



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

"Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez"

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA FÍSICA

"DESARROLLO DE DIODO TÉRMICO PARA APLICACIONES
TERMOSOLARES"

TESIS

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

PRESENTA:
HERMINIO REBOLLO SANDOVAL

ASESOR:
DOCTOR EN FÍSICA
LUIS MARIANO HERNÁNDEZ RAMÍREZ

MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DE 2026



AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, hoy Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo otorgado para la realización de los estudios de posgrado.

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Objetivo general.....	6
1.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Hipótesis.....	6
2. MARCO TEORICO.....	7
2.1. Energía solar térmica.....	7
2.2. Propiedades térmicas de materiales.....	8
2.3. Mecanismos de transferencia de calor.....	10
2.3.1. Conducción.....	10
2.3.2. Convección.....	14
2.3.3. Radiación.....	15
2.4. Recubrimientos termoconvertidores.....	16
2.5. Recubrimientos termoconvertidores de bajo impacto ambiental.....	17
2.6. Cosecha y almacenamiento de energía térmica.....	20
2.6.1. Tipos de sistemas de almacenamiento de energía térmica.....	20
2.7. Diodo térmico.....	22
2.7.1. Aplicación de diodo térmico para el almacenamiento de energía térmica.....	32
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	34
3.1. Métodos utilizados para la determinación de la conductividad térmica.....	35
3.2. Procedimiento experimental.....	38
3.3. Determinación de la conductividad térmica del hollín.....	39
3.4. Estimación de la rectificación térmica.....	40
3.5. Implementación del diodo térmico en un sistema solar de pequeña escala.....	41
4. RESULTADOS.....	44
4.1. Conductividad térmica de los recubrimientos de resina-hollín.....	44
4.2. Pruebas de rectificación térmica.....	46
4.3. Aplicación del recubrimiento de hollín como diodo térmico en un sistema solar de pequeña escala.....	48
5. CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS.....	52

RESUMEN

Hollín de biomasa forestal y resina de pino fue usada para la elaboración de un recubrimiento depositado sobre un sustrato de aluminio, el cual es capaz de permitir el flujo de calor en una dirección preferencial. Un rectificador térmico, también conocido como diodo térmico, es un dispositivo que presenta una resistencia térmica distinta dependiendo de la dirección del flujo de calor, presentando una resistencia térmica alta en la dirección negativa, impidiendo el paso de calor, y una resistencia térmica baja en la dirección positiva, permitiendo el flujo de calor. El presente estudio consta de tres etapas, I) la determinación de la conductividad térmica, II) la estimación de la rectificación térmica, III) la implementación del recubrimiento en un sistema solar de pequeña escala para determinar si se presenta un efecto de diodo térmico. Los resultados obtenidos muestran una conductividad térmica entre 0.070 y 0.095 W/mK para los recubrimientos resina/hollín, la cual está relacionada con la concentración de hollín presente en las muestras, obteniéndose la mayor conductividad para las muestras al 50 y 100%, pero inviables estructuralmente para su uso. Mientras que los factores de rectificación, para las muestras con mejor estabilidad estructural, fueron de 35% para la muestra con una sola capa al 30% hollín, y de 54% para la muestra con doble capa, una al 10% y otra al 30% hollín. Para la implementación en un sistema de pequeña escala, se optó por el recubrimiento que presentó la mayor rectificación térmica, donde a través de la carga y descarga del sistema, se obtuvo una eficiencia de recolección de 34% y una eficiencia de retención del 17%, en contraste la pintura negra de alta temperatura alcanzó valores de 31.4% de recolección y de 8.4% de retención.

Palabras clave: conductividad térmica, diodo térmico, energía solar, hollín, recubrimiento.

ABSTRACT

Soot from forest biomass and pine resin was used to make a coating deposited on an aluminum substrate, which is able to allow heat flow in a preferential direction. A thermal rectifier, also known as a thermal diode, is a device that exhibits a different thermal resistance depending on the direction of heat flow, exhibiting a high thermal resistance in the negative direction, preventing the passage of heat, and a low thermal resistance in the positive direction, allowing the flow of heat. The present study consists of three stages: I) the determination of thermal conductivity, II) the estimation of thermal rectification, III) the implementation of the coating in a small-scale solar system to determine if a thermal diode effect occurs. The results obtained show a thermal conductivity between 0.070 and 0.095 W/mK for the resin/soot coatings, which is related to the soot concentration present in the samples. The highest conductivity was obtained for the 50% and 100% soot samples, but these were structurally unsuitable for use. Meanwhile, the rectification factors for the samples with the best structural stability were 35% for the sample with a single layer at 30% soot, and 54% for the sample with two layers, one at 10% and the other at 30% soot. For implementation in a small-scale system, the coating that presented the greatest thermal rectification was chosen, where through the loading and unloading of the system, a collection efficiency of 34% and a retention efficiency of 17% were obtained, in contrast the high-temperature black paint reached values of 31.4% collection and 8.4% retention.

Keywords: thermal conductivity, thermal diode, solar energy, soot, coating.

1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho que el progreso y desarrollo de las sociedades está vinculado de manera directa al consumo de energía, así de esta manera al crecer las ciudades y países del mundo, la demanda de energía se ha incrementado como se muestra en la figura 1.1. Esto a su vez ha traído consigo el incremento de la contaminación, provocando problemas medioambientales y de salud. Por otra parte, la mayoría de los combustibles que se utilizan para la generación de energía son no renovables, de modo que tarde o temprano se agotaran, por ello la necesidad de encontrar alternativas energéticas a corto, mediano y largo plazo para hacer frente a esta problemática que aqueja a las sociedades modernas.

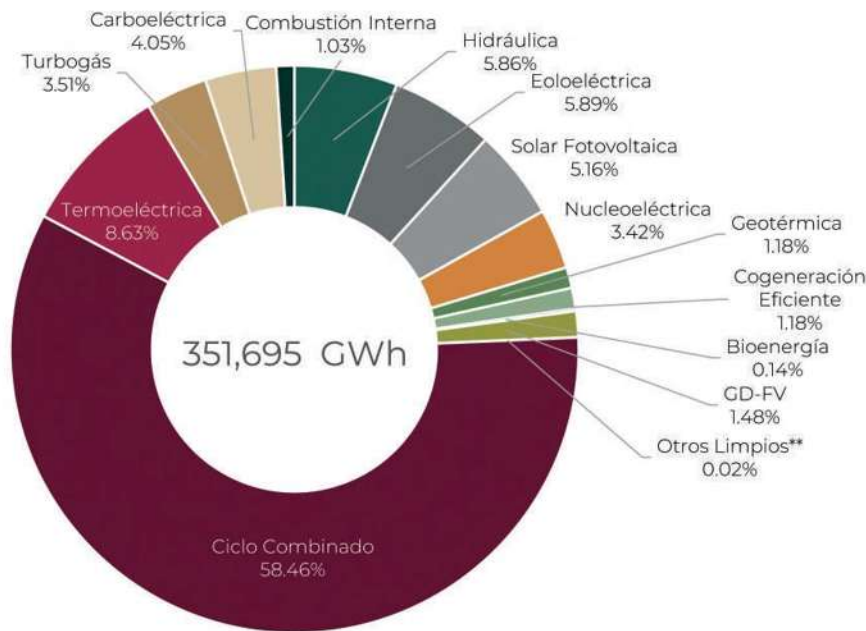


Figura 1.1. Generación de energía de acuerdo a su fuente en México en 2024 [1].

Las fuentes renovables de energía se definen como aquellas que no producen contaminación durante su generación, además de que no comprometen los recursos naturales para generaciones futuras [2]. De tal manera que se hace necesario e indispensable la investigación y desarrollo de dispositivos que ayuden en la producción de energías limpias y renovables. Existen diferentes tipos de energías renovables, dentro de las cuales encontramos la energía solar, que es la más abundante y relativamente se puede considerar como una fuente inagotable de energía [3]. Dentro de la energía solar encontramos la energía fotovoltaica y la térmica, la energía solar térmica es la que utilizan los dispositivos termosolares. La optimización de los dispositivos termosolares es indispensable, tanto para su buen funcionamiento como para generar una mayor confianza y aceptación que ayuden a un mayor uso e inversión en este sector. Se han realizado mejoras en cuanto a su capacidad de absorción

de radiación solar con el uso de recubrimientos, tanto para los que requieren una alta reflectancia como para los que solo necesitan una alta absorbancia.

Otra problemática es la del almacenamiento de la energía cosechada, ya que se requiere que no solo funcionen durante las horas de sol, para esto se han desarrollado diferentes tecnologías de almacenamiento de energía solar térmica [4]. Existen diferentes propuestas para llevar a cabo el almacenamiento de energía solar térmica, sin embargo, esto se realiza de manera indirecta, es decir primero se capta la energía y después pasa por un sistema que la almacena, como puede ser una sustancia sólida o líquida [5], otra forma que ha surgido en los últimos años es la de la utilización del concepto de diodo térmico [6], en estos sistemas se trata de captar la energía solar térmica y almacenarla de forma directa sin pasar por el uso de una sustancia de intercambio.

Desarrollar un dispositivo que solo permita el flujo de energía térmica en una sola dirección, rectificador térmico, supondría un gran avance en la optimización de los sistemas de almacenamiento de energía solar térmica y en general de los dispositivos termosolares. Es por lo anterior que en este trabajo se propone el desarrollo de un recubrimiento termoconversor capaz de captar y almacenar la energía solar térmica, haciendo uso del concepto de diodo térmico, Para lograrlo se hace uso del hollín de biomasa forestal, ya que ha demostrado tener buenas propiedades de absorción de radiación solar térmica.

1.1. Objetivo general

Desarrollar un recubrimiento termoconversor con materiales de bajo impacto ambiental, hollín y resina de pino, que presente el fenómeno de diodo térmico para mejorar la captación y almacenaje de energía solar térmica en dispositivos termosolares.

1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar los materiales que conformarán el recubrimiento termoconversor en base a sus propiedades térmicas.
- Variar el espesor del recubrimiento
- Variar la concentración de los materiales constituyentes del recubrimiento
- Implementar el diodo en el circuito térmico compuesto por la resistencia y el capacitor en un sistema a pequeña escala.

1.3. Hipótesis

En base a los conocimientos que se tienen de las propiedades térmicas, ópticas y estructurales del hollín de resina de pino, se plantea demostrar que se puede diseñar y construir un diodo térmico, el cual puede, primeramente, tener un comportamiento igual o similar a los que se encuentran en la literatura, y también implementarse en dispositivos termosolares para mejorar la captación y almacenaje de energía solar térmica.

2. MARCO TEORICO

2.1. Energía solar térmica

Se puede definir la energía solar térmica como aquella radiación que nos proporciona el sol, la cual se puede aplicar en la industria, comercio e incluso en la generación de electricidad [3] Existe una clasificación de las aplicaciones de la energía termosolar, la cual está en función de la temperatura a la cual operan [7], siendo estas de baja, media y alta temperatura.

Tabla 2.1. Clasificación de aplicaciones de acuerdo a su temperatura

Categoría	Rango de temperatura	Ejemplo de aplicación
Baja	Menor a 100 °C	Calentadores de agua domestica
Media	100-400 °C	Concentradores solares de uso industrial
Alta	Mayor a 400 °C	Generación de electricidad

La tabla 1.1 muestra de forma resumida la clasificación de los dispositivos que utilizan energía solar térmica de acuerdo a su temperatura de operación. El rango de radiación en el que operaran los dispositivos termosolares es de los 200 nm a los 2500 nm. De la energía emitida por el sol solo alrededor de 1.366 kWm⁻² es interceptada por la Tierra. Este valor se conoce como la constante solar y su valor fluctúa ± 3 % debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol [8]. Debido a esto, el Sol se considera la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta y se considera que treinta minutos de radiación solar impactando en la Tierra es igual a la demanda energética mundial por un año.

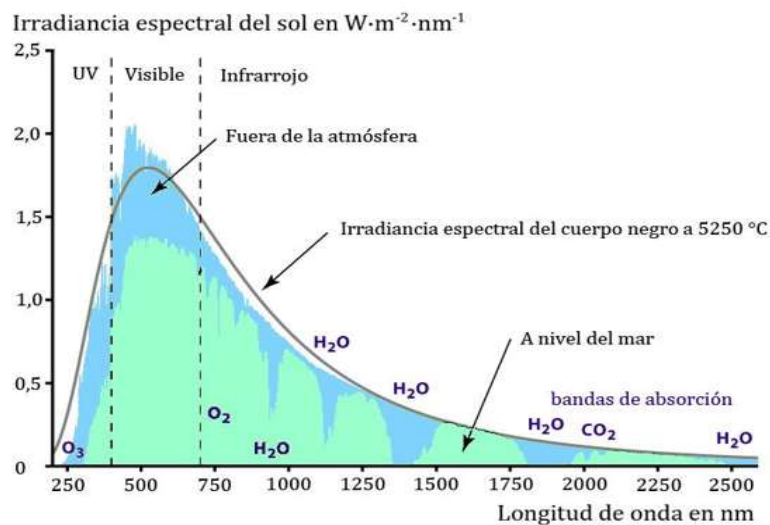


Figura 2.1. Espectro de radiación solar [9].

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

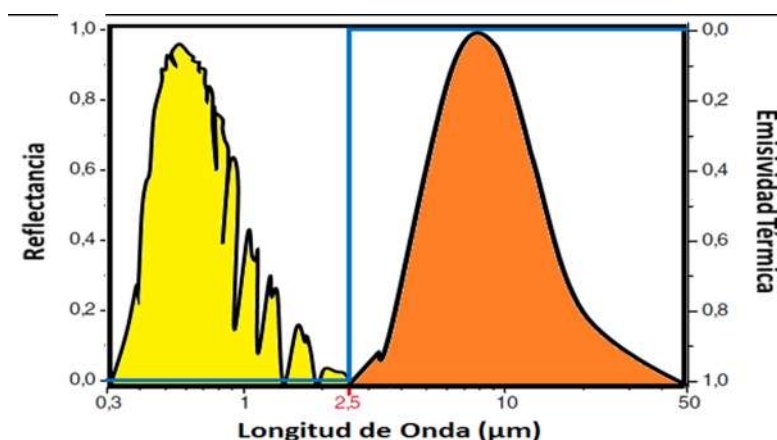


Figura 2.2. Reflectancia y emisividad térmica para un recubrimiento selectivo ideal [10].

Al incidir los fotones que componen la radiación solar sobre una superficie, se produce una excitación de los electrones de los átomos que la componen. El decaimiento del electrón excitado a su estado normal se produce liberando la energía absorbida, que es transferida a los vínculos interatómicos, es decir generan vibraciones en toda la estructura del sólido. En definitiva, el fotón absorbido es utilizado para aumentar la temperatura del cuerpo a través de las vibraciones de los átomos que lo componen [11]. De esta forma la energía solar es convertida en energía térmica al incidir sobre una superficie absorbente, proceso que se denomina conversión fototérmica.

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

2.2. Propiedades térmicas de materiales

El manejo de las propiedades térmicas de los materiales es de gran importancia a la hora de desarrollar un dispositivo para un determinado fin, ya que el control de la temperatura juega un papel importante en el comportamiento de los materiales que constituyen un determinado dispositivo, ya sea que se quiera aislar o permitir el flujo de calor a través de un material para un determinado propósito.

Una comprensión de las propiedades térmicas es de utilidad para determinar la falla mecánica de materiales como los cerámicos, las barreras térmicas, y las fibras cuando cambia la

temperatura. En los materiales metálicos, los electrones transfieren el calor. En los materiales cerámicos, la conducción de calor corresponde a los fonones. En otras aplicaciones, como son las barreras térmicas lo que se desea es minimizar la transferencia de calor a través del material. Esta transferencia de calor es importante en muchas aplicaciones, que van desde los vasos para bebidas calientes hasta complejos recubrimientos de los vidrios para construir edificios que usan eficientemente la energía teniendo un bajo impacto ambiental [12].

La temperatura es la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. De esta manera tenemos que dos objetos están en equilibrio térmico, uno con otro, si se encuentran a la misma temperatura. En sentido inverso, si dos objetos no están en equilibrio térmico uno con otro entonces están a diferentes temperaturas. Dentro de los conceptos de la termodinámica nos encontramos con la distinción entre lo que es la energía interna y el calor, la energía interna es toda la energía de un sistema que se asocia con sus componentes microscópicos, átomos y moléculas, cuando se ve desde un marco de referencia en reposo respecto del centro de masa del sistema, y por el otro lado tenemos que el calor es la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema debida a una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores [13]. Cuando se le agrega energía a un sistema y no hay cambio en las energías cinética o potencial de éste, por lo general tendremos un aumento en la temperatura. Si el sistema consiste de una muestra de una sustancia, se encuentra que la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una masa determinada de la sustancia a cierta cantidad varía de una sustancia a otra.

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

$$C = Qm\Delta T \quad (2.1)$$

El calor específico es en esencia una medida de que tan insensible térmicamente es una sustancia a la adición de energía. Mientras mayor sea el calor específico de un material, más energía se debe agregar a una determinada masa de la sustancia para causar un cambio particular de energía [14]. Es factible relacionar la energía Q transferida entre una muestra de masa m de un material y sus alrededores con un cambio de temperatura como

$$Q = mc\Delta T \quad (2.2)$$

Tenemos que el calor específico de una sustancia no es una constante, sino que varía con la temperatura. Sin embargo, si los intervalos de temperatura no son muy grandes se desprecia la temperatura y podemos tratar a c como una constante.

Al aumentar la temperatura, los átomos vibran con mayor amplitud alrededor de su posición de equilibrio, provocando un incremento en la distancia interatómica de equilibrio, y por tanto haciendo aumentar las dimensiones del material [15]. El cambio de dimensión dL por unidad de longitud y por grado centígrado (o absoluto) de temperatura está dado por la expresión:

$$\alpha = \frac{dL}{LdT} \quad (2.3)$$

Cabe resaltar que la dilatación se logra debido a la función no simétrica de la energía potencial, ya que si los átomos se comportaran como osciladores armónicos perfectos no habría dilatación por más diferencia de temperatura que exista.

2.3. Mecanismos de transferencia de calor

2.3.1. Conducción

La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de calor que se produce debido a un gradiente de temperatura, en sólidos, líquidos o gases el proceso de transmisión de energía es mediante comunicación molecular directa. La segunda ley de la termodinámica nos indica que la transferencia de calor se realiza de la zona de mayor temperatura a la de menor temperatura.

$$Q = k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

Donde Q es el flujo de calor por unidad de área en la dirección x , k es la conductividad térmica del material, la cual no es una constante, sino que depende de la temperatura, aunque en muchas aplicaciones se puede suponer constante. las unidades de Q son W/mK en el Sistema Internacional (SI) de unidades [16]. Esta ecuación se conoce como la ley de Fourier, en la tabla 2.2 se presentan algunos materiales y sus conductividades térmicas.

Tabla 2.2. Algunos materiales y sus conductividades térmicas [13].

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

Si tenemos una placa de espesor L y área A , podemos calcular el flujo de calor que se transfiere a través de la placa

$$Q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.5)$$

esta ecuación indica que el flujo de calor es proporcional al área, a la conductividad térmica del material y a la diferencia de temperaturas. Por otra parte, tenemos que el flujo de calor es inversamente proporcional al espesor de la placa. La expresión (2.5) se puede extender a varias placas. Siguiendo con el fenómeno conductivo, se puede hacer una analogía termoeléctrica, la cual nos puede ayudar a entender de mejor manera los procesos de transferencia de calor a través de materiales.

Como se ha mencionado anteriormente, el calor pasa de una temperatura alta a una más baja a través de un medio que impide el flujo de calor, esto se puede modelar como una resistencia térmica. La capacidad de un material para almacenar energía interna está determinada por su capacitancia térmica, C . Cuanto mayor sea la capacitancia de un material, menor es el cambio en su temperatura cuando se agrega una cantidad de calor o es eliminado de él [17].

Se puede hacer un modelamiento para el flujo de calor que ocurre en un material usando una analogía entre un circuito eléctrico y un sistema térmico.

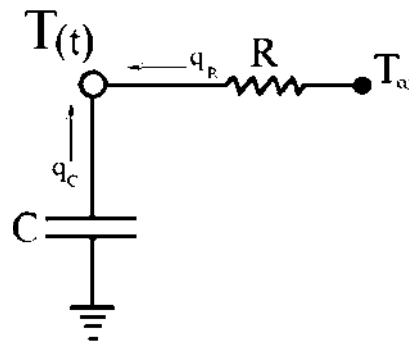


Figura 2.3. Circuito RC [17]

Usando la ley de Kirchoff y la ley de Ohm se puede resolver el circuito de la figura 2.3

$$q_R + q_C = 0 \quad (2.6)$$

Y de la ley de Ohm

$$q_R = \frac{(T_\infty - T)}{R} \quad (2.7)$$

La corriente a través de la resistencia es debida a la diferencia de voltaje, en nuestro caso a la diferencia de temperatura. Cuanto mayor sea la resistencia, menor será el flujo a través de ella. La ecuación $V=IR$ es la Ley Ohm, escrita en la forma de $I=V / R$, que en realidad debería ser $\Delta V=IR$, donde ΔV es la diferencia de voltaje, diferencia de temperatura en nuestra analogía con el caso térmico, a través de la resistencia, y no un valor absoluto en un punto específico del circuito.

Para resolver el circuito de la figura 2.3, primero encontraremos la expresión para q_C , considerando un evento de duración de tiempo Δt , durante el cual fluye una cantidad de carga,

$$\frac{dQ}{dt} = -q_c \quad (2.8)$$

Y la carga almacenada en el capacitor

$$Q = -C(T - T_{ref}) \quad (2.9)$$

Después derivando

$$\frac{dQ}{dt} = -C \frac{dT}{dt} \quad (2.10)$$

De manera que

$$C \frac{dT}{dt} = -q_c \quad (2.11)$$

De tal manera que podemos relacionar la carga que fluye por el capacitor y a través de la resistencia para obtener la siguiente expresión

$$-C \frac{dT}{dt} + \frac{(T_\infty - T)}{R} = 0 \quad (2.12)$$

Solucionando esta ecuación tenemos que

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{\frac{-t}{RC}} \quad (2.13)$$

De la expresión (2.13) podemos continuar haciendo una relación análoga con el caso térmico, de tal manera que podemos modelar la carga y descarga de un capacitor en un circuito compuesto por una resistencia térmica y una capacitancia térmica. Si despejamos la temperatura en función del tiempo tenemos la expresión siguiente

$$T(t) = A + B(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.14)$$

Donde A es una temperatura inicial, B es la diferencia de temperaturas entre la temperatura final o de estancamiento y la temperatura inicial, α es un parámetro relacionado con la capacitancia y resistencia térmica del material. La expresión (2.14) nos permite ajustar datos experimentales de la temperatura en función del tiempo con la cual podemos extraer información de propiedades térmicas de un material.

Para una estructura con varias capas de diferentes materiales se puede utilizar esta analogía termo-eléctrica, la ley de Ohm y el concepto de resistencia térmica se puede abordar el problema de flujo de calor a través de una pared de diferentes materiales con espesores y propiedades termo físicas distintas [18].

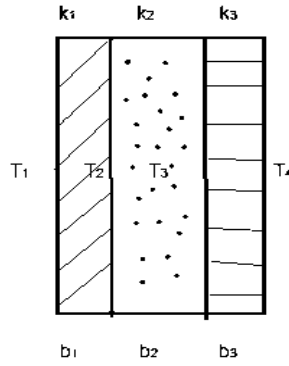


Figura 2.4. Placa compuesta de diferentes materiales.

En este caso el tratamiento es de resistencias en serie, para cada sección se tiene una resistencia asociada al tipo de material, si se conocen las conductividades térmicas, la superficie y las temperaturas en los extremos se puede conocer el flujo de calor a través de la estructura con la siguiente expresión

$$Q = \frac{(T_4 - T_1)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.15)$$

Siendo

$$R_i = \frac{b_i}{k_i l} \quad (2.16)$$

Donde l es la superficie de cada placa que compone la estructura

También se puede utilizar la analogía eléctrica para problemas más complejos que tiene tanto resistencias en serie como en paralelo

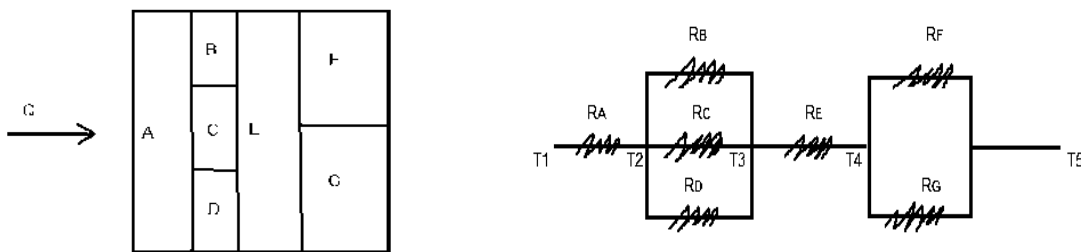


Figura 2.5. Estructura compuesta de resistencias en serie y en paralelo y su analogía eléctrica.

La resistencia térmica al flujo de calor desde la superficie más caliente a T1 a la más fría a T5 es

$$R_{total} = R_A + R_1 + R_E + R_2 \quad (2.17)$$

Siendo

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D} \quad \text{y} \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_G} \quad (2.18)$$

El flujo de calor para este problema se puede escribir como

$$Q = \frac{\Delta T_{total}}{R_{total}} \quad (2.19)$$

Como se puede constatar en este apartado, existe una estrecha similitud entre los fenómenos eléctrico y térmico, lo cual abre la posibilidad de poder construir circuitos térmicos más complejos con elementos análogos como podrían ser los diodos térmicos.

2.3.2. Convección

El fenómeno de convección es uno de los mecanismos de transferencia de calor, el cual es generado por el movimiento de un fluido, ya sea líquido o gas, en la vecindad de una superficie, estos movimientos pueden ser de manera artificial, convección forzada, o por medio de variaciones de la densidad provocada por cambios de temperatura en la naturaleza, convección natural [19]. El modelo más simple para abordar el flujo de calor por convección es aquel expresado mediante la ley de enfriamiento de Newton [20].

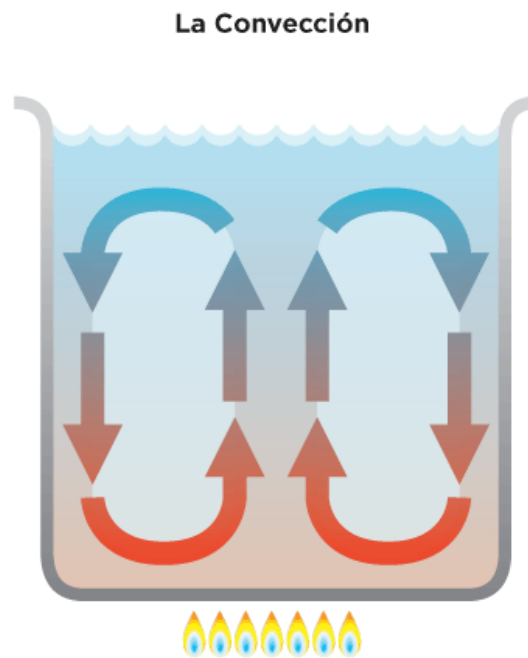


Figura 2.6. Ejemplo de fenómeno de convección [21].

$$Q = h(T_2 - T_1) \quad (2.20)$$

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

2.3.3. Radiación

Dentro de los mecanismos de transferencias de calor, tanto la conducción como la convección, requieren de un medio material para propagarse. Sin embargo, existe otro mecanismo de transferencia de calor en el cual se puede transmitir el calor en el vacío absoluto mediante radiación.

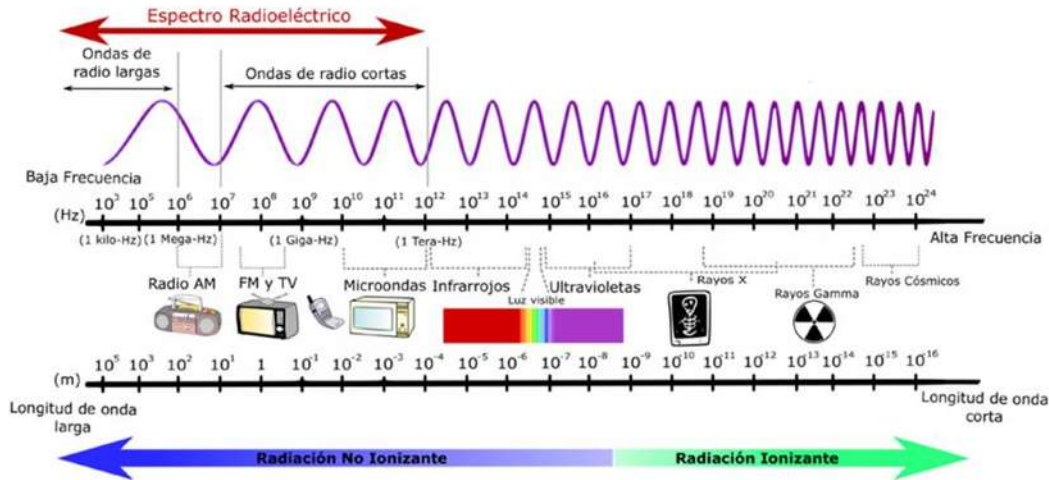


Figura 2.7. Espectro de radiación [22].

Un radiador perfecto se puede definir como aquel que emite la máxima cantidad de energía radiante desde su superficie a una razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, *ley de Stefan-Boltzmann*,

$$Q = \sigma T^4 \quad (2.21)$$

donde σ es una constante que adquiere un valor igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ en el SI y que recibe el nombre de *constante de Stefan-Boltzmann*. De la ecuación anterior se deduce que la superficie de todo cuerpo negro emite radiación si se encuentra a una temperatura diferente del cero absoluto, independiente de las condiciones de los alrededores [23].

Cuando ocurre la interacción entre una superficie material y la radiación, se presentan tres fenómenos; que son la absorción, transmisión y la reflexión

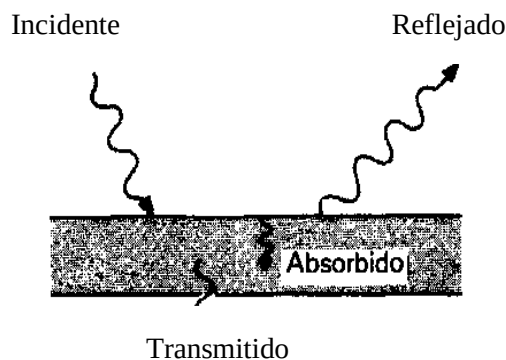


Figura 2.8. Efectos de la radiación incidente sobre un material [24].

Para un cuerpo opaco, como por ejemplo un metal sin espesor nanométrico, no se presentará el fenómeno de transmisión de radiación, por lo que solo se presentará el fenómeno de la reflexión y la absorción, estas dos últimas de gran importancia para el diseño de materiales destinados a las tecnologías termosolares.

Ahora cuando la radiación interactúa con una superficie, se pueden observar dos fenómenos. Si el ángulo de incidencia es igual al reflejado, a esta se le llama especular. Por otra parte, cuando un rayo incidente se distribuye de forma uniforme en todas direcciones después de la reflexión, a esta se le llama difusa. La influencia de la rugosidad de la superficie sobre las propiedades de radiación térmica de los materiales es un tema de gran interés y que sigue siendo objeto de investigación continua [24].

En México se puede aprovechar la gran cantidad de recurso solar que se tiene por su ubicación geográfica, se han desarrollado proyectos de energía termosolar para procesos industriales, empleando colectores solares de concentrador de canal parabólico. Actualmente existen empresas mexicanas que desarrollan y comercializan concentradores solares de canal parabólico para la generación de energía térmica entre los 50°C y 200°C. Estos sistemas son utilizados principalmente en el sector alimenticio [25].



Figura 2.9. Proyectos mexicanos con energía termosolar para procesos industriales [25].

2.4. Recubrimientos termoconvertidores

La investigación en el tema de recubrimientos termoconvertidores ha sido amplio en las últimas décadas, en gran parte debido al compromiso de muchos países con la reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Existen diferentes componentes dentro de las

tecnologías solares, los cuales se están mejorando continuamente, como son los reflectores y los recubrimientos de absorción de radiación solar [26, 27, 28]. Hablando particularmente de los recubrimientos solares de absorción podemos encontrar en la literatura una amplia investigación [29, 30, 31]. Existen varias propuestas de recubrimientos absorbentes solares, los que se elaboran con diferentes tipos de materiales, como pueden ser composites C-NiO [32], óxidos metálicos como el óxido de cromo [33], también se tienen recubrimientos hechos a base de pinturas negras, que se elaboran a partir de la calcinación de algunos metales, como el cobalto [34], para ser utilizados como pigmentos para las pinturas absorbentes. Por otro lado, se tiene también la influencia de la estructura de los recubrimientos que juega un papel importante en la absorción de radiación, que van desde la rugosidad [35], a la combinación de diferentes materiales, entremezclados o en multicapas.

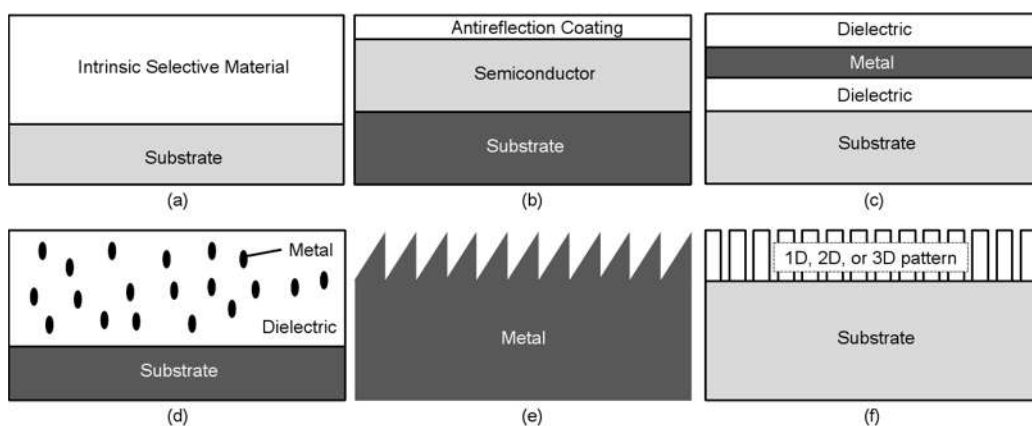


Figura 2.10. Diferentes tipos de recubrimientos solares [36].

La principal característica que comparten los recubrimientos absorbentes solares, es su alta absorbancia en el rango del espectro solar y una baja emisividad en el infrarrojo [37], con el propósito de obtener una gran absorción y transferencia de calor para llevar a cabo los distintos procesos, ya sean industriales o de uso doméstico.

2.5. Recubrimientos termoconvertidores de bajo impacto ambiental

En años recientes se han desarrollado trabajos en los cuales se ha buscado la manera de darle uso a materiales que se pueden considerar inutilizables, es decir, que ya no tienen otro propósito. Mas concretamente se ha venido trabajando el residuo de la combustión de biomasa de origen forestal, conocido como hollín, como una propuesta de recubrimiento para la absorción de radiación solar térmica, dichos trabajos han demostrado que el hollín puede utilizarse como un material para la elaboración de recubrimientos solares de bajo costo y con un rendimiento térmico aceptable [38, 39, 40, 41, 42, 43].

Se ha estudiado la proporción pintura hollín óptima para la mayor captación de energía solar térmica, dando como resultado una relación hollín aglutinante de 30-70 en masa [44]. Donde tanto área como espesor se mantuvieron constantes.

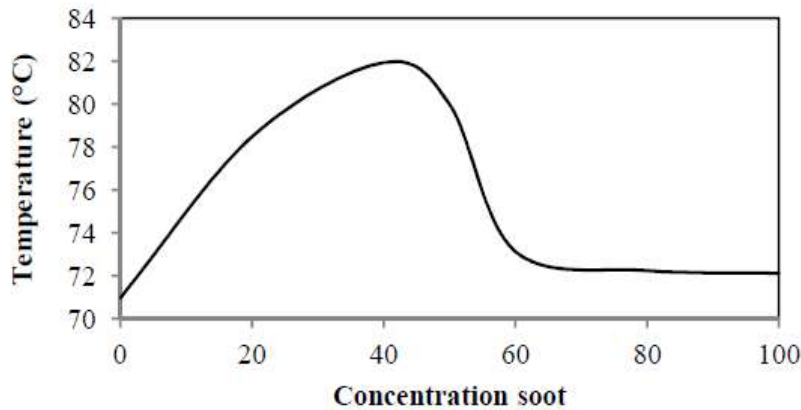


Figura 2.11. Dependencia de la temperatura respecto de la concentración acrílico-hollín [44].

También se ha estudiado su composición química y su caracterización estructural mediante técnicas de microscopia y espectroscopia, arrojando datos tales como una gran cantidad de carbono alrededor del 85 % y una estructura mayoritariamente amorfa por medio de microscopia Ramman [45].

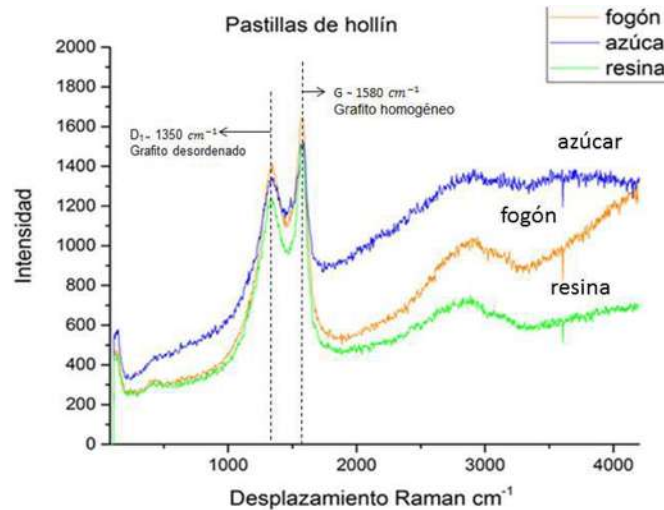


Figura 2.12. Espectro RAMAN para los diferentes tipos de hollín [45].

En otro trabajo se estudió el desarrollo de utilizar aceites esenciales naturales para diluir poliestireno y así crear un aglutinante para fabricar un recubrimiento a base de hollín, dando como resultado un material con alta eficiencia térmica, con una absorbancia de 94% y de bajo impacto ambiental, también se obtuvo la conductividad térmica del hollín, dando como resultado que a mayor temperatura mayor es el flujo de calor, ya que la conductividad térmica del hollín aumenta al incrementarse la temperatura [46].

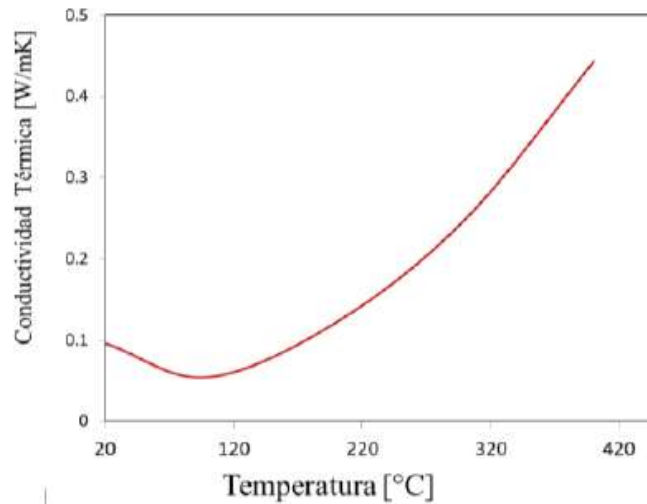


Figura 2.13. Conductividad térmica del hollín en función de la temperatura [46].

Así mismo se ha estudiado las propiedades ópticas y térmicas de un recubrimiento de hollín usando como aglutinante resina de pino, obteniéndose resultados por medio de microscopia electrónica de barrido y espectroscopia uv vis nir composición y la reflectancia y absorbancia, demostrando que se puede utilizar como un recubrimiento para aplicaciones termosolares de bajo costo, dando como resultado una absorbancia de alrededor de 94% con una proporción 70-30 en masa resina-hollín, y además se comprobó que la resina de pino se puede usar como aglutinante natural para la elaboración de recubrimientos absorbentes solares, presentando estructuralmente adherencia y estabilidad térmica en el rango de los 20 a los 105 °C. Con lo cual es factible su utilización para tecnologías termosolares de baja temperatura [47].



Figura 2.14. Micrografía de la mezcla resina/hollín al 30%, la cual muestra la presencia de carbono y oxígeno, así como una distribución homogénea de la mezcla [47].

Finalmente se justifica el uso del hollín de biomasa forestal, ya que se ha comprobado que es un material capaz de absorber eficientemente la radiación térmica, además de que estudios recientes han demostrado que su estructura amorfa favorece el flujo de calor unidireccional [38, 39, 40, 48] esto debido a que en un sistema cristalino, periódico, los portadores de energía, electrones para el caso metálico o fonones para el caso cerámico, se pueden mover sin restricción libremente tanto en una como en otra dirección, más sin en cambio en un material amorfo esta movilidad se verá condicionada por la estructura que nos es la misma en las diferentes direcciones teniendo un impacto en las propiedades térmicas del material dependiendo de la dirección del flujo de calor. Lo anterior nos presenta al hollín como un material que puede ser usado para el desarrollo de un diodo térmico.

2.6. Cosecha y almacenamiento de energía solar térmica

La disponibilidad de la energía solar no se da de forma continua en lo que se refiere a fuentes renovables, debido a la intermitencia que ocurre por el movimiento planetario, haciendo indispensable el desarrollo de dispositivos para almacenar la energía cosechada durante el día y poder aprovecharla cuando el recurso solar ya no esté disponible, días nublados o en la noche. Se puede definir que el almacenamiento de energía térmica es una restricción del flujo de calor ganado, confinándolo en un depósito por un periodo determinado de tiempo [49] para su posterior utilización, esto conlleva a una mayor confiabilidad en los sistemas de generación de energías renovables como la solar térmica.

2.6.1. Tipos de sistemas de almacenamiento de energía térmica

Existen principalmente tres formas de almacenar energía térmica, calor sensible, calor latente y el método termoquímico, los cuales presentan ventajas y desventajas en operación y costos.

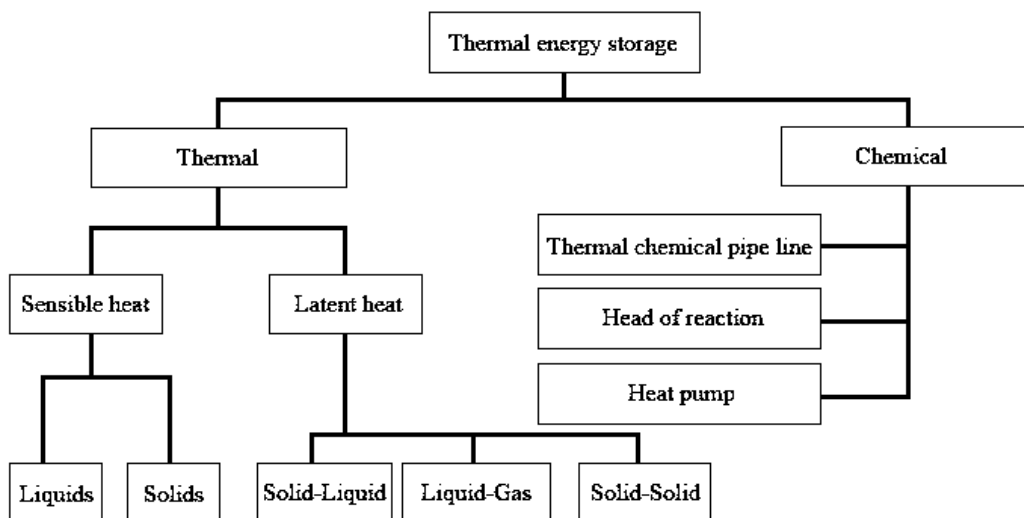


Figura 2.15. tipos de sistemas de almacenamiento de energía térmica [50].

La energía térmica se puede almacenar en forma de calor sensible, de calor latente, por procesos termoquímicos, o una combinación de ellos. En el almacenamiento por calor sensible la energía térmica transferida al medio de almacenamiento hace que este aumente o

disminuya su temperatura [51], es el método más simple y más desarrollado, en el cual la cantidad de calor almacenado depende del calor específico del material utilizado, de la temperatura de carga, y de la cantidad de material de almacenaje [52]. Los sistemas termoquímicos se basan en la ruptura y cambios moleculares en reacciones químicas completamente reversibles [53]. En el caso de calor latente, se utiliza un material con cambio de fase, por lo general de sólido a líquido, el cual almacena la energía térmica, este material tiene un alto punto de fusión, los ciclos de cambio de fase son reversibles, la liberación o absorción de la energía térmica se da cuando la temperatura a la cual está sometido el material es mayor o menor que su temperatura de cambio de fase [54].

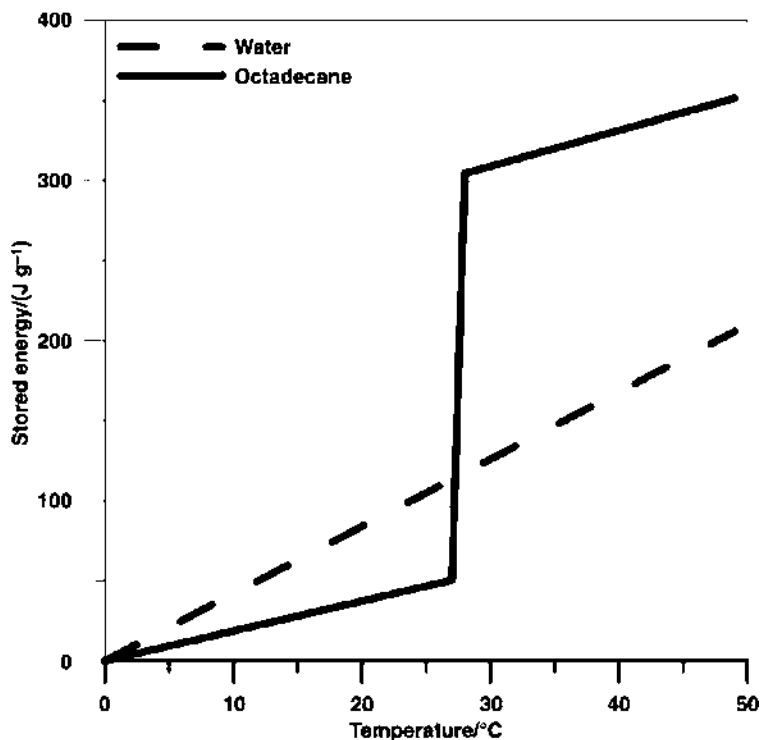


Figura 2.16. Comparación de almacenamiento de energía de un PCM y el agua [54].

Las sales hidratadas han sido de los materiales PCM más estudiados por su bajo coste y su capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de calor por unidad de volumen, que las convierten en candidatos para sus múltiples aplicaciones en el almacenamiento de energía térmica [55].

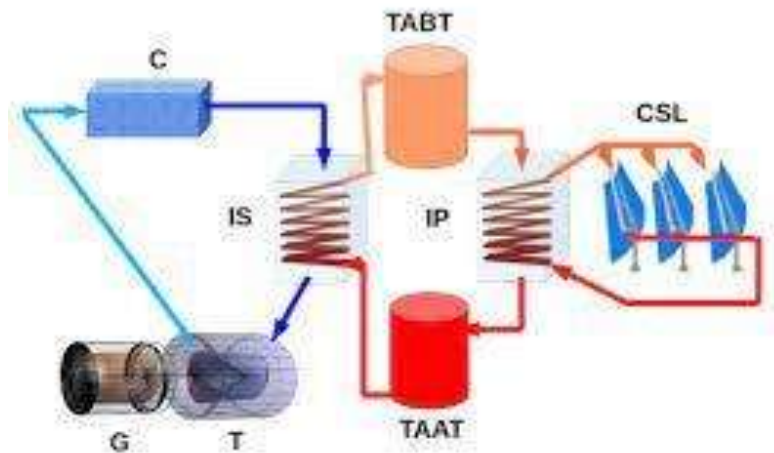


Figura 2.17. Principio de operación de un circuito térmico [55].

El almacenaje de energía térmica puede traer varios beneficios, tales como la estabilidad de la operación de los sistemas termosolares, los cuales conllevarían a la generación de mayor confianza en su inversión ya sea de manera directa en la adquisición de este tipo de tecnologías o en la continuación de trabajos de investigación que aumente el rendimiento de este tipo de tecnologías.

2.7. Diodo térmico

Un diodo térmico es un dispositivo que permitirá el flujo de calor en una dirección, y se opondrá en la dirección contraria, es decir tiene un flujo preferencial de calor, tal como su análogo electrónico, presenta una resistencia distinta en dependiendo de la configuración de donde se tenga la fuente de calor, teniendo una resistencia menor en la posición positiva y presentando una mayor resistencia térmica en la posición negativa. Este tipo de dispositivos ha sido extensamente estudiado en años recientes debido a sus potenciales aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia y la tecnología, especialmente en la optimización de sistemas de almacenamiento de energía térmica [56, 57, 58, 59].

La primera vez que se observó el efecto, alrededor de los años 30, fue en la interfaz del cobre y óxido de cobre [60]. Alrededor de los años 2000 se reportó un modelo teórico en una red 1D anarmónica que predecía la rectificación térmica [61, 62], de esta manera se han propuesto varias aplicaciones para el rectificador térmico, como por ejemplo transistores térmicos, memorias térmicas, y puertas lógicas térmicas [63, 64, 65, 66].

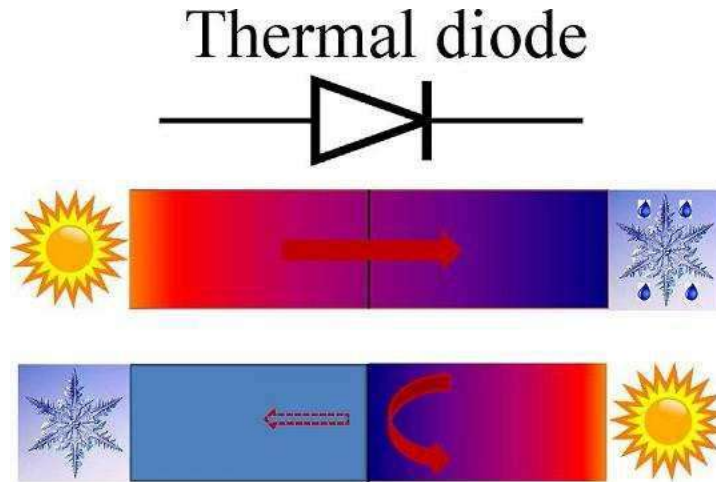


Figura 2.18. Esquema de funcionamiento de un diodo térmico [66].

Para la evaluación de lo que se puede considerar como diodo térmico, se tiene en cuenta lo que se conoce como factor de rectificación el cual tiene la siguiente expresión

$$\gamma = \frac{|Q_f| - |Q_r|}{|Q_r|} \quad (2.22)$$

Donde la magnitud del flujo de calor hacia delante Q_f es más grande que la magnitud del flujo de calor de reversa Q_r a la misma diferencia de temperatura ΔT [67].

En el trabajo [61] se demostró el modelo de funcionamiento de un diodo térmico, por acoplamiento de dos redes no lineales unidimensionales, este es una simulación computacional donde el sistema consiste de dos segmentos no lineales acoplados por un resorte de constante k , con los diferentes parámetros de ajuste se obtuvo la siguiente figura

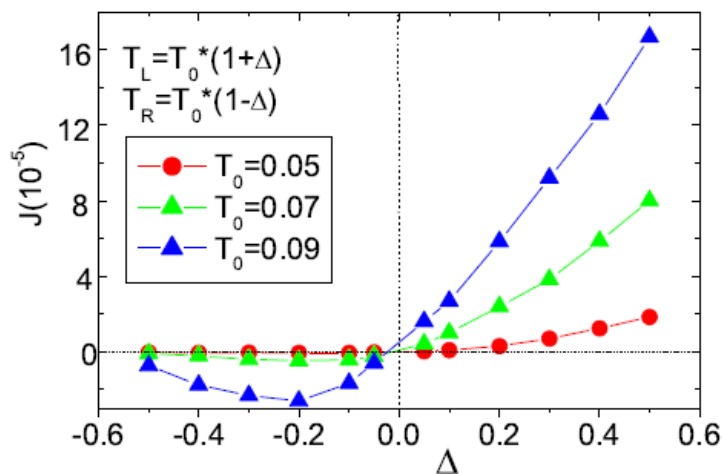


Figura 2.19. Corriente térmica contra diferencia de temperatura adimensional [61].

Cuando $\Delta > 0$ la corriente de calor se incrementa, y cuando $\Delta < 0$ la corriente es casi cero es decir se comporta como un aislante térmico, estos resultados muestran un efecto de rectificación.

Dentro de los estudios recientes de rectificación térmica tenemos la teoría basada en la resistencia de interface [68], donde se tiene en cuenta el efecto de la interface existente entre distintos materiales, como en la figura 1.12 donde tenemos una estructura formada por dos materiales y vemos que existe una caída de temperatura donde las resistencias térmicas reducen el flujo de calor.

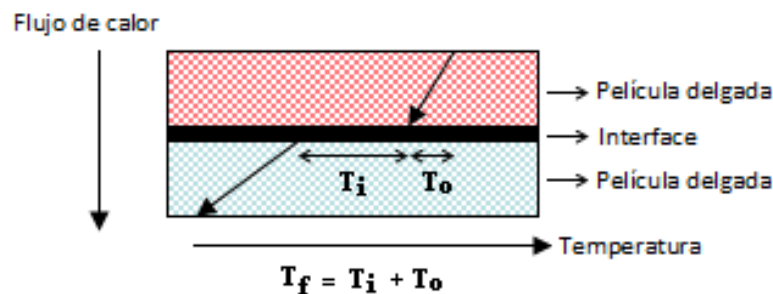


Figura 2.20. Caída de temperatura en una estructura de dos materiales donde muestra el efecto de la interface [69].

Se han realizado experimentos para crear dispositivos que hagan el efecto de diodo térmico, como el presentado en el trabajo [69], donde se utilizó el modelo de desacople acústico para lograr tal efecto. Se usaron materiales como el cobre, aluminio, tungsteno, y grafito, con espesores que iban de 1 a 4 mm, se hicieron las diferentes combinaciones de materiales, se obtuvieron graficas como la siguiente

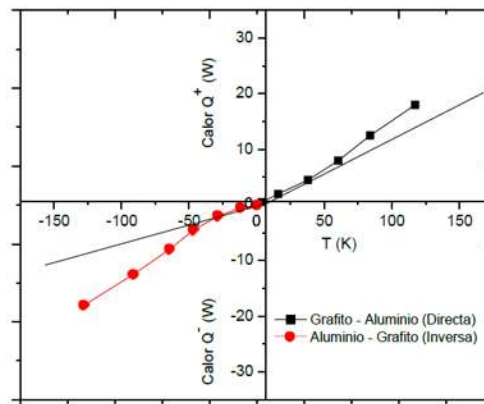
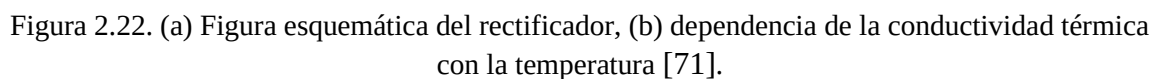


Figura 2.21. Curva característica para el diodo basado en grafito/Al [69].

Los resultados obtenidos llevaron a concluir que los sistemas conformados por dieléctrico/metal presentó el mejor factor de rectificación.

También encontramos en la literatura, que se han desarrollado dispositivos de rectificación térmica, haciendo uso de la geometría del dispositivo, como en el trabajo [71] donde se implementó una forma en pirámide como la mostrada en la figura 2.22 donde también podemos ver sus dimensiones



25

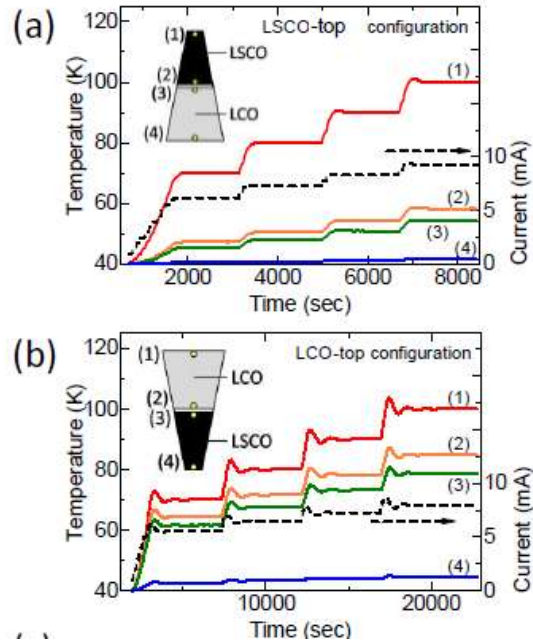


Figura 2.23. Temperatura en función de tiempo para las configuraciones (a) y (b) [71].

De igual manera encontramos en la literatura donde utilizan dos materiales con diferentes espesores y distintas conductividades térmicas para lograr un efecto rectificador [72].

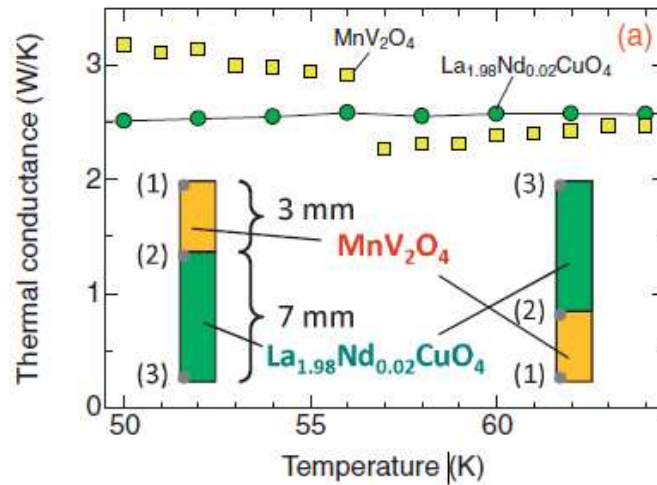


Figura 2.24. Dependencia de la conductividad térmica con la temperatura para un diodo bicapa basado en el efecto de la diferencia en las conductividades térmicas de los materiales [72].

En otros trabajos recientes se han utilizado estructuras tipo kirigami para lograr el efecto de rectificación térmica [73], donde se utiliza el fenómeno de termo deformación de los materiales constituyentes, los cuales tienen una gran diferencia de coeficientes de expansión térmica.

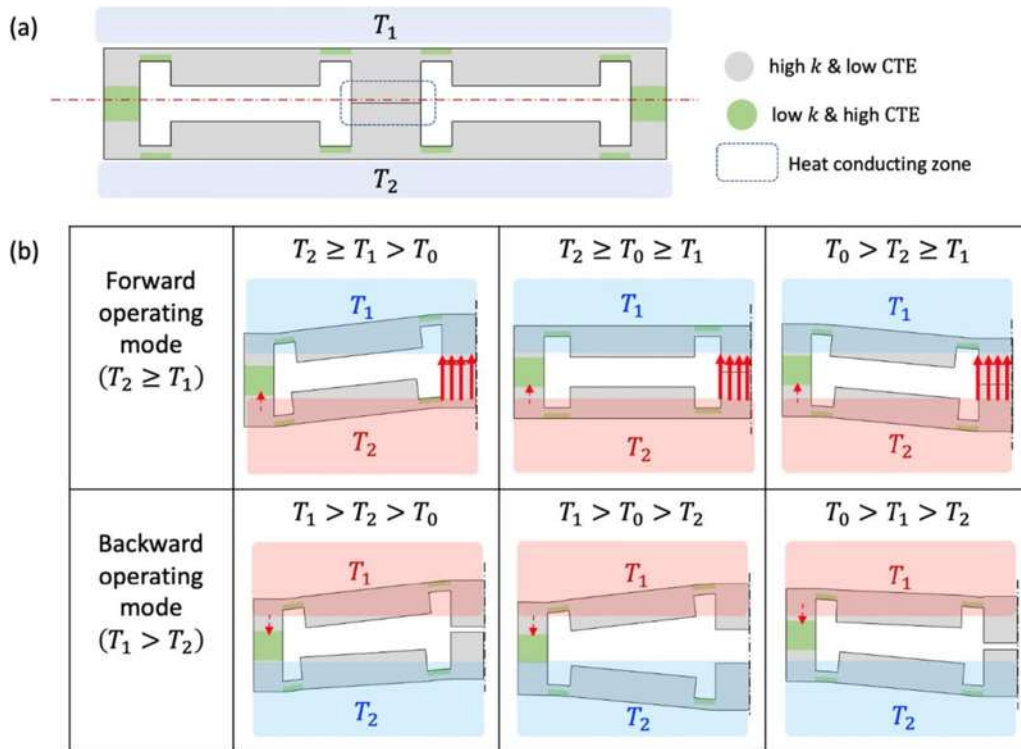


Figura 2.25. Principio de funcionamiento de un diodo termodeformable con estructura tipo kirigami [73].

En el trabajo [74] se desarrolló un diodo térmico hecho a base de membranas de silicio nano estructuradas, se usó la técnica de termometría Raman para la medición de temperatura sobre las muestras.

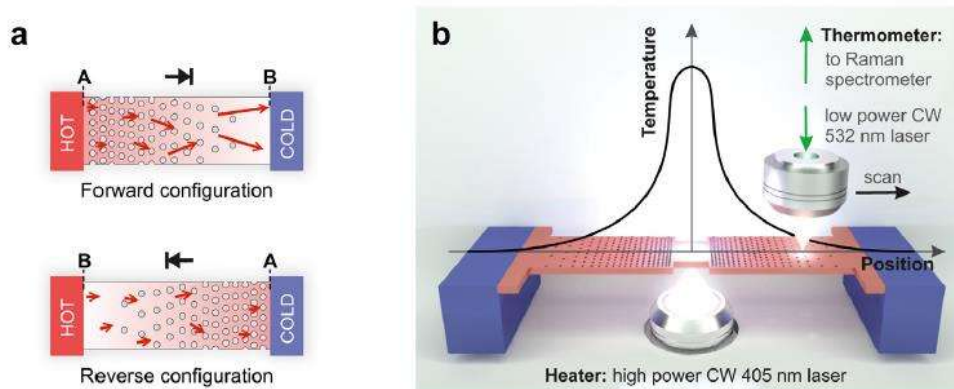


Figura 2.26. Principio de funcionamiento del rectificador y el esquema del método de termometría Raman [74].

Esta membrana de silicio cristalino poroso puede operar de temperaturas que van de 300 K a 1000 K. Los poros mostraron que tienen influencia en la trayectoria de los fonones, afectando así la conducción de calor y de esta manera permite un mayor o menor flujo de calor dependiendo de la configuración ya sea positiva o negativa.

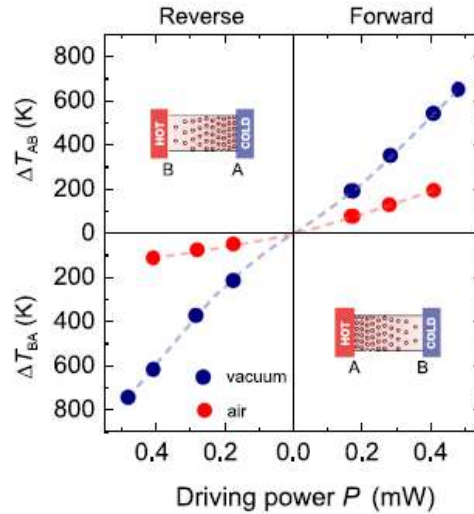


Figura 2.27. comportamiento del diodo de silicio poroso en las distintas configuraciones y medios [74].

Como se ha observado anteriormente, en base a la literatura, existe la manera de lograr el efecto de diodo térmico variando la forma geométrica del diodo, de esta manera encontramos que se han desarrollado rectificadores térmicos haciendo uso de la geometría, la cual tiene efecto en la conducción de calor.

De esta manera tenemos trabajos en los cuales se ha implementado el uso de diodos con forma triangular [75].

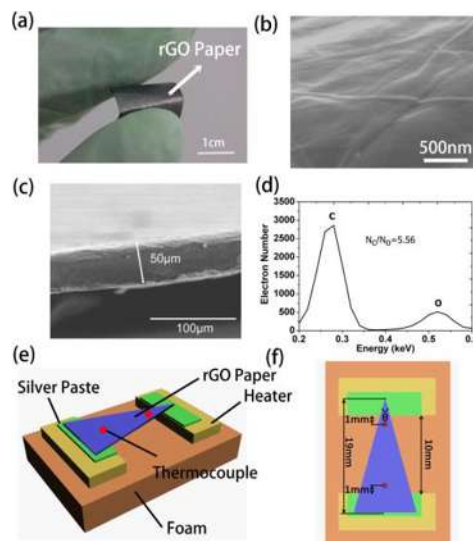


Figura 2.28. Diodo térmico con forma triangular [75].

También se han implementado diodos con forma rectangular, como el que se muestra en la figura 2.29.

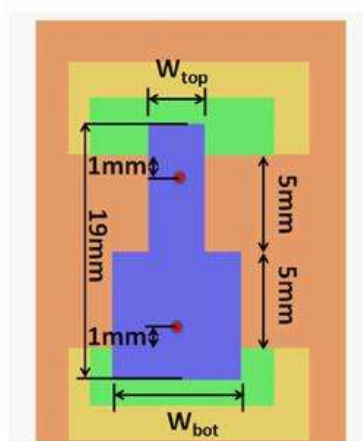


Figura 2.29. Diodo térmico con forma rectangular asimétrica [75].

Ambos diodos hechos de óxido de grafito, presentaron el efecto de diodo térmico. En este trabajo se mostró que la forma triangular presentó el mejor resultado de rectificación.

También se han realizado trabajos en los cuales se han utilizado los dos métodos antes mencionados [76], 1) la combinación de dos materiales con diferente conductividad térmica y 2) aprovechando el efecto de la forma geométrica de los materiales.



Figura 2.30. Diseño esquemático de rectificador térmico con dos diferentes materiales con forma cónica [76].

Se concluye que tanto la diferencia de la conductividad de los materiales A y B, así como la forma asimétrica de los conos permiten que se dé el fenómeno de rectificación térmica.

En el trabajo [77] se fabricaron muestras de uniones heterogéneas irradiadas y prístinas de nano fibras de polietileno, las cuales presentaron factores de rectificación de alrededor de 50% de acuerdo con la ecuación (2.22). el fenómeno de rectificación es debido a la estructura

molecular anisotrópica que presenta la fibra de polietileno, lo cual causa que la conductividad térmica tenga una dependencia con la temperatura ya que se da un cambio de fase en su estructura.

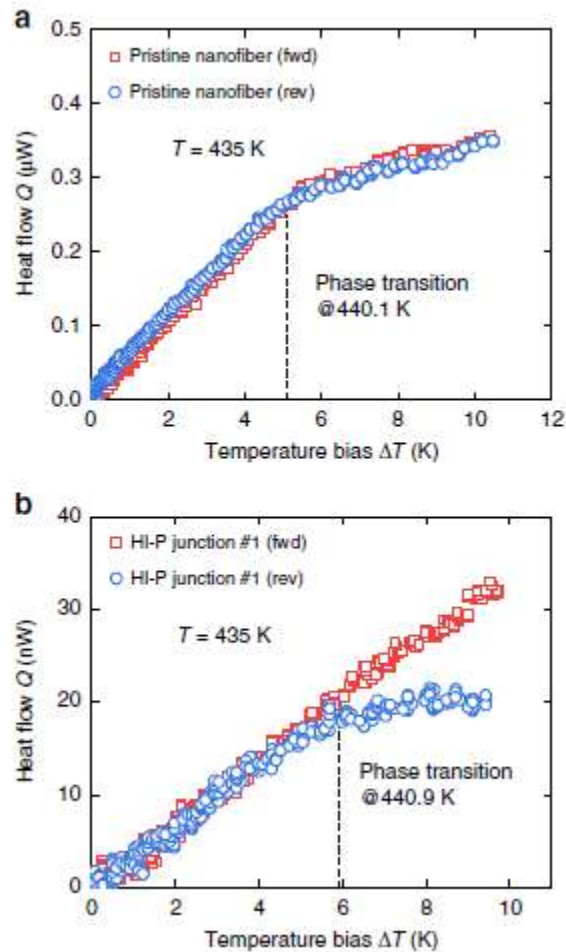


Figura 2.31. resultados obtenidos en las pruebas de rectificación, para la nanofibra sin unión (a), donde no se presentó rectificación, y (b) donde se tiene la unión heterogénea, donde se puede apreciar el fenómeno de rectificación [77].

Se han realizado algunos trabajos encaminados a darle un enfoque practico a los diodos térmicos, como por ejemplo en [78] donde se presenta un diodo multicapa hecho de materiales intercalados de cambio de fase e invariantes (PCM y PIM), donde se obtuvo un radio de rectificación de 136% con respecto a la expresión (2.22). el mecanismo de rectificación, como se ha venido mencionando se da debido a que existe un cambio de la conductividad térmica en los materiales a medida que se llega a la temperatura de transición, es decir cuando se da el cambio de fase en el material.

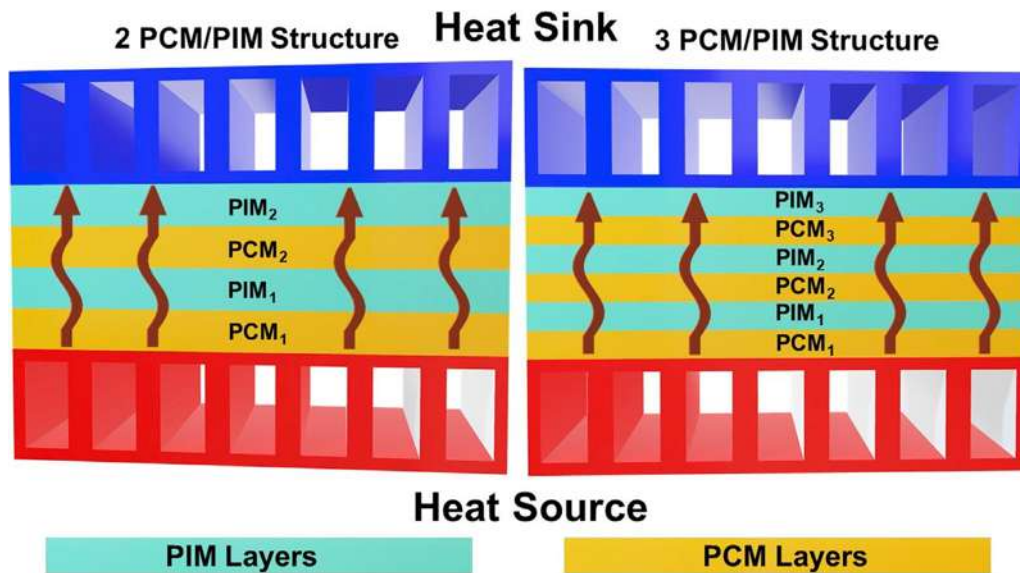


Figura 2.32. diodo multicapa con materiales alternantes de cambio de fase e invariantes a cambios de fase [78].

Se evaluó su desempeño en un sistema de almacenamiento de energía térmica, en la siguiente figura podemos apreciar el comportamiento del sistema a la hora de almacenar la energía absorbida. Se observa que existe una marcada diferencia entre los tiempos de descarga.

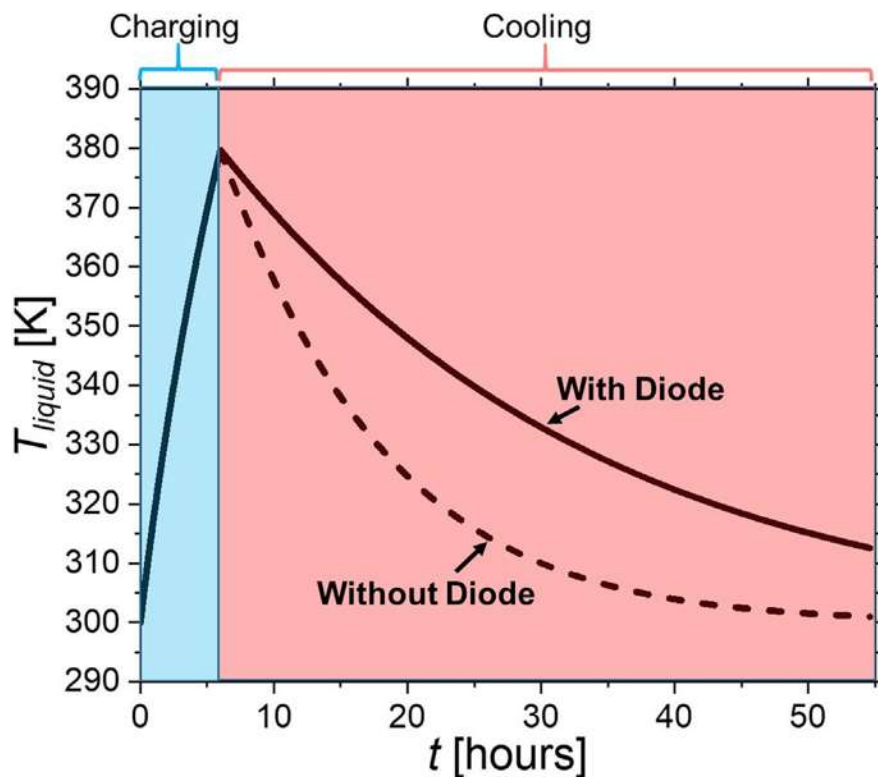


Figura 2.32. grafica de la carga y descarga del sistema térmico, con diodo (línea sólida), y sin diodo (línea punteada) [78].

Al revisar los diferentes métodos y materiales mencionados en la literatura, en general podemos decir que se tienen ciertos criterios para el diseño de diodos térmicos, los cuales pueden ser:

- Las conductividades térmicas de los materiales componentes deben ser diferentes.
- Las conductividades térmicas de los materiales componentes deben tener dependencia con respecto a la temperatura.
- Una de las conductividades debe ir aumentando con la temperatura mientras la otra debe ir decreciendo con el aumento de la temperatura.

2.7.1. Aplicación de diodo térmico para el almacenamiento de energía térmica

Aunque se han mencionado al principio de este apartado de las potenciales aplicaciones para el diodo térmico, las tecnologías relativamente más sencillas, como un calentador de agua solar, son donde se ha tenido una aplicación real y directa de los diodos térmicos.

En el trabajo [79] se realiza una evaluación sobre un sistema de calentamiento de agua de uso doméstico, en el cual se hace uso del concepto de diodo térmico, en dicho trabajo se tienen parámetros de desempeño que están relacionados con la recolección de energía y su posterior retención una vez que la fuente de energía solar ya no está disponible.

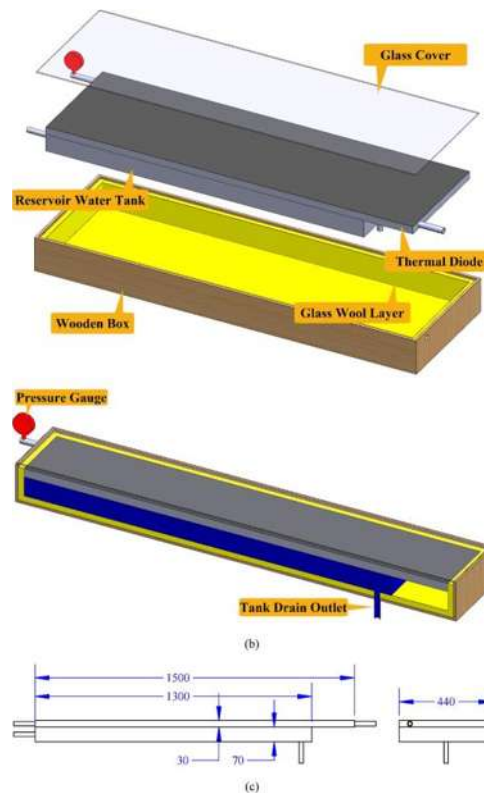


Figura 2.33. figura esquemática del sistema integrado de recolección y almacenaje [79].

La figura 2.33. muestra esquemáticamente como está conformado el sistema integrado de recolección y almacenaje, donde el diodo este compuesto por una placa de metal recubierta con pintura negra y una tapa de plástico acrílico.

El estudio ilustra que la utilización del concepto de diodo térmico reduce las pérdidas de calor y que pueden mejorar el funcionamiento de los colectores de placas planas.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó como material base para la elaboración de muestras, hollín proveniente de la combustión de biomasa forestal, ya que como se vio en apartados anteriores este material ha arrojado resultados satisfactorios en el campo de la energía termosolar.

El hollín ha sido estudiado y se ha demostrado que puede ser usado como recubrimiento absorbedor de radiación solar térmica. En un rango de temperaturas inferiores a los 600 oC, ya que a esa temperatura se descompone. Pero en ese rango tiene una amplia gama de dispositivos en los cuales se puede aplicar, como por ejemplo en calentadores de agua de uso residencial o industrial, lavado pasteurización, cocción, secado y deshidratado [80].

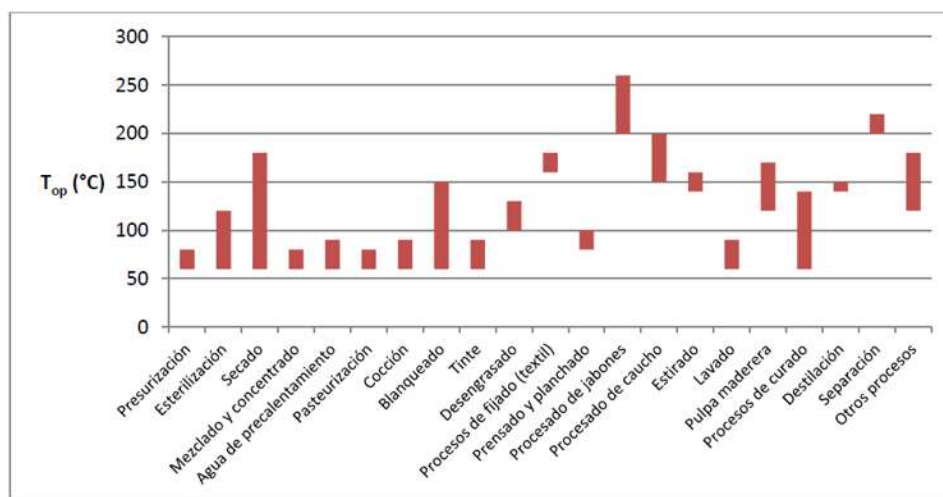


Figura 3.1. Temperatura de operación de diferentes procesos industriales [80].

Como sustrato se utilizaron placas de aluminio, se tomó la decisión de usar este material ya que el aluminio es un material ampliamente utilizado en diferentes dispositivos, por sus propiedades físicas y su coste. En el caso de tecnologías termosolares es un material ideal con el cual se pueden construir soportes y utensilios tales como tanques de almacenamiento de líquidos y ollas de cocción [81].

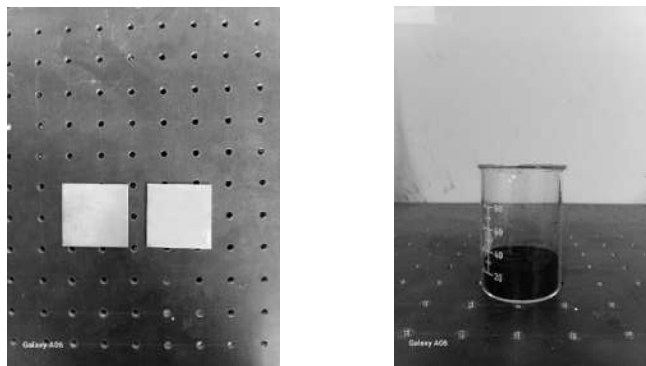


Figura 3.2. muestra de hollín y placas de aluminio utilizadas para la elaboración de las muestras.

Como material aglutinante se usó resina de pino extraída de los *Pinnus* Michoacano, la resina es un terpeno que presenta características adhesivas de manera natural, lo cual implica un bajo coste y una manera directa de aplicación para la elaboración de pinturas con bajo impacto ambiental. En el trabajo [47] se demostró que se puede utilizar como aglutinante con hollín para la elaboración de recubrimientos absorbentes solares, dando como resultado un desempeño óptico, térmico y estructural aceptable dentro de los recubrimientos de bajo coste.



Figura 3.3. resina de pino.

3.1. Métodos utilizados para la determinación de la conductividad térmica

Una de las propiedades físicas a determinar en este trabajo es La conductividad térmica k , que es una propiedad de los materiales que, excepto en el caso de los gases a bajas temperaturas, no es posible predecir analíticamente. La información disponible está basada en medidas experimentales. En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura, pero en muchas situaciones prácticas, si el sistema tiene una temperatura media, se puede considerar con un valor medio constante, lo que proporciona resultados bastante satisfactorios [82].

Tabla 3.1. Conductividades térmicas de distintos materiales [12]

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

La porosidad, las imperfecciones o impurezas en los materiales tienen una marcada influencia sobre la conductividad térmica. Por lo general la conductividad térmica de los materiales es una función de la temperatura, dependiendo del material en algunos casos se mantiene cuasi constante en ciertos rangos de temperatura

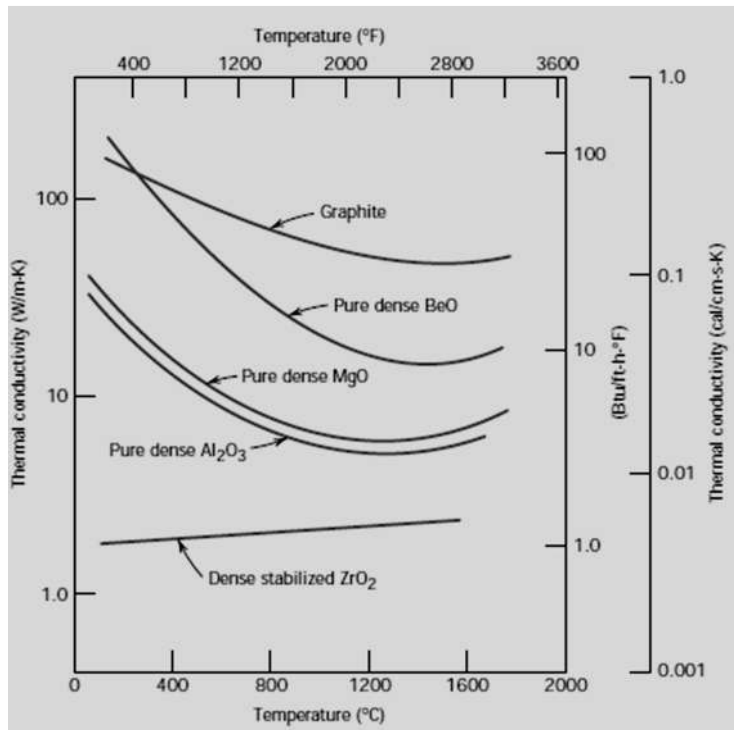


Figura 3.4. Conductividad térmica de diferentes materiales cerámicos [82].

Para la determinación experimental de la conductividad térmica k se tienen dos métodos principalmente: el de estado estable y el de estado estacionario.

En el de estado estacionario se crea un gradiente de temperatura constante entre las dos caras de la muestra [83]. Y en el de estado no estacionario, en el cual el gradiente de temperatura es dependiente del tiempo y de la posición, de acuerdo con algunos autores [84] este método es más rápido que el de estado estacionario.

En muchos trabajos en los que se mide la conductividad térmica de materiales aislantes, el método más común es el de placa caliente guardada establecido por la norma ASTM C 1363 [85, 86].

De acuerdo con este método de prueba se requieren: a) el establecimiento de condiciones de estado estable, b) la medida del flujo de calor en la región medida, el área medida, el grosor del espécimen, las temperaturas de las superficies calientes.

El procedimiento de prueba incluye los siguientes pasos:

- Selección del espécimen
- Instalación del espécimen
- Establecimiento del estado estable térmico
- Adquisición de datos

3.2. Procedimiento experimental

Las muestras se prepararon haciendo una mezcla de hollín y resina de pino en concentración de masa de 10%, 20%, 30%, 50% y 100% hollín y completando el porcentaje restante con resina.

Tabla 3.2. muestras resina-hollín en concentración de masa

muestra	Hollín	Resina
M1	10	90
M2	20	80
M3	30	70
M4	50	50
M5	100	0

Una vez preparadas las mezclas resina-hollín, se depositaron sobre sustratos metálicos de aleación de aluminio 3003 con dimensiones de 5x5 cm y 2 mm de espesor, utilizando un aplicador de control de espesor, con el cual se aplicaron recubrimientos con espesor de 150 μm . Con la finalidad de conocer las propiedades mecánicas del recubrimiento, se llevó a cabo una prueba de adherencia bajo la norma ASTM D3359 método B [87].

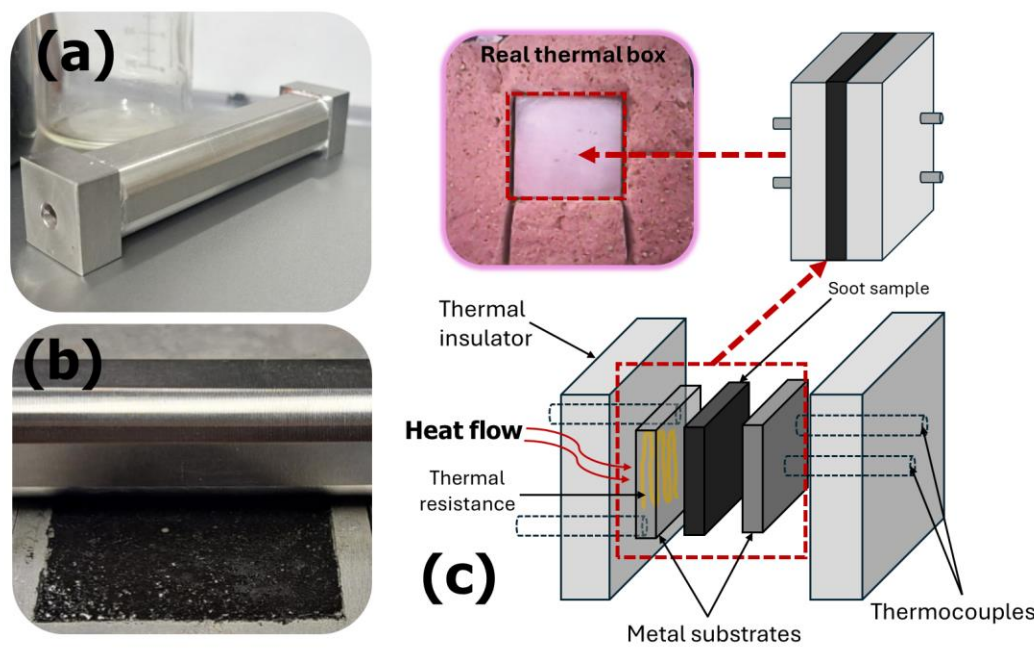


Figura 3.5. a) equipo de aplicación del recubrimiento para control de espesor, b) aplicación del recubrimiento de hollín en el sustrato de metal, c) configuración de la caja térmica para la estimación de la conductividad.

En la figura 3.5 podemos observar el equipo y materiales utilizados para la aplicación del recubrimiento, así como la configuración de la caja térmica que se utilizó para la estimación de la conductividad térmica de las diferentes muestras.

3.3. Determinación de la conductividad térmica del hollín

Para poder determinar la conductividad térmica de las muestras de hollín, se utilizó un arreglo experimental de caja térmica siguiendo la norma ASTM C 1363, descrita anteriormente. La caja térmica consiste en un ladrillo de cerámica de conductividad térmica de 0.987 W/mK [88], con dimensiones de $6 \times 11 \times 11 \text{ cm}$, a la cual se le hizo una cavidad ubicada en el centro del ladrillo con dimensiones de $5 \times 5 \times 3 \text{ cm}$, donde se coloca la muestra a ser analizada. Dentro de la caja térmica se colocan dos placas de metal, de conductividad térmica conocida, en medio de las cuales se pone la muestra de las diferentes mezclas de hollín-resina de pino, una de las placas se calienta de manera homogénea por medio de una resistencia térmica, para monitorear la temperatura de ambas placas se utilizaron termopares tipo k, con una resolución de 0.1°C , con un rango de operación de -50 a 400°C , también se usó una cámara termográfica UNI-T pro uti260b para obtener imágenes térmicas. Para llevar a cabo la determinación de la conductividad térmica se establecieron las condiciones y requerimientos presentes en la norma ASTM C 1363 anteriormente descrita, para establecer un flujo de calor se utilizó una fuente de voltaje variable ELC AI924a para inyectar un voltaje de 3.6 V en una resistencia de 3.6 Ohm en una de las placas de metal.

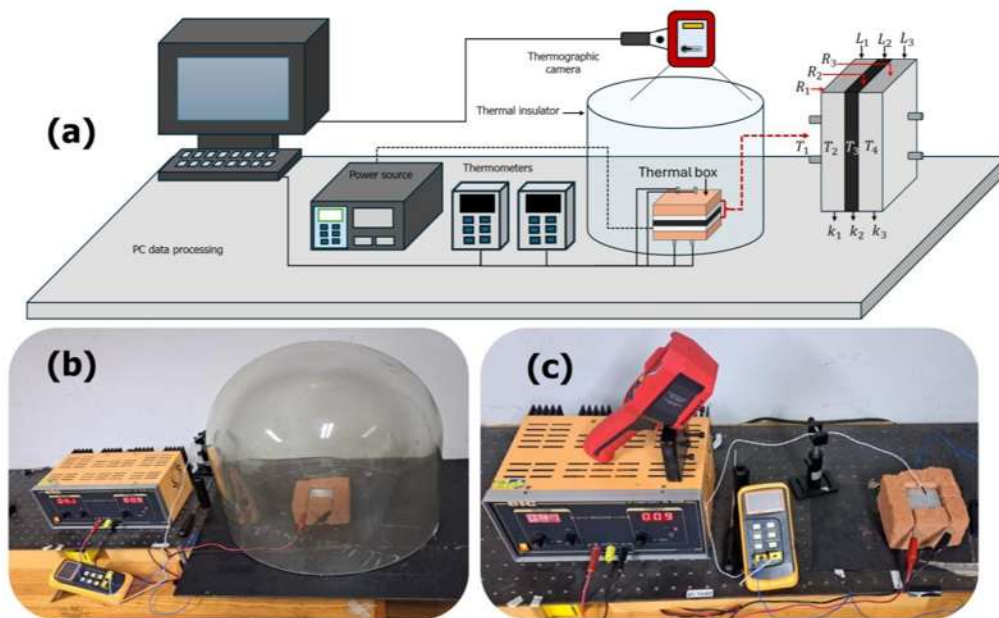


Figura 3.6. esquema del montaje experimental (a) diseño del montaje experimental, (b) cámara aislada con la caja térmica (c) se muestran los sensores de temperatura, caja térmica, fuente de voltaje y cámara termográfica [89].

Para poder determinar la conductividad térmica tenemos que considerar la ley de Joule que establece que toda resistencia eléctrica libera calor cuando una corriente eléctrica circula a través de ella, esto se debe a que parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material del conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. Esta conversión de energía eléctrica es conocida como Efecto Joule.

Este efecto también fue definido de la siguiente manera: “La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente”. Matemáticamente se expresa como:

$$Q = I^2 R_e \quad (3.1)$$

La resistencia R_e es el componente que transforma la energía eléctrica en energía calorífica. Por otro lado, para poder conocer la conductividad térmica de las muestras, se hace uso del tratamiento de un circuito en serie de resistencias térmicas, análogo al caso eléctrico, como el que se describió en el apartado 2 de este trabajo y utilizando la expresión (2.15) adaptándola a nuestro caso de estudio, con lo cual quedaría de la siguiente forma

$$Q = \frac{(T_4 - T_1)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.2)$$

Donde T_1 y T_4 representan las temperaturas en los extremos de las placas donde en medio de ellas se encuentra la muestra a analizar, R_1 , R_2 , y R_3 representan las resistencias de los materiales. La resistencia térmica se puede expresar de manera general de la siguiente manera

$$R = \frac{L}{kA} \quad (3.3)$$

Donde L es el espesor del material, A el área a través de la cual ocurre el flujo de calor, y k la conductividad térmica. Si conocemos las áreas, el espesor y la conductividad térmica de las placas exteriores, así como la superficie y el espesor de la muestra, podemos estimar el valor de la conductividad térmica de las muestras con la siguiente expresión

$$k_m = \frac{L_m Q}{A_m (\Delta T - 2Q R_p)} \quad (3.4)$$

Donde k_m es la conductividad de la muestra, L_m es el espesor de la muestra, A_m el área de la muestra, R_p la resistencia térmica de la placa de metal y Q es la potencia suministrada por la fuente de voltaje a través de la ley de Joule.

3.4. Estimación de la rectificación térmica

Para estimar si se presenta el fenómeno de la rectificación térmica en el material propuesto, un arreglo experimental similar al expuesto en el apartado anterior se utilizó, modificándolo para realizar las pruebas de diodo térmico, de tal manera que la fuente de corriente a través del resistor calienta la placa de aluminio que a su vez tiene el recubrimiento.

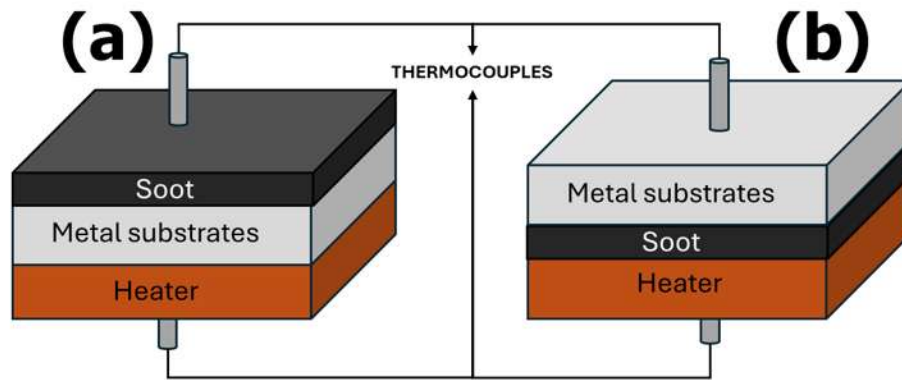


Figura 3.7. Configuraciones negativa (a) y positiva (b), para la prueba de diodo térmico en las muestras con recubrimiento de hollín-resina [89].

Las pruebas de diodo térmico se realizaron para todas las muestras de la tabla 3.2 más una muestra que tiene una doble capa de recubrimiento, de 10 y 30%. Las pruebas consistieron en generar un flujo de calor constante hasta alcanzar una temperatura de estancamiento, primero en la configuración positiva y después en la configuración negativa, variando la corriente para cada prueba en 1, 1.5 y 2 Ampere. Primeramente, para la parte positiva, la fuente de calor, elemento resistivo, está en contacto con el recubrimiento, se toman los datos de temperatura respecto al tiempo hasta alcanzar el estado estable. Una vez que los datos han sido capturados, se apaga el equipo y se deja enfriar, para después repetir el mismo procedimiento simplemente invirtiendo el sentido de la placa, como se muestra en la figura 3.7 para la configuración negativa, donde la fuente de calor está en contacto con la placa de aluminio que esta recubierta. El factor de rectificación se calcula con la ecuación (2.22).

3.5. Implementación del diodo térmico en un sistema solar de pequeña escala

Se llevo a cabo un experimento con la finalidad de verificar si se daba el fenómeno de rectificación térmica, en un sistema solar a pequeña escala, se utilizó un cilindro de aluminio, ya que es lo que más se asemeja a un contenedor usado en los dispositivos termosolares de absorción y de almacenamiento de energía solar, tanto en el tipo de material como en la forma geométrica. El cilindro fue recubierto con la mezcla resina-hollín que presentó los mejores resultados de rectificación térmica y se llenó con liquido anticongelante, este tipo de líquido permite una estabilidad térmica evitando cambios de fase como los que podrían ocurrir con el agua y el aire que puedan afectar las mediciones en cuanto a si se presenta o no la rectificación térmica por el uso del recubrimiento.

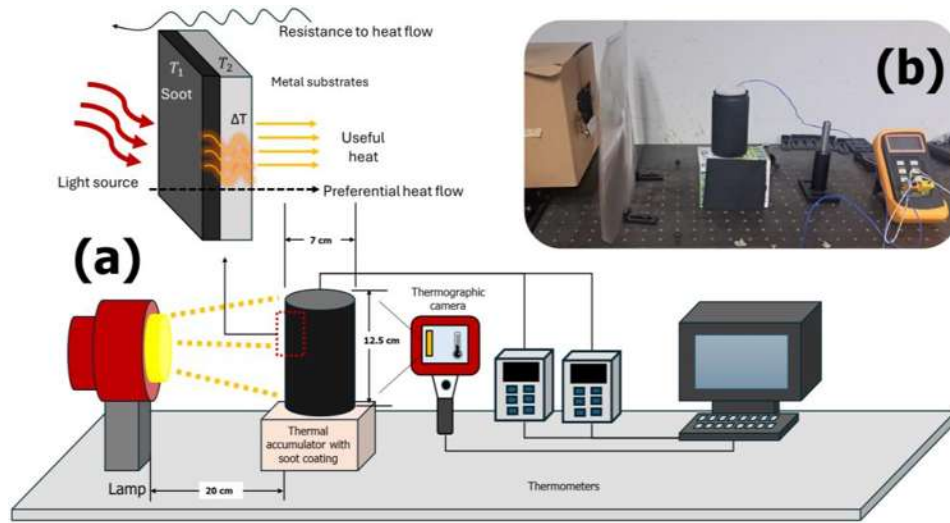


Figura 3.8. (a) diseño del montaje experimental del sistema termosolar de pequeña escala, (b) montaje experimental real [89].

Para este experimento se utilizó una lampara incandescente de 240 W, la cual presenta una irradiancia de $1182 \text{ (W/m}^2\text{)}$ [38], y termopares tipo k para la adquisición de los datos de temperatura que se colocaron dentro del cilindro de aluminio recubierto. Este sistema a pequeña escala simula el comportamiento de un dispositivo solar de baja potencia, como puede ser un calentador de agua doméstico. La lampara actúa como fuente de calor, como lo haría el sol, proveyendo de una irradiancia que calienta el cilindro que a su vez provoca el incremento de la temperatura del fluido de trabajo que está en su interior. El proceso de foto conversión se lleva a cabo una vez que la luz proveniente de la lampara incide sobre el recubrimiento de hollín-resina, transformando esta luz en calor que después es transferido por conducción hacia el interior del cilindro. Un parámetro que nos ayuda a corroborar el efecto rectificador, es a través de la eficiencia de retención de energía térmica, ya que es una consecuencia del fenómeno de rectificación térmica al permitir el flujo de calor en una dirección y oponerse en la dirección contraria. Con la ecuación (3.5) podemos calcular la eficiencia de retención de nuestro sistema [90].

$$\eta_{coll} = \frac{mc_p \Delta T}{\int I A dt} \quad (3.5)$$

Donde m es la masa del fluido de trabajo, anticongelante en este caso, c_p es el calor específico, ΔT es la diferencia entre la temperatura final e inicial durante el periodo de recolección de energía térmica, I es la energía incidente que proporciona la lampara incandescente, A es la superficie en la que incide la luz y t es el intervalo de tiempo que dura la prueba.

Otro factor a tener en cuenta para la evaluación de la funcionalidad de nuestro diodo es el factor de eficiencia de retención de energía, el cual fue estimado con la ecuación (3.6)

$$\eta_{ret} = \frac{T_{ret,f} - T_{amb}}{T_{ret,i} - T_{amb}} \quad (3.6)$$

Donde $T_{\text{ret},f}$ es la temperatura final alcanzada por el sistema durante el periodo de retención, lo que equivaldría a la descarga de un capacitor para el caso eléctrico, $T_{\text{ret},i}$ es la temperatura inicial a la cual se encuentra nuestro sistema al iniciar el proceso de calentamiento del sistema, análogo al proceso de carga de un capacitor, y T_{amb} es la temperatura ambiente a la cual se realiza la prueba, que para nuestro caso, en condiciones de laboratorio, se mantiene constante. El comportamiento del sistema de pequeña escala propuesto en este trabajo también se comparó con un sistema similar donde se utilizó pintura negra de alta temperatura que se utiliza en dispositivos solares [91].

También se calculó la eficiencia exergética del sistema de pequeña escala utilizando la ecuación (3.7) [92, 93].

$$\Psi = \frac{mc_p(T_0 - T_i)(1 - \frac{T_e}{T_f})}{I_s A_c (1 - \frac{T_0}{T_s})} \quad (3.7)$$

Donde m es la masa del depósito térmico, c_p el calor específico del líquido refrigerante, T_0 es la temperatura de salida del dispositivo, T_i la temperatura inicial del depósito térmico, T_e es la temperatura ambiente, T_s es la temperatura de cuerpo negro relacionada con la fuente de calor, T_f es la temperatura final del depósito térmico, I es la irradiancia de la fuente de energía, lámpara incandescente, y A_c es la superficie del colector sobre la cual incide la luz proveniente de la lámpara.

El error experimental asociado a cada medida del proceso, conductividad térmica, temperatura, flujo de calor, fue calculada con la siguiente expresión matemática, ecuación (3.8) [94, 95].

$$\delta f = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x)^2 + (\frac{\partial f}{\partial y} \delta y)^2 + \dots + (\frac{\partial f}{\partial w} \delta w)^2} \quad (3.8)$$

Donde f es una función de varias variables, δ es el error asociado a cada variable del proceso, y $x, y, \dots, w$ representan las diferentes variables.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos al realizar la metodología previamente descrita se presentan a continuación, donde se abordan los análisis del recubrimiento como diodo térmico y su aplicación en un sistema absorbedor-acumulador de pequeña escala.

4.1. Conductividad térmica de los recubrimientos de resina-hollín

Primeramente, las muestras de hollín y de resina-hollín que fueron implementadas como recubrimiento presentan homogeneidad de manera macroscópica, por otro lado, de manera microscópica presentan una superficie rugosa (figura 3.9a), se ha reportado [38, 39] que dicha forma contribuye a la transferencia y al proceso de foto conversión. En las imágenes termográficas (figura 3.9b y figura 3.9c) se puede apreciar que el comportamiento térmico es uniforme, en la figura 3.9 c se presenta el análisis termográfico de la muestra con 30% hollín donde se puede observar una temperatura homogénea utilizando la caja térmica.

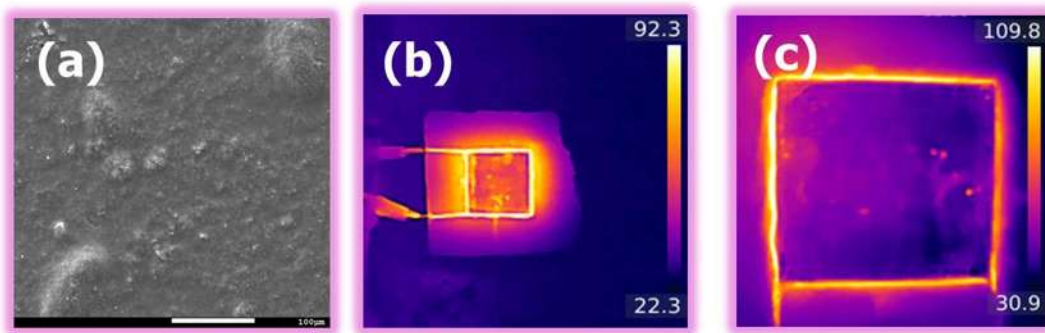


Figura 4.1. (a) micrografía del recubrimiento, análisis termográfico de la superficie metálica (b) arreglo experimental de la caja térmica (c) placa metálica [89].

Con la norma ASTM D3359 método B se analizaron los recubrimientos de hollín con la finalidad de obtener su grado de adherencia de acuerdo a esta norma. Dicha norma consiste en realizar un patrón de rayado sobre el recubrimiento hasta llegar al sustrato, y después colocar una cinta adhesiva para posteriormente removerla. Después de esta prueba se tiene una escala numérica para determinar cuál muestra presenta la mejor adherencia mecánica, 1=0B más del 65 % se despega del sustrato, 3=1-2B entre el 15 y menos del 65% es removido del sustrato, y 5=3B de 5 a 15% es removido. La muestra con 30% hollín y 70% resina presentó los mejores resultados de adherencia mecánica. La figura 3.10 presenta una adherencia de 3B de acuerdo a la categoría de la norma ASTM D3359, la imagen corresponde a la muestra con 30% hollín.

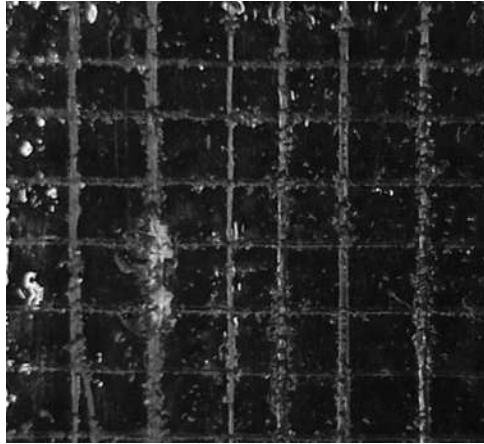


Figura 4.2. Imagen de la muestra con 30% hollín y 70% resina, la cual mostró la mejor adherencia mecánica.

Las muestras M1 y M5 no presentaron adhesión alguna, mientras que las muestras M2 y M4, mostraron un rango de adhesión entre 15 y 65%.

La figura 4.2. muestra los perfiles de temperatura obtenidos para las diferentes muestras, como se puede observar la muestra M3 exhibió mayores temperaturas alcanzadas al realizar la prueba de calentamiento fototérmico respecto de las demás muestras analizadas. Con este resultado y con el de adhesión podemos ver que la muestra M3 presenta los mejores resultados de adherencia y absorción de energía térmica.

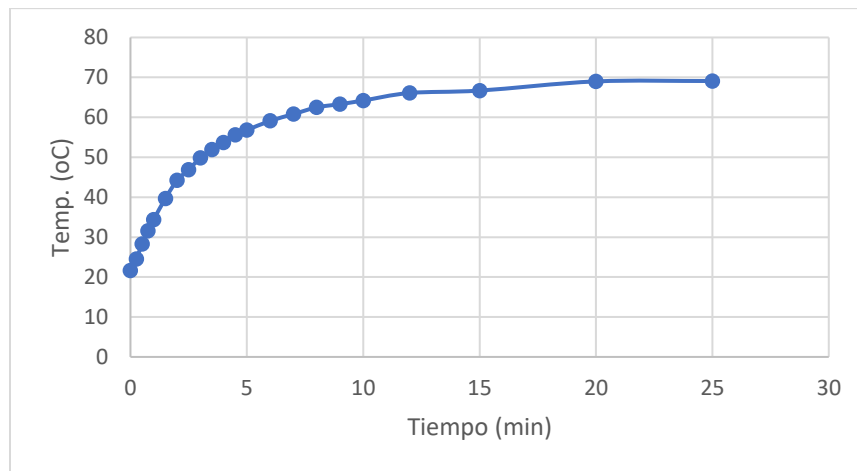


Figura 4.3. perfil de temperatura para la muestra M3 (30% hollín).

La figura 3.12. muestra la conductividad térmica de las muestras analizadas, donde podemos apreciar que la conductividad térmica aumenta a medida que incrementamos la concentración de hollín. Se tiene una relación directa entre una mayor conductividad térmica se alcanzan mayores temperaturas. De esta manera podemos observar que la muestra con el mayor porcentaje de hollín, muestra con 50%, presentó la conductividad térmica más alta. También observamos que los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango de los valores reportados en otros trabajos, que es de 0.09 ± 0.003 W/mK [38].

Tabla 4.1. Conductividad térmica estimada de los recubrimientos resina/hollín

Muestra (% de hollín)	Conductividad (w/m K)
10	0.0667
20	0.073
30	0.077
50	0.0826
100	0.0852

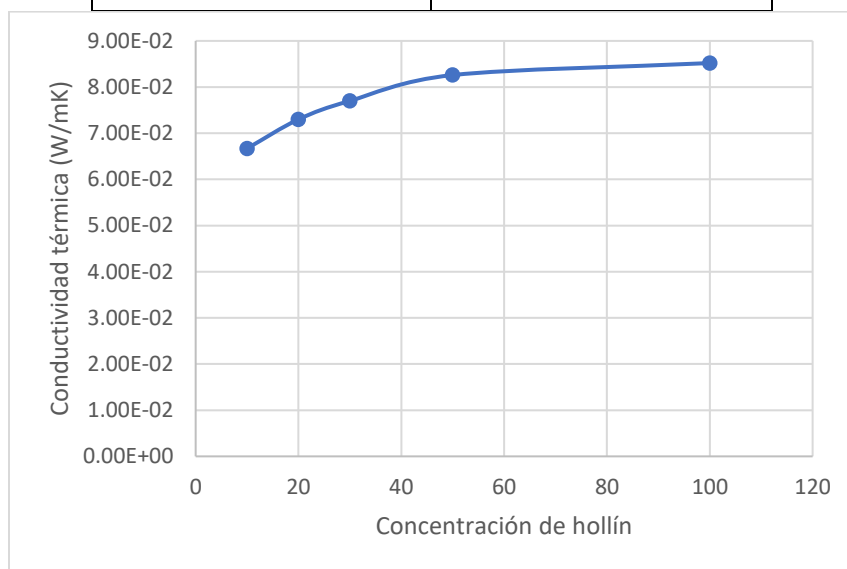


Figura 4.4. conductividad térmica en función de la concentración de hollín.

Relacionando los datos tanto estructurales como térmicos, se observa que la muestra con 10 y 20% de hollín son estructuralmente débiles y sus conductividades térmicas son bajas, lo cual repercute en a la hora de transferir el calor a la placa metálica y alcanzar altas temperaturas, la muestra con 50% aunque mostró la mayor conductividad presenta grietas en su superficie, esto debido a que la alta concentración de hollín provoca una saturación de la mezcla. La muestra con 30% hollín exhibió una estructura mecánicamente estable y adicionalmente se observó que en el rango de 20 a 100 grados centígrados permanece sin cambios considerables en su superficie, lo cual la convierte en la opción más viable para una posible aplicación en un dispositivo termosolar.

4.2. Pruebas de rectificación térmica

Como previamente se ha documentado, la rectificación térmica puede ser alcanzada al unir dos o más materiales con distintas conductividades térmicas [96], para este caso de estudio podemos decir primeramente que, al realizar los experimentos, se observa el fenómeno de rectificación térmica, independientemente de su grado de eficiencia. Las pruebas se

realizaron en un rango de 20 a 100 grados centígrados, y se hizo uso de la ecuación (2.22) para la estimación del factor de rectificación.

Las muestras que se analizaron, para las pruebas de diodo térmico, fueron la que contiene 30% de hollín con un espesor de 150 μm , esta decisión se basó en el balance que presentó en cuanto a conductividad térmica y estabilidad estructural, la otra muestra fue con un recubrimiento multicapa, una capa de 10% y otra de 30%, esto con la finalidad de comparar su comportamiento respecto de la muestra con una sola capa, y poder determinar cómo influye el tener más capas con diferentes niveles de absorción y conducción de calor, ambas muestras se depositaron sobre sustratos de aluminio.

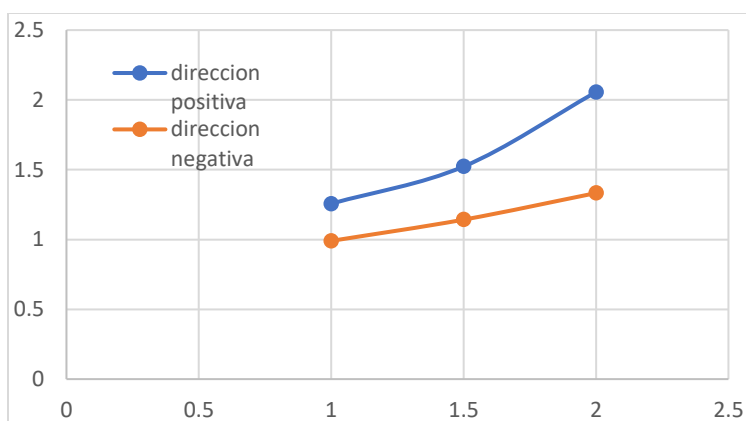


Figura 4.5. corriente suministrada a la muestra contra el flujo que se tiene en las muestras.

Claramente en la figura 4.4. vemos que existe una diferencia en cuanto al flujo de calor en la dirección positiva, que es mayor, y la dirección negativa, la cual presenta un flujo de calor menor, evidenciando el fenómeno de rectificación.

Para la muestra con el 30% se obtuvo una Q_F de 4.3 ± 0.55 y una Q_B de 3.2 ± 0.47 lo cual nos da un factor de rectificación de $35\% \pm 1.2\%$. Para la muestra con doble capa se obtuvo una Q_F de 2.1 ± 0.55 y una Q_B de 1.3 ± 0.50 con un factor de rectificación de $54\% \pm 1.4\%$, estos valores nos indican que el factor de rectificación más alto se encontró con la muestra con doble capa.

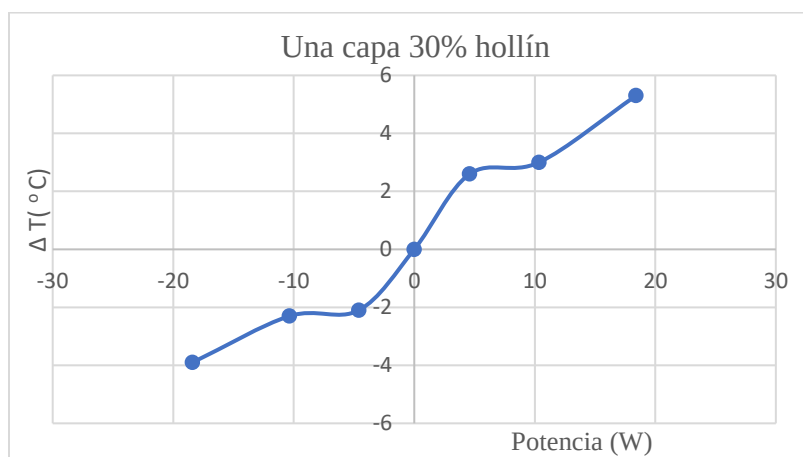


Figura 4.6. Grafica de rectificación del recubrimiento de 30% hollín.

Como se puede observar en la figura 4.4 no existe una linealidad en la dirección positiva y negativa, aunado a esta grafica con los resultados cuantitativos, vemos presente el efecto de diodo para esta muestra.

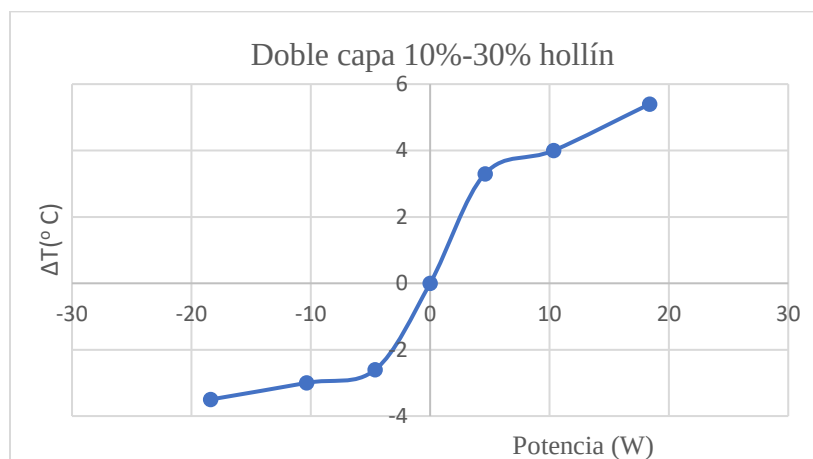


Figura 4.7. doble capa de recubrimiento (10% -30% hollín).

Podemos ver una gráfica aún menos lineal que la que presenta la muestra con 30%, lo cual indica un mayor grado de rectificación, lo cual se corrobora con los datos obtenidos a través de la relación (2.22) que es arriba del 50% de factor rectificación, los cuales están en el rango de los resultados obtenidos en trabajos recientes [59, 75, 78], cabe destacar que los materiales y métodos utilizados en los diodos propuestos en otros trabajos son más sofisticados que los usados en este trabajo de investigación, haciéndolo de menor costo y más asequible para su utilización en dispositivos de baja y mediana temperatura en el ámbito de la energía solar.

El diodo propuesto presenta dos fenómenos por medio de los cuales se alcanza la absorción y la rectificación, primeramente, el hollín absorbe energía de la fuente, en este caso la lámpara, debido al efecto fototérmico, que transforma los fotones en vibraciones térmicas en el rango del infrarrojo [48, 38, 39, 40], lo cual provoca un aumento de la temperatura en el material. El segundo mecanismo, que es el que tiene que ver con la rectificación, es ya que el recubrimiento de hollín transfiere el calor bajo los principios de equilibrio térmico con los materiales con los que está en contacto, en este caso con la placa metálica, la interacción de los fonones puede ser diferente dependiendo de la dirección de aplicación del gradiente de temperatura, esto debido a la diferencia de conductividades térmicas entre el recubrimiento de hollín y el sustrato de aluminio, lo cual provoca que exista un flujo de calor preferencial, ya que mientras la conductividad del recubrimiento aumenta, en la dirección positiva, la del aluminio permanece casi constante.

4.3. Aplicación del recubrimiento de hollín como diodo térmico en un sistema solar de pequeña escala

Con la finalidad de probar la eficiencia del recubrimiento propuesto en este trabajo, se decidió aplicarlo en un sistema de pequeña escala, tomando en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de rectificación. Se utilizaron tres cilindros idénticos de metal, para poder comparar resultados, uno con la doble capa de recubrimiento de hollín de 10 y 30%, el segundo cilindro

con pintura negra de alta temperatura, y un tercer cilindro sin recubrimiento como punto de referencia. Los tres sistemas se sometieron un proceso de calentamiento, los tres cilindros de trabajo se rellenaron con 235 ml de líquido anticongelante, el cual permite un proceso térmico estable, evitando cambios de fase que afecten los resultados.

Para el cilindro con doble capa de recubrimiento se obtuvo una temperatura máxima promedio de 68.5 ± 0.55 °C para el proceso de carga, y de 31.2 ± 0.4 °C para la descarga, con una temperatura ambiente de 25.9 °C. se ajustaron los datos para la carga y la descarga del sistema haciendo uso de la ecuación (2.14), obteniendo para el caso de carga

$$T(t) = 24.7 + 43.7(1 - e^{-0.0279t}) \quad (4.1)$$

Y para el caso de la descarga, se obtuvo la siguiente expresión

$$T(t) = 68.5 - 40.5(1 - e^{-0.0195t}) \quad (4.2)$$

De las expresiones anteriores se puede observar que existe una clara diferencia en cuanto a los valores representativos, tales como la temperatura máxima alcanzada en los dos procesos, carga y descarga, así como en los tiempos característicos en que el sistema alcanza su temperatura de equilibrio, que está relacionada con la siguiente expresión

$$\tau = R_T C_T \quad (4.3)$$

Donde τ es el tiempo de carga o descarga del sistema, R_T es la resistencia térmica y C_T es la capacitancia térmica. Para el sistema de pequeña escala se obtuvo el siguiente resultado haciendo un cociente entre los tiempos característicos de carga y descarga

$$\frac{\tau_d}{\tau_c} = 1.43 \quad (4.4)$$

Podemos notar que el tiempo característico de descarga del sistema es mayor que el tiempo de carga, ahora ya que la capacitancia térmica es la misma, por tratarse del mismo material, tenemos que lo que cambia es la resistencia térmica, para la configuración positiva es menor que para la configuración negativa, evidenciando que ocurre un efecto de diodo térmico.

De acuerdo con las ecuaciones (3.5) y (3.6) que son comúnmente utilizadas en la evaluación de diodo térmico para el caso de sistemas termosolares, se obtuvieron resultados de una eficiencia de recolección de $34\% \pm 1.1$ y una eficiencia de retención de $17.8\% \pm 0.9$. valores que se encuentran dentro de los rangos reportados en trabajos relacionados con el área de energía solar [97, 98, 99, 100, 101], en contraste para la pintura negra se obtuvo una eficiencia de recolección de $31.4\% \pm 1$ y de retención de $8.4\% \pm 1$. Por otro lado, para el cilindro sin recubrimiento se obtuvo una temperatura máxima de 43.4 °C, y para el de pintura negra de alta temperatura de 64.2 °C, lo cual demuestra la mayor eficiencia del recubrimiento propuesto en este trabajo a la hora de absorber radiación térmica como se puede observar también en la figura 4.8d donde se muestra el proceso de carga y descarga para las muestras.

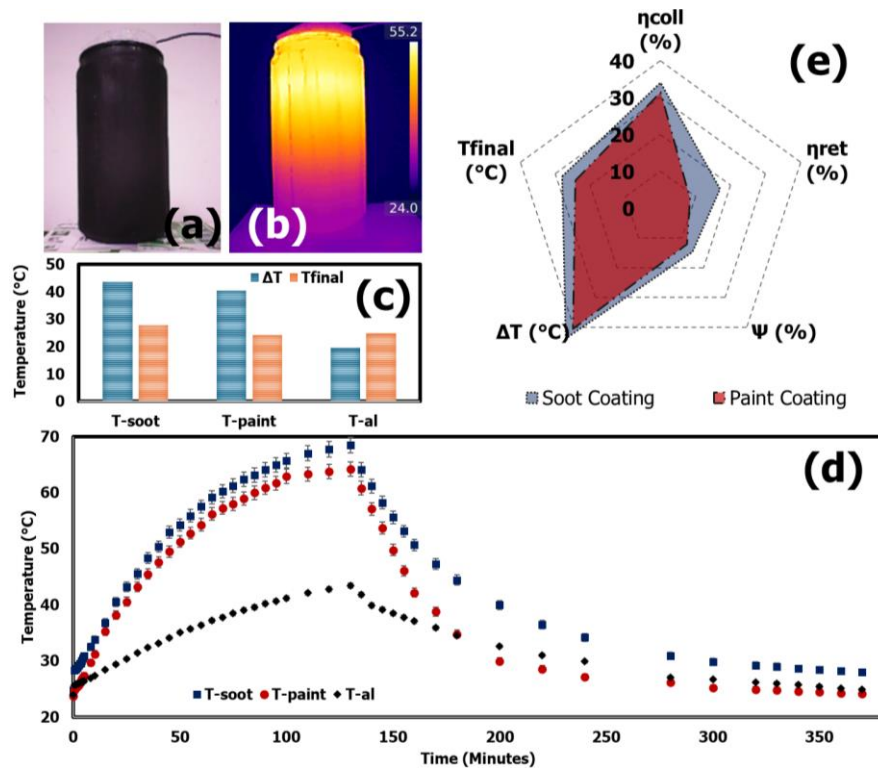


Figura 4.8. Análisis del recubrimiento en un sistema de pequeña escala: (a) Cilindro de trabajo (b) análisis tomográfico (c) Perfiles de gradientes de temperaturas (d) curvas de distribución térmica de carga y descarga energética (e) análisis comparativo de temperaturas y coeficientes de recolección y retención.

Este trabajo presenta algunas limitantes que no pudieron ser analizados y que quedaban fuera de los objetivos del trabajo, pero que representan un área de oportunidad para trabajos futuros, como puede ser el estudio de la rugosidad del recubrimiento y como puede afectar el grado de rectificación, el uso de multicapas alternantes y distintos espesores, el número de capas óptimo para la rectificación, así como un estudio de resistencia del recubrimiento, ante condiciones climatológicas y mecánicas, así mismo realizar un estudio tecno-económico para poder compararlo con otros materiales utilizados para el mismo fin y determinar las ventajas que puede tener en cuanto a costos e impacto ambiental.

5. CONCLUSIONES

Al realizar este trabajo de investigación, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

Primeramente, en cuanto a la determinación de la conductividad térmica de las muestras de hollín/resina, se estimó un valor en el rango de los 0.08 W/mK, el cual está dentro de los rangos reportados en otros trabajos para el caso del hollín, por lo que el experimento dio resultados satisfactorios, que permitieron su elección para el desarrollo del diodo térmico.

Para el caso de la determinación de la rectificación térmica, se demostró que la mezcla de hollín/resina, como recubrimiento de fácil acceso y manufactura, presenta un flujo de calor preferencial, evidenciando el fenómeno de diodo térmico. Se estimó un factor de rectificación para la muestra con una sola capa de 30% hollín de alrededor de 40%, y para la doble capa de recubrimiento, de 10 y 30% de hollín, arriba del 50% por lo que la muestra con doble capa demostró una mayor rectificación térmica al combinar dos recubrimientos con distintas conductividades térmicas.

En cuanto a la implementación del material propuesto como diodo térmico, a través de un sistema termosolar de pequeña escala, se concluye que mostró evidencias de tener un flujo de calor preferencial, con lo cual permitió tener una eficiencia de recolección y retención de energía mayor a la presentada por la pintura negra de alta temperatura que suele usarse como opción económica para aplicaciones solares, además de que se encuentra en los rangos de eficiencia reportados en trabajos recientes donde se hace uso de concepto de diodo térmico.

Finalmente, de manera general se puede concluir que se demostró, que el hollín con su estructura amorfa, mostró un comportamiento de diodo térmico, y que se pudo implementar en un sistema de pequeña escala evidenciando su funcionalidad para absorber y almacenar energía.

REFERENCIAS

- [1] p. 2.-2. sener, «[www.cenace.gob.mx/Docs/16 MARCOREGULATORIO/Prodecen](http://www.cenace.gob.mx/Docs/16%20MARCOREGULATORIO/Prodecen),» 18 marzo 2024. [En línea]. Available: [https://www.cenace.gob.mx/Docs/16 MARCOREGULATORIO/Prodecen](https://www.cenace.gob.mx/Docs/16%20MARCOREGULATORIO/Prodecen). [Último acceso: 24 junio 2025].
- [2] J. C. S. R. G. P. I. C. H. R. P. U. F. R. G. D. M. D. D. C. P. G. M. R. J. P. F. V. S. Ortin, Energías renovables y eficiencia energetica, Canarias: Instituto tecnologico de Canarias, 2008.
- [3] G. A. Isaac, «SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA EN EL CAMBIO DE FASE DE MATERIALES PARA UN SECADOR SOLAR TIPO HOHENHEIM.,» Bogota, 2015.
- [4] S. G. Daniel, «Calculo, diseño y análisis de una central termosolar de colectores cilindrico-parabolicos operando con sales fundidas,» Madrid, 2012.
- [5] M. Moscoso, «Aplicacion de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura,» Barcelona, 2016.
- [6] H. d. Beijer, «Product development in solar water heating,» *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 201-204, 1998.
- [7] A. N. d. E. solar, «www.ANES.com,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.anes.org/cms/index.php>. [Último acceso: 2021].
- [8] P. Fernadez Diez, «Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura,» 2008. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/599152965/Procesos-Termosolares-en-Baja-Media-y-Alta-Temperatura-Fernandez>. [Último acceso: 2024].
- [9] D. F. G.-G. D. I. G.-G. Jose Misael Chavarria Martinez, «Síntesis de puntos cuánticos de PbS con un “band gap” óptimo para aplicaciones fotovoltaicasSynthesis of PbS quantum dots with an optimal band gap for photovoltaic applications,» *Ingenierias*, pp. 3-15, 2025.
- [10] F. L.-T. M. E.-G. M. C.-D. J. D. M. R. d. C.-G. J. A.-G. O. A. y. G. O. D.M. Herrera-Zamora, «Recubrimientos selectivos y la energia renovable una opcion para conversion de energia solar a energia termica,» Mérida.
- [11] C. Kittel, Introduccion a la fisica del estado solido, Octava ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [12] P. P. P. Askeland. Donald R, Ciencia e ingeniería de los materiales, Cuarta ed., México: Thompson, 2004.

- [13] H. B. Callen, Termodinámica e introducción a la termoestadística, Segunda ed., John Wiley & Sons, 1975.
- [14] R. A. S. J. W. J. Jr, Física para ciencias e ingeniería, Séptima ed., vol. 1, México: Cengage Learning, 2009.
- [15] Z. P. T. Hryniewicz, «Thermal Expansion of Solids,» *Journal of Modern Physics*, pp. 793-802, 2012.
- [16] J. Á. M. Valadez, Transferencia de calor, Segunda ed., México: Oxford, 2011.
- [17] G. Sidebotham, Heat Transfer Modeling and inductive approach, Springer, 2015.
- [18] R. Betancourt Grajales, «Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento,» 2008. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9283>. [Último acceso: 2023].
- [19] W. D. Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Cuarta ed., Reverte, 2005.
- [20] F. J. B.-R. S. A. R.-L. E. S.-Á. J. A.-T. A. Cruz-Álvarez, «Mecanismos de transferencia de calor Heat Transfer Mechanisms,» 2021.
- [21] «tv411 tune in to Learning,» [En línea]. Available: <https://www.tv411.org/en-espanol/ciencia/calor-ciencia-leccion/activity/1/7>. [Último acceso: 2025].
- [22] «Aquí estamos on line,» [En línea]. Available: <https://aqui estamosonline.com/espectros-de-luz-parte-ii/>. [Último acceso: 2025].
- [23] G. H. J. D. M. C. B. Ralph H. Pretucci. F, Química general: Principios y aplicaciones modernas, Décima ed., Madrid: Pearson education, 2011.
- [24] J. P. Holman, Transferencia de calor, Décima ed., Compañía editorial continental, 1999.
- [25] M. e. C. M. G. O. G. M. e. A. C. A. d. l. F. M. M. e. A. M. B. R. H. D. S. M. O. L. C. A. T. d. Loera, «Reporte de inteligencia tecnológico energía termosolar,» 2018.
- [26] M. M. T. F. M. E. M. Mubarrat, «Research Advancement and Potential Prospects of Thermal Energy Storage in Concentrated Solar Power Application,» *Int. J. Thermofluids*, 2023.
- [27] F. H. S. S. M. K. F. Jamil, «Application of advanced energy storage materials in direct solar desalination: A state of art review,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2023.

- [28] H. S. M. M. K. Z. A. I. T. Y. K. J. E. Hasan, «Solar Thermal Systems and the dawn of Energy,» *Energies*, vol. 16, pp. 1-30, 2023.
- [29] J. C. Z. Y. B. T. J. C. J. G. Z. X. X. C. T. T. S. Y. Zhu, «Sun, Spectrally selective solar absorber and thermal infrared suppression based on hollow cylindrical microstructures,» *Opt. Commun.*, vol. 549, n° 129910, 2023.
- [30] Y. S. H. W. T. L. X. Z. S. G. J. L. Y. Li, «Recent advances in carbon-based materials for solar-driven interfacial photothermal conversion water evaporation: Assemblies, structures, applications, and prospective,» *Carbon Energy*, vol. 5, pp. 1-42, 2023.
- [31] S. K. S. P. K. S. R. B. M. Tripathi, «A comprehensive review on solar to thermal energy conversion and storage using phase change materials,» *J. Energy Storage*, 2023.
- [32] M. G. M. R. B. E. P. Vazquez, «Síntesis y caracterización de pinturas selectivas de Co₂O₄ para superficies selectivas,» *Avances en energías renovables*, vol. 13, pp. 110-119, 2009.
- [33] C. E. Keneddy, «Progress to develop advanced solar selective coating,» *National renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [34] K. T. R. N. T. B. Y. M. D. G. T. Roberts, «Selective Solar Absorber coating research at the CSIR,» *World Renewable Energy Congress 2011*, 2011.
- [35] C. E. Kennedy, «Review of Mid- to High Temperature Solar Selective Absorber Materials,» *National Renewable Energy Laboratory*, 2002.
- [36] J. L. J. D. J. I. C. M. S. Peter Bermel, «Selective Solar Absorbers,» *Annual Review of Heat Transfer*, 2012.
- [37] W. a. B. W. W. J. a. Duffie, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., 2003.
- [38] M. G.-A. L. H.-R. A. M.-F. T. L.-L. M. B.-S. J. Z.-M. L.B. López-Sosa, «Ecological solar absorber coating: A proposal for the use of residual biomass and recycled materials for energy conversion,» *Sol. Energy*, pp. 238-248, 2020.
- [39] M. G.-A. M. H.-R. A. M.-F. I. S.-R. J. Z.-M. L.B. López-Sosa, «Electron microscopy characterization of forest biomass soot as solar energy absorption material,» *Microsc. Microanal.*, 2019.
- [40] F. R.-H. M. G.-A. I. S.-R. J. Z.-M. L. H.-R. A. M.-F. L.B. López-Sosa, «Fullerene Carbon Soot Characterization for Application as a New Solar Energy Absorption Material,» *Microsc. Microanal.*, 2020.

- [41] J. Z.-M. L. H.-R. H. S.-C. M. G.-A. L.B. López-Sosa, «Development a low-cost solar absorber coating based on soot of biomass-forest: Thermal characterization and application in a solar cooking system,» *Rev. Mex. Ing. Quim.*, 2018.
- [42] R. D. V. B. O. R. Masera, «From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico,» *Energy Sustain.*, pp. 25-36, 2005.
- [43] R. D. E. O. R. M. V. M. Berrueta, «Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico,» *Renew. Energy*, pp. 859-870, 2007.
- [44] L. B. L. Sosa, «“Caracterización y determinación de los parámetros óptimos de recubrimientos de bajo costo empleados en cocinas solares”.,» Morelia, 2016.
- [45] H. S. Campuzano, «“Caracterización óptica y térmica de recubrimientos absorbentes a base de hollín para estufas solares”.,» México, 2018.
- [46] L. S. L. Bernardo, «Procesamiento y caracterización de hollín de carbono, para su utilización como material funcional en sistemas termoconversion solar,» México, 2020.
- [47] H. R. Sandoval, «Determinacion del comportamiento óptico y térmico de la resina de pino para la elaboración de un recubrimiento de bajo costo para aplicaciones solares,» Morelia, 2020.
- [48] J. Z.-M. M. G.-A. H. S.-C. H. C.-B. F. R. H. L.B. López-Sosa, «Into the net zero emissions and climate change control: From solid carbon waste to effective solar convertors,» *Carbon*, pp. 362-373, 2022.
- [49] A. R. Arkadiy Arsentev, «Using Phase Change Materials (PCM) to Reduce Energy Consumption in Buildings,» *E3S web of conferences*, 2023.
- [50] C. S. Ioan sarbu, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage,» *Sustainability*, 2018.
- [51] L. F. C. Harald Mehling, Heat and cold storage with PCM An up to date introduction into basics and applications, primera ed., Springer Nature, 2008.
- [52] S. K. S. Arun Kumar, «A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application,» *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 462-469, 2015.
- [53] C. Herrick, «Melt-freeze-cycle life-testing of Glaubers salt in a rolling cylinder heat storage,» *Solar Energy*, vol. 28, pp. 99-104, 1982.
- [54] I. Ibáñez sales, «Estudio de acumuladores de energía,» 2019.

- [55] F. J. N. A. G.-S. A. Oliver, «Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica,» *Materiales de construcción* , vol. 62, pp. 131-140, 2012.
- [56] S. P. A. M. J. P. O'callaghan, «A thermal rectifier,» *Journal of Physics D*, pp. 1352-1358, 1970.
- [57] M. P. a. G. C. M. Terraneo, «Controlling the energy flow in nonlinear lattices: A model for a thermal rectifier,» *Phys. Rev.*, pp. 943021-943024, 2002.
- [58] C. M.-M. Jean-Pierre Eckmann, «Thermal rectification in billiardlike systems,» *Phys. Rev.*, pp. 1-4, 2006.
- [59] T. H. H. L. M.Y. Wong, «A review of state of the art thermal diodes and their potential applications,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 164, 2021.
- [60] C. Starr, «The Copper Oxide Rectifier,» *J. Appl. Phys*, vol. 7, pp. 15-19, 1936.
- [61] L. W. G. C. Baowen Li, «Thermal Diode: Rectification of Heat Flux,» *Phys.Rev.Lett.*, 2004.
- [62] N. L. L. W. B. L. Nuo Yang, «Thermal rectification and negative differential thermal resistance in lattices with mass gradient,» *Phys. Rev. B*, 2007.
- [63] B. Li, L. Wang y G. Casati, «Negative differential thermal resistance and thermal transistor,» *Appl. Phys. Lett*, vol. 88, 2006.
- [64] a. B. L. Lei Wang, «Thermal Memory: A Storage of Phononic Information,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, 2008.
- [65] B. L. Lei Wang, «Thermal Logic Gates: Computation with Phonons,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, 2007.
- [66] J. R. L. W. G. Z. P. H. B. L. Nianbei Li, «Colloquium: Phononics: Manipulating heat flow with electronic analogs and beyond,» *Rev. Mod. Phys.*, vol. 84, 2012.
- [67] H. Grahm, *Semiconductor superlattices : growth and electronic properties*, World Scientific, 1995.
- [68] P. Kapitza, «THE STUDY OF HEAT TRANSFER IN HELIUM II,» *Physics*, 1971.
- [69] F. H. B. M. M. J. Rodríguez Sánchez, «Desarrollo de rectificadores térmicos basados en el efecto de desacople acústico entre materiales,» 2017.

- [70] A. B. S. M. L. David G. Cahill, «Interface thermal conductance and the thermal conductivity of multilayer thin films,» *High Temperatures - High Pressures*, vol. 32, pp. 135-142, 2000.
- [71] D. Sawaki, W. Kobayashi, Y. Moritomo y I. Terasaki, «Thermal rectification in bulk materials with asymmetric shape,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, 2011.
- [72] D. S. T. O. T. K. Y. M. a. I. T. Wataru Kobayashi, «Thermal Rectification in the Vicinity of a Structural Phase Transition,» *Applied Physics Express*, vol. 5, 2012.
- [73] S. L. H. B. J. J. Chao Song, «Design of thermal diodes using asymmetric thermal deformation of a Kirigami structure,» *Materials & Design*, vol. 193, 2020.
- [74] M. S. K. Z. I. I. F. A. S. V. C. M. S. T. B. G. M. Kasprzak, «High-temperature silicon thermal diode and switch,» *Nano Energy*, vol. 78, 2020.
- [75] D. X. Y. Y. T.-L. R. G. Z. Y.-F. W. C.-J. Z. P.-G. P. L.-G. W. L.-T. L. He Tian, «A novel solid-state thermal rectifier based on reduced graphene oxide,» *scientific reports*, pp. 1-7, 2012.
- [76] M. P. R. Y. T. M. Z. M. L. S. H. T. E. H. T. T. Bensong Chen, «Flexible thermal rectifier based on macroscopic PDMS@graphite composite film with asymmetric cone-shape interfaces,» *Carbon*, vol. 126, pp. 464-471, 2018.
- [77] Y. L. X. L. S. S. T. Z. P. S. W. G. M. B. T. L. R. C. K. H. S. S. Ramesh Shrestha, «Dual-mode solid-state thermal rectification,» *nature communications*, vol. 11, 2020.
- [78] K. K. S. A. G. B. A. K. M. M. R. Timm Swoboda, «Thermal rectification in multilayer phase change material structures for energy storage applications,» *iScience*, vol. 24, 2021.
- [79] M. A. M. M. Hadi Farzan, «Thermal assessment of a new planar thermal diode integrated collector storage solar water heater in different partial vacuums: An experimental study,» *Renewable Energy*, vol. 208, pp. 119-129, 2023.
- [80] A. Sastre Alfaro, «Análisis de colectores solares de media temperatura,» 2016.
- [81] «Andalucart,» [En línea]. Available: <http://www.andalucart.com>. [Último acceso: 2023].
- [82] J. F. Guarachi Solano, «DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN POLVOS AISLANTES TÉRMICOS DE MgO A ALTA TEMPERATURA: EFECTO DE LA DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE GRANO E IMPUREZAS.,» 2011.

- [83] J. A. G. A. D. Gutiérrez, «Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado,» *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA*, vol. 16, p. 41–48, 2012.
- [84] E. E. C.-E. J. P.-C. C. M. Daza-Mafioli, «Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 15, pp. 101-116, 2019.
- [85] U. d. Sonora, «Determinacion de la conductividad termica. Norma ASTM C 518,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8729/Capitulo3.pdf>. [Último acceso: 2025].
- [86] E. B. L. L. A. B. G. C. M. C. C. Buratti, «Mechanical characterization and thermal conductivity measurements using of a new 'small hot-box' apparatus: innovative insulating reinforced coatings analysis,» *Journal of Building Engineering*, vol. 7, pp. 63-70, 2016.
- [87] ASTM D3359, «Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test 1,» 2012. [En línea]. Available: <http://doi.org/10.1520/D3359-09E02.2>. [Último acceso: 2024].
- [88] A. Y. O.-R. M. M.-M. J. C. C.-H. J. C. L. V. G. M. R.-T. M. R. C. A. G. S. O. Luis Bernardo López-Sosa, «Results in Engineering Multivariate analysis of materials used in rural housing in Mexico considering sustainability indicators : Towards suitable house construction,» *Results in Engineering*, vol. 25, 2025.
- [89] L. M. H. R. L. B. L. S. Herminio Rebollo Sandoval, «Proposal for a Thermal Diode with Low-Environmental-Impact Materials for Thermosolar Applications,» *International Journal of Thermophysics*, vol. 46, 2025.
- [90] A. Z. J. D. M. M. S. Adrian Pugsley, «Theoretical and experimental analysis of a horizontal planar Liquid-Vapour Thermal Diode (PLVTD),» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 144, 2019.
- [91] COMEX, «Esmalte Alquídico Modificado Resistente a Altas temperaturas,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.comex.com.mx/getattachment/94344e52-eb00-47ca-bae9-b688a25dbae2/.aspx/>. [Último acceso: 2025].
- [92] A. O.-C. D. E.-G. J. Z. M. M. G.-A. LB López-Sosa, «Solar air heating system with low environmental impact materials: Mathematical model and optothermal characterization,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, 2021.
- [93] A. P. V. T. S. T. S.R. Park, «Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 105-123, 2014.

- [94] T. H. I. Hughes, *Measurements and their Uncertainties*, New York: Oxford University Press, 2010.
- [95] J. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, Second ed., Sausalito, CA: University Science Book, 1991.
- [96] K. F. Faraz Kaiser Malik, «A review of thermal rectification in solid-state devices,» *Journal of Semiconductors*, vol. 43, n° 10, 2022.
- [97] A.-J. N. Khalifa, «Thermal performance of locally made flat plate solar collectors used as part of a domestic hot water system,» *Energy Conversion and Management*, vol. 40, pp. 1825-1833, 1999.
- [98] N. M. Nahar, «Capital cost and economic viability of thermosyphonic solar water heaters manufactured from alternate materials in India,» *Renewable Energy*, vol. 26, pp. 623-635, 2002.
- [99] R. C. K.M. Pandey, «A review on analysis and development of solar flat plate collector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 641-650, 2017.
- [100] S. Faisal Ahmed, M. Khalid, M. Vaka, R. Walvekar, A. Numan, A. Khaliq Rasheed y N. Mujawar Mubarak, «Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review,» *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, 2021.
- [101] I. J. L. M. S. Ramkishore Singh, «Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 270-298, 2016.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Doctorado en Ciencias en Ingeniería Física	
Título del trabajo	DESARROLLO DE DIODO TÉRMICO PARA APLICACIONES TERMOSOLARES	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Herminio Rebollo Sandoval	herminio.rebollo@umich.mx
Director	Luis Mariano Hernández Ramírez	mariano.ramirez@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Gonzalo Viramontes Gamboa	doc.cs.ingenieria.fisica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	no	
Traducción a otra lengua	no	
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Herminio Rebollo Sandoval 
Lugar y fecha	Morelia Michoacán México, 12 de febrero de 2026

Herminio Rebollo Sandoval

DESARROLLO DE DIODO TÉRMICO PARA APLICACIONES TERMOSOLARES.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:557477614

Fecha de entrega

16 feb 2026, 9:42 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

16 feb 2026, 9:47 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

DESARROLLO DE DIODO TÉRMICO PARA APLICACIONES TERMOSOLARES.pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB

60 páginas

14.886 palabras

78.571 caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 4%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.