. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA. p. 59.
- Guillén, O. (2004). Energía Renovables: una perspectiva ingenieril. Primera Edición. México. Editorial Trillas. Pp. 11-15.
- Harding, G. L. and Craig, S. (1981). "Composition and degradation of graded metal-carbon solar selective absorbing surfaces," Solar Energy Mater. pp. 4, 413.
- International Energy Agency. (2015). CO2 emissions from fuel combustion. Ed. 2015, France.
- International Energy Agency. World Energy Balances (2015). Ed. 2015, France.
- Jolly, R. (1976). The World Employment Conference: The Enthronement of Basic Needs. Development Policy Review, A9 (2), 31-44.
- Kundapur, A. & Sudhir, C.V. (2009) Proposal for new world standard for testing solar cookers, Journal of Engineering Science and Technology, 4(3): 272-281.
- 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.
- López L. B. & González M. (2013) "Desarrollo e Implementación de la Cocinas Solar Rural (CSR)". Memorias del Primer Congreso Sustentabilidad e Interculturalidad, Pichátaro, México. pp. 248-255.

- López L. B. & González M. (2014). Reseñas Gráficas y descriptivas de cocinas solares CPC-3D. En L. B. López. (Ed.), *Cocina Solar: una alternativa energética sustentable: modelo matemático y construcción física* (pp. 118-121), Primera Edición, Saarbrücken, Germany: Editorial Académica Española.
- López Sosa, L. B, González-Avilés, M., Pérez, D. G., & Gutiérrez, Y. S. (2014). Rural Solar Cookers, an Alternative to Reduce the Timber Resource Extraction through the Use of Renewable Energy Sources: Technology Transfer and Monitoring Project. *Energy Procedia*, 57, 1593-1602.
- López, L. B., González, M., & Servín, H. (2015). Evaluation framework for small-dimension solar cooker. *Energy and development in the XXI century: a global approach. International Energy Conference Proceedings 2015. México.* pp. 39-44.
- M. Amemiya. (2012). "Energía y Sustentabilidad: algunas características de la energía sustentable". *Revista Digital Universitaria-UNAM.* Vol. 13, No. 10, pp. 6-9.
- Manrique, J.A. (1984). *Fundamentos y aplicaciones fototérmicas.* Harper & ROW Latinoamericana. México. pp. 99-105.
- Mattox, D. M. and Sowell, R. R. (1974). "High absorptivity solar absorbing coatings," *J. Vac. Sci. Technol.* pp. 11, 4, 793.
- McDonald, G. E. (1975) "Spectral reflectance properties of black chrome for solar collector use," *Solar Energy.* pp. 17, 119.
- Meinel, A. (1982). *Aplicaciones de la energía solar.* Barcelona. Editorial Reverté.
- Mikell P., Groover. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas.* 1ª. Ed. Pearson. México. Pp. 831.
- Monroy, M. (1995). *Comportamiento térmico de cerramientos soleados: un*

- modelo de simulación por diferencias finitas. Tesis Doctoral. Universidad de la Plamas de Gran Canaria. pp. 35-44.
- Muehrlatzer, A., Goerler, P., Erben, E. and Zeilinger, H. (2000) "Selection of a black chrome bath for continuous tube-plating and the properties of the coating deposited from it," *Solar Energy*. pp.63, 125.
- Mullick. (1987). Thermal Test Procedure for Box-Type Solar Cookers, *Solar Energy* Vol. 39, No. 4, pp. 353-360.
- Orel Z. C. and Gunde, M. K. (2001) "Spectrally selective paint coatings: Preparation and characterization," *Solar Energy Mater. & Solar Cells*. pp. 68, 337.
- Orel, B, Orel, Z. C., Jerman, R. and Radoczy, I. (1990) "Coil-coating paints for solar collector panels —II. FTIR spectroscopic investigations," *Solar & Wind Technol.* pp. 7, 6, 713.
- Ortíz J, Masera O & Fuentes A. (2014). *La Ecotecnología en México*. Primera Edición. México. Editorial Imagia. Pp. 12-25.
- Passamai, V., Passamai, T., Pareja, S. y Pizarro, L., (2007). *Física térmica de una cocina solar de pequeñas dimensiones*, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Pejack, Ed., *Technology of Solar Cooking*. 2e solar cooking archive, 2003. Disponible en <http://solarcooking.org/Pejack-on-solar-cooker-technology.pdf>
- Pellegrini, G. (1980). "Experimental methods for the preparation of selectively absorbing textured surfaces for photothermal solar conversion," *Solar Energy Mater.* pp. 3, 391.
- Pettit R. B. and Sowell, R. R. (1976). "Solar absorptance and emittance properties of several solar coatings," *J. Vac. Sci. Technol.* pp. 13, 2, 596.
- Quiñonez, J. & Hernández, A. (2014). *Primeros ensayos de caracterización de un*

nuevo recubrimiento selectivo para placas absorbedoras de colectores solares calentadores de aire. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 18, pp.03.43-03.50. Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES2014.

Randich, E. and Allred, D. D. (1981). "Chemical vapor-deposited  $ZrB_2$  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  $ZrB_2$ ," Solar Energy Mater. pp. 5, 425.

Richharia, L., and Chopra, K. L. (1989). "Stability investigations of a chemically converted textured black copper selective surface," Solar Energy Mater. pp. 19, 365.

Riojas, H, Romieu, I, Marron, T, Rodríguez-Dozal, S, and Maser, O, 2006. "Health impact assessment due the introduction of improved stoves in Michoacan, Mexico", International Conference, Paris, September 2-6, Conference Abstracts Supplement, Epidemiology, 17(6) Supplement, pp.S226-S227, November.

Sánchez del río, C. (1989). Análisis de errores. Editorial Eudema, Niadrid. 180 pp.

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.

Secretaría de Energía (2004). Sistema de Información energética de la secretaria de energía. México: autor.

Secretaría de Energía. (2014). Balance Nacional de Energía en México, Ed. 2014.

Senthilkumar, S., Perumal, K. & Srinivasan, P.S. (2009). Optical and thermal

- performance of a three-dimensional compound parabolic concentrator for spherical absorber. *Sadhana*, Vol. 34 (3). Pp. 369-380.
- Seraphin, B. O. and Meinel, A. B. (1976) in *Optical Properties of Solids: New Developments*, B. O. Seraphin, ed., North Holland Publishing Co., Amsterdam. Chap. 17.
- Seraphin, B. O. (1979), in *Topics in Applied Physics*, Vol. 31, B. O. Seraphin, ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, p. 18.
- Servín Campuzano, H., González-Avilés, M., López Sosa, L.B. (2012). Estimación de la potencia de cocción de la estufa solar Jorhejpataranskua. Memoria 36 Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Mor. 1-5 de octubre de 2012. *Energía Sostenible para todos*. ISBN: 978-607-95019-5-2. pp 472-475.
- Servín, H., González, & López, L. (2012). Estimación de la potencia de cocción de la estufa solar jorhejpataranskua. En Memoria 36 Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Mor-2012. *Energía Sostenible para todos*. ISBN: 978-607-95019-5-2.
- Solís, G., J. (2014). *Hidrógeno y Energías Renovables*. México: Trillas, pp.25-29.
- Tesfamichael T. and Wäckelgård, E. (2000). "Angular solar absorptance and incident angle modifier of selective absorbers for solar thermal collectors," *Solar Energy*. pp. 68, 4, 335.
- Tesfamichael, T. and Wäckelgård, E. (1998). E. "Angular solar absorptance and incident angle modifier of selective absorbers for solar thermal collectors," *Solar Energy Mater.* pp. 51, 171.
- Wäckelgård, E. (1998). "Characterization of black nickel solar absorber coatings electroplated in a nickel chlorine aqueous solution," *SEM*. Pp. 56, 35.
- Williams, D. A., Lappin, T. A. and Duffie, J. A. (1963). "Selective radiation properties of particulate coatings," *J. Eng. Power*, 85A, 213.

Winston, R. (1970). Light collection within the framework of geometrical optics. *J. Opt. Soc. Am*, 60(2):245–247.

Zeno W. W., Jones, F. N. & Wicks, D. A. (2007). *Organic Coatings*. Wiley-Interscience. United States of America. pp. 4-6.

# ANEXOS

## ANEXO I. Tabla de superficies selectivas de media y alta temperatura.

TABLA A1.

Mid-Temperature Selective Surfaces <sup>1</sup>								
Rank	Material	Substrate	Fabrication	Absorptance $\alpha$	Emittance $\epsilon$ (100°C)	Stability (°C)		Commercial Product
						Vacuum	Air	
2	TSSS <sup>1</sup>	Al	Paint	0.92	<0.015		<135	Solariselect
2	PbS	Al	Evaporation Pyrolysis	0.93-0.99	0.21-0.10		200	
2	NiCrO <sub>2</sub>	SS <sup>2</sup> Cu/ Polyamide	Sputtering	0.8 0.92-0.93	0.14 0.06		<200 <200	
2	Colored SS	SS	Chemical conv.	0.62-0.93	0.1		<200	SEL, INCO
2	Black nickel NiS-ZnS	Steel Ni coated steel	Electrodeposition	0.88-0.96	0.03-0.10		<200	Maxorb
3	Ni-Sn	Cu	Electrodeposition /Sol-gel	0.92-0.98	0.08-0.25		300	Black Crystal
3	Graphitic films $\alpha$ -C:H /Cr $\alpha$ -C:H	Cu	MF-pulsed	0.92	0.025		250	
		Al	PVD/PECVD	0.876	0.061		250	
3	Ge in silicon Si binder PbS	Cu or SS	Paint	0.91	0.7		300	
				0.83	0.7			
				0.96	0.7			
3	Ag dielectric	Al	Biomimetic sol-gel				300	
3	Black copper BiCu-Cu <sub>2</sub> O:Cu	Cu	Electrodeposition	0.97-0.98	0.02	370	250	
3	Black chrome Cr-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni-Cu	Electrodeposition	0.97	0.09	400	350	MTI ChromeCoat Energie Solaire
		Cu steel						
3	Mo/ Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.95	<0.30		425	
3	TiN <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	Cu	ARE	0.92	0.06	400		Thermomax
2	CuFeMnO <sub>4</sub> /silica	Glass,Si	Sol-gel	0.6	~0.29-0.39			
1	Cr,Fe,Mo,SS,Ta, Ti, W silicides	Bulk Cu	DC reactive sputtering	0.76-0.82	0.02-0.3	400	250	
		Sputtered Cu		0.81-0.86				
1	Cr,Fe,Mo,SS,Ta, Ti, W carbides	Bulk Cu	DC reactive sputtering	0.76-0.81	0.02	400	250	
		Sputtered Cu		0.84-0.90				
3	Ni-NiO <sub>2</sub>	Al	reactive sputtering	0.96	0.10		300	Sunstrip
3	Ni pigmented Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	Anodization	0.85-0.97	0.08-0.21		300-400	TeknoTerm Energi Showa

Rank =Should material be investigated for CSP applications 1= Yes, 2=No, 3=Maybe

TSSS<sup>1</sup>= Thickness-sensitive spectrally selective

SS<sup>2</sup>=stainless steel

TABLA A2.

High-Temperature Selective Surfaces								
Rank	Material	Substrate	Fabrication	Absorbance $\alpha$	Emittance $\epsilon$ (100°C)	Stability (°C)		Commercial Product
						Vacuum	Air	
2	Ni- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> AR	Mo-Ni- SS	RF sputtering	0.94	0.07	500	350-400	
2	Co-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.94	0.04			
3	Mo-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni or Al	RF sputtering	0.96	0.16 (350)	350-500		Solel
1	W- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Steel	RF sputtering	0.97-0.98	0.1-0.07(400)	500		Solel
1	W- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		CVD	0.85	0.04			
1	Pt- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	RF sputtering				600	
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Pt- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0.90-0.98	0.08		600	
	Double					500		
1	Mo- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cu	DC Sputtering	0.96	0.06 (350 <sub>c</sub> )	350-500		TurboSun
2	SS-AlN			0.95	0.10 (350 <sub>c</sub> )	500		
3	Mo-AlN			0.92-0.94	0.08-0.10 (350 <sub>c</sub> )	500		
1	W-AlN							
	Quasicrystals							
1	multilayer	Cu, Si		0.90	0.025	500	400	
1	cermet			0.86-0.92	0.031-0.05	550		
3	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si-Ge/Ag	SS, Al	CVD	0.890	0.0389 (300) 0.0545 (500)		650 (He)	
1	Ni:SiO <sub>2</sub> Cr:SiO	Al, Cu	Reactive DC sputtering	0.90-0.96	0.03-0.14		400-800 (Ar)	
3	Al-AlN <sub>x</sub> -AlN	SS	Reactive DC	0.97	0.10	500		
2	CuO	Cu, SS	Electroplating	0.91	0.18		<400	
1	Ag/CuO/Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / CeO <sub>2</sub> //	SS	Organo-metallic spray	0.9	0.1	700	500	
1	CeO <sub>2</sub> //Ag/Pt/CuO/ Rh/Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> //Ag/Pt			0.86-0.88	0.1	775	550	
1	CeO <sub>2</sub> //CuO/CoO Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> //Pt			0.88-0.92	0.06-0.12	700	500	
	Black cobalt							
1	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Co			0.96-0.92	0.71-0.017		400-650	
3	Ni-Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Co			0.95	0.10			
	Black moly		CVD	0.94	0.30 (500 <sub>c</sub> )	500	350	
1	Mo-MoO <sub>2</sub>							
	Black Tungsten		CVD	0.83	0.15	800		
1	W-WO <sub>x</sub>							
1	Au/TiO <sub>2</sub>	SS	Sol-gel	0.85	0.01 (400 <sub>c</sub> )	>500		
3	Au/MgO	Mo/SS	RF Sputtering	0.90-0.93	0.04-0.1		400	
3	ZrC <sub>x</sub> N <sub>y</sub>	Al		0.85	0.074 (325 <sub>c</sub> )	600	125	
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrC <sub>x</sub> N <sub>y</sub> /Ag			0.91	0.05 (325 <sub>c</sub> )	700	175	
1	ZrO <sub>x</sub> /ZrC <sub>x</sub> /Zr	SS		0.90	0.05 (20)	700		
3	TiN	Cu,Al	DC reactive sputtering		0.14-0.40		500	
1	Ti <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> N			0.80			750-900	
3	M <sub>5</sub> O <sub>4</sub> + M' Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Ni-Mo alloy	Painting Arc plasma	>0.90	>0.45		700 1060	
3	VB <sub>2</sub> , NbB <sub>2</sub> , TaB <sub>2</sub> , TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , LaB <sub>6</sub> , WSi <sub>2</sub> , TiSi <sub>2</sub>	Glass	DC reactive sputtering	0.99	0.95-0.97	2300- 3040 (MP)		
1	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> AR-ZrB <sub>2</sub>	ZrB <sub>2</sub>	CVD	0.88-0.93	0.08 to 0.10		500	
3	Masterbeads <sup>®</sup> "paint"			0.93			<1000	
2	C-Textured Cu	Cu		0.9	0.04 (20)	400		
2	Textured Ni	Ni		0.92±0.2	0.09±0.02		<300	
1	Textured SS			0.93±0.02	0.22±0.02	>440		
3	Textured Cr	SS		0.80-0.90	0.10-0.30		<500	
1	W whiskers	Cr		0.98	>0.26	550		
1	Mo,Rh,Pt,W,HfC,Au						>600	
1	NiO <sub>x</sub> ,CoO <sub>x</sub>						800	

## ANEXO II. Arreglo Experimental.



**Termómetros**



**Arreglo de  
termopares tipo K**



**Placa  
Metálica**



**Lámpara  
incandescente de 200  
Watts**

## ANEXO III. Instrumentación.

Instrumento	Especificaciones
	<p>Piranómetro portátil con datalogger LP02</p>
	<p>Termopares tipo "K", sensor de temperatura</p>
	<p>Termómetro digital "anaheim scientific" modelo h 240, con 4 terminales para sensor de temperatura.</p>
	<p>Termómetro con dos terminales para sensor de temperatura UT-325. Resolución: 0.1 °C</p>
	<p>Balanza analítica Dever instrument modelo tp-214.</p>

## ANEXO IV. Perfil general de temperaturas

Perfil general de temperaturas									
Tiempo	100- Acrílico	80- acrílico- 20- hollín	60%- Acrílico- 40%- Hollín	50%- Acrílico- 50%- Hollín	40%- Acrílico- 60%- Hollín	20%- Acrílico- 80%- Hollín	100%- Hollín	Alta- Temperatura	Placa sin recubrimiento
0	19.7	20.1	18	19.8	20	20.8	18.5	20.4	22
1	31.35	39.4	34.14	32.41	30.11	29.08	29.64	34.73	26.34
2	40.97	45.9	45.08	44.1	40.87	38.16	40.44	50.63	30.07
3	48.32	53.88	53.15	51.91	47.49	47.67	48.18	57.97	32.17
4	53.32	59.44	59.92	58.47	53.77	53.23	53.89	63.82	33.77
5	57.08	64.1	66.99	63.28	58.44	55.37	57.57	67.08	35.27
6	60.3	66.92	69.37	67.91	61.55	59.35	60.61	69.76	36.67
7	62.56	69.92	72.61	70.04	64.29	61.07	62.6	72	38.07
8	64.32	71.39	74.32	72.01	65.9	64.26	64.68	73.85	38.97
9	65.58	72.91	76.36	73.83	67.02	65.71	65.71	75.25	39.73
10	66.59	74.17	77.57	75.17	68.07	66.74	67.22	76.07	40.56
11	67.64	74.76	78.52	76.13	69.07	67.58	68.16	77.23	41.08
12	68.39	75.44	79.33	76.97	69.53	68.44	68.4	77.79	41.58
13	68.55	75.59	79.87	77.41	70.14	69.73	69.77	78.02	41.61
14	68.98	76.43	80.14	77.83	70.08	70.48	69.7	78.38	42.14
15	69.33	76.82	80.52	78.47	71.04	70.04	69.82	78.67	42.7
16	68.65	76.73	80.4	77.91	71.03	70.43	70.24	78.82	42.7
17	69.44	77.01	80.49	78.62	70.83	71.11	70.39	79.42	43.09
18	69.98	77.13	81.01	78.76	71.46	72.01	70.65	79.72	43.26
19	69.81	76.98	80.93	79.01	71.56	71.5	70.9	79.61	43.62
20	69.8	77.49	81.27	79.06	71.73	72.25	70.91	80.03	43.58
21	70.05	76.99	80.73	78.56	72.22	71.99	71.03	80.21	44.02
22	70.35	77.54	81.36	79.16	71.96	71.64	71.38	80.11	43.92
23	70.3	77.77	81.58	79.5	72.01	71.18	70.77	80.19	44.15
24	70.66	77.73	81.47	79.69	72.62	71.3	71.58	80.64	44.08
25	70.96	77.67	81.83	79.64	72.81	71.81	71.56	80.79	44.33
26	70.51	78.1	80.36	79.77	72.5	71.58	71.48	80.61	44.23
27	70.55	78.37	81.56	79.63	72.44	71.3	71.81	80.69	44.4
28	70.71	78.03	80.22	79.7	73.14	71.99	71.81	80.15	44.39
29	70.19	78.31	81.45	79.96	72.58	71.35	71.93	80.68	44.63
30	70.69	78.47	80.82	79.99	72.87	71.35	72.12	80.68	44.74

### ANEXO V. Prueba de potencia de cocción





## Recubrimiento con hollín.

Tiempo (min)	$T_{agua}$ (°C)	Radiación ( $\frac{W}{m^2}$ )	$T_{ambiente}$ (°C)	Potencia de Cocción	Diferencia ( $T_{agua} - T_{ambiente}$ )	Error total						Suma de errores	
						Err-masa-1	Error-Rad_1	Error-temp-1	Error_Rad_2	Error-temp-2			
6	29	700	31.7	218.887607	-2.7	0.51988466	1.93574074	0.12378206	1.93574074	0.12378206	0.12378206	4.63893026	
12	34.1	730	31.1	181.95963	3	0.58386977	1.92787188	0.1384515	1.92787188	0.1384515	0.1384515	4.71651653	
18	38.4	740	34.2	204.354419	4.2	0.61865492	1.9161878	0.14581092	1.9161878	0.14581092	0.14581092	4.74265238	
24	44.7	736	32.3	216.529222	12.4	0.51722377	1.88571166	0.11996575	1.88571166	0.11996575	0.11996575	4.52857858	
30	49.7	749	35.7	181.028319	14	0.51275733	1.85015532	0.1166873	1.85015532	0.1166873	0.1166873	4.44644258	
36	54.3	760	32.7	179.465066	21.6	0.52216513	1.82757796	0.11737816	1.82757796	0.11737816	0.11737816	4.41207738	
42	59.4	778	36.1	182.757796	23.3	0.4843032	1.80325658	0.10741833	1.80325658	0.10741833	0.10741833	4.30565302	
48	64.3	779	33.7	169.506119	30.6	0.41132979	1.77735096	0.08992219	1.77735096	0.08992219	0.08992219	4.1458761	
54	68.8	799	31.5	143.965428	37.3	0.33515761	1.77735096	0.07326993	1.77735096	0.07326993	0.07326993	4.0363994	
60	72.4	802	32.3	117.305163	40.1	0.39168504	1.85256438	0.08925115	1.85256438	0.08925115	0.08925115	4.2753161	
66	75.4	799	34.9	137.089764	40.5	0.46973975	1.80669136	0.10438661	1.80669136	0.10438661	0.10438661	4.29189569	
72	79.8	737	37.9	164.408914	41.9	0.42309271	1.68275511	0.08757093	1.68275511	0.08757093	0.08757093	3.9637448	
78	84.5	838	35.2	148.08245	50.9	0.32868463	1.69175915	0.06839454	1.69175915	0.06839454	0.06839454	3.84899202	
84	88.6	853	32.8	115.039622	55.8	0.2404197	1.71728358	0.05078268	1.71728358	0.05078268	0.05078268	3.77655221	
90	91.3	829	31.8	84.1468953	51.3	0	1.71108773	0	1.71108773	0	0	3.42217545	
96	93.5	828	36.5	0	57	0.03911058	1.71108773	0.00823133	1.71108773	0.00823133	0.00823133	3.47774869	
102	91.3	835	38.8	13.6887018	52.5	0.12665242	1.70493642	0.02655982	1.70493642	0.02655982	0.02655982	3.58964491	
108	94.3	828	34.9	44.328347	59.4	-0.01929997	1.68874712	-0.0040089	1.68874712	-0.0040089	-0.0040089	3.35017647	
114	93.9	841	39.5	-6.75498846	54.4	0	1.68974993	0	1.68974993	0	0	3.37949987	
120	93.9	844	36.7	0	57.2	0	1.68974993	0	1.68974993	0	0	3.37949987	
						Ps	127.8						
						Error	4.03641862						
						Total	4.03641862						

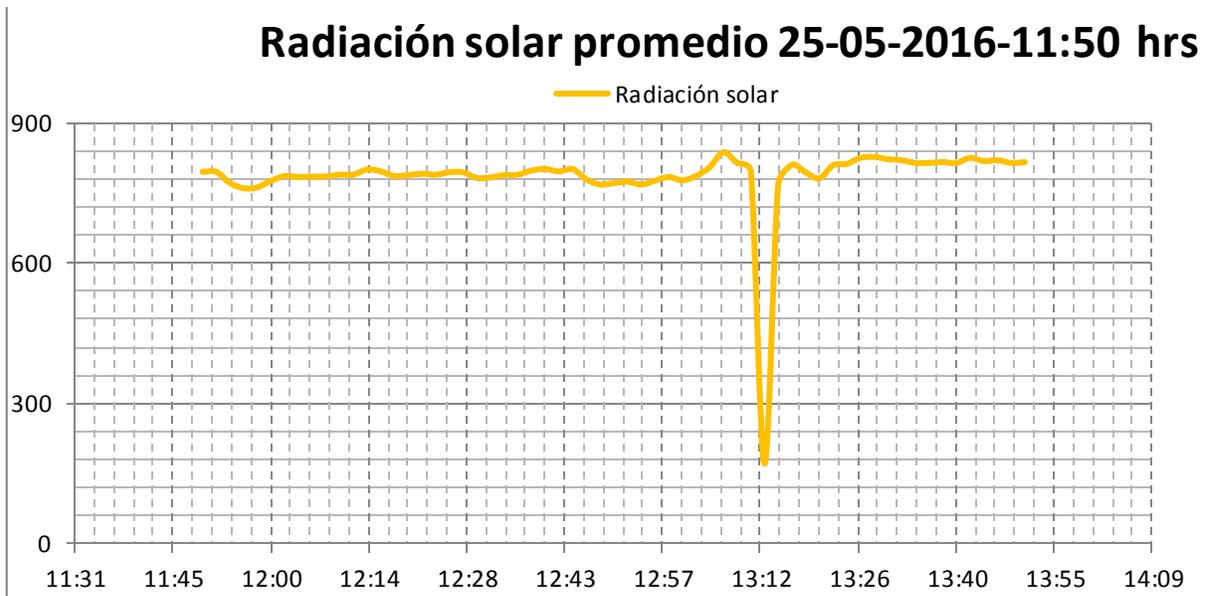
### ANEXO VII. Irradiación solar

#### Radiación solar promedio 25-05-2016-11:50 horas

Tiempo	Radiación solar
11:50	795
11:52	795
11:54	771
11:56	760
11:58	762
12:00	776
12:02	786
12:04	784
12:06	785
12:08	785
12:10	789
12:12	789
12:14	800
12:16	796
12:18	786
12:20	788
12:22	791
12:24	789
12:26	794
12:28	794

12:30	782
12:32	783
12:34	788
12:36	789
12:38	798
12:40	801
12:42	796
12:44	801
12:46	779
12:48	768
12:50	771
12:52	774
12:54	768
12:56	776
12:58	784
13:00	777
13:02	786
13:04	805
13:06	837
13:08	814
13:10	797

13:12	171
13:14	768
13:16	810
13:18	794
13:20	781
13:22	809
13:24	812
13:26	825
13:28	827
13:30	822
13:32	820
13:34	814
13:36	814
13:38	816
13:40	814
13:42	825
13:44	818
13:46	820
13:48	814
13:50	816

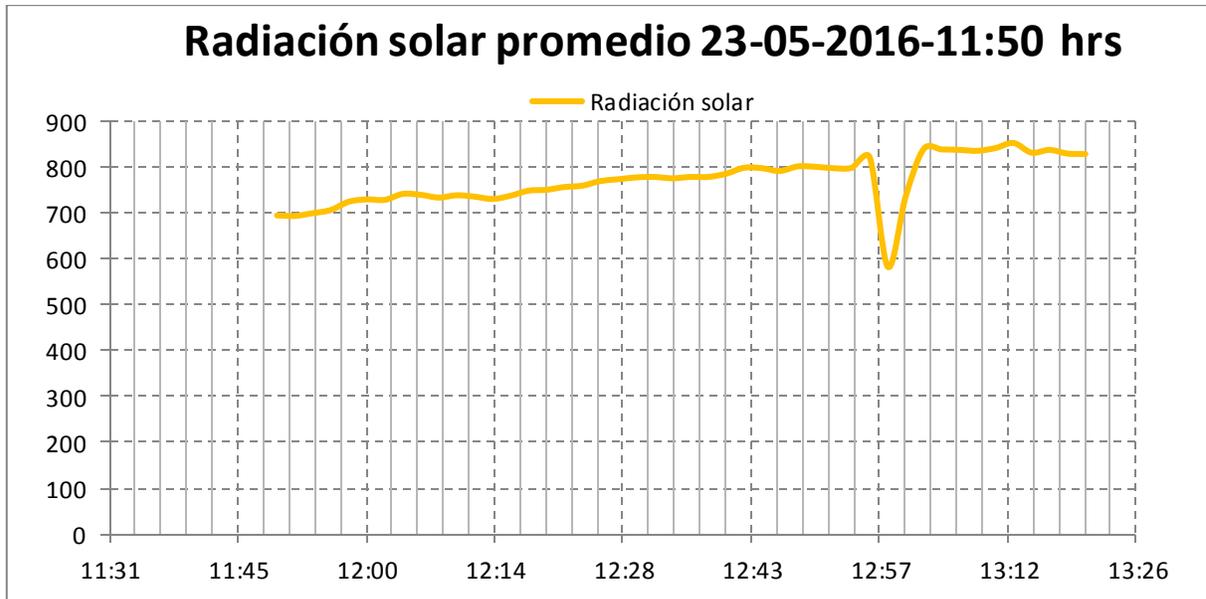


## Radiación solar promedio 23-05-2016-11:50 horas

Tiempo	Radiación solar
11:50	695
11:52	694
11:54	700
11:56	707
11:58	725
12:00	730
12:02	729
12:04	742
12:06	740
12:08	734
12:10	739
12:12	736
12:14	731
12:16	738
12:18	749

12:20	751
12:22	757
12:24	760
12:26	770
12:28	774
12:30	778
12:32	779
12:34	776
12:36	779
12:38	779
12:40	786
12:42	799
12:44	798
12:46	792
12:48	802
12:50	801

12:52	798
12:54	799
12:56	821
12:58	583
13:00	737
13:02	840
13:04	839
13:06	838
13:08	836
13:10	842
13:12	853
13:14	832
13:16	838
13:18	830
13:20	829

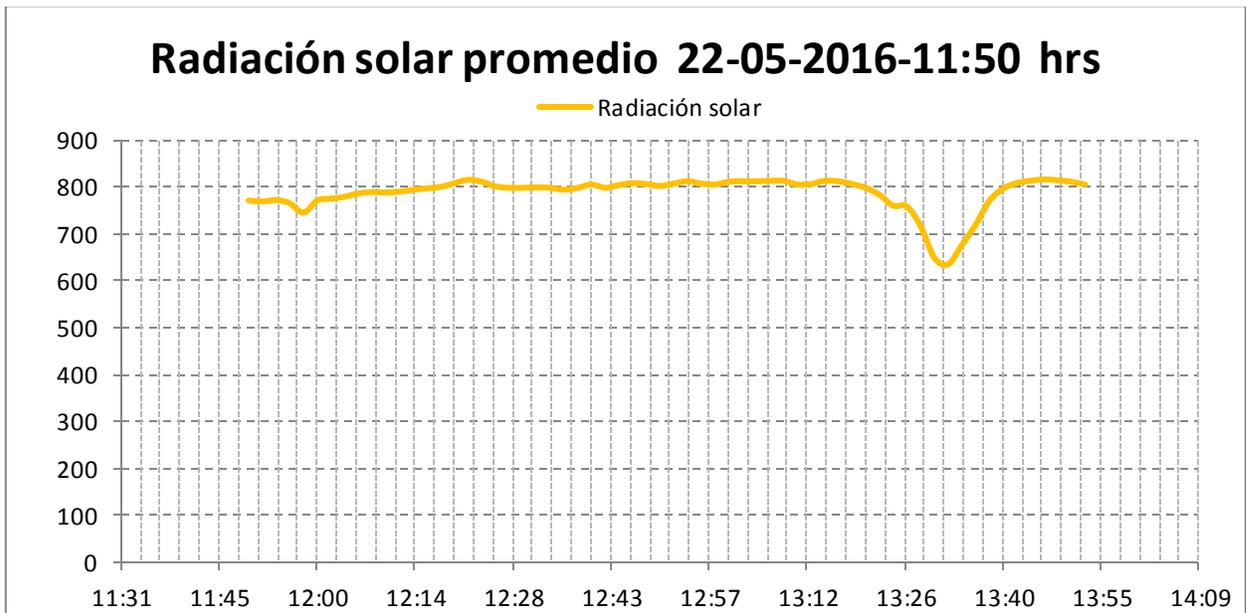


**Radiación solar promedio 22-05-2016-11:50 horas**

Tiempo	Radiación solar
11:50	771
11:52	769
11:54	772
11:56	765
11:58	745
12:00	771
12:02	775
12:04	779
12:06	786
12:08	789
12:10	788
12:12	790
12:14	794
12:16	797
12:18	800
12:20	808
12:22	815
12:24	811
12:26	801
12:28	798

12:30	798
12:32	799
12:34	798
12:36	794
12:38	798
12:40	805
12:42	798
12:44	804
12:46	808
12:48	806
12:50	802
12:52	807
12:54	812
12:56	807
12:58	805
13:00	811
13:02	812
13:04	812
13:06	813
13:08	813
13:10	805

13:12	806
13:14	813
13:16	812
13:18	806
13:20	798
13:22	783
13:24	760
13:26	758
13:28	716
13:30	649
13:32	635
13:34	676
13:36	719
13:38	770
13:40	796
13:42	808
13:44	813
13:46	816
13:48	814
13:50	811
13:52	805

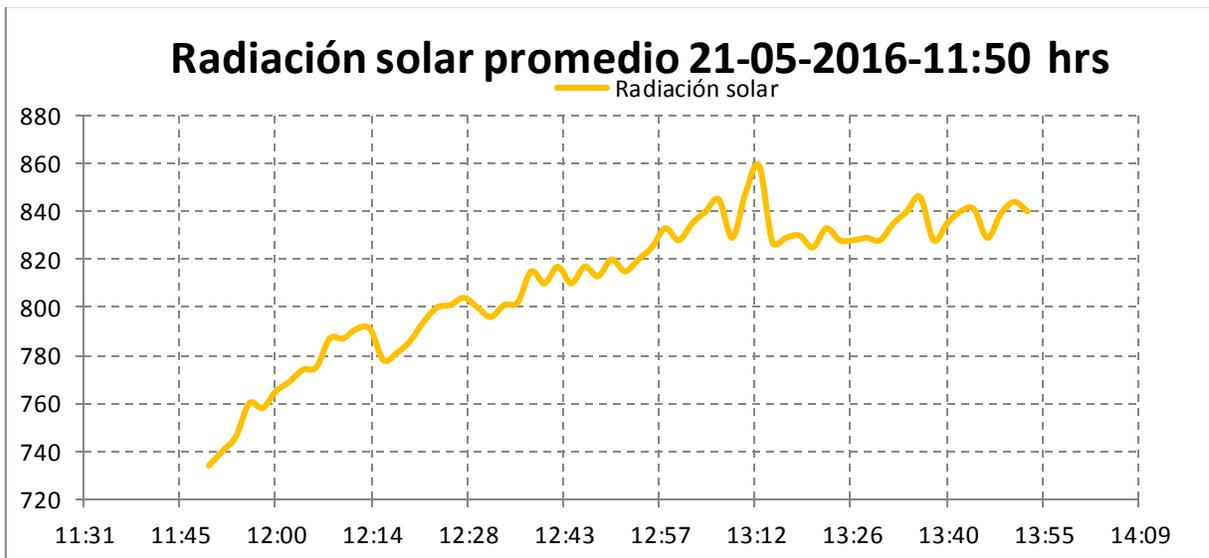


**Radiación solar promedio 21-05-2016-11:50 horas**

Tiempo	Radiación solar
11:50	734
11:52	740
11:54	746
11:56	760
11:58	758
12:00	765
12:02	769
12:04	774
12:06	775
12:08	787
12:10	787
12:12	791
12:14	791
12:16	778
12:18	781
12:20	786
12:22	794
12:24	800
12:26	801
12:28	804

12:30	800
12:32	796
12:34	801
12:36	802
12:38	815
12:40	810
12:42	817
12:44	810
12:46	817
12:48	813
12:50	820
12:52	815
12:54	820
12:56	825
12:58	833
13:00	828
13:02	835
13:04	840
13:06	845
13:08	829
13:10	848

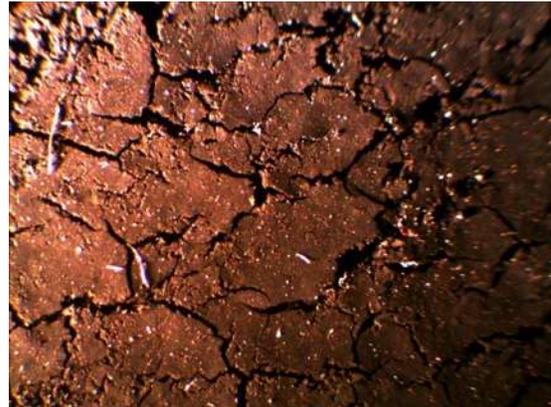
13:12	859
13:14	827
13:16	829
13:18	830
13:20	825
13:22	833
13:24	828
13:26	828
13:28	829
13:30	828
13:32	835
13:34	840
13:36	846
13:38	828
13:40	835
13:42	840
13:44	841
13:46	829
13:48	839
13:50	844
13:52	840



## ANEXO VIII. Uniformidad de las superficies



100% hollín



60% Acrílico-40% hollín



50% acrílico-50% hollín



100% acrílico



100% alta temperatura

## ANEXO IX. Datos de Rendimiento térmico.

Tiempo (X)	$\Delta X/2$	K	F(x1)-Rad. Solar	A-1	F(x2)-Rad. Solar	A-2	T_agua-Hollín	T_agua ALT-TEMP
2	60	1	795	47700	695	41700	25.9	26.7
4	60	2	795	95400	694	83280	27.5	26.9
6	60	2	771	92520	700	84000	29	27.9
8	60	2	760	91200	707	84840	30.5	29.2
10	60	2	762	91440	725	87000	32.7	30.1
12	60	2	776	93120	730	87600	34.1	31.6
14	60	2	786	94320	729	87480	35.7	32.9
16	60	2	784	94080	742	89040	37.9	34.4
18	60	2	785	94200	740	88800	38.4	34.9
20	60	2	785	94200	734	88080	41.5	37.6
22	60	2	789	94680	739	88680	41.7	38.5
24	60	2	789	94680	736	88320	44.7	39.7
26	60	2	800	96000	731	87720	46.3	41.5
28	60	2	796	95520	738	88560	48.1	42.7
30	60	2	786	94320	749	89880	49.7	44
32	60	2	788	94560	751	90120	51.7	45.2
34	60	2	791	94920	757	90840	52.7	46.4
36	60	2	789	94680	760	91200	54.3	47.6
38	60	2	794	95280	770	92400	56.4	48.3
40	60	2	794	95280	774	92880	57.8	49.7
42	60	2	782	93840	778	93360	59.4	51
44	60	2	783	93960	779	93480	61	52.8
46	60	2	788	94560	776	93120	62.5	53.9
48	60	2	789	94680	779	93480	64.3	55.6
50	60	2	798	95760	779	93480	65.7	57.6
52	60	2	801	96120	786	94320	67.2	59.1
54	60	2	796	95520	799	95880	68.8	60.4
56	60	2	801	96120	798	95760	69.4	61.6
58	60	2	779	93480	792	95040	71.7	62.6
60	60	2	768	92160	802	96240	72.4	63.7
62	60	2	771	92520	801	96120	74.6	65.2
64	60	2	774	92880	798	95760	75	66.3
66	60	2	768	92160	799	95880	75.4	67.6
68	60	2	776	93120	821	98520	76.9	68.8
70	60	2	784	94080	583	69960	78.7	69.6
72	60	2	777	93240	737	88440	79.8	70.9
74	60	2	786	94320	840	100800	81.7	71.7
76	60	2	805	96600	839	100680	83.2	72.8
78	60	2	837	100440	838	100560	84.5	73.5
80	60	2	814	97680	836	100320	85.8	74.6
82	60	2	797	95640	842	101040	87.4	74.5
84	60	2	171	20520	853	102360	88.6	74.7
86	60	2	768	92160	832	99840	90.1	75
88	60	2	810	97200	838	100560	90.5	76
89	60	2	794	95280	830	99600	91	77.5
90	60	2	781	93720	829	99480	91.3	78.6
92	60	2	809	97080				80
94	60	2	812	97440				81.3
96	60	2	825	99000				82.2
98	60	2	827	99240				83.5
100	60	2	822	98640				84.4
102	60	2	820	98400				85.8
104	60	2	814	97680				86.4
106	60	2	814	97680				87.2
108	60	2	816	97920				88.1
110	60	2	814	97680				89.2
112	60	2	825	99000				90.7
114	60	2	818	98160				91.4
			A1-Total	5E+06	A2-Total	4E+06		
Rendimiento térmico R. Hollín				<b>0.4486</b>	Rendimiento térmico P-Alta Temp.			<b>0.3462</b>

## ANEXO X. Datos del análisis térmico.

Conductividad térmica (w/m°C)		237	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2700	Análisis térmico de flujo transitorio				
difusividad térmica (m <sup>2</sup> /s)		0.0000975	volumen (m <sup>3</sup> )	0.00005					
Longitud característica m		0.00115	calor específico (j/kg°C)	900					
tiempo (s)		30	área superficial (m <sup>2</sup> )	0.005					
$\Delta T(0)$ [°C]	$(T_{-0-T_t})$ [°C]	Pendiente	Recubrimiento hollín	Coeficiente h (w/m <sup>2</sup> °C)	$\Delta T(t)$ [°C]	q [j]	w (w)		
22.86	-22.74	0.1728	Placa sin recubrimiento	483.0424615	0.12814263	2762.91	0.309491656		
50.54	-51.2	0.2688	0	751.3993846	0.015903201	6220.8	0.059748276		
55.35	-58.37	0.2819	20	788.0189231	0.011756802	7091.955	0.046322911		
63.2	-63.83	0.2802	40	783.2667692	0.0141266	7755.345	0.055324484		
60.18	-60.19	0.262	50	732.3907692	0.02322189	7313.085	0.085037488		
50	-53.14	0.2589	60	723.7250769	0.02117409	6456.51	0.076621101		
52.11	-51.45	0.2368	80	661.9470769	0.042824576	6251.175	0.141738015		
52.93	-53.62	0.2647	100	739.9383077	0.018835164	6514.83	0.069684298		
59.06	-60.39	0.309	Alta temperatura	863.7738462	0.005563955	7337.385	0.024029993		