

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD SALTILLO

**“Desarrollo de un dispositivo de almacenamiento
térmico para cocción de alimentos”**

T E S I S

Que presenta

Ing. Javier Alejandro Martínez Ligas

Para la obtención del grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA

Director de tesis: Dr. Gregorio Vargas Gutiérrez

Ramos Arizpe, Coahuila

AGOSTO, 2023

Dedicatoria

A mi familia, en especial a mi madre Belén y mi hermana Paola que siempre han estado ahí para mí, a mi novia Dayana que me apoyó en todo momento, a mis profesores que han sido una guía para mí, a mis amigos que me ayudaron a despejarme en los momentos difíciles, y en general a todas aquellas personas que cuando pudieron ayudarme lo hicieron, no hubiera podido sin ustedes, ¡GRACIAS!

Agradecimientos

Agradezco principalmente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y al Centro de Investigación en Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Saltillo (CINVESTAV US) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis, al Dr. Miguel Ángel Aguilar González por su gran apoyo en la caracterización de muestras por microscopía y por contactarme con las personas correctas, al Dr. Francisco Botello Rionda por la caracterización térmica de mis muestras, al M.C. Sergio Rodríguez Arias y M.C. Félix Ortega Celaya por proporcionarme el servicio de difracción de rayos X, al Dr. Tirso Emanuel Flores Guía y al Dr. Marco Antonio García Lobato a ambos por siempre apoyarme en cualquier problema, al Dr. Fabián Fernández Luqueño por orientarme, evaluar este trabajo y prestarme reactivos de igual manera a la Lic. María del Socorro García Guillermo por haberme prestado reactivos y poder avanzar en mi trabajo, a la Lic. Diana Alicia Palacios Duran que siempre me apoyo en cualquier duda que tenía y en la agilización de trámites administrativos, al personal de limpieza por mantener mi lugar de trabajo aseado, al Dr. Felipe Ávalos Belmontes, Dr. Francisco José González González y al M.C. Rodrigo Macías Garbett por dedicarme su tiempo para ayudarme a analizar la caracterización térmica, al Ing. Teodoro Caballero González por ayudarme en la preparación de muestras, al Ing. Jesús López Zavala y al Lic. Francisco Martín Salas Hinojosa que me ayudaron a realizar la experimentación, a la Lic. Estefany Palomo Ligas y al Lic. Carlos Gasca Fuentes por ayudarme en la etapa de la cocción de alimentos, a la Dra. Lissethe Palomo Ligas y al Dr. Sendar Daniel Nery Flores por prestarme material de laboratorio, a la Dra. Claudia Magdalena López Badillo por aconsejarme y apoyarme en todo momento, a la Dra. María Esther Sánchez Castro por retroalimentarme e indicarme en que puedo mejorar y al Dr. Gregorio Vargas Gutiérrez que me ha brindado de su amplia experiencia y me ha capacitado para afrontar los problemas de otra manera, gracias a todos ustedes, han formado un recurso humano de gran valor.

Contenido

1	Introducción	1
2	Antecedentes	3
2.1	Tipos de cocinas solares	3
2.2	Materiales de cambio de estado/fase (PCM)	6
2.3	Materiales de cambio de fase y cocinas solares	7
2.4	Incremento de conductividad térmica en materiales de cambio de estado	9
2.5	Transporte de calor en compósitos de PCM	11
2.6	Diseño de un acumulador térmico	12
2.7	Metodología QFD	16
3	Justificación	18
4	Objetivos	21
4.1	General	21
4.2	Particulares	21
5	Metodología científica	22
5.1	Preparación del PCM con grafito	23
5.2	Caracterización del PCM	24
5.3	Análisis estadístico	26
5.4	Selección del PCM	26
5.5	Cálculo de potencia y eficiencia térmica de concentrador solar de disco parabólico	27
5.6	Diseño de acumulador térmico	28
5.7	Diseño de acumulador térmico y simulación asistidos por computadora	29
5.8	Diseño de sistema de seguimiento solar	30
5.9	Emisiones de CO₂ equivalente	30
5.10	Rendimiento del acumulador térmico	31

5.11	Aplicación del acumulador térmico.....	31
6	Resultados y discusión.....	32
6.1	Preparación del PCM con grafito.....	32
6.2	Caracterización del PCM.....	33
6.3	Análisis estadístico.....	47
6.4	Selección del PCM.....	49
6.5	Medición de potencia y eficiencia térmica del concentrador solar de disco parabólico.....	57
6.6	Diseño de un acumulador térmico.....	61
6.7	Diseño de un acumulador térmico asistido por computadora y simulación térmica.....	62
6.8	Diseño de un sistema de seguimiento solar.....	64
6.9	Análisis de emisiones de CO ₂	66
6.10	Construcción de un acumulador térmico.....	67
6.11	Rendimiento del acumulador térmico.....	70
6.12	Aplicación de un acumulador térmico.....	75
6.13	Evaluación del acumulador térmico mediante matriz QFD.....	82
7	Conclusiones.....	84
8	Recomendaciones para trabajos futuros.....	85
9	Referencias.....	86

Índice de figuras

Figura 1. Cocina solar tipo caja [10].	3
Figura 2. Cocina solar tipo panel [11].	4
Figura 3. Cocina solar tipo disco parabólico [13].	4
Figura 4. Cocina solar de tubo evacuado al vacío [15].	5
Figura 5. Matriz QFD.	16
Figura 6. Diagrama de la metodología.	22
Figura 7. PCM base y PCM con grafito. a) Espátula de acero inoxidable sosteniendo al PCM base después del proceso de molienda. b) Muestras de PCM con 5, 10 y 15 % de grafito procesadas mediante el método de dos pasos.	32
Figura 8. Resistencia eléctrica en kOhm del PCM con 5 % en masa de grafito medida con un multímetro digital a) en su superficie y b) en el interior.	33
Figura 9. Entalpías de fusión endotérmicas y exotérmicas del PCM por ambos métodos en función del porcentaje en masa de grafito.	34
Figura 10. Termograma de las muestras con 0, 5, 10 y 15 % de grafito preparadas mediante el método de la mezcla simple.	35
Figura 11. Termograma de las muestras con 0, 5, 10 y 15 % de grafito preparadas mediante el método de dos pasos.	36
Figura 12. Vista interna de compuesto de PCM base con grafito realizado mediante el método de dos pasos.	38
Figura 13. Difractograma del grafito comercial utilizado en el PCM	39
Figura 14. Análisis de difracción de rayos X del PCM. a) Difractograma del PCM. b) Carta cristalográfica del nitrato de potasio. c) Carta cristalográfica del nitrato de sodio d) Carta cristalográfica del nitrito de sodio.	41
Figura 15. Difractogramas de las muestras realizadas mediante el método 1 (M1) y el método 2 (M2).	42
Figura 16. Tubo de ensaye de 10 mm x 10 cm con termopar tipo K en compuesto.	44
Figura 17. Análisis de microscopía electrónica de barrido. a) Micrografía de la superficie del PCM. b) Mapeo elemental de sodio (Na). c) Mapeo elemental de potasio (K).	45
Figura 18. Micrografía de una muestra con 15 % de grafito preparada mediante el método de mezclado simple.	46

Figura 19. Micrografía de una muestra con 15 % de grafito preparada mediante el método 2.	47
Figura 20. Análisis de beneficio/costo del ahorro, tiempo de procesamiento, entalpía de fusión y conductividad térmica en función del porcentaje en masa de grafito.....	52
Figura 21. Matriz QFD para selección de PCM.	53
Figura 22. Ahorro total del PCM GT y GR en función del tiempo.	54
Figura 23. Ahorro económico en función del tiempo y el costo de energía eléctrica en kWh.	55
Figura 24. Análisis termogravimétrico de los PCM GT y GR.	56
Figura 25. Difractogramas de PCM GR y GT. a) Difractogramas del PCM GR y GT antes y después de 19 ciclos de calentamiento enfriamiento. b) Difractograma del PCM GT y las cartas cristalográficas de nitrato de potasio, nitrato de sodio y nitrito de sodio.	57
Figura 26. Rampas de calentamiento entre la olla sin hollín y sin aislamiento (SHSA), la olla con hollín sin aislamiento (CHSA) y la olla con hollín y aislamiento (CHCA), así como la temperatura ambiente (T_{∞}).....	58
Figura 27. Set de medición de potencia y eficiencia para olla de aluminio con hollín y aislamiento térmico en concentrador solar de disco parabólico.	59
Figura 28. Cocción de frijoles con concentrador solar de disco parabólico en olla de presión. a) Pesado de 188 g de frijoles. b) Pesado de 880 g de agua. c) Concentrador solar cocinando frijoles en olla de presión utilizando la radiación solar. d) Frijoles negros cocidos después de 30 minutos de cocción.	60
Figura 29. Diseño asistido por computadora del acumulador térmico.	62
Figura 30. Corte transversal del diseño asistido por computadora del acumulador térmico y sus distintas configuraciones de superficies extendidas.	63
Figura 31. Resultados de simulación térmica en estado transitorio para las distintas configuraciones de superficies extendidas.....	64
Figura 32. Circuito de control para sistema de seguimiento solar.....	65
Figura 33. Sistema de seguimiento solar con sus componentes.	66
Figura 34. Acero inoxidable utilizado en el acumulador térmico. a) Lámina rolada y soldada. b) y c) superficies extendidas.....	67

Figura 35. PCM GT. a) Compuestos del PCM GT. b) PCM GT mezclado en polvo y parrilla de calentamiento.	69
Figura 36. Comparación entre fotografía real y termografía del PCM vaciado en el contenedor del acumulador térmico.....	69
Figura 37. Acumulador térmico terminado a 100.4 °C debajo de su tapa.	70
Figura 38. Evolución térmica vs tiempo del acumulador térmico en condiciones reales.....	71
Figura 39. Potencia del acumulador térmico en función del tiempo en horas.	72
Figura 40. Proceso de carga y descarga de acumulador térmico. a) Acumulador térmico en el punto focal del concentrador solar. b) PC Laptop registrando datos del microcontrolador Arduino Mega 2560. c) Termopar tipo K midiendo la temperatura del acumulador térmico.	73
Figura 41. Deformación térmica y presurización del acumulador térmico. a) Deformación de la superficie del acumulador térmico. b) Herramientas para perforar y enderezar el acumulador térmico. c) Acumulador térmico perforado.	74
Figura 42. Prueba de cocción de arroz con acumulador térmico. a) Olla con su tapa y arroz en su interior sobre acumulador térmico. b) Olla con arroz y agua destapada y 8 sensores de temperatura DS18B20.....	76
Figura 43. Cocción de huevo y salchicha en acumulador térmico. a) Medición de temperatura en la parte externa del acumulador térmico con su tapa. b) Huevos con salchicha cocinándose en el acumulador térmico sin tapa. c) Comprobación de la cocción de la salchicha y de la yema de huevo a través de un corte con un cuchillo. d) Huevos y salchicha cocidos con cortes hechos con un cuchillo.....	77
Figura 44. Alimentos cocidos con acumulador térmico. a) Carne de res, nuggets de pollo y camarones después de 2.25 h de cocción. b) Corte realizado en trozo de carne de res para observar su cocción interna. c) Corte realizado en camarón para observar su cocción interna. d) Cortes realizados en los 3 alimentos mostrando su cocción interna.	78
Figura 45. Temperatura en función del tiempo del acumulador térmico mientras cocinaba carne de res, nuggets de pollo y camarones.....	79
Figura 46. Comparación de fotografía y termografía de la tapa mientras se cocina con el acumulador térmico. a) Fotografía de la tapa con un termopar tipo K midiendo la temperatura en el interior. b) Termografía de la tapa durante el proceso de cocción.....	80

Figura 47. Potencia y energía transferida desde el acumulador térmico al aire de un cuarto de 34.56 m ³ en función del tiempo.	81
Figura 48. Matriz QFD del acumulador térmico.	83

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de cocinas solares con almacenamiento térmico.	5
Tabla 2. Energía mínima para cocinar cuatro tipos de alimentos [55].	13
Tabla 3. Eficiencias de cinco tipos de estufas [58].	13
Tabla 4. Tasas de corrosión para la mezcla $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40 % m/m) [64] .	15
Tabla 5. Resultados de calorimetría diferencial de barrido.	34
Tabla 6. Conductividades térmicas promedio en función del método de preparación y porcentaje en masa de grafito.	43
Tabla 7. Factores significativos con su valor de probabilidad y variable de respuesta.	48
Tabla 8. Tiempos de carga y descarga de PCM en función del porcentaje en masa de grafito.	51
Tabla 9. Ahorro energético total en 30 años en función del porcentaje en masa de grafito.	53
Tabla 10. Rampa de calentamiento y potencia promedio de la olla sin hollín, con hollín y con hollín y aislamiento en $^{\circ}\text{C}/\text{s}$	59
Tabla 11. Masa y moles para sintetizar nitrato de sodio.	68
Tabla 12. Temperaturas recomendadas para cocinar 4 tipos de carnes [60].	79

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Calor sensible.	6
Ecuación 2. Calor latente de fusión.	6
Ecuación 3. Coeficiente de transferencia de calor por convección en función de la velocidad del viento.	14
Ecuación 4. Calor específico.	25
Ecuación 5. Ley de Fourier.	25
Ecuación 6. Conductividad térmica mediante THM.	26
Ecuación 7. Eficiencia térmica de una CS.	28
Ecuación 8. Potencia térmica de una CS.	28
Ecuación 9. Parámetro “m” para cálculo de superficies extendidas.	29
Ecuación 10. Calor transferido por una superficie extendida de longitud infinita.	29
Ecuación 11. Efectividad de una superficie extendida.	29
Ecuación 12. Cálculo de grado de grafitización.	40
Ecuación 13. Ecuación química de reacción de neutralización para la síntesis de nitrato de sodio.	68
Ecuación 14. Modelo por potencia que mejor ajusta a los datos de tiempo de descarga del acumulador térmico.	72
Ecuación 15. Modelo por potencia que mejor ajusta a los datos de potencia térmica del acumulador térmico.	73
Ecuación 16. Reacción de termólisis del PCM.	75
Ecuación 17. Reacción de oxidación del PCM.	75

Lista de siglas

OMS - Organización Mundial de la Salud

ASAE – Asociación Americana de Agrónomos e Ingenieros Biológicos

PCM – Material de Cambio de Estado

CS – Cocina Solar

HTF – Fluido de Transferencia de Calor

QFD – Despliegue de la Función de Calidad

DSC – Calorimetría Diferencial de Barrido

TGA – Análisis Termo Gravimétrico

XRD – Difracción de Rayos X

SEM – Microscopía Electrónica de Barrido

THM – Método del Historial Térmico

PCM GT – Material de Cambio de Estado Grado Técnico

PCM GR – Material de Cambio de Estado Grado Reactivo

msnm – Metros sobre el nivel del mar

Glosario de términos

Aditivo: Sustancia que se añade a otra para mejorar sus propiedades

Agente de nucleación: Material que promueve la cristalización de un elemento o compuesto.

Amorfo: Que no tiene una forma definida.

Anemómetro: Instrumento para medir la velocidad de un fluido gaseoso.

Anisotropía: Propiedad de un material que posee propiedades físicas dependientes de su dirección.

Biomasa: Materia orgánica, de origen vegetal o animal, y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial

Calor latente: Energía requerida para cambiar de estado.

Calor sensible: Energía que hace que aumente la temperatura de un cuerpo.

Catalizador: Sustancia que aumenta la velocidad de reacción sin ser consumida en el proceso.

Compósito: Material constituido por más de un componente.

Compuesto espectroselectivo: Compuesto que solo absorbe radiación electromagnética en determinadas longitudes de onda.

Convección forzada: Se da cuando el fluido involucrado en el proceso de transferencia de calor es movido por medios externos.

Convección natural: Se da cuando el fluido involucrado en el proceso de transferencia de calor es movido por diferencia de densidades.

Emisividad: Capacidad de un cuerpo para emitir radiación electromagnética a una determinada temperatura.

Endotérmico: Proceso en el cual se absorbe energía en forma de calor.

Exotérmico: Proceso en el cual se libera energía en forma de calor.

Fatiga térmica: Deformación cíclica causada por expansiones y contracciones cuando el material se expone a fluctuaciones de temperatura.

Flexómetro: Cinta métrica metálica enrollada.

Fonones: Vibración térmica cuantizada de un material.

Hidrocarburos: Compuesto químico conformado por carbono e hidrógeno.

Irradiancia: Radiación electromagnética que incide sobre una superficie con unidades de W/m^2 .

Isotropía: Característica de un material en la cual sus propiedades no dependen de la dirección en la que se miden.

Morfología: Forma o estructura de algo.

Percolación: Concepto que describe la formación de vías de transporte de calor o corriente eléctrica por medio de partículas interconectadas.

Punto focal: Espacio en el que converge la radiación electromagnética.

Radiación solar: Conjunto de ondas electromagnéticas compuestas por 49 % de radiación infrarroja, 42 % luz visible y 9 % de radiación ultravioleta.

Retraso térmico: Característica de un material que le permite absorber o liberar su energía térmica lentamente.

Superficies extendidas: Sólidos utilizados para transferir calor hacia una dirección deseada.

Termopar: Sensor para medir temperatura compuesto de 2 metales diferentes unidos por un extremo.

Resumen

Se desarrolló un acumulador térmico para ser usado en conjunto con una cocina solar con el fin de usarla en periodos en los cuales no se tenga radiación solar. Este acumulador se probó en conjunto con un concentrador solar de disco parabólico. Se evaluó el mejor material de cambio de estado (PCM) haciendo uso de una matriz de análisis multicriterio denominada QFD (siglas en inglés de Quality Function Deployment). Los resultados mostraron que la adición de grafito al PCM $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40 % m/m) aumentó la conductividad térmica, pero disminuyó la capacidad calorífica y la entalpía de fusión por lo que se decidió utilizar el PCM sin grafito. También se evaluó el número de superficies extendidas que maximizan la potencia térmica a través de simulación térmica. Los mejores resultados de potencia térmica se obtuvieron utilizando 17 superficies extendidas. Se encontró que el acumulador térmico fue capaz de cocinar 71 g de nuggets de pollo, 50 g de camarón y 74 g de cortadillo de pulpa de res con una temperatura máxima de 143 °C la cual disminuyó hasta 70 °C en un lapso de 2.25 h. El acumulador térmico también se evaluó como calentador de un habitáculo de 4 m x 3.2 m x 2.7 m disipando su energía durante 10.17 h. La potencia máxima fue de 145.52 W y la energía máxima transferida al aire del cuarto fue de 32.66 kJ. Se requieren estudios complementarios para reducir el peso del acumulador térmico y maximizar su eficiencia térmica durante el calentamiento de los alimentos.

Abstract

A thermal accumulator was developed to be used in conjunction with a solar cooker to use it in periods when there is no solar radiation. This accumulator was tested in conjunction with a parabolic dish solar collector. The best phase change material (PCM) was evaluated using a multi-criteria analysis matrix called QFD (Quality Function Deployment). The results showed that the addition of graphite to the PCM ($\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40% m/m)) increased the thermal conductivity but decreased the heat capacity and the enthalpy of fusion, so it was decided to use the PCM without graphite. The number of extended surfaces that maximize thermal power was also evaluated through thermal simulation. The best thermal power results were obtained using 17 extended surfaces. It was found that the thermal accumulator could cook 71 g of chicken nuggets, 50 g of shrimp and 74 g of beef meat cutlets at a maximum temperature of 143 °C which decreased to 70 °C in 2.25 h. The thermal accumulator was also evaluated as a heater for a 4 m x 3.2 m x 2.7 m room, dissipating its energy for 10.17 h. The maximum power reached 145.52 W and the maximum energy transferred to the air in the room was 32.66 kJ. Additional studies are required to reduce the weight of the thermal accumulator and maximize its thermal efficiency during food heating.

1 Introducción

El cambio climático es una problemática mundial ocasionada principalmente por el uso de combustibles fósiles. Este problema puede ser mitigado a través de tres maneras: reduciendo la demanda de energía, transformar la energía de manera eficiente y usando fuentes alternativas de energía [1, 2]. Reducir la demanda de energía no parece ser viable pues la población sigue aumentando, por otro lado, se puede aumentar la eficiencia de transformación de energía considerando que más del 50 % de toda la energía que se consume en el mundo se utiliza en forma de calor y esta causa el 40 % de las emisiones de CO₂ [3].

La energía térmica es utilizada en todo el mundo para calentar agua, climatización y cocción de alimentos [4], estas necesidades pueden ser cubiertas por fuentes de energía como la eléctrica o la proveniente de los combustibles fósiles. Sin embargo, la Agencia Internacional de Energía (IEA) comunicó en el año 2008 que el 83 % de la energía eléctrica generada en México provenía de combustibles fósiles, además, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reportó en el año 2011 que la generación de energía eléctrica proveniente de hidrocarburos y productores independientes correspondía al 75 % de la generación total. Lo anterior muestra la dependencia que tiene México de los combustibles fósiles [5].

Por otro lado, se pueden utilizar combustibles fósiles como el gas L.P. o el gas natural y biomasa para cocinar alimentos dentro de los hogares debido a su bajo costo, pero éstos presentan efectos adversos en los seres humanos y al medio ambiente [6]. Un ejemplo de estos daños son las 4 millones de muertes reportadas en el año 2018 por la OMS [7] debidas al aire contaminado dentro de los hogares a causa de la quema de combustibles fósiles como el keroseno o combustibles sólidos usados para la calefacción y cocción de alimentos. Para disminuir esta problemática se necesita utilizar una fuente de energía alternativa, por ejemplo, la radiación solar la cual puede ser utilizada en cocinas solares pues estas no producen contaminación durante su uso y pueden satisfacer la necesidad de calentar y cocinar alimentos, además, pueden calentar un espacio.

Existen diferentes tipos de cocinas solares como las de tipo caja, panel, canal parabólico y disco parabólico siendo estas últimas las de mejor desempeño de acuerdo a la norma ASAE S580.1 [7]. No obstante, la energía solar es intermitente por lo que es necesario almacenar el calor para que éste pueda utilizarse en periodos de ausencia de la radiación solar.

Una de las alternativas más prometedoras para el almacenamiento de energía térmica son los acumuladores térmicos que usan materiales con cambio de estado o PCM por sus siglas en inglés. Actualmente se utilizan diferentes PCM [8] en centrales de concentración solar para almacenar y transferir energía térmica. Los PCM poseen propiedades térmicas como la entalpía de cambio de estado la cual determina la capacidad de almacenamiento térmico. Otras variables importantes son la temperatura a la cual ocurre el cambio de estado y el tiempo de carga y descarga de la energía. Esta última variable está directamente determinada por la conductividad térmica del PCM. Sin embargo, la conductividad térmica elevada implica la incorporación de aditivos que afectan negativamente la entalpía de cambio de estado y/o su calor específico lo cual puede resultar indeseable.

Aún con las desventajas que estos materiales presentan es necesario que sean evaluados para observar si es conveniente utilizarlos o no, considerando además factores económicos. Otra alternativa para mejorar la eficiencia de un acumulador térmico es trabajar en el diseño de este dispositivo. Por ejemplo, incrementando el área de transferencia de calor mediante superficies extendidas o bien mejorando el aislamiento térmico del dispositivo de almacenamiento.

En este trabajo se evaluó el beneficio/costo de añadir grafito en un 5, 10 y 15 % en masa al PCM conformado por $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40 % m/m) el cual es una mezcla eutéctica que ha sido utilizada en la industria para almacenar y transferir energía térmica. La adición de grafito se realizó con la intención de aumentar la conductividad térmica del PCM. También se evaluó el uso de superficies extendidas para aumentar la eficiencia del acumulador térmico. Además, se diseñó, simuló y construyó un primer prototipo de acumulador térmico para cocinar y calentar alimentos. Al dispositivo construido se le evaluó el tiempo de carga y descarga de energía térmica, así como su cantidad de energía almacenada, potencia y eficiencia térmica.

2 Antecedentes

2.1 Tipos de cocinas solares

Las cocinas o estufas solares (CS) son dispositivos que permiten cocinar y calentar alimentos utilizando la radiación solar durante el día [9]. Existen diferentes tipos de CS convencionales, las más comunes son:

- Tipo caja: cocinas en forma de caja que funcionan como un horno, suelen utilizar un vidrio para evitar pérdidas por convección natural y forzada, dentro cuentan con un material reflejante para concentrar la energía térmica. Suelen alcanzar temperaturas entre los 90 y 200 °C, su tiempo de cocción es de 1 a 3 horas (Figura 1).



Figura 1. Cocina solar tipo caja [10].

- Tipo panel: estas cocinas pueden estar en forma de caja o no, cuentan con una mayor área de captación de radiación solar la cual es concentrada y enfocada en el centro de esta donde la comida es posicionada. Este tipo de cocina es una combinación entre las cocinas tipo caja y las cocinas tipo disco parabólico, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 150 °C (Figura 2).



Figura 2. Cocina solar tipo panel [11].

- Tipo disco parabólico: cocinas con un concentrador solar de disco parabólico, suelen llegar a temperaturas de más de 200 °C, sin embargo, el punto focal puede alcanzar los 1500 °C [12] (Figura 3).



Figura 3. Cocina solar tipo disco parabólico [13].

- Tipo tubos evacuados al vacío: cocinas compuestas por un concentrador de tipo canal parabólico y un tubo evacuado al vacío para evitar pérdidas de calor por convección. Dentro del tubo está presente una capa de nitruro de aluminio (AlN), un compuesto espectroselectivo que absorbe la radiación para después ser transferida hacia la comida. Una estufa de este tipo tiene la capacidad de calentar 500 mL de agua a 81 °C en 1 hora [14] (Figura 4).



Figura 4. Cocina solar de tubo evacuado al vacío [15].

Además de las CS convencionales existen otras que contienen un PCM para almacenar el calor, éstas se clasifican por su número de etapas, cabe resaltar que las de mayor potencia utilizan un fluido de transferencia de calor (HTF) para aumentar su potencia térmica [16], las distintas CS por etapas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de cocinas solares con almacenamiento térmico.

Tipo de CS	Descripción
2 etapas	Son el tipo de CS más simple, el PCM se coloca en un contenedor el cual entra en contacto directo con el objeto a calentar.
3 etapas	CS similar a la de 2 etapas, solo que en este caso existe un HTF el cual calienta al PCM y éste a la comida.
4 etapas	Son el tipo de CS más complejas, requieren de un sistema de tuberías y bombas para mover al HTF a donde se requiera. La principal diferencia con la CS de 3 etapas es que esta cocina cuenta con un tanque almacenador de HTF para su posterior uso. El utilizar bombas para enviar al HTF a la cocina proporciona una ventaja sobre otras cocinas, pues la potencia es superior que en aquellas en las que la transferencia de calor es por medio de convección natural o conducción en lugar de convección forzada.

2.2 Materiales de cambio de estado/fase (PCM)

El mayor reto del aprovechamiento de energía térmica solar es su captación y uso sin intermitencia, para solucionar el problema de la captación de radiación solar se pueden utilizar concentradores solares, de hecho la manera más efectiva de coleccionar radiación solar es a través de un concentrador de disco parabólico [17], además, un sistema de seguimiento solar ayuda a incrementar la eficiencia térmica hasta en un 13 % [29]. Para el problema de la intermitencia se necesita almacenar la energía y usarla en periodos de escasez de energía lo cual se puede lograr con el uso de un PCM, estos materiales pueden almacenar energía térmica mediante calor sensible y calor latente [18]. Para conocer la cantidad de calor que se puede almacenar en un material de cambio de estado por calor sensible se utiliza la Ecuación 1.

$$Q_s = m * C_p * \Delta T \quad (1)$$

donde Q_s es el calor sensible en Joules (J), m es la masa del material en gramos (g), C_p es el calor específico a presión constante en Joules/gramo*Kelvin (J/g*K) y ΔT es la diferencia de temperaturas en Kelvin (K).

Para calcular el calor latente de fusión de un PCM se utiliza la Ecuación 2.

$$Q_l = m * \Delta H_f \quad (2)$$

donde Q_l es el calor latente de fusión en Joules (J), m es la masa del material en gramos (g) y ΔH_f la entalpía específica de fusión del material en Joules/gramo (J/g).

Los materiales de cambio de estado se clasifican en: inorgánicos, orgánicos y mezclas eutécticas. Algunas de sus principales características son sus temperaturas de operación, calores latentes de fusión, capacidades caloríficas y conductividades térmicas [19]. Los PCM inorgánicos como los nitratos de sodio (Na) y potasio (K) tienen mayor capacidad para almacenar energía que los PCM orgánicos debido a sus altas temperaturas de operación, también, presentan una mayor conductividad térmica y menor costo [20]. Además, los PCM inorgánicos pueden llegar a tener bajas tasas de corrosión (< 0.01 mm/año) dependiendo del material utilizado para contenerlos [21].

Para aplicaciones prácticas se mezclan diferentes PCM para lograr satisfacer las necesidades de un determinado proceso, a pesar de que actualmente existen muchos PCM disponibles los

nitratos han demostrado ser los más adecuados para sistemas de almacenamiento térmico por cambio de estado a temperaturas mayores a los 100 °C [21].

Un ejemplo de lo anterior es la mezcla binaria de nitrato de potasio con nitrato de sodio ($\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$), incluso hay mezclas ternarias donde nitrito de sodio (NaNO_2) es añadido. Las mezclas binarias son una buena alternativa para concentradores que alcanzan temperaturas superiores a los 300 °C. Para cocinar alimentos se usan comúnmente temperaturas entre 140 y 220 °C. Este objetivo puede ser alcanzado utilizando mezclas ternarias como la mezcla de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ (32/24/44 % m/m) con una temperatura de fusión de 80 °C y un calor latente de fusión de 67 J/g, valores bajos en comparación con mezclas binarias. Aunado a lo anterior, el nitrato de calcio tiene un menor costo que los correspondientes de nitrato de sodio y potasio, esto baja los costos del PCM y su aplicación a mayor escala puede ser atractiva.

Tanto mezclas binarias como ternarias son utilizadas a escala industrial en plantas de concentración solar para producción de energía eléctrica con turbinas de vapor [22], en plantas nucleares y en procesos industriales donde se aprovecha la energía térmica residual de gases de combustión [23].

Debido a la importancia que tiene los PCM en el sector energético se realizó un estudio en las instalaciones solares para la investigación en Europa en donde se obtuvieron las propiedades termofísicas de PCM conformados por mezclas binarias, ternarias y cuaternarias [24]. Uno de los PCM más utilizados, es la mezcla ternaria de $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40 % m/m) la cual tiene una temperatura de fusión de 143 °C, un calor latente de 117.2 J/g [25] y una temperatura de descomposición de 593 °C [26]. Estos valores son atractivos para su uso como PCM en una CS, sin embargo, su baja conductividad térmica de 0.5 W/m*K indica que existe un área de oportunidad y por esta razón se añadió grafito el cual posee una conductividad térmica superior.

2.3 Materiales de cambio de fase y cocinas solares

Para cocinar y calentar comida en India se implementó el uso de acetamida (CH_3CONH_2) como PCM con tres diferentes materiales almacenadores de calor sensible, estos fueron la arena, rocas y hierro metálico. En este estudio se encontró que la acetamida y la arena son la

mejor combinación, además, se reportó que en el rango de 1 - 3 p.m. fue el período de mayor presencia de radiación solar. La CS se pudo mantener a 60 °C por 5 horas (de 3 - 8 pm) [27]. En otro estudio se utilizaron 2.5 kg de ácido esteárico y 3 kg de acetanilida ($C_6H_5NHCOCH_3$) como PCM en un concentrador de canal parabólico, el cual contenía un bulbo de Cu en su interior. Las horas de mayor radiación solar en este caso fueron entre 12 p.m. a 3 p.m., el PCM alcanzó 120 °C y para transferir el calor almacenado se utilizó un intercambiador de calor de acero inoxidable. La eficiencia térmica de este dispositivo fue del 30% debido a las pérdidas de calor por mal aislamiento térmico [28].

Otro PCM que se evaluó en una CS de tipo caja fue el aceite de *Jatropha*, en el diseño del dispositivo se consideraron 1.3 cm de espacio de aire como aislante térmico y una capa de 6 cm de aislante para minimizar las pérdidas de calor. En estas condiciones la temperatura del absorbedor permaneció por encima de los 110 °C durante 7 horas. La máxima potencia de la CS fue de 103.6 con una eficiencia térmica de 58.78 %. Sin un PCM las CS tipo caja alcanzan eficiencias entre 3 y el 35 % por lo tanto, el uso de un PCM aumenta la eficiencia térmica de una CS tipo caja [29].

Aceites comestibles como el aceite de maní también han sido utilizados como PCM, este último fue añadido a una CS tipo caja, la eficiencia de dicha cocina fue del 32 % con una temperatura de operación de 137 °C y una energía total almacenada de 307 kJ [30]. Otro aceite comestible que se ha usado como PCM en CS es el aceite de coco, en donde 1.5 kg de este material dentro de un tubo de Cu permitieron cocinar arroz, papa y huevo en un periodo de 6 horas, cabe resaltar que el uso de PCM en la CS redujo en un 15 % el tiempo de cocción [31].

Sales inorgánicas hidratadas también son utilizadas como PCM en CS, tal es el caso del nitrato de magnesio hexahidratado el cual alcanzó una temperatura de 140 °C en condiciones reales de radiación solar y la máxima eficiencia térmica en un contenedor de aluminio fue del 31.37 % [32]. Una desventaja de las sales hidratadas es que presentan subenfriamiento, es decir que necesitan una temperatura más baja que su punto de solidificación para promover la cristalización y entregar el calor latente [20].

En otro trabajo una CS con 3 kg de acetamida como PCM y agua como HTF logró una temperatura de 63.6 °C durante 2 horas, este sistema contempló 15 tubos evacuados al vacío

para coleccionar la radiación de manera indirecta, el prototipo pudo cocinar 200 g de arroz [33]. Para cocinar la misma cantidad de arroz en ausencia de radiación solar se utilizó la mezcla eutéctica de 60/40 % m/m de NaNO_3 y KNO_3 respectivamente con nanopartículas de alúmina en una CS con concentrador de tipo disco parabólico y sistema de seguimiento solar, el tiempo para realizar la cocción fue de 22 minutos a una temperatura de 70 °C [34].

El PCM mencionado anteriormente pertenece al grupo de las sales inorgánicas, estas sales se conocen como sales fundidas y son las más comunes en aplicaciones prácticas a nivel industrial. Comúnmente se utilizan mezclas eutécticas, es decir que tienen un punto de fusión menor que el de sus componentes puros [20]. Lo anterior es útil cuando se requiere bajar la temperatura de operación, por ejemplo, para calentar o cocinar alimentos, no obstante, estas sales presentan baja conductividad térmica y limitan la transferencia de calor, por esta razón es necesario mejorar esta propiedad para que el calor pueda almacenarse y entregarse de la manera más eficiente posible.

2.4 Incremento de conductividad térmica en materiales de cambio de estado

El uso de aditivos como; metales (Ag, Cu, Au), óxidos metálicos (CuO , Al_2O_3 , TiO_2) y materiales carbonáceos (grafito, nanotubos, grafeno, nanofibras) en PCM aumentan la conductividad térmica pero, reducen otras propiedades como el calor latente de fusión y el calor específico [35]. Para aumentar la conductividad térmica se agregan metales al PCM, pero esto aumenta el costo y el peso, además, la corrosión es un problema cuando sales oxidantes son utilizadas. Metales como el estaño o aleaciones pueden ser utilizadas como PCM en sí mismo siempre y cuando el costo y el peso no presenten un problema en la aplicación [36].

El grafito posee una alta resistencia a la oxidación y tiene buena estabilidad química con los PCM, su conductividad térmica es superior a la de algunos metales y tiene una baja densidad. Cabe resaltar que la conductividad térmica de las sales fundidas es menor de 1 $\text{W/m}^*\text{K}$ [37]. En un estudio efectuado en el Centro Aeroespacial de Alemania [38] se menciona que un aumento de 0.5 - 10 $\text{W/m}^*\text{K}$ en un PCM disminuye el número de tubos en un intercambiador de calor, por lo tanto, el dispositivo puede ser más pequeño y barato. Además, en el mismo estudio, el uso de grafito fue justificado debido a su alta conductividad térmica y estabilidad química. La conductividad térmica reportada fue entre 3 y 25 $\text{W/m}^*\text{K}$ cuando se añadió

grafito entre 5 y 30 % en masa. Otro estudio reporta que la cantidad óptima de grafito es del 15 % en masa en compósitos con NaNO_3 [39].

Las conductividades térmicas de los PCM orgánicos son bajas, sin embargo, los incrementos de conductividad térmica para PCM compósitos son altos, tal es el caso del alcohol láurico el cual fue usado como PCM y aumentó su conductividad térmica desde 0.18 a 0.62 $\text{W/m}^*\text{K}$ con una adición de 5 % en masa de nanotubos de carbono de pared múltiple [40]. En otro estudio se usó parafina con nano grafito y la conductividad térmica incrementó de 0.1264 hasta 0.9362 $\text{W/m}^*\text{K}$ cuando se añadió 10 % en masa de nano grafito. En este caso el calor latente de fusión bajó de 209.33 a 181.81 J/g . En el mismo trabajo se encontró que para lograr incrementar la conductividad térmica sin grandes alteraciones del calor latente se necesita agregar como máximo 4 % en masa de grafito. Con este porcentaje se obtuvo una entalpía de 194 J/g y una conductividad térmica de 0.5 $\text{W/m}^*\text{K}$ [41]. En otro trabajo se encontró que el incremento de conductividad térmica para la parafina como PCM fue de 0.4 hasta 1.99 $\text{W/m}^*\text{K}$ cuando 3 % de grafeno y 1 % de TiO_2 fueron añadidos [42].

Para sales inorgánicas como el nitrato de litio (LiNO_3) se han reportado incrementos de conductividad térmica desde 0.51 hasta 1.86 $\text{W/m}^*\text{K}$ cuando éste es mezclado con 20 % m/m de grafito, en este caso ambos materiales fueron prensados en frío [43]. Una mezcla de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ con NaNO_3 y 7 % m/m de grafito expandido fue prensado en frío obteniendo una conductividad térmica de 5.66 $\text{W/m}^*\text{K}$ y una entalpía de fusión de 89.79 J/g [44]. Además del prensado en frío otra manera de preparar las mezclas es fundiendo la sal y agregar el aditivo. Por ejemplo, a la mezcla ternaria de KNO_3 - LiNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ se le agregó 30 % m/m de grafito expandido y se obtuvo una conductividad térmica máxima de 21.89 $\text{W/m}^*\text{K}$.

En otro caso, la mezcla de $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ (40/57 % m/m) fue mezclada a 150 °C por 4 horas, después se añadió 9 % m/m de grafito expandido y se mezcló por 8 horas, manteniendo el compuesto a 115 °C por una hora y dejando enfriar a temperatura ambiente. El material obtuvo un valor de 2.3 $\text{W/m}^*\text{K}$ de conductividad térmica [45]. En otro caso, el proceso de compresión en frío de un compósito de $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ (50/50 % mol) con un 15 % m/m de grafito alcanzó una conductividad térmica de 20 $\text{W/m}^*\text{K}$. El mismo material dispersado del grafito en la sal fundida solamente alcanzó 3 $\text{W/m}^*\text{K}$ [46].

Para lograr incrementar la conductividad térmica de un PCM compuesto es necesario homogenizar el PCM y su aditivo, esto se pueden obtener mezclando ambos materiales en estado líquido, para esto se han reportado dos métodos, como el descrito en la referencia [47] donde los autores mencionan que primero se funde el PCM y luego se le añade un aditivo. Este método es uno de los más utilizados pues no se necesita de un disolvente, el otro método consiste precisamente en utilizar un disolvente como medio para dispersar tanto al PCM como al aditivo con alta conductividad térmica. Una vez homogenizados, se evapora el disolvente y se muele el material, el inconveniente de este método es el secado ya que se requiere energía para evaporar el disolvente.

Se propuso otro método en la referencia [48] que no involucra el mezclado en estado líquido. El método evita el uso de agua que causa que las partículas añadidas se aglomeren además de introducir posibles contaminaciones. Esta manera de mezclado en estado sólido fue utilizado en la referencia [49], en este caso se preparó la mezcla “solar salt” ($\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ 60/40 % m/m) y 1 % de nanopartículas, primero se homogenizó la mezcla de sales y se molió, y después se agregaron las nanopartículas en seco. En el presente trabajo se comparan dos métodos: el método de mezclado con el PCM fundido y el método en seco para observar cual es el mejor y que implicaciones presentan.

2.5 Transporte de calor en compósitos de PCM

El transporte de calor en una mezcla de materiales con baja y alta conductividad depende de la concentración, de la distribución, de la orientación, del tamaño y de la forma de cada uno de los componentes. Al mezclar dos componentes, uno de alta y otro de baja conductividad térmica o eléctrica se crea un compósito en donde las propiedades de este se pueden explicar mediante la teoría de percolación.

La teoría de percolación sostiene que la introducción aleatoria de partículas de alta conductividad térmica o eléctrica en una matriz de baja conductividad térmica o eléctrica formará un camino por el cual el calor o la electricidad puedan fluir de un extremo del material a otro. El umbral de percolación sería entonces la concentración de partículas que hace que la matriz se comporte como un conductor del calor o la electricidad. El tamaño de las partículas conductoras afecta a este último y por consecuencia a la conductividad térmica o eléctrica del material [50].

Las diferencias entre las conductividades térmicas de un compuesto que ha sobrepasado el umbral de percolación térmica no son tan elevadas como las obtenidas para compósitos que han pasado el umbral de percolación eléctrica, esto se debe a las diferentes maneras de transporte de carga y calor. El transporte de calor se produce por electrones y por fonones, estos últimos estando presentes en todo momento. Sin embargo, para la conductividad eléctrica solo los electrones forman parte del proceso de transferencia de carga y es por esto que es más notable la diferencia antes y después del umbral de percolación [51].

La conductividad térmica en no metales se debe a las vibraciones de la red cristalina, las cuales se conocen como fonones, estas vibraciones se ven reducidas cuando existen límites de grano o porosidades en el material pues dispersan dichas vibraciones en direcciones diferentes a las del flujo de calor [52], a esto se le conoce como resistencia térmica intergranular, la cual dificulta la transmisión de fonones en la red cristalina [53], es decir que entre más interfaces existan en el material mayor será la resistencia interna eléctrica o térmica del mismo.

2.6 Diseño de un acumulador térmico

Las CS que no utilizan un PCM son consideradas CS directas y no pueden usarse para cocinar en la noche, en cambio, si se desea cocinar o calentar en la noche es necesario añadir un acumulador térmico que contenga un PCM en su interior, por lo tanto, es preciso que se consideren factores de diseño relacionados principalmente con el PCM [54].

Para iniciar el diseño de una CS con acumulador térmico se requiere conocer la energía necesaria para cocinar y calentar alimentos, esta cantidad sirve para calcular las dimensiones del acumulador térmico.

Como primer paso se debe obtener información acerca de los alimentos más consumidos y cuánta energía es necesaria aproximadamente para cocinarlos. Se tiene información al respecto de los 4 alimentos más consumidos a nivel mundial son el arroz, la carne, el frijol y la papa, siendo la carne y la papa los que requieren más energía para su cocción (Tabla 2). Para cocinar 1 kg de arroz se necesitan alrededor de 3 MJ; sin embargo, en otro estudio se reportó que para cocinar distintos alimentos se necesitan menos de 3 MJ, esto se debe a que las pérdidas de calor por convección y radiación fueron omitidas [55].

Tabla 2. Energía mínima para cocinar cuatro tipos de alimentos [55].

Alimento	Energía mínima (kJ)
Arroz	562
Carne	708
Frijol	278
Papa	716

Un dato importante es que se requiere todavía menos energía en el caso de los alimentos precocidos, pues estos solamente necesitan ser calentados [56], lo anterior es conveniente para una cocina solar ya que los requerimientos energéticos son mínimos (~ 0.7 MJ) [57].

Otro aspecto por considerar es la eficiencia térmica de los distintos dispositivos para cocinar, debido a que utilizan diferentes fuentes de energía y dispositivos sus pérdidas de calor pueden variar, ver Tabla 3 [58]. A excepción de las estufas de inducción, las restantes en la Tabla 3 presentan eficiencias bajas pues se ha reportado que hasta un 45 % del calor utilizado para cocinar se desperdicia por pérdidas convectivas, para hacer frente a este problema el uso de una tapa suele ser suficiente para reducir las pérdidas de energía térmica [59].

Tabla 3. Eficiencias de cinco tipos de estufas [58].

Método de cocción	Eficiencia (%)
Estufas de inducción	90
Estufas de gas natural	45 – 60
Estufas tradicionales	10
Estufas de leña	23 – 40
Estufas de resistencia	75

Entonces para maximizar la eficiencia es necesario minimizar las pérdidas de calor, por ejemplo, cocinar en una olla de presión dentro de una caja con aislamiento térmico aumenta la eficiencia térmica del 41 al 87 % y reducen el tiempo de cocción de 40.51 a 19.25 minutos. No obstante, hay otros factores que afectan la energía y tiempo de cocción como el tamaño y forma del recipiente, además, el tipo de cocción también determina los requerimientos energéticos y su eficiencia [60].

Las eficiencias ópticas y térmicas más altas son obtenidas con concentradores de disco parabólico las cuales son entre 95 % y 90 % a $535\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. A pesar de que este tipo de concentradores solares logran temperaturas de operación más elevadas lo cual puede implicar una disminución de la eficiencia térmica [61]. La causa de esta disminución de eficiencia es

que más calor se disipará al medio ambiente en lugar de calentar al objeto deseado. Por otra parte, se debe aislar al objeto que se desea calentar para aumentar su eficiencia térmica. Un ejemplo de ello es el prototipo realizado en Bagdad [62] compuesto por un concentrador de canal parabólico, el cual logró una eficiencia del 80.3 % a una temperatura de operación de 81 °C. El dispositivo utilizó un sistema de seguimiento solar de 2 ejes y alcanzó una potencia térmica de 1619 W.

Otra razón para utilizar aislamiento térmico en un acumulador térmico son los factores ambientales, principalmente el viento ya que puede producir pérdidas de calor considerables. Estas pérdidas se pueden cuantificar usando el coeficiente de transferencia de calor por convección del viento h_v ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), utilizando la velocidad del viento v_v en m/s como se muestra en la Ecuación 3 [62].

$$h_v = 5.7 + (3.8 * v_v) \quad (3)$$

Para aumentar entonces la eficiencia térmica de un acumulador, es recomendable que el mismo cuente con aislante térmico, además se deberá colocar el dispositivo donde la velocidad del viento sea la mínima posible.

Por otro lado, la selección del PCM es una parte importante del diseño de un acumulador térmico, ya que sus propiedades térmicas del material como la temperatura de fusión, la entalpía de fusión, la temperatura de descomposición, la conductividad térmica y el calor específico determinan sus características funcionales [63]. Por otra parte, se debe tener en cuenta la expansión térmica del PCM y del recipiente, en este caso el coeficiente de expansión volumétrica del PCM de estudio ($\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ 53/7/40 % m/m) es de $51.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ y los aceros tienen coeficiente de expansión térmica de $10\text{-}20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, [64]. Lo anterior implica que la sal se expande más que el acero, esto puede ocasionar fatiga térmica y deteriorar el recipiente durante su ciclado térmico. Para evitar el deterioro de un acumulador térmico debido a diferencias de dilatación térmica es recomendable dejar un 22 % de volumen vacío [65].

La corrosión es otro factor importante por considerar cuando se diseña un acumulador térmico que utilice un PCM, ya que este determina cuánto va a durar el recipiente [66]. Para el PCM mencionado anteriormente la corrosión es menor en acero con altos contenidos de

cromo pues al entrar en contacto forma compuestos complejos (óxidos) que protegen al metal de la sal oxidante, las tasas de corrosión y temperaturas del PCM en distintos materiales se presentan en la Tabla 4, el acero inoxidable 316 destaca sobre los demás pues se corroe menos de 1 mm en 30 años.

Tabla 4. Tasas de corrosión para la mezcla $KNO_3/NaNO_3/NaNO_2$ (53/7/40 % m/m) [64] .

Aleación	Temperatura de operación (°C)	Tasa de corrosión (mm/yr)
Acero al carbono ASTM (A273, A274)	538	0.6-3
Acero inoxidable 304	538	0.21
Acero inoxidable 304L	538	1.8
Acero inoxidable 316	538	< 0.03

Debido a que los PCM poseen bajas conductividades térmicas la distribución de temperaturas en el mismo no es homogénea, así, el diseño de acumulador debe considerar la disipación del calor en el interior para minimizar este problema. Las mejores opciones para disipar el calor y aumentar conductividad térmica de manera general son las superficies extendidas de metales, esponjas metálicas [36], o bien agregar materiales como el grafito o el aluminio [21]. La ventaja de utilizar aluminio es que la temperatura es más uniforme en todo el metal y permite transferir el calor en todo el sólido. Sin embargo, este último reacciona con sales oxidantes, es más costoso y más difícil de soldar [36]. Como consecuencia, se debe seleccionar un material compatible con el PCM y de mayor conductividad térmica que el PCM para que permita transferir calor hacia adentro y hacia afuera del acumulador térmico de manera eficiente.

Un ejemplo de prototipo en el que se consideraron algunos de estos factores se reportó en la referencia [67]. En este caso se construyó un acumulador térmico portátil para calentar alimentos el cual pudo alcanzar temperaturas entre 300 y 400 °C utilizando 5 kg de KNO_3 como PCM. Se empleó un concentrador de disco parabólico de 1.5 m² el cual calentó al acumulador en un tiempo de 2 horas con 21 minutos y la energía recuperada fue de 2.3 MJ. La eficiencia térmica promedio después de 20 pruebas realizadas entre las 8 y 12 p.m. fue del 17.9 %. Para pruebas entre 11 y 2 p.m. fue del 21.6 %.

Además, en este mismo estudio se evaluó estadísticamente la diferencia de eficiencias al utilizar pinturas con distintos porcentajes de absorbancia y emisividad, debido a que el uso

de estos materiales espectralmente selectivos aumenta la eficiencia térmica. El dispositivo fue capaz de hervir 1 L de agua en 3 minutos y 40 segundos. Por otro lado, en el mismo trabajo se menciona que el reto del dispositivo es disminuir el tiempo de carga y la aceptabilidad por parte de los usuarios. Otra desventaja reportada fue que el acumulador presentó fugas de PCM y en algunas ocasiones no alcanzó la temperatura mínima de operación de 340 °C. Esto deja ver que existen implicaciones técnicas que deben considerarse en el diseño, principalmente evitar que el recipiente se rompa y que se alcance la temperatura de operación requerida.

2.7 Metodología QFD

La metodología QFD o despliegue de la función calidad por sus siglas en inglés (Quality Function Deployment) es una herramienta que permite seleccionar la mejor solución para satisfacer una serie de requerimientos. Primero se debe tener un objetivo, de acuerdo con este, se plantean una serie de requerimientos para cumplir dicho objetivo, los cuales se definen como los “Qués” y a cada uno se le asigna una ponderación el cual es llamado coeficiente de peso [68] (Figura 5).

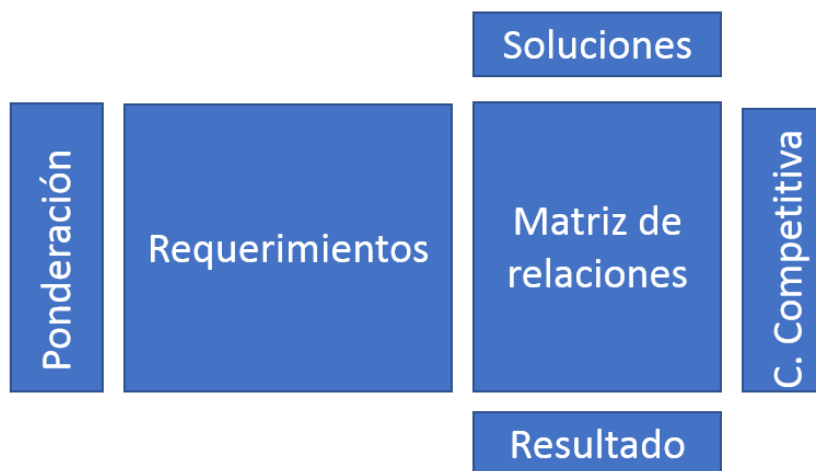


Figura 5. Matriz QFD.

Con los requerimientos es posible realizar una comparación competitiva, en donde se colocan cada uno de los competidores. Para satisfacer cada uno de los requerimientos se enlistan cada una de las posibles soluciones, también se conocen como los “¿Cómos?”. La matriz de relaciones como su nombre lo indica, relaciona cada requerimiento con cada una de las

soluciones, esto se hace con valores de 1, 5 y 9 [69] o bien se pueden normalizar con el valor máximo. Las casillas dentro de la matriz de relaciones también indican su valor de mayor a menor a través de colores, los cuales van del verde hasta el rojo, siendo el amarillo un puntaje promedio. Cada valor que se ha colocado en la matriz de relaciones deberá ser multiplicado por la ponderación de cada requerimiento para que se contemple la importancia de cada necesidad. Para calcular el resultado únicamente se suman los valores de cada solución de manera vertical y se comparan entre sí, la solución con un resultado mayor será aquella que será más relevante para satisfacer la mayor parte de los requerimientos o los más importantes, con esto se puede tomar una decisión [68].

3 Justificación

De acuerdo con los resultados obtenidos en una encuesta realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la mayor parte de la energía térmica consumida en México se utiliza para la cocción y calentamiento de alimentos, en donde el gas LP domina sobre la leña o carbon con un 79 %, por lo tanto, el electrodoméstico de mayor uso es la estufa con un tiempo promedio de 1 a 2 horas por día. Aunado a lo anterior, el 55.9 % de las viviendas encuestadas utilizó el horno de microondas menos de 10 min y el mismo porcentaje utilizó la parrilla eléctrica menos de 1 hora por día [70]. Lo anterior implica que también la energía eléctrica es utilizada para cocinar alimentos la cual no produce contaminantes durante su uso, sin embargo, su generación está basada en recursos no renovables.

La agencia internacional de energía (IEA) comunicó que el 83 % de la energía eléctrica generada en México durante el 2008 provino de combustibles fósiles, adicionalmente, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reportó en el año 2011 que la generación de energía eléctrica producida por hidrocarburos y productores independientes correspondía al 75.01 % de la generación total, lo cual pone en evidencia la dependencia de México por los combustibles fósiles [5].

Por otro lado, en zonas rurales el uso de leña y carbón para cocinar es un problema pues es difícil el acceso a otros recursos como la energía eléctrica y el gas natural [56], esto ocasiona que las personas estén expuestas al monóxido de carbono (CO), gas tóxico que causa malestares físicos, mentales y en casos de intoxicación aguda, puede ser mortal [57]. En un reporte emitido por la OMS en el año 2018 se estimó que alrededor de 4 millones de personas murieron por aire contaminado dentro de los hogares, mismo que es provocado por el uso de cocinas que utilizan combustible sólido y keroseno [7]. Una manera de disminuir el problema es diseñar estufas que aíslen internamente al usuario de los gases de combustión, pero esto no resuelve el problema real de la quema de biomasa [58]. Además, un inconveniente con el uso de la biomasa es la contaminación ambiental, debido al aumento de gases de efecto invernadero [59].

Por esta razón se deben buscar alternativas a la dependencia de combustibles fósiles para satisfacer necesidades básicas como cocinar y calentar alimentos o calefacción [60]. Las CS son dispositivos que pueden ayudar a este propósito, pues evitan el uso de combustibles

fósiles o biomasa durante su uso, aquí es importante mencionar que dichos dispositivos deberán contaminar lo menos posible durante su fabricación, uso y disposición.

No obstante, las CS presentan una desventaja y es que necesitan de una fuente de energía continua para funcionar [71] y el sol es una fuente de energía intermitente [72], entonces, se deberá almacenar la energía térmica cuando esté disponible y después utilizarla cuando se requiera, esto con la ayuda de un PCM. Dicho PCM deberá ser accesible y contaminar lo menos posible también por lo que es necesario una alta estabilidad térmica para evitar su reemplazo.

Existen diferentes PCM, algunos de ellos con altos valores de entalpía de fusión como el LiNO_3 combinado con mezclas eutécticas, aunque, estos materiales tienen un alto costo por su baja disponibilidad [73]. Otros PCM son más accesibles como la mezcla de $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ (53/7/40 % m/m) por su costo menor con respecto a otros 11 PCM [74]. Esta mezcla ha sido considerada para plantas solares de generación de energía eléctrica con proyección a 30 años de vida útil [75] y se ha reportado que; para una temperatura de operación de 450 °C, no se observaron deterioros en su composición química durante 8 años [47], por lo tanto, este PCM resulta atractivo de utilizar en CS debido a su alta estabilidad térmica.

El PCM mencionado tiene la desventaja de tener una baja conductividad térmica que no permite aprovechar al máximo la energía captada, por lo que añadiendo un material de bajo costo con alta conductividad térmica como el grafito [45] o bien mediante superficies extendidas [76] se puede lograr un mayor aprovechamiento de la energía térmica solar.

Un último aspecto para considerar en las CS es la baja disponibilidad que tiene para usarse en la noche. Las CS que, actualmente hay en el mercado no cocinan en la noche y sus costos varían entre \$ 2,600.00 - 10,500.00 MXN (Pesos mexicanos) [77]. Estas estufas no cuentan con un sistema de seguimiento solar, por lo que la radiación solar no es aprovechada en su totalidad [78] y no pueden cocinar sin la disponibilidad de la radiación solar, solamente un producto tiene la capacidad de cocinar en la noche y este lo hace a través de una fuente de energía eléctrica y no térmica [79]. Cabe mencionar que las CS equipadas con tubos evacuados al vacío son los productos más competitivos del mercado, pero estos son muy delicados y pueden romperse fácilmente. Otro tipo de CS llamada "*Haines 2.0 Solar Cooker*

with Cooking Pot” tiene un costo de \$ 1,707.67 MXN [80] (1 USD = 17.09 MXN, Fecha: 08-agosto-23) la cual no cuenta con un sistema de seguimiento solar ni un PCM. Con base en lo anterior, el interés que se tiene es construir una cocina solar que sea barata o que mantenga el precio de las cocinas solares actuales pero que pueda almacenar calor utilizando un PCM y aprovechar al máximo la radiación solar con un sistema de seguimiento solar de dos ejes, este sistema utilizará el microcontrolador Arduino nano en conjunto con fotoreistencias y motores de corriente continua.

4 Objetivos

4.1 General

Desarrollar un acumulador térmico capaz de cocinar alimentos mediante la selección del mejor PCM y el mejor diseño del dispositivo para ser comparado con otras fuentes de energía térmica.

4.2 Particulares

- Evaluar la adición de 0, 5, 10 y 15 % en masa de grafito al PCM base compuesto por KNO_3 , NaNO_3 y NaNO_2 (53/7/40 % m/m) utilizando la metodología QFD para seleccionar el mejor PCM.
- Evaluar el número superficies extendidas del acumulador térmico mediante simulación para seleccionar el mejor diseño y construir el dispositivo.
- Evaluar el rendimiento del acumulador térmico mediante la metodología QFD para compararlo con otras fuentes de energía térmica.

5 Metodología científica

En la Figura 6 se observa la metodología que se realizó y la cual se explica a continuación:

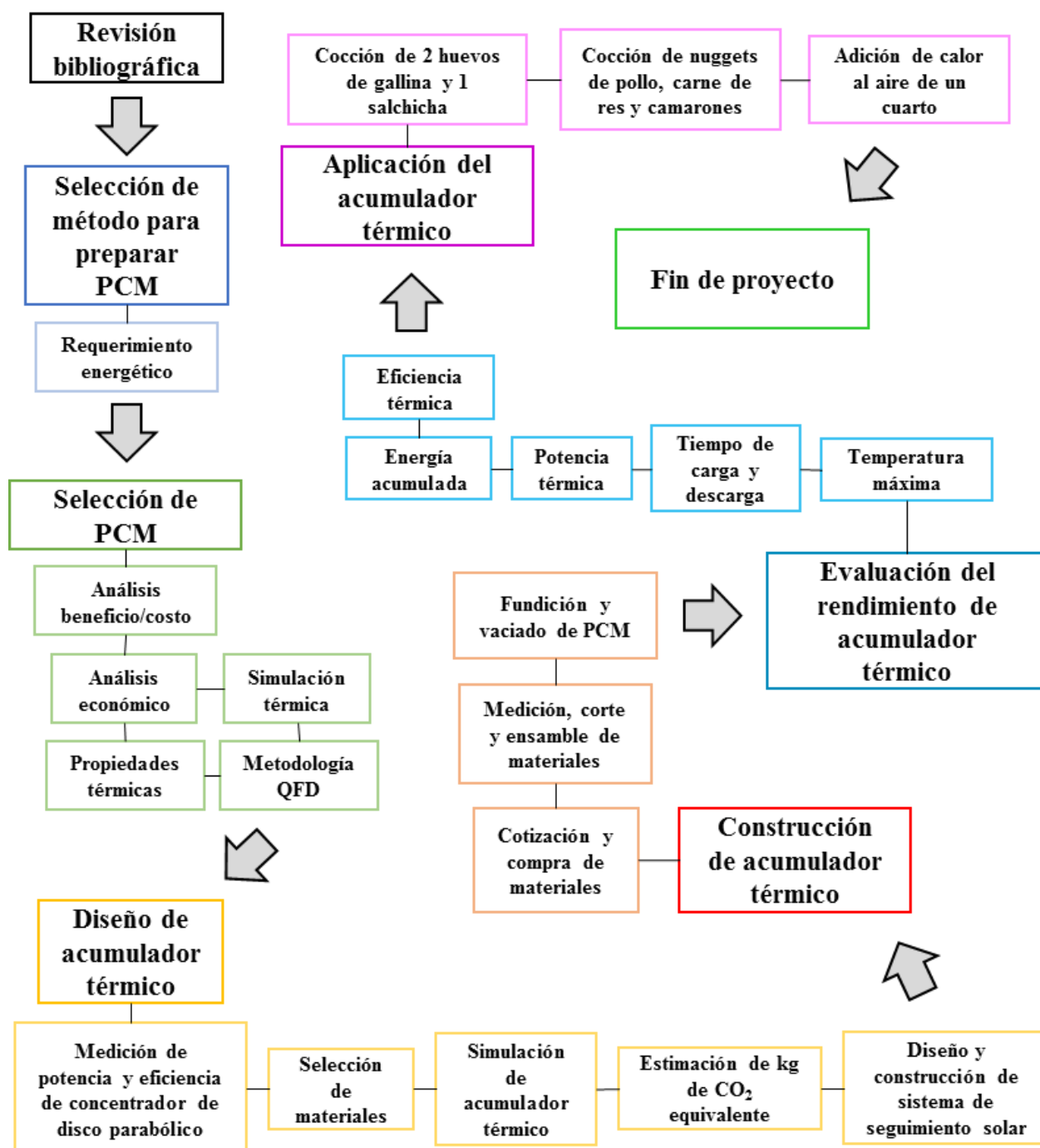


Figura 6. Diagrama de la metodología.

Primero se realizó una revisión bibliográfica y después se elaboró un diseño experimental para analizar dos métodos de preparación del PCM y 4 porcentajes en masa de grafito (0, 5,

10 y 15 %) con 3 repeticiones cada experimento, en donde el número total de muestras fue de 24. Todas las muestras se analizaron por DSC y THM para obtener la entalpía y temperatura de fusión/solidificación, calor específico y conductividad térmica. Solamente las muestras más relevantes se analizaron por XRD, SEM y TGA para observar cambios en su estructura cristalina, morfología y temperatura máxima de operación. Con los datos recopilados se hizo un análisis de varianza (ANOVA) para observar diferencias significativas. Posteriormente se seleccionó el método de preparación del PCM y mediante la metodología QFD se seleccionó el PCM más adecuado para el acumulador térmico.

La potencia y eficiencia de un concentrador solar de disco parabólico fueron evaluadas. Con la información recabada se diseñó y simuló un acumulador térmico para observar su desempeño en estado transitorio.

Para determinar el número de superficies extendidas primero se seleccionó el material, después se realizó un análisis dimensional para aumentar la eficiencia. Se simularon acumuladores térmicos con diferente número de superficies extendidas. Se eligió la configuración de mayor eficiencia en el periodo de mayor radiación solar. A esta configuración se le estimó la emisión de CO₂ equivalente. También se diseñó y construyó un sistema de seguimiento solar.

Con la información recabada se construyó el acumulador térmico solar y se evaluó: su tiempo de carga y descarga, cantidad de energía almacenada, potencia y eficiencia térmica. Adicionalmente se analizó su capacidad para cocinar alimentos y para calentar un habitáculo.

A continuación, cada una de las etapas de la metodología son explicadas en mayor detalle.

5.1 Preparación del PCM con grafito

PCM base. El PCM base se obtuvo mezclando los siguientes porcentajes en masa: 53 % de KNO₃, 7 % de NaNO₃ y 40% de NaNO₂. Las 3 sales fueron grado reactivo de la marca CTR Scientific. Primero se secaron las sales por separado a 110 °C durante 10 minutos y se dejaron enfriar a temperatura ambiente, después se colocaron en un desecador con gel de sílice, se pesaron los componentes por separado para dar un total de 224.64 g. Posteriormente esta cantidad se introdujo en un molino de cuchillas para su molienda durante dos ciclos de 30 s cada uno. Se utilizó un molino de cuchillas de 125 W de la marca Hamilton Beach, el cual

se compró nuevo a modo de evitar usar otro molino que pudiera introducir contaminantes a las muestras. El grafito utilizado fue grafito comercial en polvo con un tamaño máximo de partícula de 76 μm (malla 180).

Preparación de los compósitos (Sales – grafito). Para mezclar estas sales con el grafito se utilizaron 2 métodos: mezcla en seco y método de dos pasos.

a) Método de la mezcla simple. Consistió en tomar el PCM base en polvo y mezclarlo con 0, 5, 10 y 15 % de grafito en masa agitando manualmente en un vial de 20 mL por 5 min. Después se trasladó la muestra a una bolsa con cierre hermético y se dejó en un desecador con gel de sílice para su posterior caracterización.

b) Método de dos pasos. Se fundió el PCM base a 200 °C y se mezcló durante 15 min con un agitador magnético en un vial de vidrio de 20 mL, después se agregó 0, 5, 10 y 15 % de grafito en masa para volver a mezclar por 30 min mediante un agitador magnético. Al finalizar el tiempo de mezclado, el PCM se trasladó a una placa de vidrio donde se dejó solidificar. Cuando el PCM se enfrió se separó de la placa de vidrio y se molió en un molino de cuchillas durante 30 segundos dos veces. Por último, se trasladó a una bolsa con cierre hermético y se dejó en un desecador con gel de sílice para su posterior caracterización.

5.2 Caracterización del PCM

Las caracterizaciones hechas al PCM fueron: calorimetría diferencial de barrido (DSC) para conocer las entalpías de fusión y solidificación, calor específico y temperatura de fusión/solidificación; análisis termogravimétrico (TGA) para conocer la temperatura máxima de operación, historial térmico (THM) [82, 83] para calcular la conductividad térmica, difracción de rayos X (XRD) para saber si existe variación en su estructura cristalina y microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología superficial.

DSC. La caracterización de las muestras se llevó a cabo en el calorímetro diferencial de barrido de la marca TA Instruments modelo SDTQ 600, utilizando 20 mg de muestra y los siguientes parámetros:

Temperatura mínima = temperatura ambiente (~ 25°C)

Temperatura máxima = 380 °C

Rampa de calentamiento = 10 °C/min

Atmósfera = Nitrógeno a 25 mL/min

TGA. Se utilizaron los mismos parámetros a excepción de la temperatura máxima la cual fue de 900 °C. El calor específico (C_p) se calculó de acuerdo con la Ecuación 4 [81] donde ΔH es la entalpía en J/g y ΔT es la diferencia de temperaturas en °C.

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (4)$$

Las entalpías de fusión y solidificación fueron determinadas mediante un termograma realizado por calorimetría diferencial de barrido, donde el área bajo la curva de W/g vs tiempo fue obtenida por el software del mismo equipo (TA Instruments), al igual que las temperaturas de fusión y solidificación.

THM. La potencia térmica se calculó mediante la ley de Fourier a partir de la Ecuación 5 [82] donde \dot{q} es la potencia térmica en Watts, K es la conductividad térmica en W/m*K, ΔT es la diferencia de temperaturas en °C y C corresponde a las dimensiones del material en metros (área / longitud). Mediante THM se pudo obtener el calor total que el PCM y su recipiente almacenaron, además, el THM proporcionó el tiempo total de la medición por lo que el cociente del calor total entre el tiempo total arrojó como resultado la potencia de disipación de calor del material.

$$\dot{q} = K * C * \Delta T \quad (5)$$

La Ecuación 5 permitió realizar un ajuste lineal donde \dot{q} corresponde al eje de las ordenas, ΔT corresponde al eje de las abscisas y $K * C$ es la pendiente de la recta, de aquí se despejó $C = A/L$ donde se hizo la suposición de K del material de referencia, A fue el área de transferencia de calor del sistema y L la longitud por la cual el calor se transfirió.

Las pendientes de las rectas \dot{q} vs ΔT permitieron conocer las dimensiones del material medido y con la referencia se pudo determinar la conductividad térmica de otros materiales a partir de las dimensiones ya encontradas. La Ecuación 6 [82] surgió de la igualdad de la ley de Fourier para dos materiales distintos. Para el cálculo de la K_{PCM} (conductividad térmica del PCM), el subíndice 2 representa a la referencia y el 1 al PCM.

$$K_{PCM} = \frac{\dot{q}_1 * L_1 * A_2}{\dot{q}_2 * L_2 * A_1} * K_2 \quad (6)$$

XRD. Los compuestos grado reactivo y grado técnico fueron analizados por difracción de rayos X para observar diferencias y detectar contaminantes, además, se realizaron pruebas para las mejores muestras antes y después de fundir el material para comprobar la estabilidad térmica. Las muestras fueron molidas hasta que pasaron por el tamiz de malla 300. El barrido del ángulo de incidencia 2θ fue de los 10 a los 80° con una radiación de $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$.

SEM. El análisis de la superficie y la morfología del material se hizo mediante el microscopio de la marca Philips modelo XL30 ESEM donde se utilizaron pastillas y polvo de los materiales analizados con una masa aproximada de 500 mg, los parámetros de la caracterización fueron de 20 keV a 1000x con un diámetro del haz de 5 nm y una distancia de trabajo de 7 a 10 mm.

5.3 Análisis estadístico

Diseño experimental. El diseño experimental contempló dos factores, el primero de ellos fue el método de preparación con dos niveles y el segundo factor fue la cantidad de grafito con 4 niveles, se realizaron 3 réplicas de cada combinación. Tanto el proceso de muestreo como la caracterización se realizaron al azar. Las variables de respuesta fueron la temperatura y las entalpías de fusión y solidificación, el calor específico y la conductividad térmica. El número total de muestras fueron 24 pues es un diseño de $2 \times 4 \times 3$. Con los datos obtenidos se realizó un análisis ANOVA mediante el software Statistica®.

Análisis de varianza (ANOVA). La significancia del estudio fue del 0.05 o bien, el estudio tuvo 5 % de probabilidad de indicar que alguno de los factores era diferente cuando en realidad no lo era. El parámetro clave para observar si una muestra fue diferente de otra, es la probabilidad (P), por lo tanto, si esta fue inferior al valor de significancia, entonces la muestra fue diferente. Con los resultados se corroboró si hubo diferencias o no y se discutió sobre qué método de mezclado y porcentaje de grafito utilizar.

5.4 Selección del PCM

Matriz QFD. Para utilizar la matriz de despliegue de calidad, primero se buscaron las propiedades térmicas de un PCM relevantes para el diseño de un acumulador térmico y se

colocaron en una columna a la izquierda de la matriz, a esto se le conoce como requerimientos del cliente. Cada requerimiento fue ponderado de acuerdo con su relevancia. Después en la parte superior de la matriz se ubicaron las posibles soluciones para satisfacer los requerimientos del cliente, en este caso los PCM.

La matriz relacionó cada requerimiento con cada una de las soluciones, este valor se ponderó con valores numéricos bajos, medios y altos, comúnmente se utilizan 1, 5 y 9, aunque estos también se pueden normalizar. Una vez llenada la matriz estos valores se multiplicaron por su ponderación y al final se sumaron los puntos de cada solución, el mayor puntaje indicó la mejor opción para satisfacer la o las necesidades más importantes.

Esta herramienta permitió concentrar toda la información relevante de los PCM para poder hacer un análisis integral y ponderado. Lo anterior ayudó a seleccionar el mejor PCM de manera imparcial teniendo en cuenta los requerimientos del acumulador térmico. El uso de esta matriz aprovechó toda la información relevante de los PCM y permitió observar de manera global las ventajas y desventajas de cada PCM en un mismo lugar. Una vez seleccionado el mejor PCM se realizó una comparación entre 2 grados de pureza, el grado reactivo y el grado técnico para observar si es conveniente ahorrar en costos de materia prima o no.

Al finalizar el análisis mediante la metodología QFD, el PCM seleccionado se comparará con su respectivo PCM grado técnico utilizando TGA, XRD antes y después de 19 ciclos de calentamiento y enfriamiento y análisis económico, esto para observar si existen diferencias que justifiquen el uso de grado reactivo.

5.5 Cálculo de potencia y eficiencia térmica de concentrador solar de disco parabólico

La potencia y eficiencia térmica permitieron conocer las limitaciones del concentrador solar que sirvieron como precedente para el diseño del acumulador térmico. La eficiencia térmica (η) se calculó dividiendo la cantidad de calor utilizada para calentar agua durante un tiempo determinado, entre la cantidad de calor que fue captada por el concentrador como se muestra en la Ecuación 7.

$$\eta = \frac{m * C_p * \Delta T}{I * A * \Delta t} \quad (7)$$

donde m es la masa de agua en gramos, C_p es la capacidad calorífica del agua en J/g °C y ΔT es la diferencia entre la temperatura inicial y final del agua en °C, I es la radiación solar por unidad de área en W/m², A es el área del concentrador en m² y Δt es la diferencia entre el tiempo inicial y final de la medición en segundos [83].

Para el cálculo de la potencia térmica (P_t) se utilizó la Ecuación 8:

$$P_t = \frac{m * C_p * (T_2 - T_1)}{t} \quad (8)$$

donde t es el tiempo de la medición en segundos.

La norma ASAE S580.1 recomienda tomar mediciones de la temperatura ambiente, temperatura del agua y radiación solar por cada intervalo de 10 min. La potencia se estandariza multiplicando por 700 y dividiendo entre la radiación solar real en W/m² [84].

5.6 Diseño de acumulador térmico

Dimensionamiento. Una vez seleccionado el PCM y con información sobre cuánta energía es necesaria para cocinar o calentar alimentos, se calculó la cantidad de PCM y con esta masa y la densidad se obtuvo el volumen del PCM. Este volumen fue distribuido en un cilindro, al cual se le añadió un volumen de espacio vacío con la finalidad de que el contenedor no se deforme o se rompa en el proceso de cambio de fase

Material de macro encapsulado y carcasa. El material seleccionado fue el acero inoxidable AISI 316 debido a sus propiedades anticorrosivas.

Aislamiento térmico. El aislante térmico seleccionado fue de fibra cerámica (52 % de sílice y 44 % de alúmina).

Cerraduras y agarraderas. Para poder trasladar el acumulador térmico se seleccionaron agarraderas para ollas de cocina hechas de baquelita.

Superficies extendidas. El cálculo de las superficies extendidas se basó en su material y geometría, el material de las superficies extendidas fue de acero inoxidable 316. Primero se

calculó el parámetro m mostrado en la Ecuación 9 el cual reúne las propiedades físicas y geométricas de la superficie extendida.

$$m = \sqrt{\frac{h * P}{K * A_c}} \quad (9)$$

donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, P es el perímetro del cilindro, K es la conductividad térmica del material y A_c es el área de sección transversal.

Si la condición $m * L > 2.65$ se cumple, significa que la superficie extendida es una aleta infinita y no hay transferencia de calor en la punta de esta, de lo contrario si la aleta es finita, quiere decir que la aleta aún posee energía que debe ser transferida y, por lo tanto, puede incrementar su temperatura debido a la incapacidad de disipar el calor con las dimensiones que posee.

En caso de que la aleta sea infinita el calor transferido por ésta se puede calcular mediante la Ecuación 10.

$$\dot{q}_f = \sqrt{h * P * K * A_c * T_b} \quad (10)$$

donde \dot{q}_f es el calor transferido por la aleta y T_b es la temperatura en la base de la aleta. La Ecuación 11 muestra el cálculo de la efectividad en una superficie extendida E la cual expresa la razón entre la cantidad de calor disipada por la aleta y la cantidad de calor disipada sin la aleta [85].

$$E = \frac{\dot{q}_f}{h * A_c * T_b} \quad (11)$$

5.7 Diseño de acumulador térmico y simulación asistidos por computadora

Con la información del apartado anterior se procedió a realizar un diseño asistido por computadora en 3 dimensiones con ayuda del software SolidWorks®, esto ayudó a tener una perspectiva general de la cantidad y material requerido. Se utilizaron las propiedades térmicas del PCM y de los demás materiales para llevar a cabo simulaciones térmicas. Estas simulaciones permitieron observar las distribuciones de temperatura dentro del acumulador

térmico variando el número de superficies extendidas considerando los parámetros siguientes:

Temperatura ambiente = 25 °C

Temperatura del foco = 501 °C

Potencia del foco = 592 W

Diámetro focal = 7.7 cm

El tiempo máximo de exposición de radiación solar establecido fue de 8 h, esto equivale a un horario de 9 a.m. a 5 p.m. debido a que en ese horario los valores de irradiancia son los más elevados.

5.8 Diseño de sistema de seguimiento solar

Se usaron motores de corriente directa que harán la función de enfocar el concentrador solar normal a la posición del sol. Además, para adaptar los motores se maquinaron dos piezas de acero al carbono y se taladraron para realizarles su rosca y poder sujetar las flechas de los motores con tornillos de fijación. Por otro lado, se utilizaron 4 fotoresistencias como sensores sujetos con una pieza de madera pintada, estos sensores fueron conectados a un microcontrolador Arduino UNO R3 y todos los circuitos se añadieron a una caja de plástico para protegerlos del medio ambiente, por último, la alimentación de todo el circuito fue suministrada por una fuente de 12 V de corriente continua.

5.9 Emisiones de CO₂ equivalente

Para efectuar un análisis de emisiones de CO₂ equivalente se usó el software OpenLCA [86] al cual se importaron 14 bases de datos sobre los insumos utilizados en la construcción del acumulador térmico. El indicador de impacto global utilizado fue el de potencial de calentamiento global a 20 años (GWP 20a) [87] para estimar los kg de CO₂ equivalente que emite el prototipo durante este periodo.

La unidad funcional del análisis fue el acumulador térmico con unidades de masa en kg para todos los flujos de entrada y salida. El método utilizado fue el del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC) [88] con bases de datos del año 2013.

5.10 Rendimiento del acumulador térmico

Tiempo de carga y descarga. Para el tiempo de carga simplemente se expuso el acumulador a la radiación solar concentrada por 3 h con ayuda de un cronómetro, para el tiempo de descarga el acumulador térmico se retiró del concentrador solar y se midió la temperatura en función del tiempo con ayuda del microcontrolador Arduino Mega 2560 y tres termopares tipo K, dos de ellos para medir la temperatura del acumulador térmico y 1 para medir la temperatura ambiente.

Energía térmica acumulada. La energía térmica almacenada se calculó con la Ecuación 1.

Potencia térmica. Para calcular la potencia térmica en watts (W) se dividió la cantidad de energía térmica acumulada en Joules (J) sobre el tiempo en segundos (s) (ver ecuación 8).

5.11 Aplicación del acumulador térmico

La aplicación del acumulador térmico se llevó a cabo cocinando 71 g de nuggets de pollo, 50 g de camarón y 74 g de cortadillo de pulpa de res, además, el acumulador se utilizó para calentar un cuarto de $4 \times 3.2 \times 2.7$ metros donde la temperatura del cuarto fue registrada para observar el cambio de temperaturas en función del tiempo. Con esta información se obtuvo la energía total transferida hacia el aire y la potencia en función del tiempo.

6 Resultados y discusión

6.1 Preparación del PCM con grafito

El PCM base se obtuvo mezclando, calentando y moliendo rápidamente las tres sales, KNO_3 , NaNO_3 y NaNO_2 para evitar su hidratación, en la Figura 7 - a) se puede observar el PCM base después de ser molido con un tamaño de partícula de $90 \mu\text{m}$. La mezcla en seco de las sales y el grafito no presentaron merma, pero resultó heterogénea de manera visual. El tiempo total de procesamiento del método de dos pasos se incrementó en 33 minutos y las pérdidas fueron del 22.22 % en masa en comparación con el proceso de preparación del PCM base. Se observó que las muestras realizadas mediante el método de dos pasos con un 5 % de grafito fueron las más sencillas de manejar por su fluidez y las de 10 y 15 % fueron difíciles de manejar debido a su textura (Figura 7 - b)).

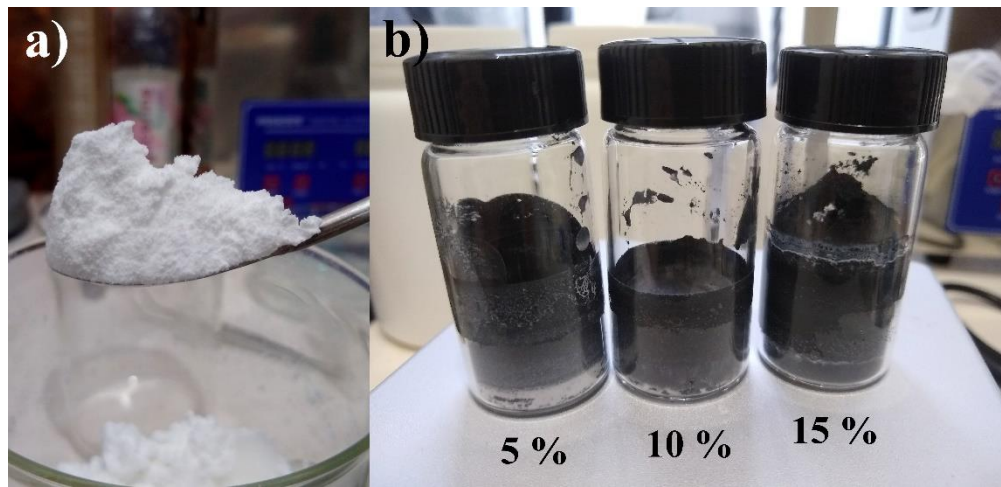


Figura 7. PCM base y PCM con grafito. a) Espátula de acero inoxidable sosteniendo al PCM base después del proceso de molienda. b) Muestras de PCM con 5, 10 y 15 % de grafito procesadas mediante el método de dos pasos.

Se variaron los tiempos de agitación (5, 10 y 15 min) para observar si la cantidad de segregación cambiaba, pero no se observaron diferencias. Esto quiere decir que no es un problema de agitación, sino de las características intrínsecas de los componentes.

En las muestras obtenidas por el método de dos pasos hubo zonas que no se segregaron las cuales fueron conductoras de la electricidad ya que presentaron una resistencia eléctrica dependiente de la distancia. Los valores de la resistencia eléctrica en la superficie fueron de 1.67 kOhm (Figura 8 - a)) y si la resistencia eléctrica se medía entra la superficie y el cuerpo de la muestra su valor era de 5.72 kOhm (Figura 8 - b)).

Esto indica que se ha pasado el umbral de percolación eléctrica, por lo tanto, hay suficiente grafito para que existan vías por donde los electrones puedan fluir, si bien en el grafito los principales transportadores de calor son los fonones, los electrones también transportan una parte del calor total transferido.

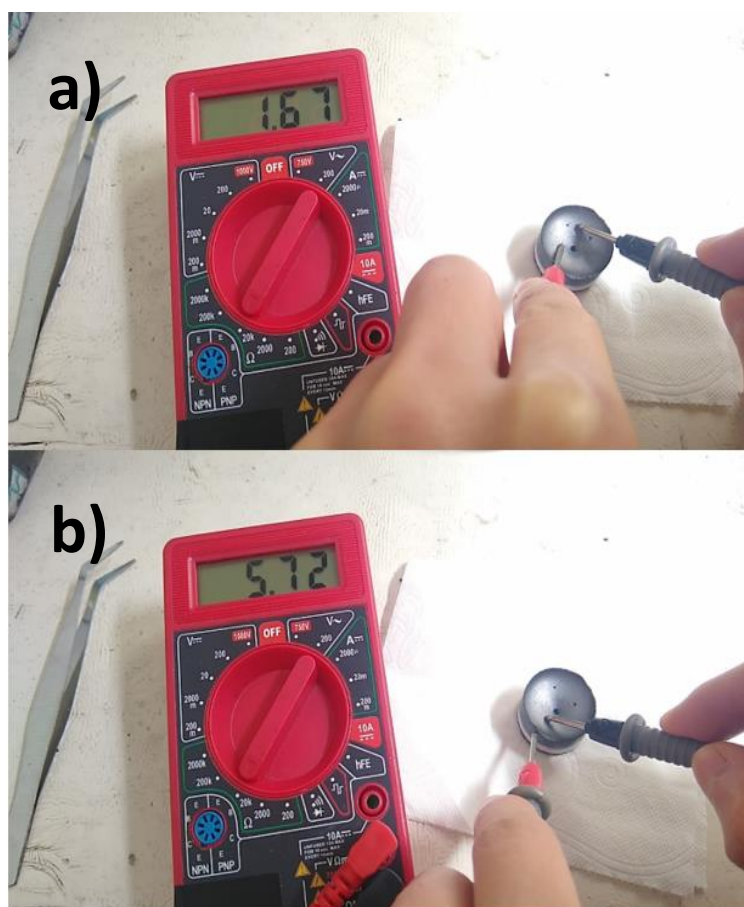


Figura 8. Resistencia eléctrica en kOhm del PCM con 5 % en masa de grafito medida con un multímetro digital a) en su superficie y b) en el interior.

De lo anterior se puede resumir que existe una cantidad suficiente de grafito para hacer conductor eléctrico un material que no lo era, por lo tanto, se puede inferir que también ocurre la percolación térmica y que ahora existen rutas de transporte de electrones en el material que puedan transferir más calor del que ya se transfería.

6.2 Caracterización del PCM

DSC. Los promedios de las propiedades obtenidas mediante calorimetría diferencial de barrido en función del método de preparación y porcentaje de grafito se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de calorimetría diferencial de barrido.

Método	Grafito (% m/m)	ΔH_f Endo (J/g)	ΔH_f Exo (J/g)	T_f (°C)	T_s (°C)	C_p (J/g°C)
1	0	204.80	108.77	147.50	132.89	1.52
	5	199.11	107.00	147.68	132.49	1.45
	10	189.93	97.19	146.93	132.41	1.35
	15	182.50	92.25	147.13	132.17	1.27
2	0	204.13	114.43	147.20	133.01	1.59
	5	193.97	102.97	144.05	132.68	1.40
	10	182.50	98.74	143.71	132.40	1.33
	15	171.53	86.70	144.07	131.82	1.18

Los resultados de DSC muestran que cuando se utiliza el método de dos pasos se requiere de 2.5 a 6 % menos energía para fundir el compuesto con respecto al método de la mezcla simple. Esta pequeña diferencia crece a medida que se agrega más grafito, este comportamiento se le atribuye a la homogeneidad de la mezcla.

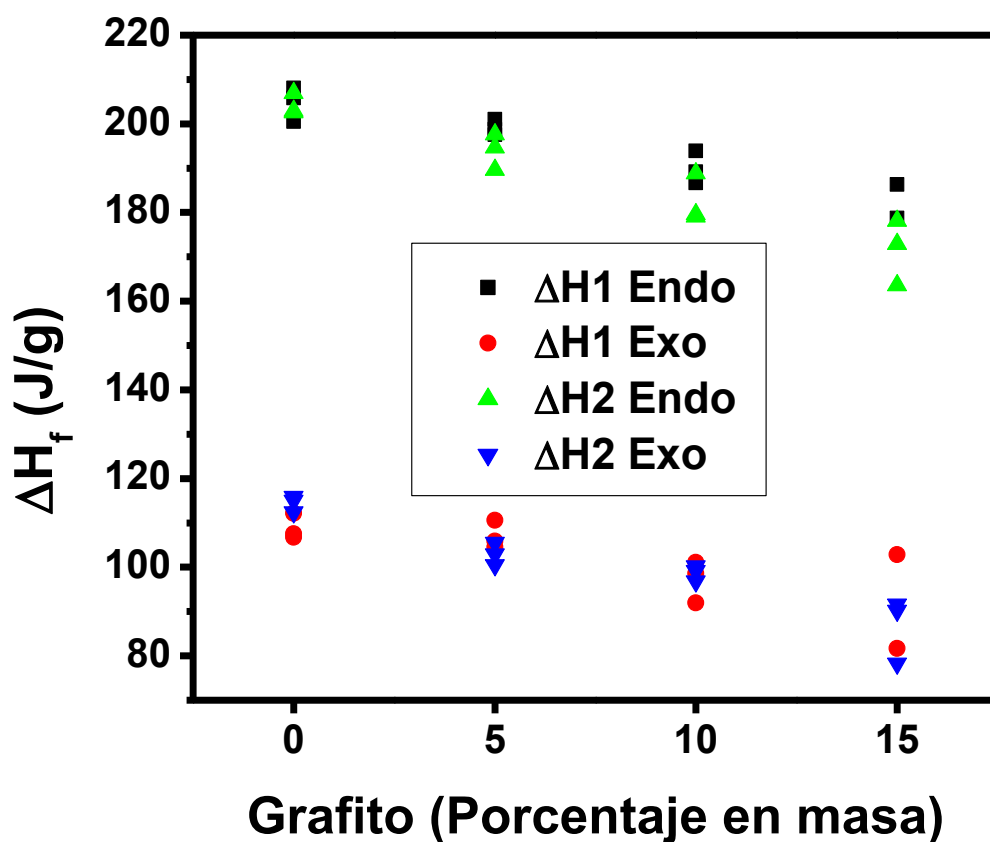


Figura 9. Entalpías de fusión endotérmicas y exotérmicas del PCM por ambos métodos en función del porcentaje en masa de grafito.

Cuando se solidificó el compuesto éste entregó la misma cantidad de energía sin importar el método de mezclado. No obstante, sí existe un cambio en la entalpía de solidificación de hasta un 24 % cuando se compara el PCM sin grafito y el PCM con 15 % en masa.

Las entalpías de fusión exotérmicas (ΔH_f Exo) y endotérmicas (ΔH_f Endo) de ambos métodos en función del porcentaje de grafito se muestran en la Figura 9, donde se observa una tendencia decreciente de la entalpía de fusión en función del porcentaje en masa de grafito. Esto se debe a que el grafito disminuye las fuerzas entre las moléculas de las sales que componen el PCM base y se necesita menos energía para fundir el compuesto.

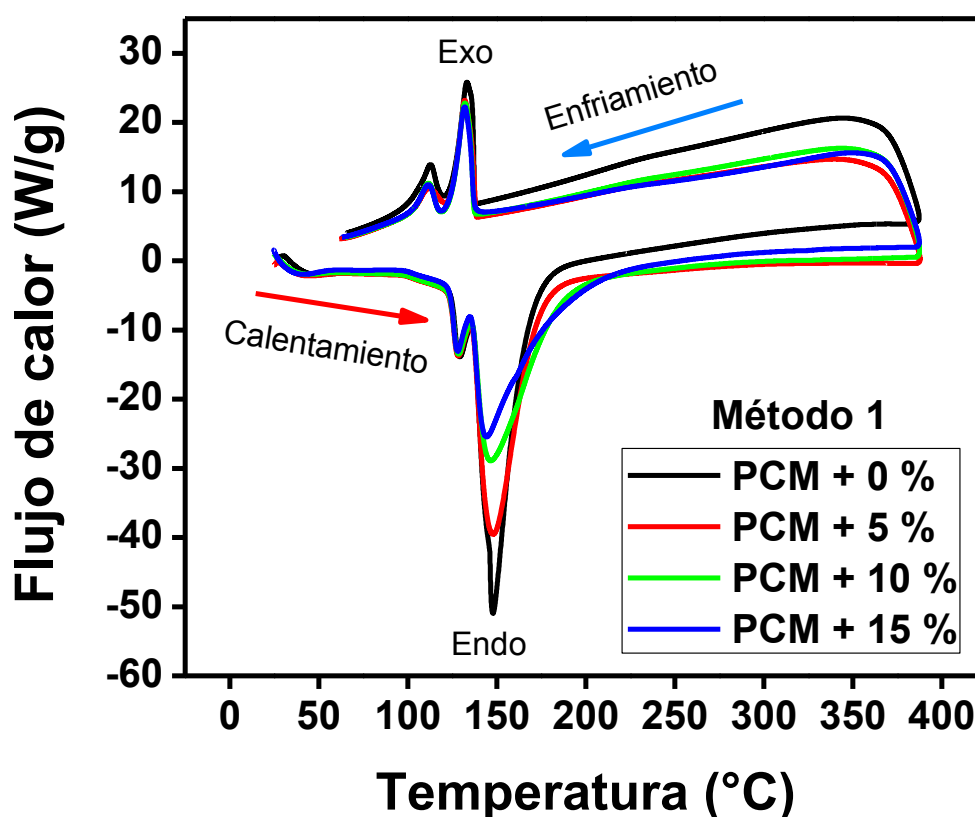


Figura 10. Termograma de las muestras con 0, 5, 10 y 15 % de grafito preparadas mediante el método de la mezcla simple.

En la Figura 10 se muestran los termogramas para las muestras del método 1 (mezcla simple). Se pueden observar un pico pequeño y otro grande durante el calentamiento y en el enfriamiento. El primero corresponde a una transición de fase sólido-sólido y el segundo a una transición de fase sólido-líquido. Como primera observación se puede visualizar que los picos exotérmicos son muy similares entre los PCM con distintos porcentajes de grafito

indicando que hay poca variación de entalpías de solidificación. A su vez, se puede apreciar que cuando las muestras se calientan no existe una variación de los picos endotérmicos para la transición solido-sólido porque el método no generó una interacción entre el grafito y el PCM justo antes de fundir el compuesto. Por otro lado, si se observa una variación en los picos endotérmicos de transición de fase líquido-sólido, éstos disminuyen porque el grafito ocupa un porcentaje de la masa total de la muestra y este material no se está fundiendo, por lo tanto, menos energía es necesaria para fundir la mezcla porque en efecto hay menos mezcla para fundir.

Por otro lado, para el método de los dos pasos se nota que los picos endotérmicos de transición de fase sólido-sólido se ensacharon y permanecieron con la misma forma para los 3 porcentajes de grafito, esto se atribuye a que el método 2 mezcla de manera uniforme los componentes.

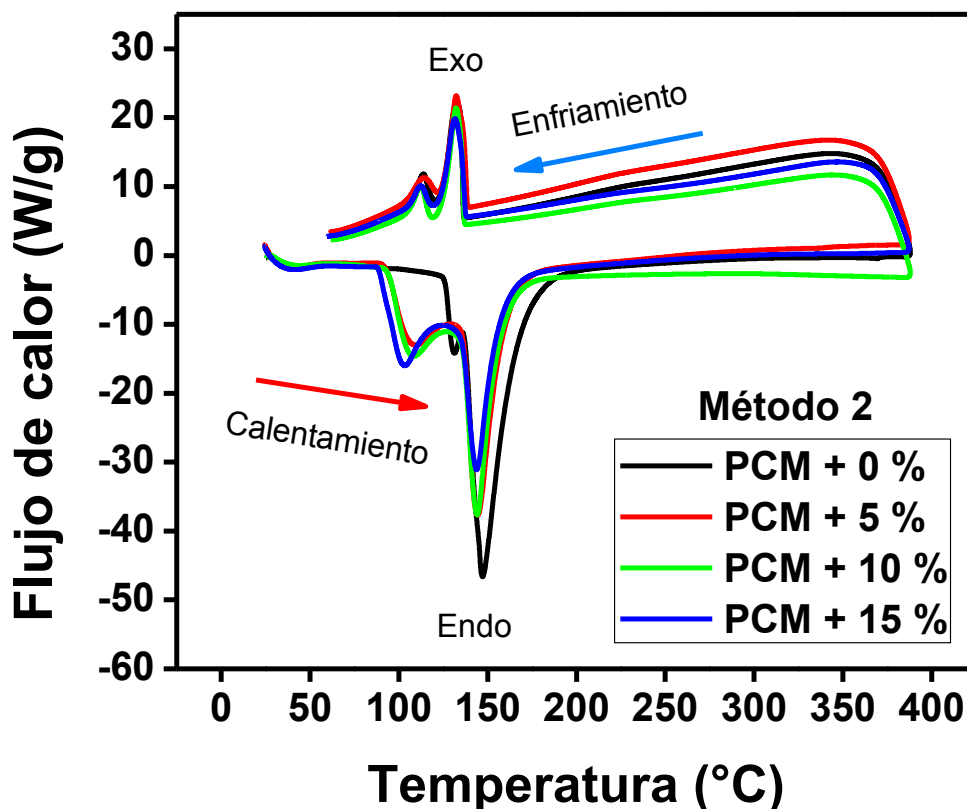


Figura 11. Termograma de las muestras con 0, 5, 10 y 15 % de grafito preparadas mediante el método de dos pasos.

Por otra parte, la anchura de los picos en DSC está relacionada con la distribución del tamaño del cristal y se infiere que hay más cristales de diferentes tamaños, lo anterior tiene sentido, pues el grafito actúa como un agente de nucleación y los cristales que crecen colapsan con otros generando cristales de diferentes tamaños (Figura 11). Además, la temperatura de transición de fase sólido-sólido se recorrió hacia temperaturas más bajas reiterando la interacción.

De lo anterior se puede decir que el método de los dos pasos mezcla ambos componentes lo suficiente para que el material varíe el tamaño de los cristales en comparación con el PCM base. Las diferencias en las temperaturas de fusión y solidificación también ayudan a corroborar dicha aseveración.

Para el pico endotérmico de transición de fase líquido-sólido se observa el mismo comportamiento observado en el método 1, pero, en diferente magnitud ya que al ser más homogénea la mezcla genera menores entalpías y temperaturas de fusión. Una causa del decremento de la entalpía de fusión es una reacción de descomposición, puesto que si reacciona el grafito con el PCM base el DSC registrará el calor necesario para que se lleve a cabo dicha reacción, para comprobar esto se realizó una prueba variando la tasa de calentamiento en DSC en donde se observó la variación de la entalpía de fusión, pues cuando se trata de un proceso físico la entalpía de fusión no debe cambiar y cuando es un proceso químico sí.

Aparte, los valores de entalpía de fusión y solidificación no concuerdan lo cual viola la primera ley de la termodinámica, indicando que hay una reacción química mientras se lleva a cabo el proceso físico de fusión. Entonces el agregar grafito ocasiona una reacción química en la mezcla ya sea porque actúa como un catalizador, por contaminantes del mismo grafito o por ambas. Lo anterior se sustentó de manera visual, pues al romper los compósitos solidificados se muestran indicios de burbujeo en las partes con grafito, pero no en las partes del PCM base (Figura 12), el cual está segregado en el fondo del compósito.

Además, en donde hay grafito se generaron grandes cavidades donde los gases generados no pudieron salir por la alta viscosidad del material. Es importante recalcar que si bien el grafito incrementa la conductividad térmica del material este también genera porosidades las cuales afectan dicha propiedad.



Figura 12. Vista interna de compósito de PCM base con grafito realizado mediante el método de dos pasos.

Los resultados de DSC proporcionaron información acerca de las temperaturas de fusión (T_f). Se encontró que estas fueron menores para el método de dos pasos en comparación con el método de un paso, presentando una variación del 0.2 al 2.45 %, esto se debe al pobre mezclado del método de un paso. Las temperaturas de fusión y solidificación (T_f , T_s) variaron hasta un 2.6 % cuando se añadió grafito, esto de nuevo confirma la interacción entre los componentes. A pesar de que existieron variaciones éstas fueron mínimas comparadas con las variaciones de las entalpías.

Una observación de los resultados es que las temperaturas de fusión y solidificación difieren del valor reportado en la literatura y del valor medido en el laboratorio, esto es consecuencia del retraso térmico [89] el cual es observado en materiales de baja conductividad térmica. Además, si se varía la tasa de calentamiento que fue de 10 °C/min, (la tasa estándar para DSC [90]), también varían las temperaturas, por lo tanto, las temperaturas de fusión obtenidas se desplazan a temperaturas más altas en donde el máximo desfase fue de 6 °C con respecto a las temperaturas de fusión reportadas.

Por último, la capacidad calorífica disminuyó en un 25.46 % cuando se consideró el PCM con 15 % de grafito mezclado por el método de dos pasos. Lo anterior tiene sentido debido

a que el grafito posee una capacidad calorífica menor ($\sim 0.7 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) que el PCM base ($\sim 1.5 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) y en una mezcla física de manera general aplica el principio de proporcionalidad. Cabe destacar que los valores de calor específico para el PCM base son similares a los reportados en la literatura: 1.561 [91], 1.55 [92], 1.42 [93] y 1.439 [94].

XRD. Se analizó el grafito añadido a los PCM para observar en que ángulos 2θ difracta. Como se puede observar en la Figura 13 el grafito es cristalino con un pico característico a 26.5° en 2θ , esto indica la presencia de un plano de difracción en la dirección 002, el pico a 54.67° muestra el plano de difracción en 004, el cual es un múltiplo del primer plano según la ley de Bragg. Los picos mostrados a $42, 41^\circ$ y 44.64° en 2θ están relacionados con los planos de difracción en 100 y 101, los cuales son útiles para conocer el tamaño del cristalito paralelo a las láminas de grafito, mientras que los planos 002 y 004 son útiles para conocer el tamaño del cristalito perpendicular a las láminas, es decir, la altura de las láminas apiladas.

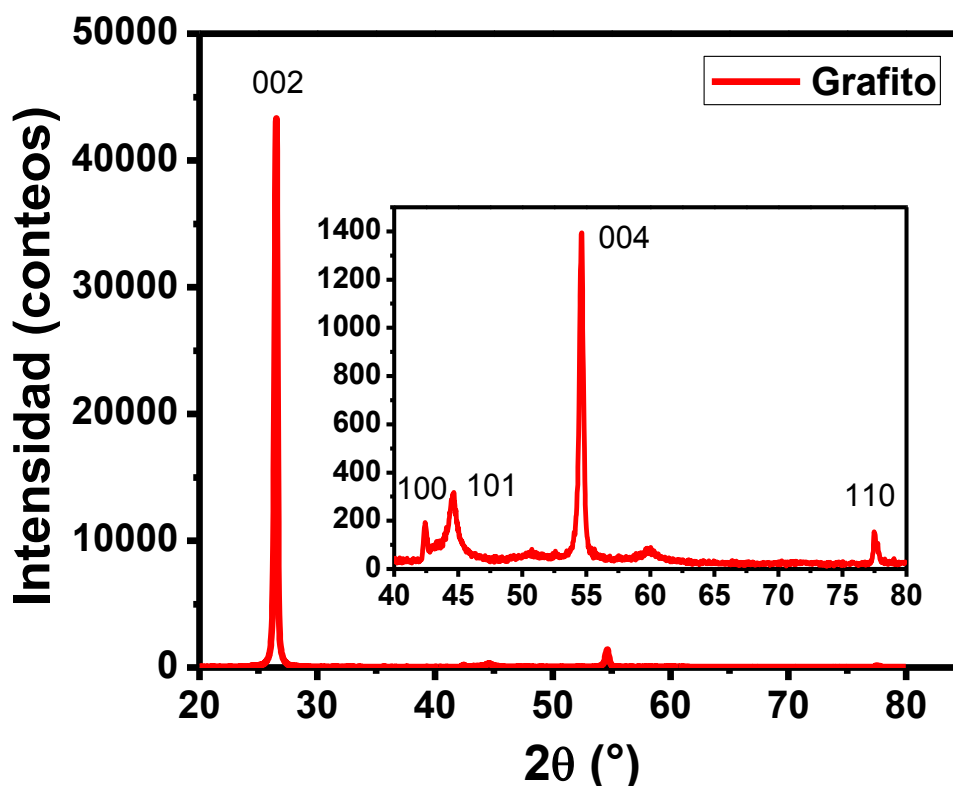


Figura 13. Difractograma del grafito comercial utilizado en el PCM

Por otro lado, en [95] se reportó un difractograma de carbones amorfos preparados a baja temperatura en donde se pueden apreciar picos anchos de los planos 002 y 100 los cuales

indican que la distancia interplanar entre las láminas de grafito es superior, esto ayuda para comparar entre carbonos amorfos y el grafito que se tiene el cual es cristalino. En la Figura 13 no se aprecia similitud con un carbono amorfo, al contrario, se muestran sus picos de difracción bien definidos, por otro lado, en el recuadro de la misma Figura entre los picos correspondientes a los planos 100 y 101 se observa que la señal no baja hasta la base, esto puede deberse a la contribución del grafito con estructura romboédrica el cual tiene un ángulo de difracción de 43.4° en 2θ aproximadamente correspondiente al plano 101 para dicha estructura [96].

La intensidad de los picos de difracción correspondientes a los planos 110, 004 y 101 incrementa en función de la temperatura de procesamiento del grafito a partir de los 1700°C , esto se debe a que se apilan más láminas de grafito y difractan en mayor medida la radiación [97]. Además la longitud de las láminas también crece en función de la temperatura, por lo que el tamaño del cristalito de grafito crece de manera axial y transversal [98]. Lo anterior se debe a que el grafito contiene unidades poliaromáticas que están estructuradas en forma de poros, lo cual con el incremento de la temperatura estos poros colapsan y las unidades se aplanan y apilan para formar estructuras más grandes.

La calidad del grafito se expresa por su contenido de carbono y su estructura cristalina, la cual puede ser hexagonal o romboédrica siendo la primera la más estable [99], ésta tiene un valor para la distancia interplanar entre láminas de grafito de 3.35 \AA [96]. Con esta distancia es posible evaluar la calidad del grafito a través del grado de grafitización (g), el cual puede ser calculado con la Ecuación 12, donde la g indica el grado de grafitización en porcentaje, d_{002} indica la distancia interplanar para el plano 002 obtenida del difractograma de rayos X, el valor de 3.44 indica la distancia interplanar en angstroms (Å) para el grafito turbostrático, este tipo de grafito tiene un grado de desorden menor que el carbón amorfo pero tiene un grado de orden inferior al grafito cristalino. El valor de 3.354 indica la distancia interplanar ideal del grafito en Å , es decir, sin defectos de red [100]. El grado de grafitización obtenido fue del 88.98% .

$$g = \frac{3.44 - d_{002}}{3.44 - 3.354} * 100 \quad (12)$$

Para el análisis de difracción de rayos X del PCM sin grafito que se muestra en la Figura 14 - a)) se observaron al menos 8 picos característicos cada uno correspondiente a 1 plano, sin embargo, solo dos de esos picos fueron los de mayor intensidad los cuales se relacionan con los planos (111) y (021), esto se puede interpretar de manera semi cuantitativa ya que el KNO_3 presenta estos dos picos y es el componente con mayor porcentaje en masa en el PCM (53 % m/m). La Figura 14 - b), c), y d) muestran las cartas cristalográficas del nitrato de potasio, nitrato de sodio y nitrito de sodio, esto para corroborar que están los compuestos en la mezcla.

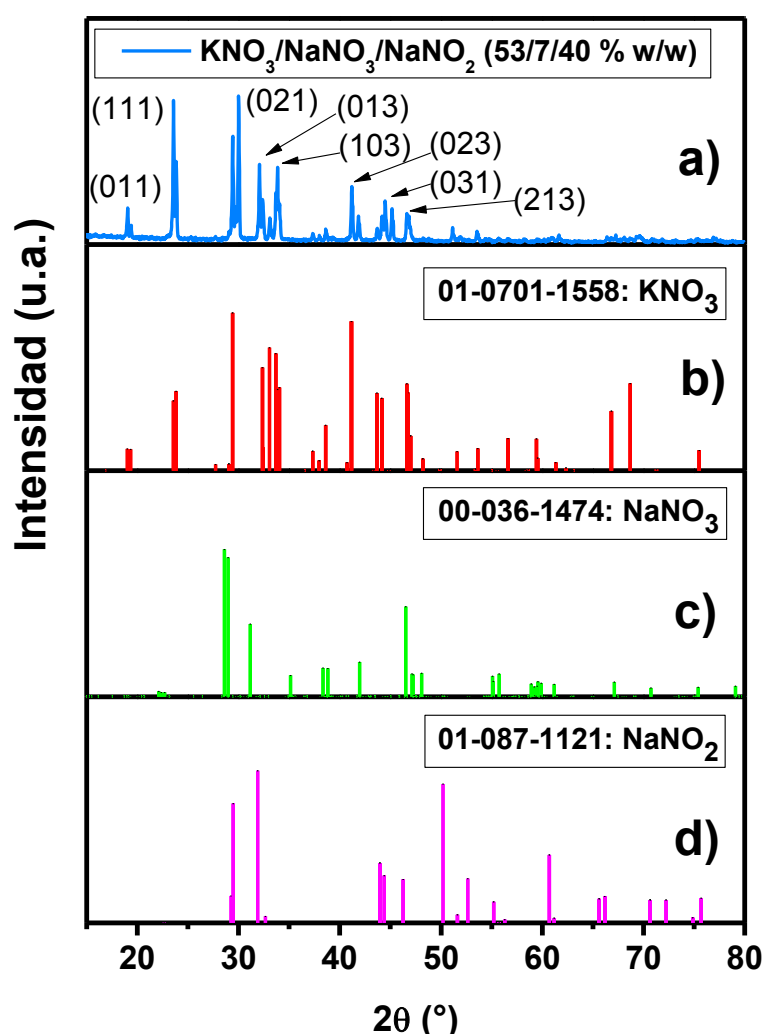


Figura 14. Análisis de difracción de rayos X del PCM. a) Difractograma del PCM. b) Carta cristalográfica del nitrato de potasio. c) Carta cristalográfica del nitrato de sodio d) Carta cristalográfica del nitrito de sodio.

Con esta técnica de caracterización se puede inferir que el PCM es una mezcla física ya que los picos del análisis coinciden con los picos de las cartas cristalográficas de las sales por separado.

Los difractogramas de las muestras realizadas para obtener los compósitos grafito – PCM mediante los métodos 1 o mezcla simple y el método 2 o de los dos pasos, indicaron que no hubo una modificación de la estructura cristalina como se muestra en la Figura 15. Se observa para el método 1 que a medida que se aumenta la cantidad de grafito el único pico que va incrementando su intensidad es el del grafito ubicado a 26.5° en 2θ mientras que los demás picos correspondientes al PCM base se mantienen invariantes. Es importante destacar que para la muestra con 15 % de grafito en masa el pico del grafito es superior en intensidad que cualquier otro pico, esto se debe a que con el método 1 no se mezclan de manera adecuada sus componentes.

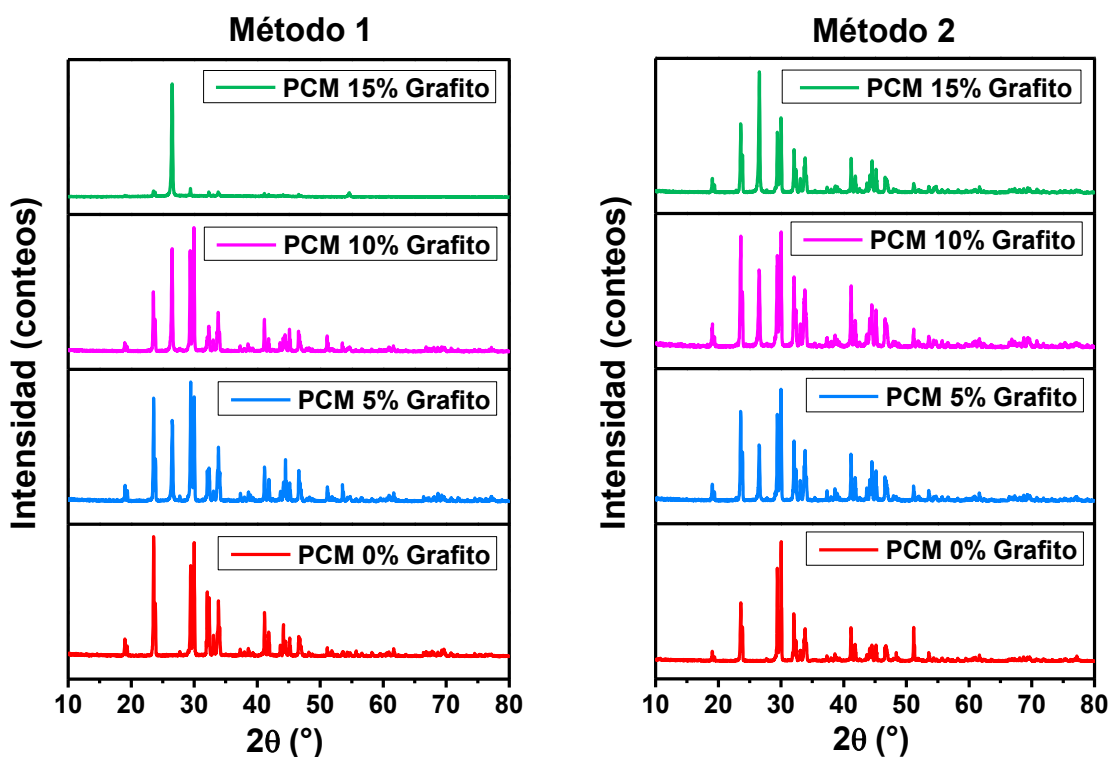


Figura 15. Difractogramas de las muestras realizadas mediante el método 1 (M1) y el método 2 (M2).

Para las muestras realizadas mediante el método 2, el pico que aumentó su intensidad también fue el pico a 26.5° en 2θ correspondiente al grafito. Se observó que existe una diferencia en

la intensidad de los picos correspondientes al difractograma del 15 % de grafito en masa para ambos métodos. Esto se debe a que en la muestra realizada por el método 1 existe una mayor cantidad de grafito que en la muestra realizada por el método 2. Esta caracterización hace notar que los compósitos se mantienen como una mezcla física sin enlaces químicos que modifican la estructura cristalina de sus componentes, esto quiere decir que los cambios en las propiedades térmicas del material se deben exclusivamente a interacciones físicas entre componentes.

THM. El THM se validó con una referencia de indio metálico previamente verificada mediante calorimetría diferencial de barrido, después se calibró con el PCM base. Más adelante, se calculó la conductividad térmica con la Ecuación 6 y se reportaron los valores promedio de dicha propiedad en función del método y porcentaje en masa de grafito (Tabla 6).

Las muestras realizadas por el método 1 presentan una tendencia anormal de la conductividad térmica, esto se debe a que el grafito no se distribuye de manera homogénea y quedan segregaciones de grafito. Por otro lado, se observó una tendencia creciente de la conductividad térmica conforme se añadió grafito en las muestras obtenidas por el método 2.

Tabla 6. Conductividades térmicas promedio en función del método de preparación y porcentaje en masa de grafito.

Método	Grafito (Porcentaje en masa)	K (W/m*°C)
1	0	0.68
1	5	0.85
1	10	0.76
1	15	0.81
2	0	0.56
2	5	0.73
2	10	0.73
2	15	0.76

Para la muestra del método 1 con 10 % de grafito la conductividad térmica fue menor, esto se atribuye a dos factores, el error intrínseco del método de medición y a la deficiencia del método de mezclado para homogenizar el compósito. El primer factor se relaciona con la exactitud de los termopares tipo K utilizados, en la Figura 16 se puede apreciar uno de ellos

introducido en el compósito, estos termopares tienen una precisión de ± 2.2 °C. Otro factor de imprecisión puede provenir de la heterogeneidad de la muestra.



Figura 16. Tubo de ensaye de 10 mm x 10 cm con termopar tipo K en compósito.

La mayor homogeneidad de las muestras obtenidas por el método de mezclado por dos pasos confirma este hecho. Este comportamiento es característico del fenómeno de percolación pues una vez se sobrepasa el umbral de percolación existe poca variación en la conductividad térmica.

SEM. En la Figura 17 - a) se observa que los cristales de las sales están distribuidos y que los tamaños de los cristales están entre 10 y 2 μm . Se observan también algunos poros de 3 μm . Este análisis mostró que no hay un crecimiento preferencial de alguno de los componentes, indicando una isotropía al menos de manera superficial. También, se pudo identificar la presencia de los elementos más característicos del PCM (Na y K) a través de un mapeo elemental obtenido por EDS.

En color azul se muestra la presencia de sodio y en color amarillo la presencia de potasio (Figura 17 - b) y 16 - c)).

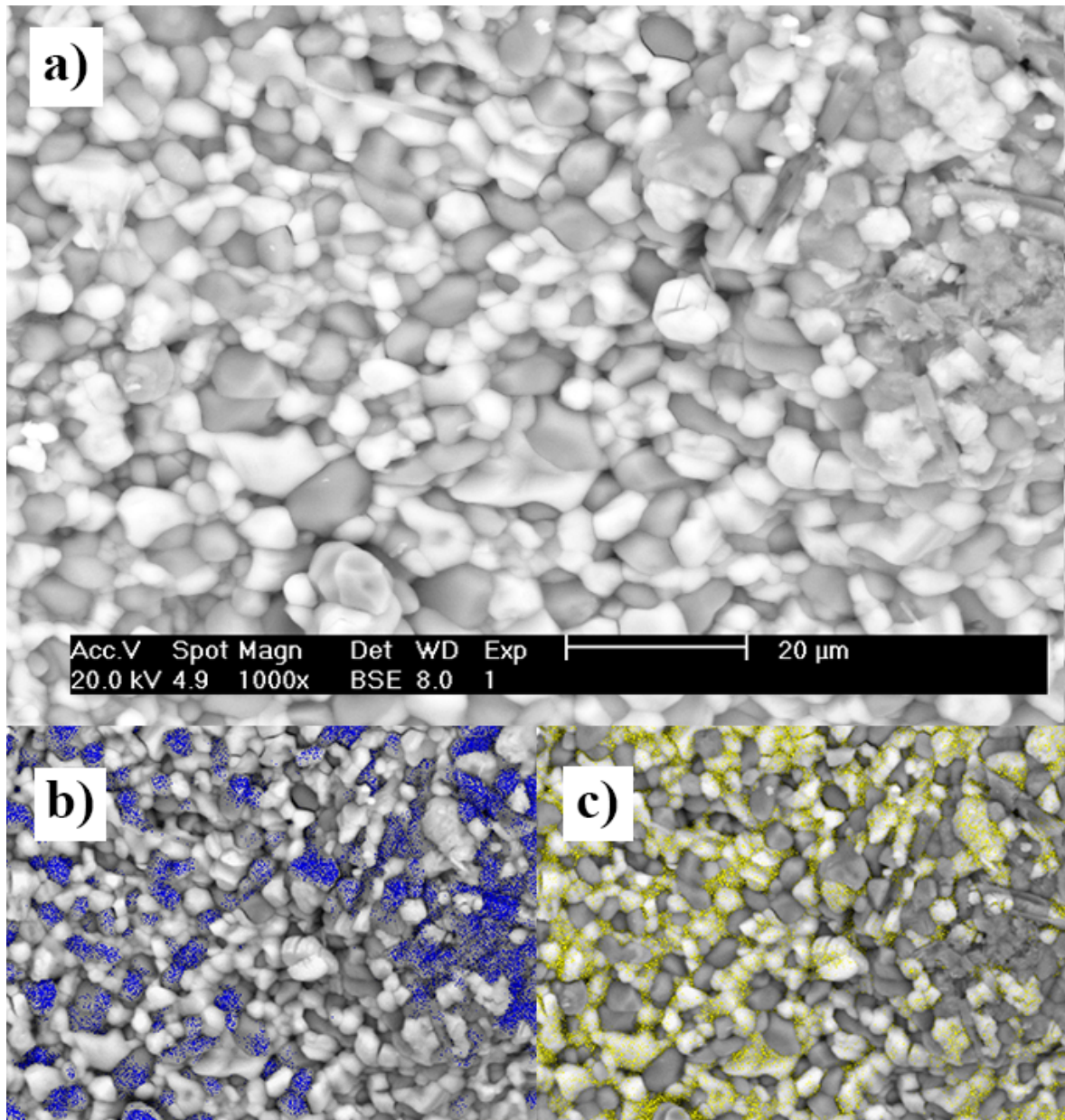


Figura 17. Análisis de microscopía electrónica de barrido. a) Micrografía de la superficie del PCM. b) Mapeo elemental de sodio (Na). c) Mapeo elemental de potasio (K).

La morfología de una muestra preparada por el método de mezclado simple con 15 % de grafito fundida y después solidificada se observa en la Figura 18.

En la misma Figura 18 se puede notar que gran parte del grafito se segregó del PCM base el cual forma la matriz del material compuesto. La forma de estrella es característica de un subenfriamiento del PCM en la superficie, esto es causado por la alta capacidad que tiene el grafito para transferir calor.

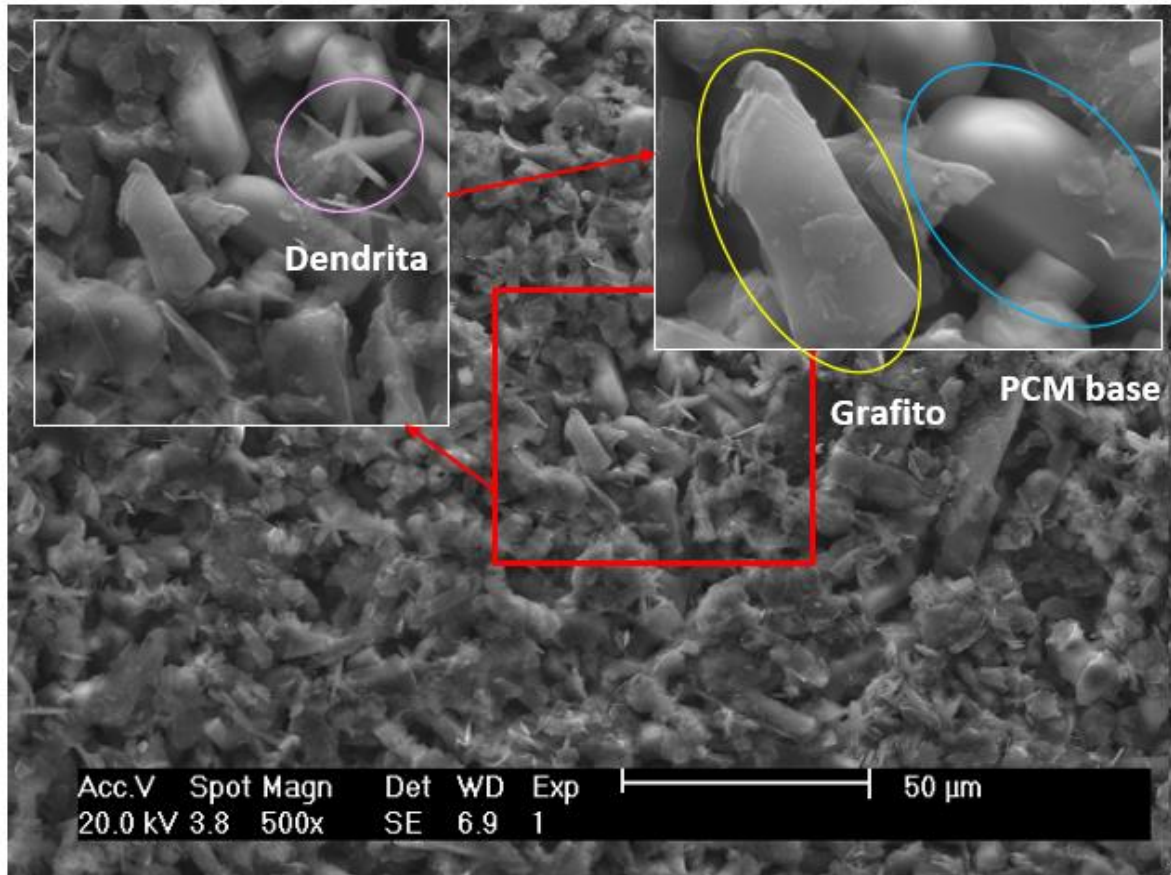


Figura 18. Micrografía de una muestra con 15 % de grafito preparada mediante el método de mezclado simple.

La Figura 19 muestra la morfología del compuesto obtenido mediante mezclado en dos pasos. Se observa que el grafito está mejor distribuido y no está aglomerado de manera localizada porque la mezcla es más homogénea en comparación con el método de mezclado simple. La forma en que cristaliza el PCM base es en forma de varillas, es decir, que el crecimiento del cristal está direccionado debido a la anisotropía intrínseca del grafito.

Este crecimiento preferencial en forma de varilla es debido a la mayor conductividad térmica del grafito. Al disminuir la temperatura del compuesto el PCM base busca solidificar y cristalizar en donde se disipe más rápido el calor y este lugar sería en la superficie de las láminas de grafito, este proceso se llevará a cabo por debajo de la temperatura de fusión del material y continuará hasta que no haya más material que cristalizar o hasta que el cristal colapse con otro cristal o lámina de grafito.

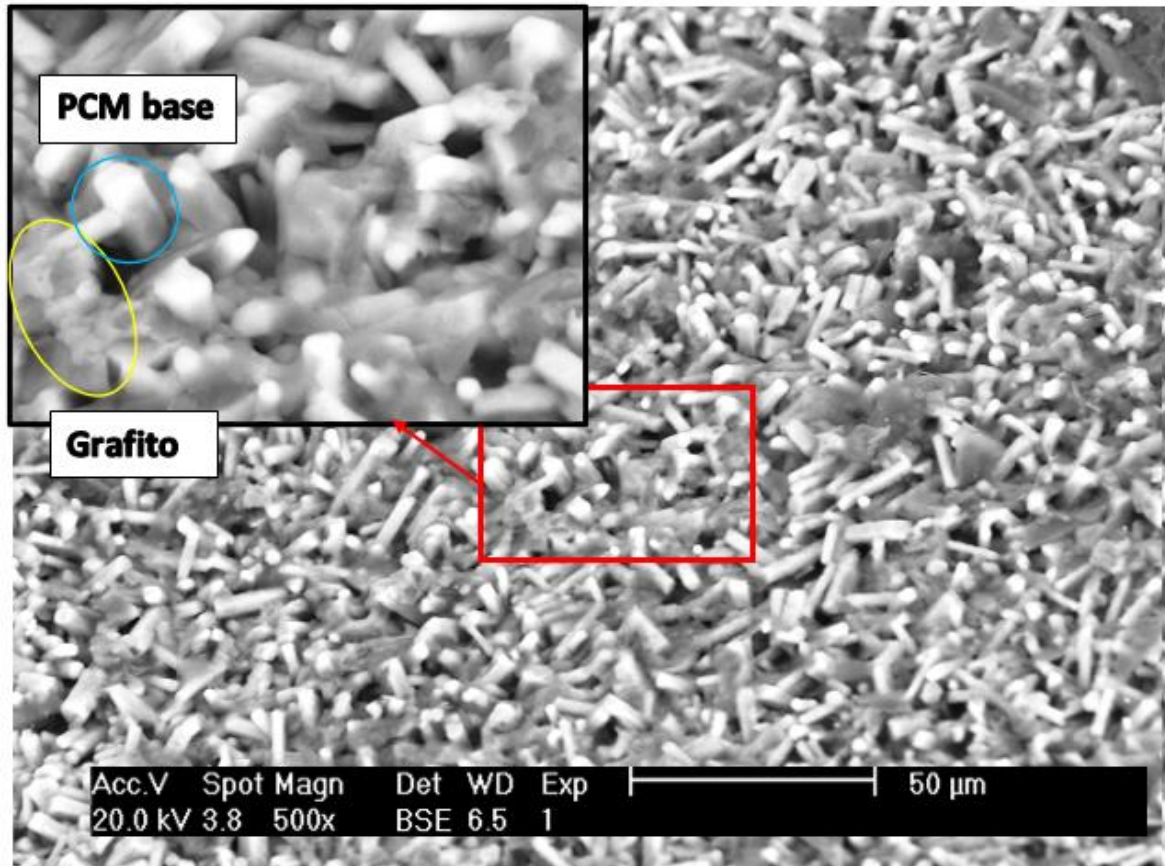


Figura 19. Micrografía de una muestra con 15 % de grafito preparada mediante el método 2.

A la morfología mostrada en la Figura 19 se le conoce como intrincada y produce una gran cantidad de poros de manera superficial, los cuales también afectan la conductividad térmica global del material. De lo anterior se puede inferir que el grafito aumenta la conductividad térmica del compuesto de manera general, pero reduce dicha propiedad en el PCM base, puesto que el cambio en su morfología genera rutas más largas por donde el calor tiene que fluir y a su vez genera porosidades las cuales evitan la conducción de calor, así mismo, genera más límites de grano causando un aumento en la resistencia térmica intergranular y por consecuencia una mayor dispersión de energía térmica en direcciones no convenientes.

6.3 Análisis estadístico

En la Tabla 7 se observa que la conductividad térmica (k) no presenta diferencias significativas entre los métodos de mezclado, esto se puede explicar mediante el fenómeno de percolación térmica, es decir no importa donde se encuentre el grafito ya sea dentro del material o de manera superficial este conducirá una cantidad de calor similar. Por otro lado,

la nula diferencia entre los porcentajes de grafito también se puede explicar mediante el mismo fenómeno ya que después del umbral de percolación térmica la conductividad térmica varía en menor medida.

Para la entalpía de fusión endotérmica (ΔH_f Endo) hubo diferencias significativas con respecto al método de mezclado pues el método de la mezcla simple no produce un compuesto homogéneo y como resultado de eso, no hay una interacción inicial, por lo tanto, la energía necesaria para fundir el material será mayor que para el método de dos pasos.

Tabla 7. Factores significativos con su valor de probabilidad y variable de respuesta.

Variable de respuesta	Valor de probabilidad (P) de los factores con diferencias significativas	
	Método	Porcentaje de grafito
k (W/m*K)	x	x
ΔH_f Endo (J/g)	0.027	0.00001
ΔH_f Exo (J/g)	x	0.00001
T_f (°C)	0.013	x
T_s (°C)	x	0.02
C_p (J/g*°C)	x	0.00001

“x” indica que no existe una diferencia significativa ($P > 0.05$).

También se presentaron diferencias significativas en la entalpía de fusión cuando se varió el porcentaje de grafito, pues, aunque existiera una heterogeneidad por parte del método 1 el hecho de agregar un material que no se funda en una mezcla es suficiente para reducir la entalpía de fusión, pues se debe recordar que de la mezcla solo el PCM base se funde y el grafito no.

Del mismo modo, la entalpía de fusión exotérmica (ΔH_f Exo) de las muestras tuvo diferencias significativas cuando se varió el porcentaje de grafito, esto se debe a que el grafito no libera energía en el proceso de solidificación del compuesto puesto que este nunca se fundió. Por otra parte, no existieron diferencias de entalpía exotérmica entre métodos ya que el hecho de fundir los compósitos que fueron mezclados por el método de la mezcla simple es suficiente para que sus componentes interactúen y se obtengan valores similares a los obtenidos por el

método de dos pasos. En resumen, no importa que método de mezclado se utilice una vez fundido el compuesto, éste interacciona y entrega una cantidad de energía similar.

Las temperaturas de fusión (T_f) presentaron diferencias significativas con el método de mezclado, el método de la mezcla simple no distribuye de manera adecuada el grafito y el PCM base, por lo tanto, las temperaturas de fusión encontradas son muy similares a la del PCM base, no obstante, para el método de dos pasos si existe una variación de las temperaturas de fusión con respecto al material sin grafito pues al haber un mejor mezclado baja su punto de fusión debido a la interacción física de sus componentes. Por el contrario, para el porcentaje de grafito no hubo variaciones porque como ya se mencionó en el método de mezclado simple, las temperaturas de fusión no varían por el pobre mezclado de los componentes y para el método de dos pasos la variación es muy pequeña.

Al igual que en la entalpía de solidificación para la temperatura de solidificación (T_s), una vez que los compósitos fueron fundidos, estos interaccionaron con sus componentes, dando como resultado una temperatura de solidificación muy similar entre métodos de mezclado, es por esto que no hubo variaciones significativas, aunque si las hubo cuando se varió el porcentaje de grafito porque entre más grafito se añadía menor era la temperatura de solidificación indicando que el grafito redujo las fuerzas intermoleculares entre los componentes del compuesto.

Por último, el calor específico (C_p) no presentó diferencias significativas con respecto al método de mezclado puesto que se utilizaron muestras que ya habían sido fundidas y, por lo tanto, ya habían interaccionado. Aunado a lo anterior, la capacidad calorífica disminuyó con respecto al porcentaje de grafito ya que este último posee un calor específico menor y si se pondera esta propiedad con su respectiva masa resulta en una capacidad calorífica menor para la mezcla.

6.4 Selección del PCM

Para seleccionar el PCM más adecuado a utilizar en un acumulador térmico, las muestras preparadas se analizaron considerando sus requerimientos funcionales y económicos, estos se integraron en una matriz QFD.

Primero se seleccionó el método de mezclado, después se evaluó el tiempo de carga y descarga mediante simulación térmica, así como su temperatura máxima, más tarde, se evaluó la relación beneficio/costo y por último se realizó un análisis económico del material grado reactivo y grado técnico.

Método. De acuerdo con la información recabada mediante calorimetría diferencial de barrido y el método de historial térmico, se decidió utilizar el método de dos pasos para preparar el PCM porque sus componentes se distribuyen de una manera más homogénea con respecto al método 1. Lo anterior también fue justificado con el ANOVA pues la entalpía y temperatura de fusión son menores cuando se utiliza este método lo que causa una reducción de los requerimientos energéticos.

Tiempo de carga y descarga (simulación térmica preliminar). Una vez seleccionado el método se procedió a observar qué porcentaje de grafito era el más adecuado, lo cual fue mediante el software SolidWorks® en donde se diseñaron y simularon 4 cilindros con las propiedades térmicas de los diferentes PCM.

Se evaluaron 3 etapas para comparar como sería el posible uso del acumulador en la vida real, la primera etapa consistió en someter a los PCM con 0, 5, 10 y 15 % de grafito en masa a un tiempo de carga de 3 horas con una potencia de 592.89 W en una superficie de 7.7 cm de diámetro con las mismas condiciones de temperatura ambiente ($T_o=25\text{ }^\circ\text{C}$). Para la segunda etapa se simuló un lapso de 4 horas en donde el acumulador térmico se expuso a pérdidas de calor por convección natural en donde el coeficiente del aire fue de $5\text{ W/m}^2\text{*}^\circ\text{C}$, es decir en esta etapa el acumulador estuvo en reposo. Por último, en la tercera etapa se evaluó el tiempo que el acumulador mantiene una temperatura superior a los $180\text{ }^\circ\text{C}$, para esto se utilizó un coeficiente de convección forzada de $37.05\text{ W/m}^2\text{*}^\circ\text{C}$ obtenido a través de la Ecuación 3 y la velocidad del viento de 8.25 m/s medida el 15 de febrero del 2023 a las 10:43 a.m. en el Cinvestav US, Ramos Arizpe Coahuila.

Las dimensiones del PCM en forma cilíndrica se calcularon con la densidad de 1.8 g/cm^3 previamente calculada con el principio de Arquímedes, después con la densidad y la masa de 8.25 kg se obtiene el volumen de 4583.33 cm^3 , por último, se obtiene el diámetro y altura de 28.8 y 7.04 cm respectivamente, los cuales fueron obtenidos iterando las dimensiones hasta

lograr una equivalencia entre las áreas en las cuales se desea transferir calor y áreas en las que no se desea transferir calor.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 8 donde se observan las temperaturas máximas después de cargar por 3 horas (T_{max}), la temperatura del acumulador después de 4 horas en reposo (T_{op}) y el tiempo en el que el acumulador mantiene una temperatura superior a los 180 °C de cada PCM, siendo el PCM sin grafito el que permite calentar por más tiempo y evita llegar a temperaturas que descompongan el material (454 °C).

Tabla 8. Tiempos de carga y descarga de PCM en función del porcentaje en masa de grafito.

Grafito (% m/m)	T_o (°C)	t carga (h)	T_{max} (°C)	T_{op} (°C)	t para $T > 180^\circ\text{C}$ (min)
0	25.00	3	410.10	222	23.33
5	25.00	3	475.44	227	22.31
10	25.00	3	506.80	230	20.76
15	25.00	3	559.14	231	20.54

Análisis económico considerando costos directos. Se determinó el costo total considerando los costos de materia prima y de proceso (energía eléctrica) y se encontró que el agregar grafito disminuye los costos del PCM. Después se utilizaron los valores de entalpía de solidificación y calor específico, las conductividades térmicas y los tiempos de procesamiento del método de dos pasos.

Los resultados del análisis de beneficio/costo se muestran en la Figura 20. Se puede observar que de los 3 porcentajes en masa de grafito el 5 % es el que mayor beneficio presenta, pues el ahorro de costo de materia prima (A-MP) es 6.7 veces mayor con respecto al decremento de la entalpía de fusión (ΔH). Por otro lado, la conductividad térmica (K) se aumenta 5.11 veces más de lo que se disminuye la entalpía de fusión, además, el PCM con 5 % de grafito es más fácil de manejar y presenta menos merma durante su manejo que los PCM con 10 y 15 % de grafito.

El aumento del tiempo de procesamiento (T-P) es similar en magnitud al aumento de conductividad y ahorro de materia prima por lo que el beneficio/costo es mínimo. La conductividad térmica promedio del PCM con 15 % en masa de grafito es de 0.76 W/m*°C, esto es 52 % mayor que la conductividad térmica reportada en la literatura (0.5 W/m*°C)

[38] para el PCM base. Sin embargo, esta combinación de materiales produce el mayor decremento de entalpía de fusión (25 %).

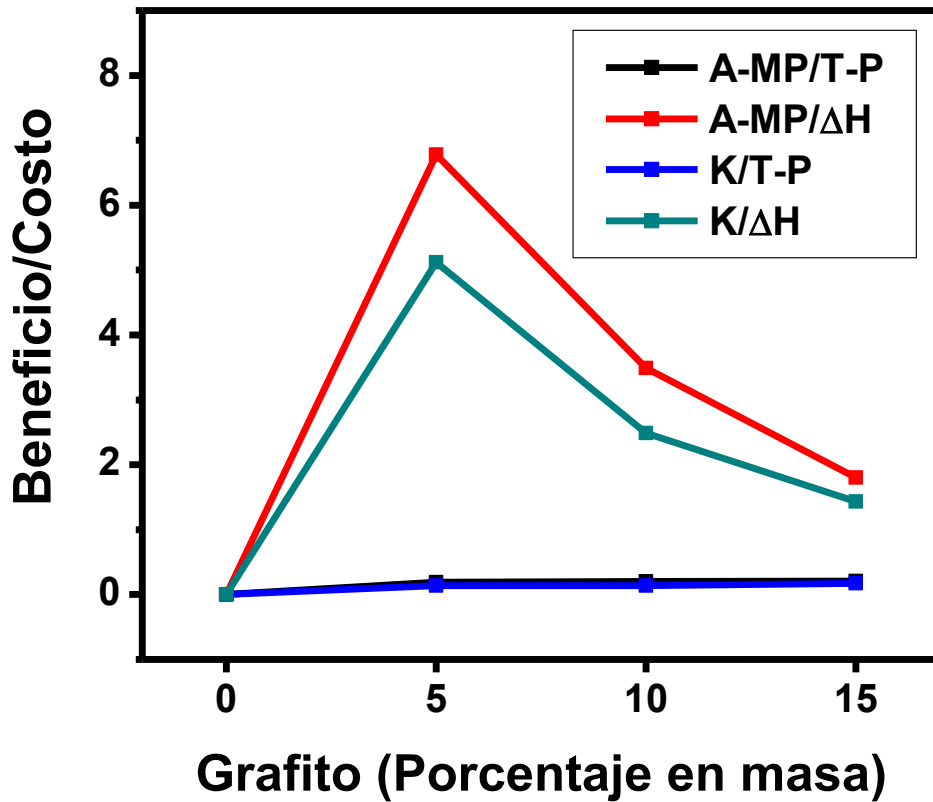


Figura 20. Análisis de beneficio/costo del ahorro, tiempo de procesamiento, entalpía de fusión y conductividad térmica en función del porcentaje en masa de grafito

Por otro lado, para evaluar el ahorro monetario del acumulador térmico primero se tuvo que suponer una cantidad de PCM, para esto se buscó la cantidad de energía requerida para cocinar 1 kg de arroz pues es uno de los alimentos más utilizados para probar prototipos de cocinas solares, la energía requerida es de 3 MJ. Si se combina el calor latente y sensible se calcula que con aproximadamente 4.5 kg de PCM se puede suministrar esa cantidad de energía a la temperatura máxima de operación de 454 °C.

Después se midió la potencia del concentrador de disco parabólico la cual fue de 592.89 W (Calculada en la sección 6.5) para calcular la capacidad de captación de energía solar. El tiempo supuesto en este análisis para utilizar el concentrador, fue de 11 a.m. a 2 p.m. por ser el lapso de mayor irradiancia (3 horas/día) entonces la cantidad de energía disponible será de 1.778 kWh/día (6.4 MJ/día), para aprovechar toda esa energía serán necesarios 8.25 kg de

PCM en un acumulador. Si los 1.778 kWh se multiplican por \$ 3.00 MXN que corresponde al costo punta o de alto consumo aproximado de la Comisión Federal de Electricidad de México se produciría un ahorro de \$ 5.33 MXN/día. Cuando se utilice el acumulador para proporcionar calor en lugar de electricidad como consecuencia del uso de microondas, un horno eléctrico o un calentador de resistencia, es necesario recordar que se está considerando el costo excedente de energía eléctrica. El ahorro energético, el ahorro bruto, la inversión de materia prima (M.P.) y el ahorro total en 30 años con el uso de compósitos de PCM con 0, 5, 10 y 15 % en masa de grafito se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Ahorro energético total en 30 años en función del porcentaje en masa de grafito.

Grafito (% m/m)	Ahorro Energético (GJ)	Ahorro bruto (MXN)	Inversión M.P. (MXN)	Ahorro total (MXN)
0	31.54	26285.82	20198.55	6087.27
5	27.86	23217.81	19898.13	3319.68
10	26.50	22087.23	19597.70	2489.53
15	23.48	19566.36	19297.28	269.08

En esta tabla se muestra el ahorro total después de 30 años de uso, considerando 160 días soleados por año ya que no todo el tiempo es posible aprovechar la energía solar, además, se puede notar que a pesar de que el uso de grafito disminuye la inversión este no produce un ahorro total igual o mayor al del PCM sin grafito.

QFD para selección de PCM. Para integrar toda la información sobre el PCM con los distintos % en masa de grafito se utilizó una matriz QFD, (Figura 21).

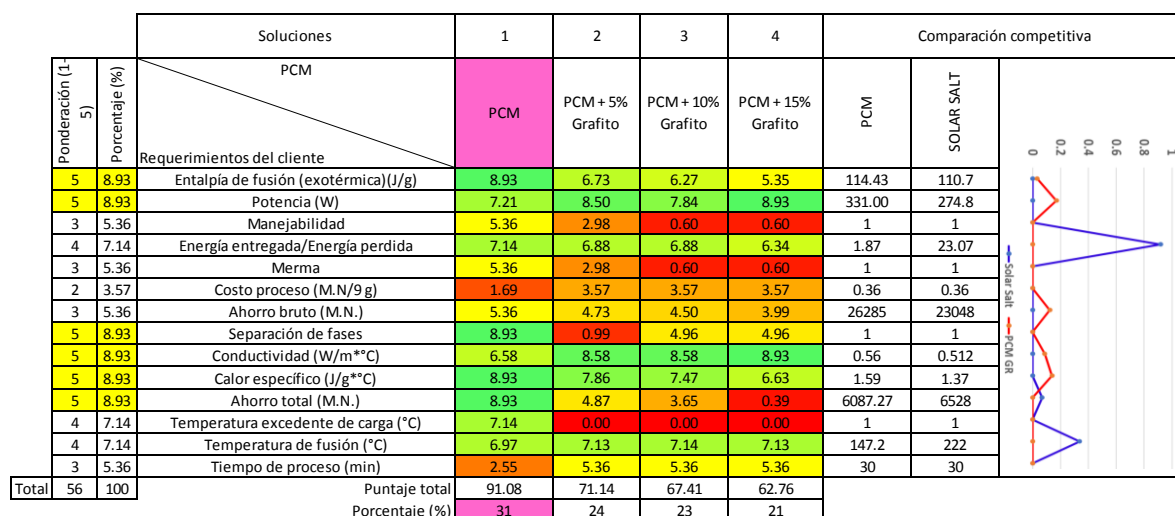


Figura 21. Matriz QFD para selección de PCM.

En esta matriz se observan los requerimientos funcionales y las posibles alternativas de soluciones. A pesar de que la adición de grafito disminuye los costos y aumenta la conductividad térmica, el análisis multicriterio demostró que es más atractivo utilizar el PCM sin grafito. Esto se debe a que características como: la entalpía de fusión, el ahorro total, la temperatura de operación, la separación de fases, el calor específico y el tiempo de procesamiento resultaron ser mejores para el PCM sin grafito.

A pesar de la menor calificación del compuesto grafito-PCM, éste podría ser útil para otra aplicación donde los requerimientos cambien o bien, que sean los mismos requerimientos, pero su ponderación sea diferente. Por ejemplo, el PCM con grafito podría ser utilizado en sistemas de captación solar de baja temperatura, donde se transfiera calor por convección forzada. Después de establecer el porcentaje de grafito más adecuado, se realizó otra comparación para analizar el costo de las materias primas [8].

Por ejemplo, el costo de 8.25 kg de PCM grado reactivo (GR) es de \$ 7,823.47 MXN y para el PCM grado técnico (GT) es de \$ 1,972.57 MXN El ahorro energético de estos dos PCM en función del tiempo se proyectó a un periodo de 30 años. Para el PCM GT el ahorro supera la inversión en un plazo de 18 años y para la PCM GR esto ocurre en 24 años (Figura 22).

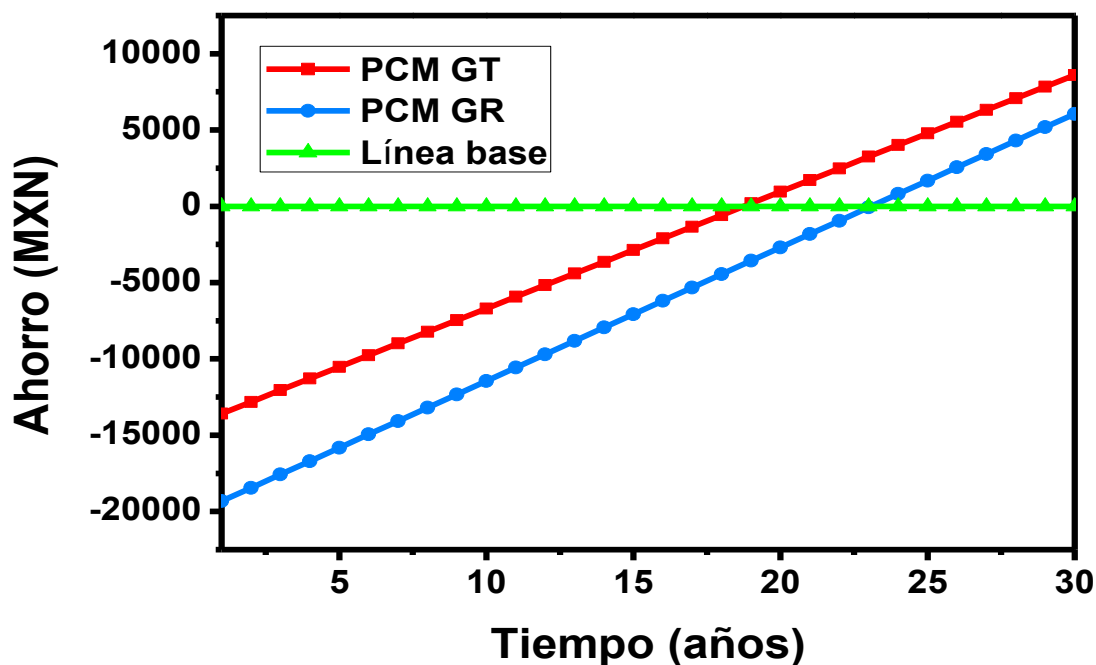


Figura 22. Ahorro total del PCM GT y GR en función del tiempo.

El ahorro total dentro de 30 años asciende a los \$ 8,607.24 MXN para el PCM GT y \$ 6,054.35 MXN para el PCM GR.

Además de estimar el ahorro total imputable a las materias primas, se consideró el costo del kWh de energía eléctrica como se muestra en la Figura 23. En esta Figura se puede observar que si el costo de la energía eléctrica es de 7 MXN/kWh en 7 años se compensan los gastos totales, logrando \$ 45,393.15 MXN de ahorro a los 30 años.

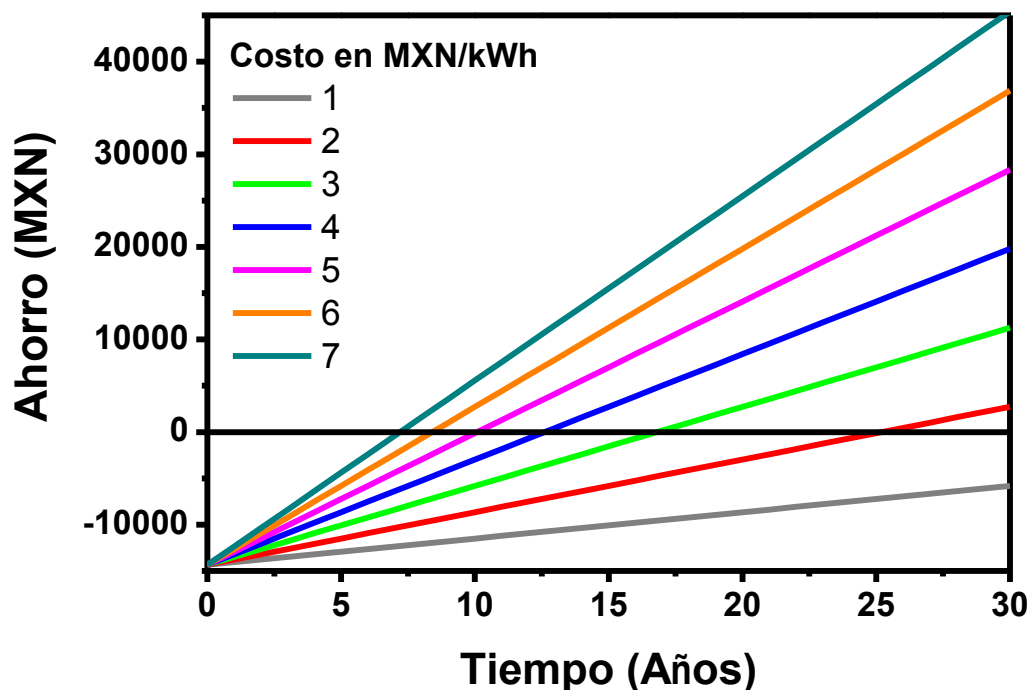


Figura 23. Ahorro económico en función del tiempo y el costo de energía eléctrica en kWh.

Para un costo de \$ 1 MXN/kWh no se cubren los gastos totales en 30 años, se necesitarían 51 años. Entre mayor sea el costo de la energía eléctrica más atractivo será el uso la energía térmica solar, además, entre menor sean los gastos totales, menor será el tiempo de su recuperación. Entre más elevado sea el precio de la electricidad (mayor a 300 kWh) será más conveniente utilizar un acumulador térmico. Para zonas rurales en los cuales haya carencia en el suministro de energía eléctrica, el acumulador térmico puede ser más atractivo ya que el factor económico pasa a un segundo término.

También, se evaluó la temperatura de descomposición de ambos materiales para analizar si el costo extra del PCM GR se justifica, no se encontraron diferencias.

El análisis termogravimétrico de la Figura 24 muestra una temperatura de descomposición de aproximadamente 600 °C la cual es superior a las reportadas en la literatura de 454 °C [101], 538 °C [102], 549 °C [91] y 593 °C [26]. Además de lo anterior se puede notar que el PCM GT tiene un porcentaje en masa menor que el PCM GR. Esto se debe a que el PCM GT tiene un mayor porcentaje de impurezas y al ser expuesto a temperaturas altas estas impurezas se gasifican ocasionando una mayor pérdida de masa en comparación con el PCM GR. El porcentaje en masa teórico para los óxidos remanentes del PCM es del 20.32 % sin embargo, el que presenta el PCM GR es del 15.54 %, esto quiere decir que el PCM GR tiene un 4.78 % en masa de contaminantes y el PCM GT tiene un 11.59 % de impurezas debido a la calidad de la materia prima.

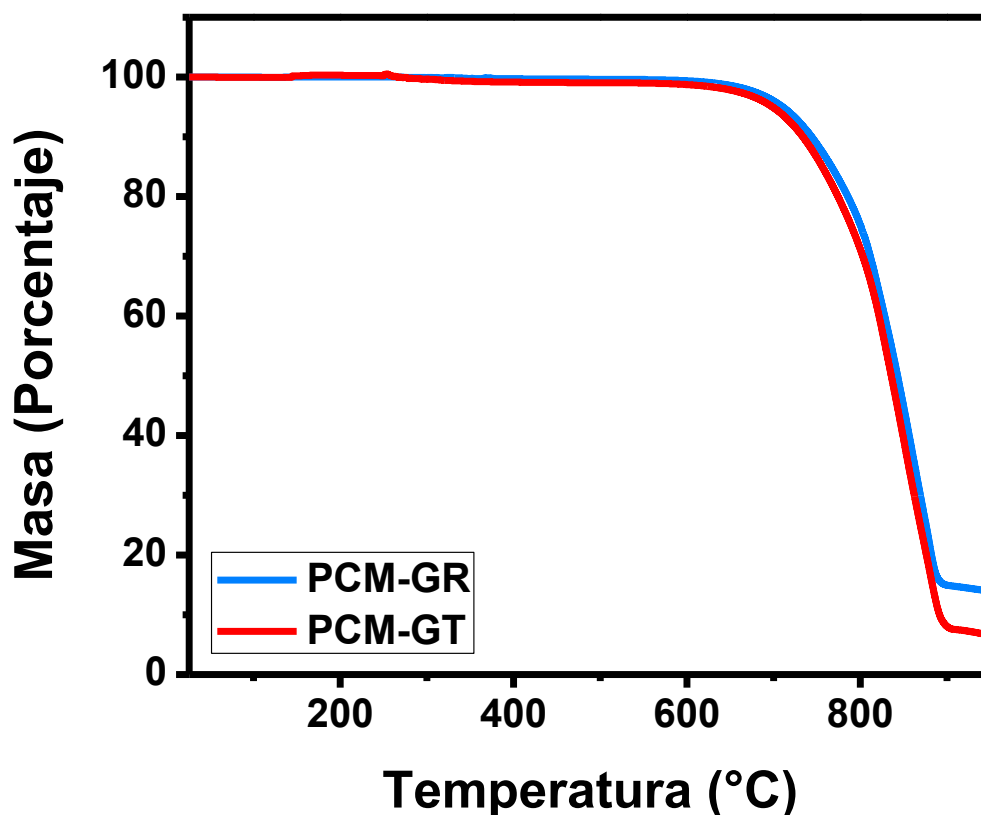


Figura 24. Análisis termogravimétrico de los PCM GT y GR.

Después de que ambos PCM fueron sometidos a 19 ciclos de calentamiento y enfriamiento para observar si existía un cambio en su estructura cristalina. Comparando el difractograma del PCM antes y después de los 19 ciclos no se observaron diferencias ya que los ángulos 2θ de sus picos se mantuvieron constantes y su intensidad varió muy poco, esto se puede

corroborar en la Figura 25 - a). También se observó en el difractograma que el PCM GT es una mezcla física ya que los picos del análisis coinciden con los picos de las cartas cristalográficas de las sales por separado como se muestra en la Figura 25 - b).

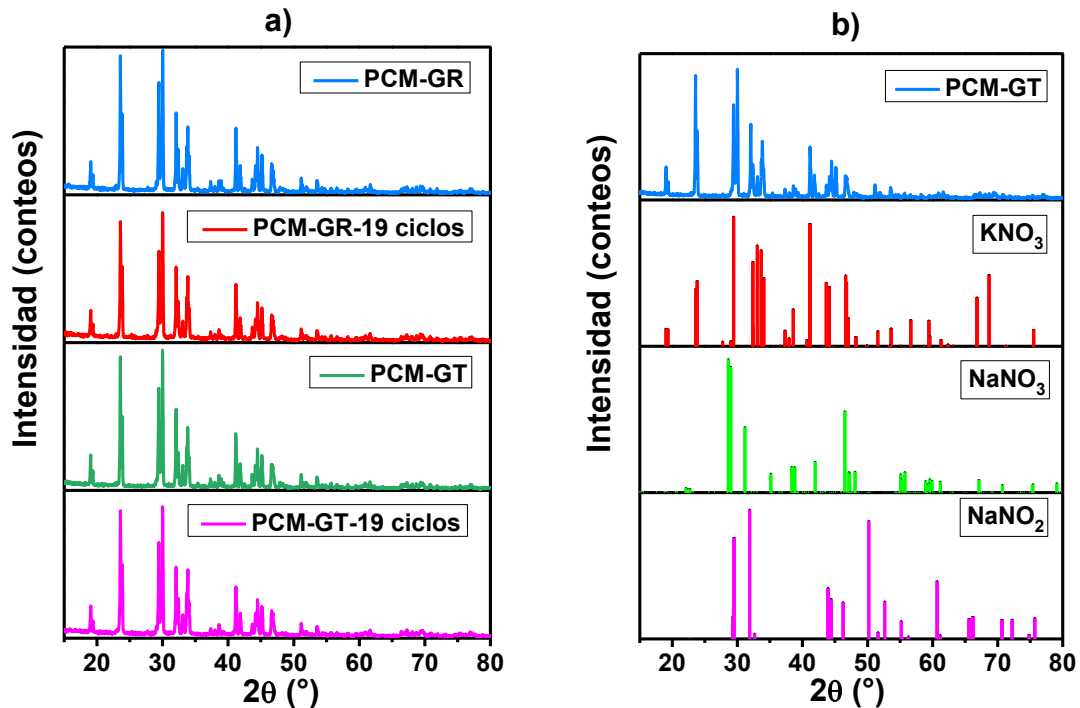


Figura 25. Difractogramas de PCM GR y GT. a) Difractogramas del PCM GR y GT antes y después de 19 ciclos de calentamiento enfriamiento. b) Difractograma del PCM GT y las cartas cristalográficas de nitrato de potasio, nitrato de sodio y nitrito de sodio.

De acuerdo con lo anterior no se encontraron diferencias en cuanto a temperaturas de descomposición y estabilidad entre ambos PCM, aparte, el PCM GT es más atractivo que el PCM GR en términos económicos, con esta información se tomó la decisión de utilizar el PCM GT en el acumulador térmico.

6.5 Medición de potencia y eficiencia térmica del concentrador solar de disco parabólico

Una olla de aluminio de 22.5 cm de diámetro y 14.7 cm de altura fue utilizada para contener 632 g de agua, esta cantidad se seleccionó para evitar que los 10 sensores de temperatura DS18B20 tocan el fondo de la olla. Se realizaron 3 mediciones, las primeras 2 en un solo día y la tercera se realizó una semana después. En la primera medición se usó una olla sin modificaciones. En la segunda medición se agregó una capa delgada de hollín en el fondo.

En la tercera medición se agregó hollín y aislamiento de fibra de vidrio, dejando únicamente la parte del fondo sin aislar. La temperatura ambiente (T_{∞}) se monitoreo continuamente.

Los resultados de la medición de temperatura con respecto al tiempo se muestran en la Figura 26. Todas las mediciones se realizaron a 80 °C para evitar que el agua llegara a su punto de ebullición ya que esto implicaría calor latente de evaporación y los resultados de la potencia y eficiencia serían erróneos. Las mediciones se realizaron en días despejados para evitar tener variaciones de radiación solar debido a las nubes.

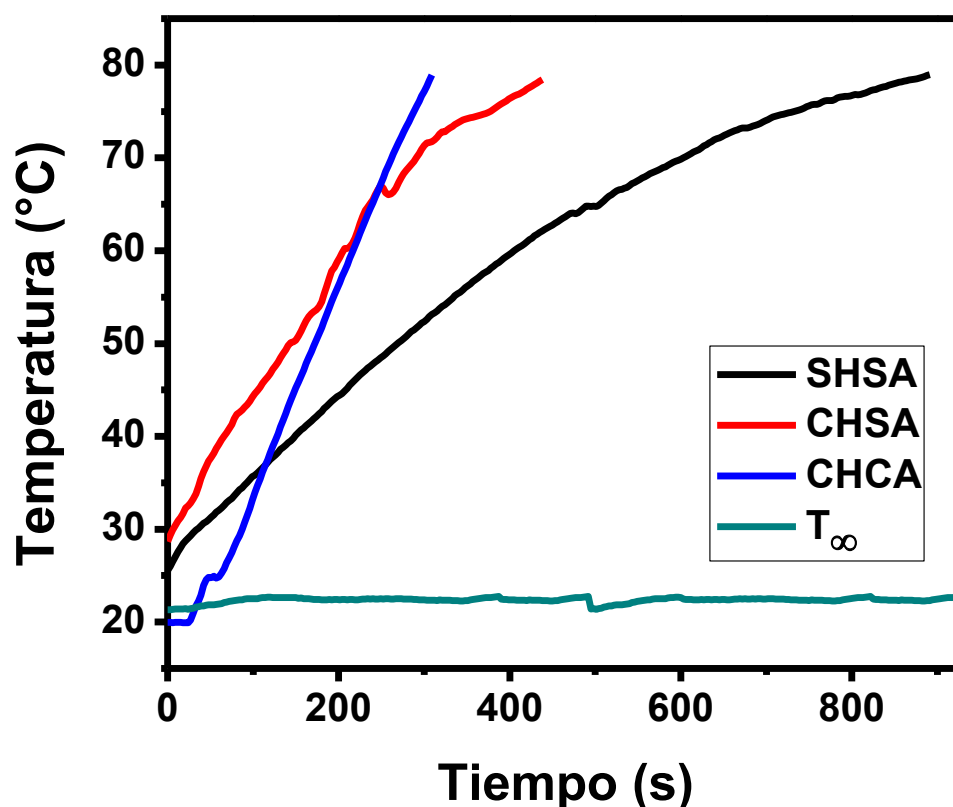


Figura 26. Rampas de calentamiento entre la olla sin hollín y sin aislamiento (SHSA), la olla con hollín sin aislamiento (CHSA) y la olla con hollín y aislamiento (CHCA), así como la temperatura ambiente (T_{∞}).

Es importante mencionar que la rampa de calentamiento de la medición CHCA fue 5.06 veces más rápida que para la medición SHSA y de la misma manera la potencia fue 3.18 veces mayor como se muestra en la Tabla 10. Como consecuencia, se recomienda utilizar hollín u otro material espectralmente selectivo y aislamiento en el acumulador térmico.

Tabla 10. Rampa de calentamiento y potencia promedio de la olla sin hollín, con hollín y con hollín y aislamiento en °C/s.

Medición	Rampa (°C/min)	Potencia promedio (W)
Sin hollín	2.49	158.515
Con hollín	7.03	300.416
Con hollín y aislamiento	12.47	504.501

La Figura 27 muestra los principales elementos del sistema de captación de energía térmica solar. En esta Figura se aprecia el concentrador de disco parabólico, la olla de aluminio, el anemómetro, el medidor de radiación solar y los sensores de temperatura, así como la PC que registró y guardó los datos para su posterior análisis.



Figura 27. Set de medición de potencia y eficiencia para olla de aluminio con hollín y aislamiento térmico en concentrador solar de disco parabólico.

La eficiencia máxima del concentrador fue del 55 % la cual es superior a la de las estufas tradicionales de leña (23-40 %). La eficiencia promedio fue de 52.72 % superando los trabajos reportados en las referencias [28, 30, 32, 97]. La potencia promedio estándar fue de

592.89 W a 1701 msnm con un punto de ebullición del agua de 94 °C en donde se almacenó un total de 1.13 MJ el día 10 de diciembre del 2022. Después, para probar si el concentrador de disco parabólico tenía la capacidad de cocinar alimentos se pesaron 188 g de frijoles secos en una olla de presión de 5 L de capacidad (Figura 28 - a)) con 880 g de agua (Figura 28 - b)).

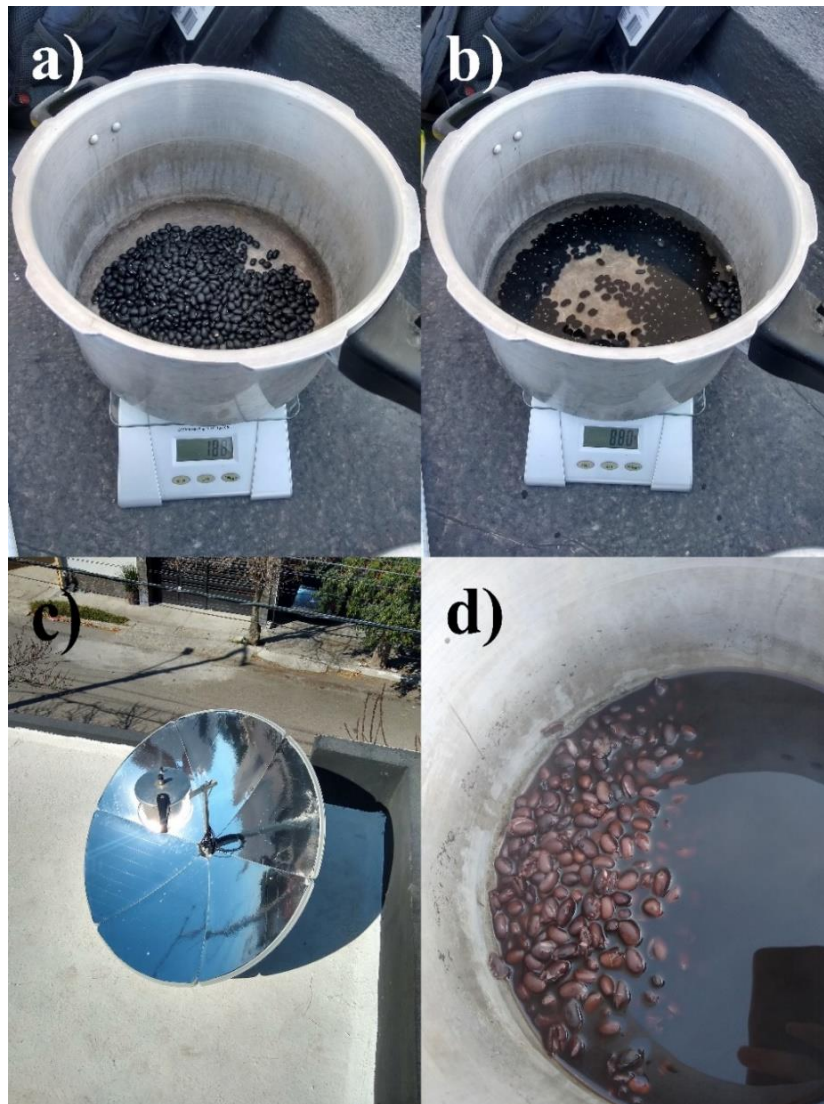


Figura 28. Cocción de frijoles con concentrador solar de disco parabólico en olla de presión. a) Pesado de 188 g de frijoles. b) Pesado de 880 g de agua. c) Concentrador solar cocinando frijoles en olla de presión utilizando la radiación solar. d) Frijoles negros cocidos después de 30 minutos de cocción.

La olla se expuso al punto focal del concentrador por 30 min, en los primeros 12 min la olla se presurizó y en los restantes 18 min se cocieron los frijoles (Figura 28 - c)). Algunos de los

frijoles cocidos se reventaron debido a las altas temperaturas del punto focal (ver Figura 28 - d)).

6.6 Diseño de un acumulador térmico

Dimensionamiento. Las dimensiones del acumulador térmico dependen de la cantidad de energía que se requiera almacenar y del PCM. De acuerdo con la referencia [55] aproximadamente 3 MJ son necesarios para cocinar 1 kg de arroz, esta cantidad es superior a cualquiera de las cantidades reportadas en la Tabla 1. Tomando esta cantidad de energía y las propiedades térmicas del PCM GT se encontró que con 8.25 kg se pueden suministrar los 3 MJ de energía incluso si el PCM se lleva a su temperatura máxima de operación se pueden almacenar hasta 5.5 MJ.

Para calcular el volumen total primero se midió la densidad del material, está fue de 1.77 g/cm³ y el volumen del PCM GT fue de 4661.02 cm³. Cuando el material se funde este se expande un 15 % de su volumen inicial. Sin embargo, por seguridad se dejó un 25 % de espacio vacío. El volumen final fue de 5826.27 cm³. Para calcular el diámetro y altura del cilindro se diseñaron y simularon diferentes cilindros variando sus diámetros y alturas, además, se consideraron las medidas de las hojas de acero inoxidable 316 disponibles en el mercado para minimizar la merma.

El punto focal fue de 7.7 cm de diámetro, por lo que la apertura para recibir la radiación en el acumulador térmico deberá tener al menos esta medida. La temperatura del punto focal fue medida mediante un termopar tipo K sobre un pedazo de lámina de acero inoxidable 304, este valor fue de 501 °C. La tasa de concentración geométrica se define como el cociente del área de captación solar sobre el área del punto focal [104], para el concentrador de disco parabólico este valor fue de 429.61.

Cálculo de superficies extendidas. Debido a su disponibilidad en el mercado y evitando el post procesamiento, las superficies extendidas seleccionadas fueron de una geometría cilíndrica. Después se calculó el diámetro de los cilindros, las mejores opciones fueron de 1/16" y 1/4", en donde se seleccionaron las de 1/4" por la factibilidad técnica.

La efectividad de la superficie extendida fue de 4.28, es decir que se transfiere 4.28 veces más calor con la aleta en comparación con la cantidad de calor transferida por la superficie

de la base de la aleta, en el cálculo se utilizó un coeficiente de transferencia de calor por convección de $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ya que dentro del acumulador la agitación es solamente por convección natural una vez que el PCM llega a su temperatura de fusión.

6.7 Diseño de un acumulador térmico asistido por computadora y simulación térmica

La información del apartado anterior fue utilizada para diseñar cada una de las piezas del acumulador térmico. Se simularon distintos cilindros en donde se encontró que el diámetro y la altura más convenientes para el acumulador térmico fueron de 20 y 18.55 cm, el diseño terminado se observa en la Figura 29.



Figura 29. Diseño asistido por computadora del acumulador térmico.

Con el diseño terminado, se determinó el número de superficies extendidas para distribuir mejor la temperatura en el interior del dispositivo, pues al simularlo sin superficies extendidas se encontró que la distribución de temperaturas no era homogénea. Se evaluaron 0, 5, 9, 13 y 17 varillas de acero inoxidable 316 de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro (ver Figura 30). El dispositivo con 17 varillas presentó la mejor distribución de temperaturas en el interior, también se encontró que la adición de superficies extendidas ocupó un volumen adicional de 82 cm^3 , este volumen no modificó el dimensionamiento previamente calculado.

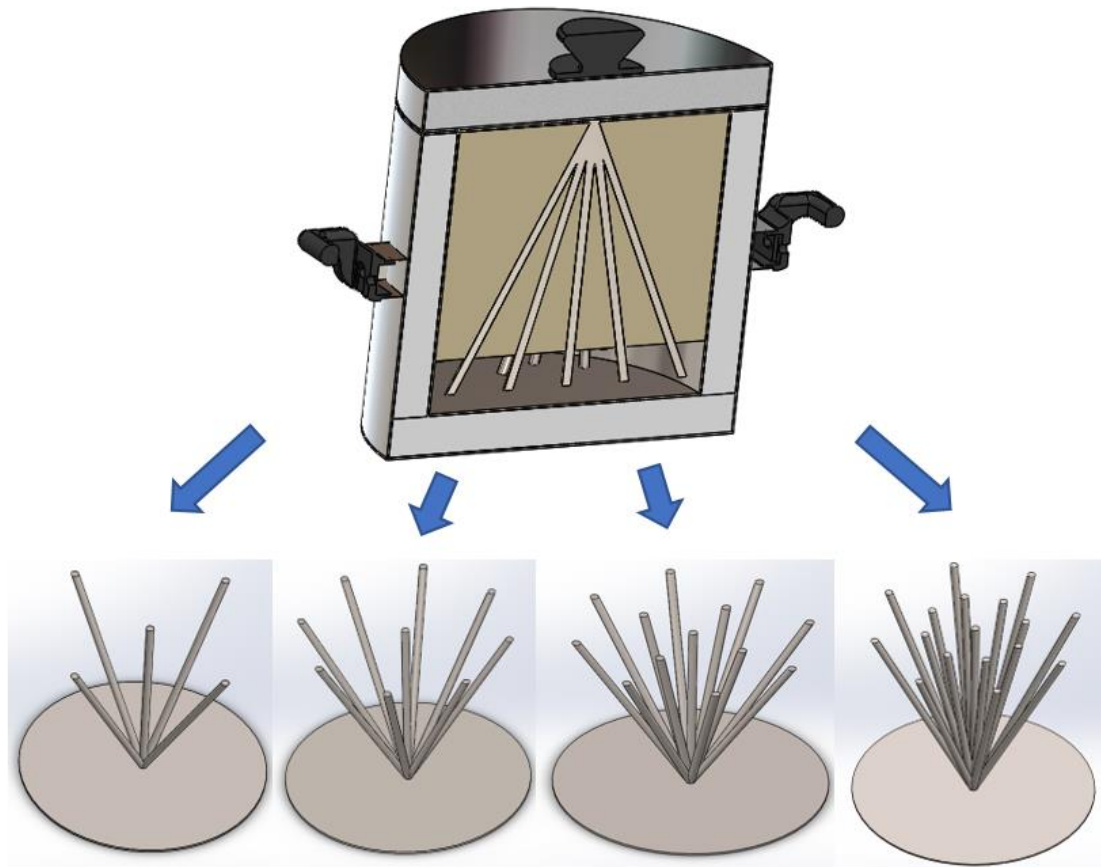


Figura 30. Corte transversal del diseño asistido por computadora del acumulador térmico y sus distintas configuraciones de superficies extendidas.

La distribución de temperaturas en el interior del acumulador térmico para las 5 configuraciones se muestra en la Figura 31 en donde ninguna configuración superó la temperatura de descomposición del PCM después de ser cargados durante 8 h.

En la Figura 31 se observan las temperaturas de la parte superior de cada acumulador térmico. Los valores más altos de potencia y eficiencia térmica fueron de 205.9 W y 34.82 % respectivamente, éstos correspondieron al acumulador térmico con 17 superficies extendidas. Para esta configuración la temperatura mínima dentro del acumulador térmico fue de 137 °C la cual coincide con la temperatura de fusión del PCM, por lo tanto, se puede almacenar calor sensible y calor latente. Dicha situación no es posible cuando se utilizan menos barras y, por el contrario, si se utilizan más barras, se reducen los tiempos de almacenamiento, además, de que se incrementa el peso y costo del acumulador térmico.

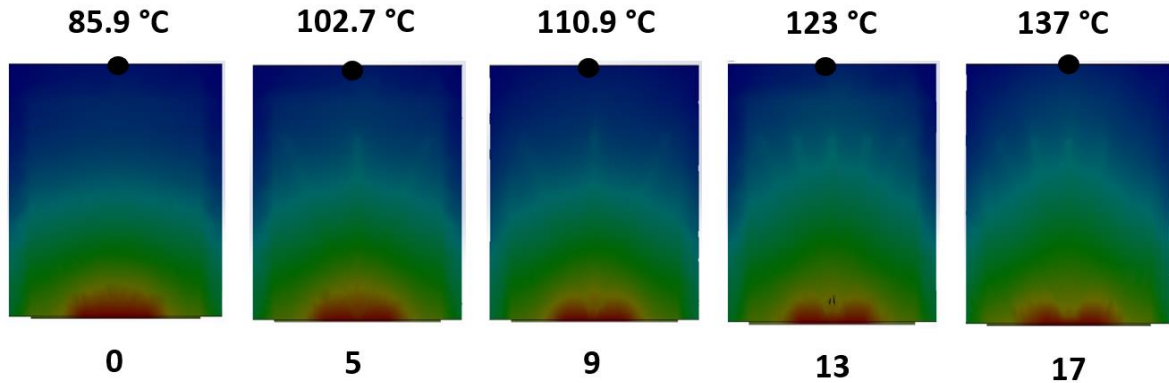


Figura 31. Resultados de simulación térmica en estado transitorio para las distintas configuraciones de superficies extendidas.

La potencia y eficiencia térmica se incrementaron en un 21.51 % y 23.34 % al comparar el acumulador térmico con 17 superficies extendidas y el que no tenía bajo las mismas condiciones. La máxima potencia alcanzada fue de 416 W cuando el acumulador térmico llegó a 454 °C, esto corresponde a un aumento de potencia del 285 % comparado con el acumulador térmico operando a 137 °C.

Entre mayor sea la temperatura de operación del acumulador térmico mayor será el tiempo que este puede mantener temperaturas suficientes para hervir agua, calentar y cocinar alimentos. Por ejemplo, cuando el acumulador térmico se llevó a su temperatura máxima de operación duró alrededor de 3.2 horas a temperaturas superiores a los 100 °C.

Los resultados de la simulación indican que el acumulador térmico puede dejarse en el concentrador durante 8 horas sin peligro de llegar a la temperatura de descomposición del PCM. Lo anterior es conveniente pues si existe un descuido por parte del usuario no ocurriría nada que pueda afectar la seguridad del usuario y/o a la degradación del PCM. Otro dato importante recabado de la simulación es que los 8.25 kg de PCM se funden en un intervalo de tiempo de 4.5 a 6.5 horas dependiendo de sus pérdidas de calor a la hora de recibir la radiación solar.

6.8 Diseño de un sistema de seguimiento solar

En la Figura 32 se pueden observar los elementos del circuito eléctrico del sistema de seguimiento solar, éstos son: las 4 fotorresistencias de 4.7 kOhm, 4 resistencias de 4.7 kOhm, 4 relés mecánicos (Relay) capaces de soportar hasta 10 amperios de corriente directa, un

microcontrolador Arduino UNO R3, un motor (M) para controlar el movimiento del eje Z y un motor (M) para controlar el eje X, y Y.

Todos los cables se midieron y se soldaron, para los relevadores y otras conexiones se utilizaron conexiones rápidas por su sencillez.

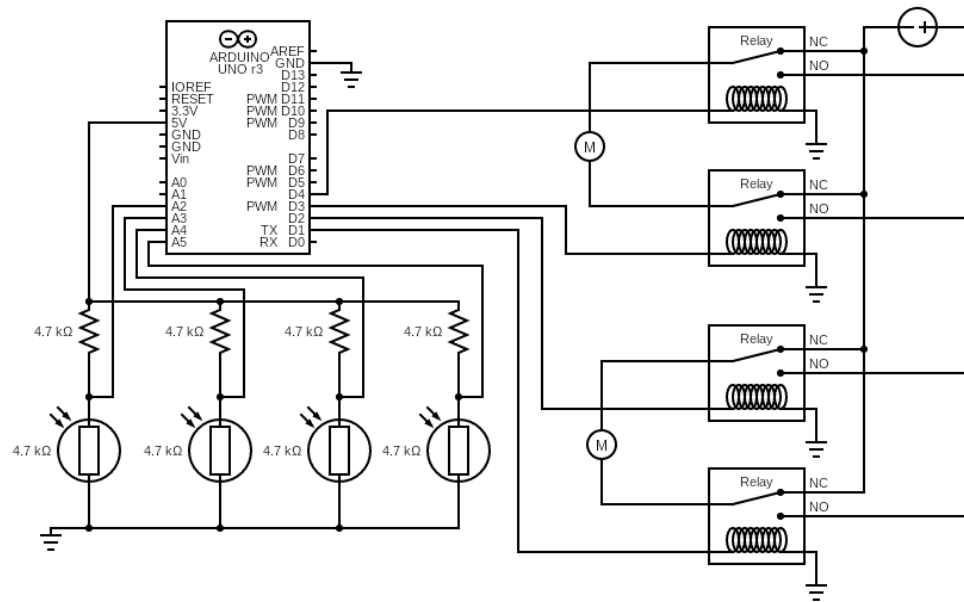


Figura 32. Circuito de control para sistema de seguimiento solar.

En el proceso de desarrollo del circuito de control se encontró que el microcontrolador Arduino UNO era muy voluminoso, por lo tanto, se cambió por un Arduino Nano. La adaptación de los motores al concentrador se llevó a cabo por piezas de acero rolando en frío previamente diseñadas en SolidWorks® y posteriormente maquinadas en un torno. Éstas se taladraron y se sujetaron mediante tornillos. Se soldaron piezas adicionales al concentrador de disco parabólico con electrodos E6013 de 3/32 a 75 amperios de corriente eléctrica. Por otro lado, las fotoresistencias se sujetaron con una pieza de madera pintada y taladrada y todos los circuitos se añadieron a una caja de plástico para protegerlos del medio ambiente.

El sistema de seguimiento solar con sus componentes se aprecia en la Figura 33, el primero de ellos es el motor que mueve al concentrador de disco parabólico en el eje Z, después se tiene la caja de circuitos donde está el microcontrolador Arduino Nano y los relevadores mecánicos que controlan el encendido y apagado de los motores. En esta misma figura se muestra una fuente de alimentación de 12 voltios y 15 amperios de corriente directa

proporcionando hasta 180 W de potencia eléctrica para mover ambos motores. La fuente se conectó a los motores a través del circuito de potencia con cables tipo caimán. También se muestra el motor que mueve al concentrador en los ejes X y Y. Se utilizó un cargador de celular de 5 voltios para alimentar el circuito de control y una extensión eléctrica para conectar la fuente de alimentación a 120 voltios de corriente alterna.

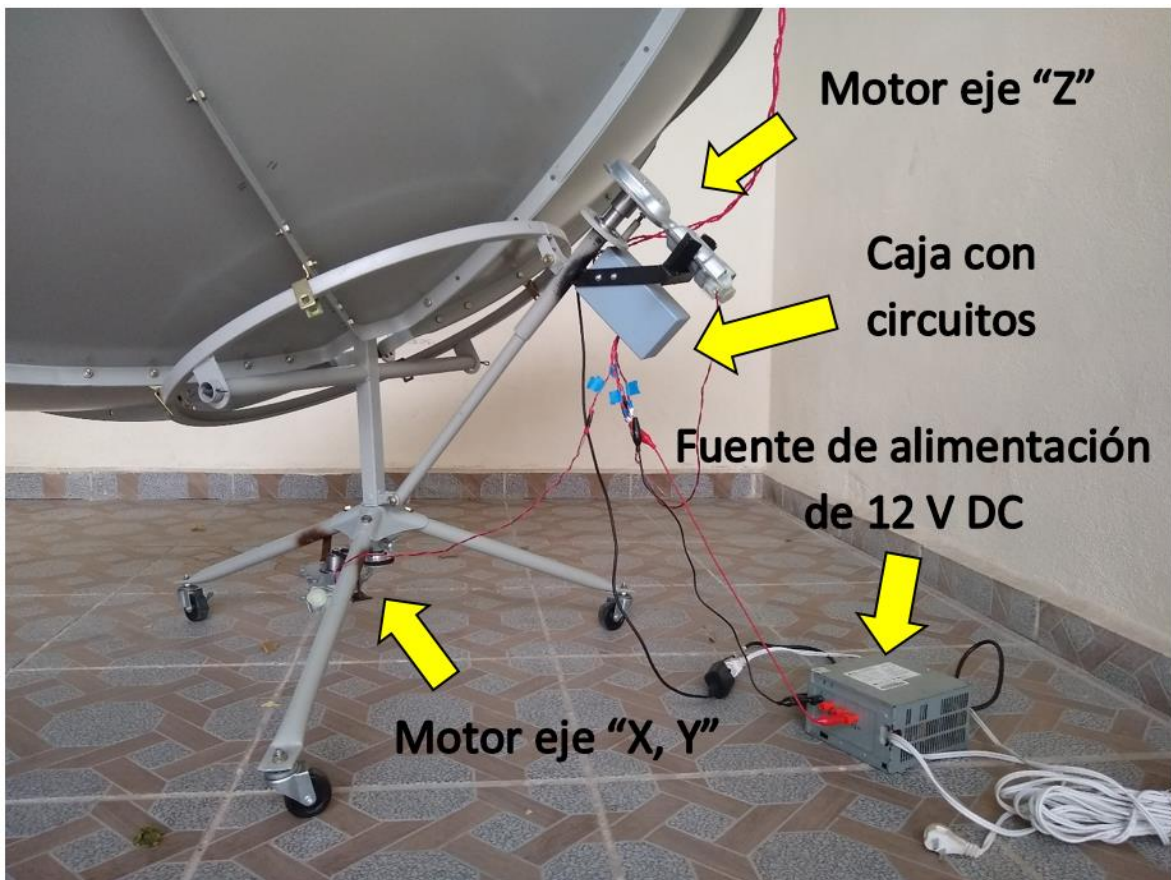


Figura 33. Sistema de seguimiento solar con sus componentes.

6.9 Análisis de emisiones de CO₂

El proceso de fabricación del acumulador térmico fue analizado mediante el software OpenLCA para obtener las emisiones de CO₂ equivalente en kg. Debido a la alta estabilidad del PCM y a las propiedades de la lámina de acero inoxidable 316 el acumulador térmico puede durar hasta 50 años, no obstante, el mayor tiempo de duración reportado hasta ahora es de 30 años, por lo tanto, este periodo fue considerado.

La fabricación del acumulador térmico produjo un total de 279.41 kg de CO₂ equivalente y se necesitaron 12.23 MJ de energía para su construcción, si esta última cantidad se resta de

la energía que el acumulador ahorraría en los 30 años de su vida útil (26.68 GJ) se obtiene que el acumulador térmico ahorraría un total de 26.66 GJ. De acuerdo con lo anterior y si se hace la suposición de que el acumulador térmico recuperará 1 MJ por día solo serían necesarios 13 días para recuperar los 12.23 MJ utilizados en la fabricación en comparación con los 4.13 años que le tomaría al dispositivo reportado por B. Chakma en y colaboradores [103].

Por otro lado, se conoce que se producen aproximadamente 0.8 kg de CO₂ equivalente por kWh de energía eléctrica consumida [105] y si se conoce la cantidad total de energía ahorrada se puede calcular la cantidad de kg de CO₂ equivalente que el dispositivo evitará emitir a la atmosfera. Esta cantidad fue de 5,918.52 kg de CO₂ equivalente. Como dato adicional, un horno de microondas tiene un consumo total de energía de 2.06 GJ y produce 7,300 kg de CO₂ equivalente [106] en toda su vida útil.

6.10 Construcción de un acumulador térmico

Una vez marcadas las láminas de acero se cortaron cada una de las piezas con un esmeril de 4 ½” utilizando un disco de corte especial para acero inoxidable. Después de cortar las piezas se les quitó la rebaba de metal con un disco de lija # 80 para acero inoxidable. Las láminas de la parte cilíndrica se rolaron y se soldaron con electrodos para acero inoxidable E308L-16 de 3/32” a 75 amperios de corriente directa (Figura 34 - a)).

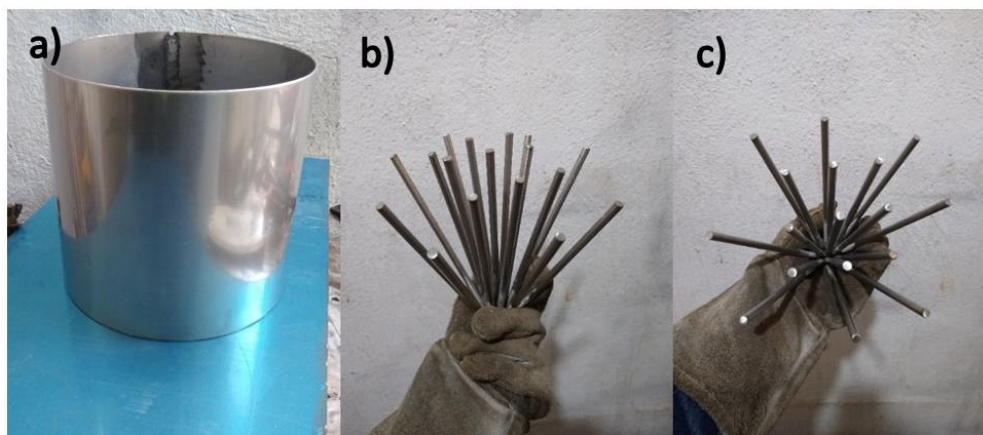


Figura 34. Acero inoxidable utilizado en el acumulador térmico. a) Lámina rolada y soldada. b) y c) superficies extendidas.

Para elaborar el dissipador de calor primero se cortaron las varillas de acero inoxidable 316 de ¼” y se soldaron (Figura 34 - b), 34 - c)), después se soldaron al contenedor del PCM y se procedió a realizar la mezcla de los 8.25 kg de PCM.

Después, se compró nitrato de potasio y nitrito de sodio grado técnico, el compuesto que no se pudo conseguir fue el nitrato de sodio, pero si se pudo conseguir ácido nítrico e hidróxido de sodio, por lo tanto, se sintetizó mediante una reacción de neutralización como se ve en la Ecuación 13 [107].



Para 8.25 kg de PCM el 53, 40 y 7 % en masa corresponde a KNO₃, NaNO₂ y NaNO₃ o bien 4.3725, 3.3 y 0.5775 kg y sus masas moleculares son 101, 63 y 85 g/mol. Los moles y cantidades necesarios para la síntesis se enlistan en la Tabla 11.

Tabla 11. Masa y moles para sintetizar nitrato de sodio.

Compuesto	Cantidad de sustancia (mol)	Masa (g)
HNO ₃	6.7	427.77
NaOH	6.7	271.60
NaNO ₃	6.7	577.50

Debido a que los rendimientos de las reacciones químicas no alcanzan el 100 % se consideró un 25 % en exceso de los reactivos (144.37 g). Los nuevos valores de ácido nítrico e hidróxido de sodio se obtuvieron multiplicando las cantidades de la Tabla 11 por 1.25.

El hidróxido de sodio se consiguió en forma de escamas y se pesó la cantidad de 339.5 g, el ácido nítrico se consiguió al 57 % en masa, lo cual se corroboró mediante la medición de su densidad con un matraz volumétrico de 50 mL, la densidad fue de 1.3462 g/mL. La masa necesaria de ácido nítrico puro fue de 534.71 g, dando como resultado un total de 1.01 kg de ácido nítrico al 57 % en masa o bien un volumen de 753.64 mL.

En la Figura 35 - a) se muestran las sales del PCM en sus empaques. La mezcla de sales se colocó en una olla y para corroborar la homogeneidad de la mezcla, ésta se fundió con la ayuda de una parrilla de calentamiento midiendo su punto de fusión (ver Figura 35 - b)).



Figura 35. PCM GT. a) Compuestos del PCM GT. b) PCM GT mezclado en polvo y parrilla de calentamiento.

Con los componentes del PCM mezclados se procedió a fundirlos en una olla con ayuda de un mechero Meker-Fisher y se mezclaron por 15 minutos con un agitador de vidrio. A la olla se le añadió aislante de fibra de vidrio para que alcanzara más rápido la temperatura de fusión y poder vaciarlas en el interior del contenedor.

En la Figura 36 - a) y 36 - b) se muestra una fotografía y una termografía del PCM vaciado en el interior de su contenedor.

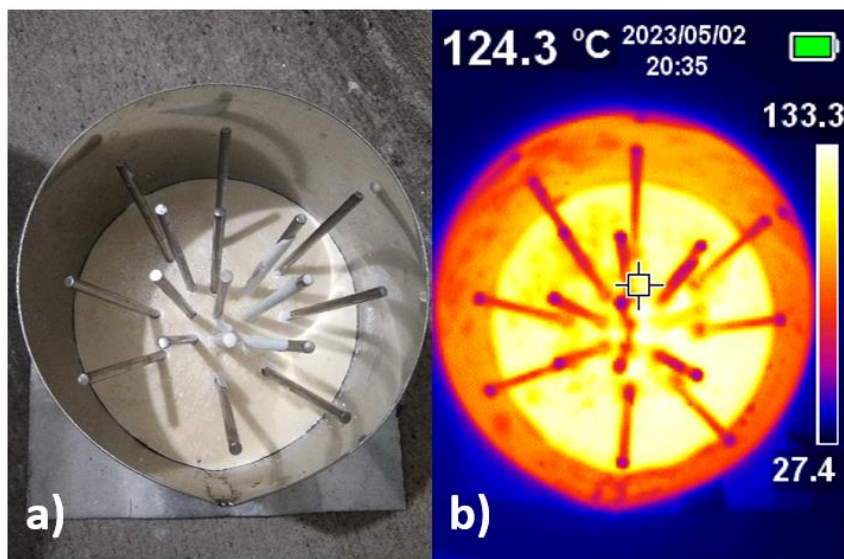


Figura 36. Comparación entre fotografía real y termografía del PCM vaciado en el contenedor del acumulador térmico.

En la fotografía se observa al PCM solidificado, también se nota que no se llenó de PCM por completo pues el contenedor se llenó en partes para observar que no existiera algún error de

cálculo debido a la expansión volumétrica. El vaciado del PCM se realizó cuidadosamente ya que al estar a temperaturas altas disminuye su viscosidad y salpica fácilmente pudiendo ocasionar quemaduras.

Una vez vaciado el PCM por completo en su contenedor de acero inoxidable, se soldó su tapa y se agregó el aislante térmico manipulándolo con el correcto equipo de protección personal.

Al finalizar todo el proceso de soldadura, desbaste y lijado, el resultado fue un acumulador térmico como el mostrado en la Figura 37 el cual tuvo un costo total de \$ 6,519.07 MXN.



Figura 37. Acumulador térmico terminado a 100.4 °C debajo de su tapa.

En la misma Figura se observa un medidor de temperatura con un termopar tipo K justo debajo de la tapa marcando 100.4 °C. Para que llegara a esa temperatura el acumulador térmico se tuvo que exponer a una temperatura de ~245 °C con ayuda de una parrilla de calentamiento durante media hora.

6.11 Rendimiento del acumulador térmico

La evaluación del acumulador se llevó a cabo de 12 a 3 p.m. tal como se recomienda en la referencia [28], con un tiempo de carga de 3 h. El tiempo de descarga es variable de acuerdo

con la temperatura de operación como se muestra en la Figura 38. En esta Figura se observa que el valor máximo de temperatura fue de 177.5 °C (T_1 y T_3) superando a los dispositivos reportados en las referencias [27-30, 32, 34]. La temperatura mínima fue de 87.25 °C (T_2) después de 2.31 h, también se registró la temperatura ambiente (T_∞) la cual muestra ruido en su señal debido a la baja calidad de los termopares tipo K. La temperatura 2 (T_2) fue más baja debido a un mal contacto con la superficie del acumulador.

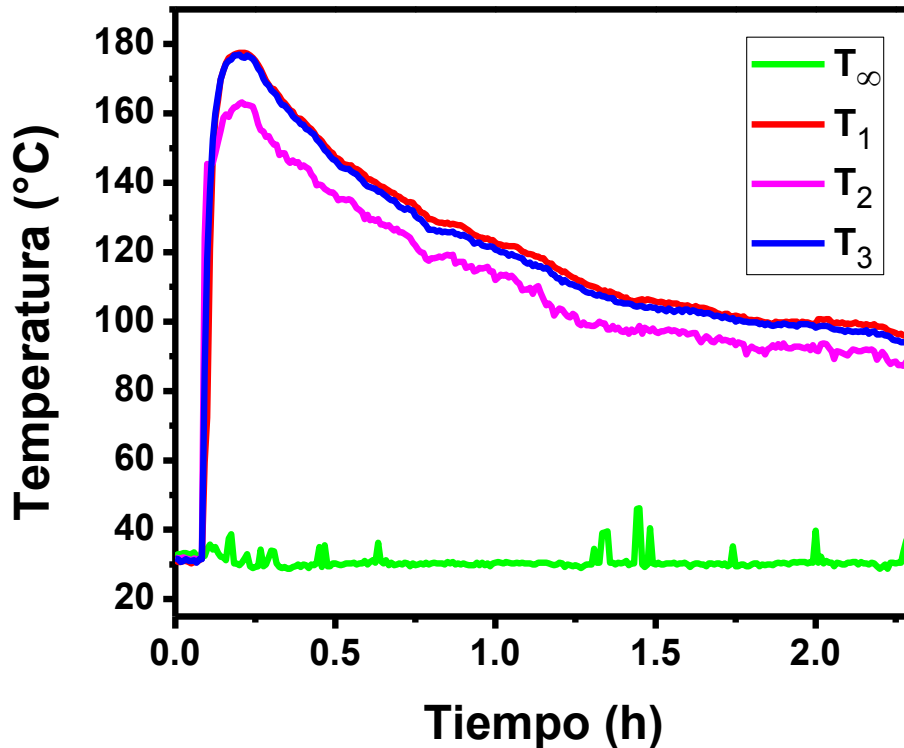


Figura 38. Evolución térmica vs tiempo del acumulador térmico en condiciones reales.

El tiempo de descarga del acumulador térmico se prolongó hasta el día siguiente, pues éste presentó una temperatura de 50 °C a 18 h después de haber sido cargado. Lo anterior se modeló con la ley de enfriamiento de Newton donde la temperatura después de 18 h de descarga fue de 31 °C, sin embargo, la temperatura fue medida después de 18 h y ésta fue de 36 °C. Esto quiere decir que el cambio de estado de agregación hace que el proceso de transferencia de calor sea más lento que el establecido por la ley de enfriamiento de Newton, ya que ésta solamente contempla la entrega de calor sensible y no de calor latente. Se realizaron modelos polinómicos y ninguno arrojó buenos resultados de ajuste, el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el modelo por potencia, el cual se muestra en la Ecuación 14.

$$T = 120.86 * t(h)^{-.283} \quad (14)$$

Donde T es la temperatura del acumulador térmico en $^{\circ}\text{C}$ y $t(h)$ es el tiempo en horas. Los valores de la energía acumulada fueron graficados en función del tiempo como se muestra en la Figura 39 (línea azul), en la misma se puede notar que el valor máximo de energía almacenada fue de 1.93 MJ esto es 6.28 veces la energía acumulada en [30]. De acuerdo con los cálculos teóricos se desperdició un total de 1.07 MJ en el proceso de carga, si esta cantidad se divide entre el tiempo total de 3 h se obtiene la potencia de disipación de calor (pérdidas), la cual fue de 99.07 W.

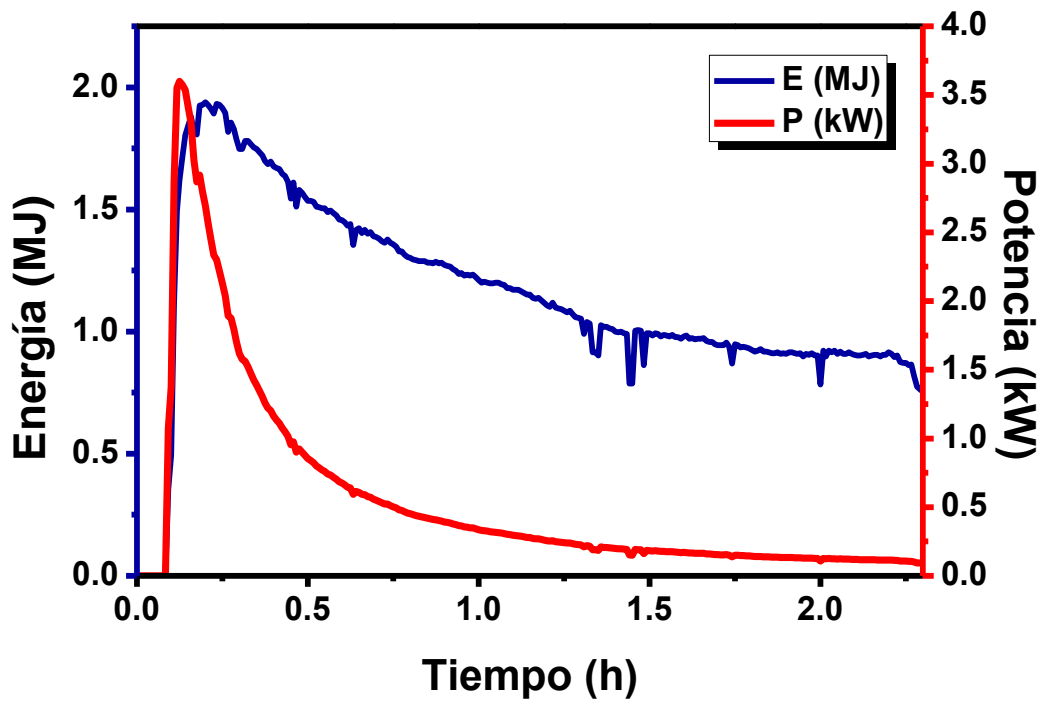


Figura 39. Potencia del acumulador térmico en función del tiempo en horas.

El área de transferencia de calor del acumulador térmico es de 0.179 m^2 y la diferencia de temperaturas total fue de $146.71 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con esta información se calculó el coeficiente de transferencia de calor por convección del acumulador térmico, el cual fue $3.77 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, éste es similar al coeficiente de transferencia de calor por convección natural ($\sim 5 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$). La potencia máxima alcanzada fue de 3600.02 W superando a las potencias máximas de los dispositivos reportados en las referencias [29] y [103]. La potencia varió en función de la temperatura, para observar su comportamiento se graficó en función del tiempo como se muestra en la Figura 39 (línea roja). De la misma manera en que se determinó la Ecuación

14, se modeló el comportamiento de la potencia en función del tiempo y se encontró que el modelo que mejor ajustaba los datos era el modelo de potencia mostrado en la Ecuación 15.

$$P = 325.5 * t(h)^{-1.382} \quad (15)$$

Donde P es la potencia del acumulador térmico y $t(h)$ es el tiempo en horas. El concentrador de disco parabólico con el acumulador se muestra en la Figura 40 - a), en el inciso b se muestra el conjunto de concentrador y acumulador térmico en operación.

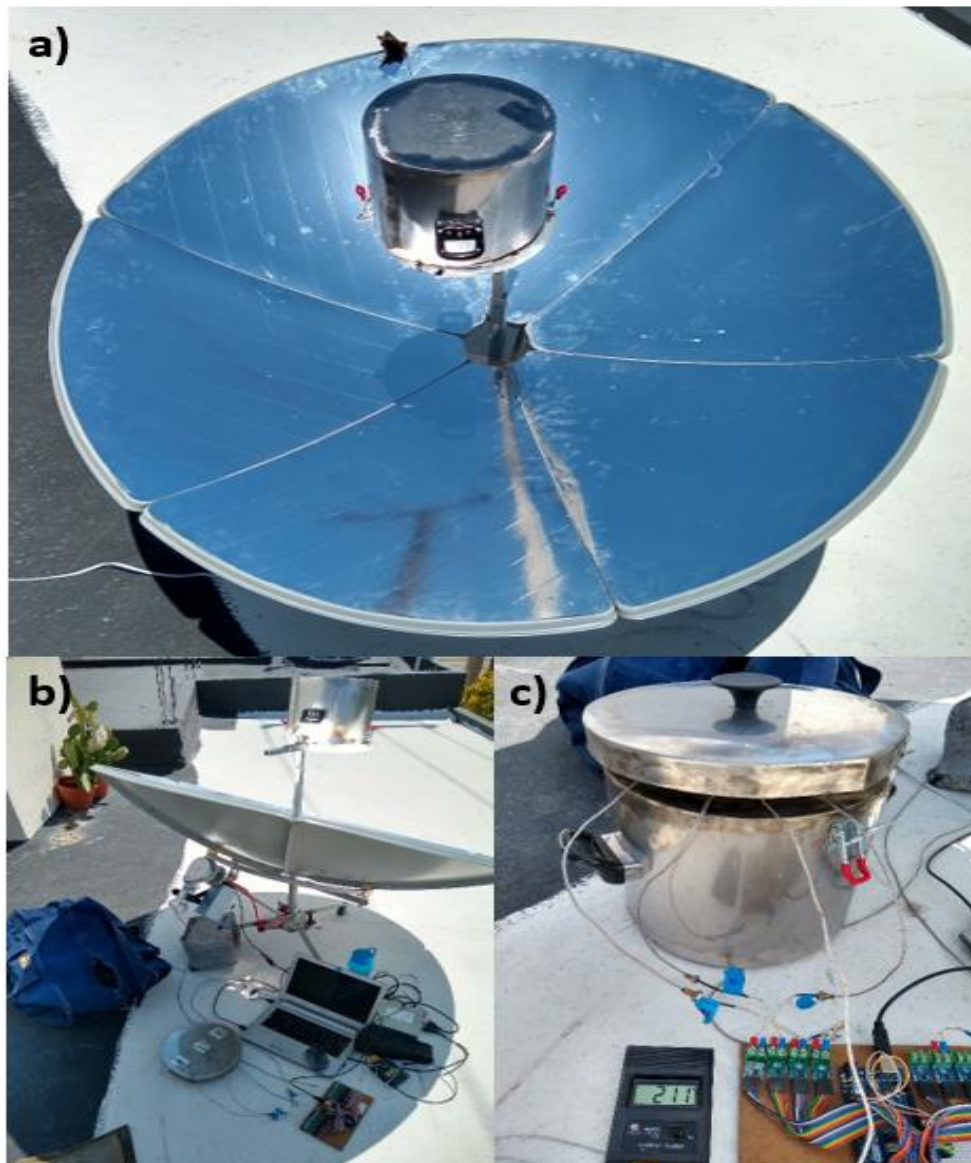


Figura 40. Proceso de carga y descarga de acumulador térmico. a) Acumulador térmico en el punto focal del concentrador solar. b) PC Laptop registrando datos del microcontrolador Arduino Mega 2560. c) Termopar tipo K midiendo la temperatura del acumulador térmico.

En el inciso c se muestra el acumulador térmico con los termopares en la superficie de este y el termopar tipo K sin su carcasa mostrando 211 °C. Esta temperatura fue superior a la máxima reportada anteriormente (177 °C) porque los termopares tipo K tienen una carcasa para proteger al sensor y esto afecta a la medición.

En la Figura 41 - a) se nota que no se utilizó hollín para aumentar la absorbancia de la radiación solar puesto que se encontró que las altas temperaturas alcanzadas en el punto focal provocan la oxidación del acero inoxidable y este material es uno de los mejores para absorber radiación solar. Se muestra una broca para preciar la deformación de la superficie del acumulador cuando éste fue expuesto al punto focal. En el inciso b se muestran las herramientas utilizadas para taladrar.

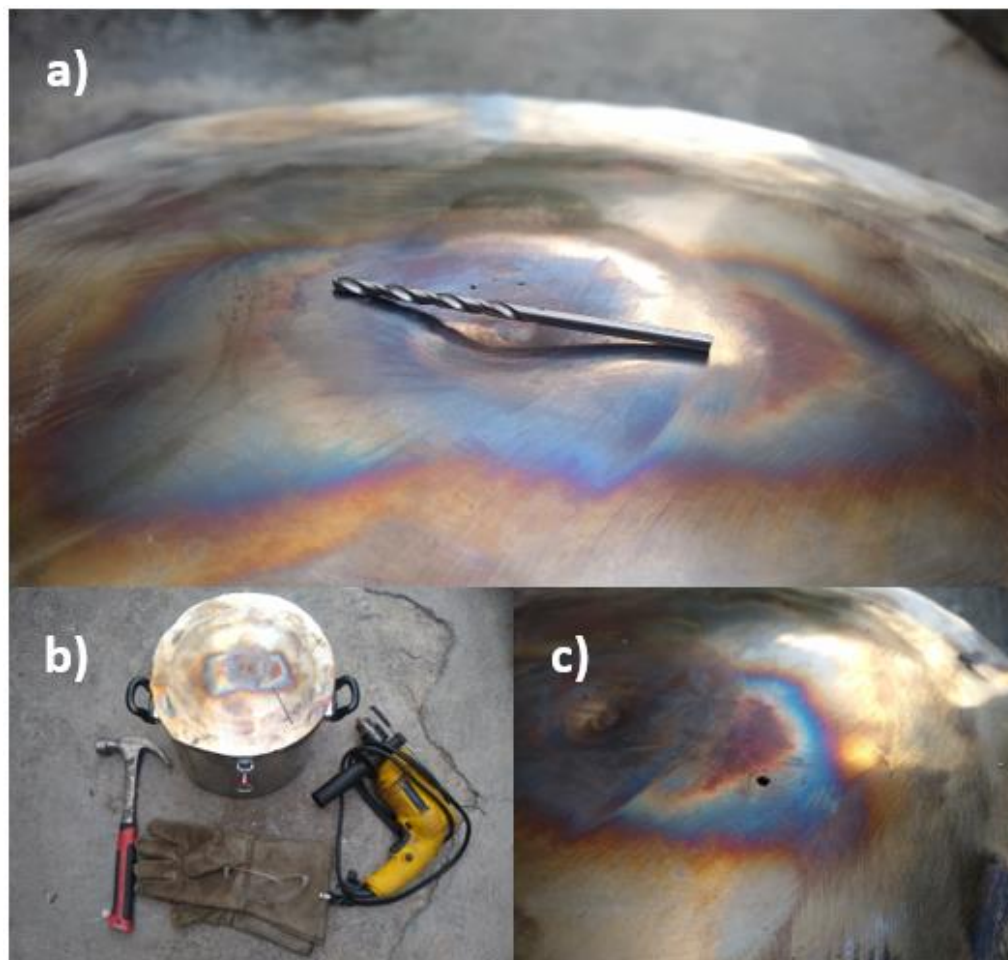


Figura 41. Deformación térmica y presurización del acumulador térmico. a) Deformación de la superficie del acumulador térmico. b) Herramientas para perforar y enderezar el acumulador térmico. c) Acumulador térmico perforado.

La deformación fue provocada por dos razones, la primera de ellas es que el concentrador de disco parabólico alcanzó temperaturas de 700 °C las cuales deformaron la lámina calibre 16 y la segunda razón fue que el acumulador térmico se presurizó ya que al estar expuesto a tan altas temperaturas el PCM se descompuso generando compuestos gaseosos.

En la Figura 41 - c) se muestra el agujero realizado con una broca de 3/32", cuando se perforó la lámina los gases del interior salieron a gran velocidad por alrededor de 3 segundos.

En la Ecuación 16 se observa la descomposición de uno de los compuestos del PCM. Se ha reportado que las sales fundidas compuestas por nitratos también se pueden descomponer en óxidos de nitrógeno y óxidos de los cationes que las componen, a estos residuos sólidos se les conoce como sales rastreas [108].



La reacción de la Ecuación 16 es endotérmica y cuando se produce pareciera que el PCM estuviera ebullendo. Por otro lado, Si el PCM se opera entre 454 y 583 °C en presencia de oxígeno uno de los constituyentes del PCM se empieza a oxidar, como se muestra en la Ecuación 17:



Una ventaja de que el PCM esté encapsulado es que está aislado del medio ambiente y después de un determinado tiempo el oxígeno que se encuentre dentro del recipiente reaccionará hasta llegar a un equilibrio.

Debido a que no se tiene un control sobre la temperatura del punto focal, el proceso de carga es peligroso, por lo que se desenfocó el concentrador para que la temperatura del punto focal no llegara a más de 450 °C.

6.12 Aplicación de un acumulador térmico

El acumulador térmico se expuso a radiación solar durante 3 h y después se procedió a calentar 2 tazas de agua (520 mL) con 1 taza de arroz blanco (218 g) en una olla de aluminio (Figura 42 - a)), se demoró 5 min en llegar a la temperatura máxima la cual fue de 42 °C, de esta temperatura bajo hasta 32 °C en 5.2 h, obteniendo así rampas de calentamiento y enfriamiento de 5.2 y 0.03 °C/min. Si bien la temperatura en la superficie del acumulador

térmico asciende hasta los 211 °C como se mostró en la Figura 40 el acumulador no pudo transferir el calor debido al mal contacto con la olla, esto fue causado por la superficie deformada del dispositivo.

Para la medición se utilizó un microcontrolador Arduino Nano y 10 sensores DS18B20, 8 en el interior de la olla (Figura 42 - b)) y 2 para medir la temperatura ambiente, la potencia máxima lograda fue de 188.55 W en donde la energía total transferida al agua y arroz fue de 28.28 kJ.



Figura 42. Prueba de cocción de arroz con acumulador térmico. a) Olla con su tapa y arroz en su interior sobre acumulador térmico. b) Olla con arroz y agua destapada y 8 sensores de temperatura DS18B20.

La temperatura máxima lograda en la olla no fue atractiva para cocinar pues el arroz solo se reblandeció, pero no se coció, debido a esto se optó por cocinar directamente en la superficie del acumulador.

Para esto se cargó de nuevo el acumulador térmico durante 3 h, seguido de esto se cocinaron dos huevos de gallina y una salchicha de pavo como se muestra en la Figura 43 - a) donde se observa una temperatura de 75.1 °C correspondiente al borde exterior del acumulador. En

esta prueba se utilizó una tapa para evitar las pérdidas de calor hacia el medio ambiente y su tiempo total de cocción fue de 26 min.

En la Figura 43 - b) se muestran los huevos y la salchicha sin la tapa, la cocción de los huevos se comprobó por medio del cambio de coloración de su yema. Para saber si la salchicha había sido cocinada esta se cortó para observar su coloración en el interior. En la Figura 43 - c) y 43 - d) se muestran los cortes a los alimentos hechos por un cuchillo para corroborar su cocción.

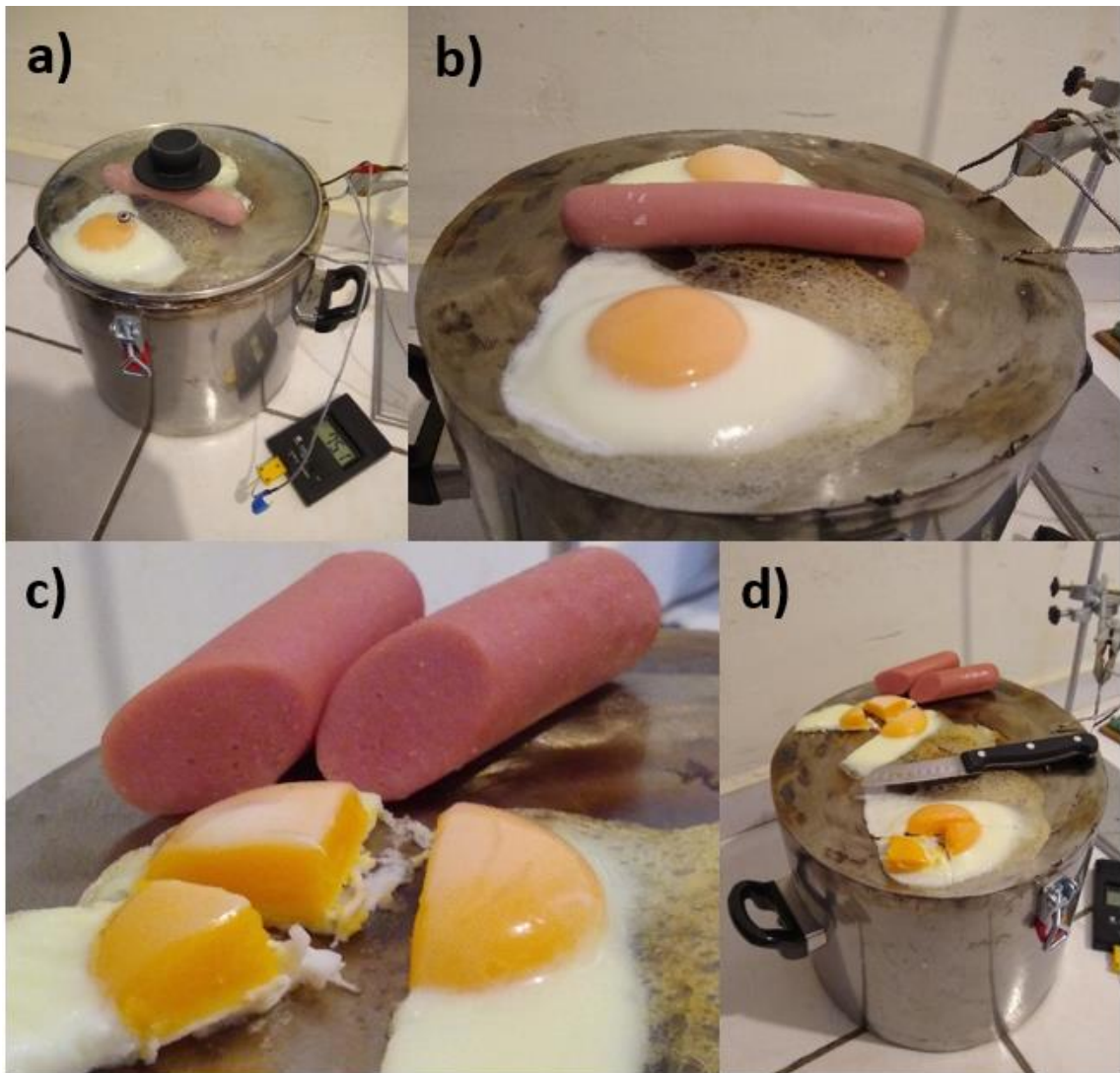


Figura 43. Cocción de huevo y salchicha en acumulador térmico. a) Medición de temperatura en la parte externa del acumulador térmico con su tapa. b) Huevos con salchicha cociéndose en el acumulador térmico sin tapa. c) Comprobación de la cocción de la salchicha y de la yema de huevo a través de un corte con un cuchillo. d) Huevos y salchicha cocidos con cortes hechos con un cuchillo.

Otra prueba fue realizada de nuevo cargando el acumulador térmico por 3 h y cocinando directamente sobre su superficie como se observa en la Figura 44 - a). En esta Figura se nota que la cocción de los alimentos dejó líquido sobre la superficie del acumulador térmico, este fenómeno es normal, pues al cocinar un alimento este pierde humedad y la misma se condensa en la tapa.

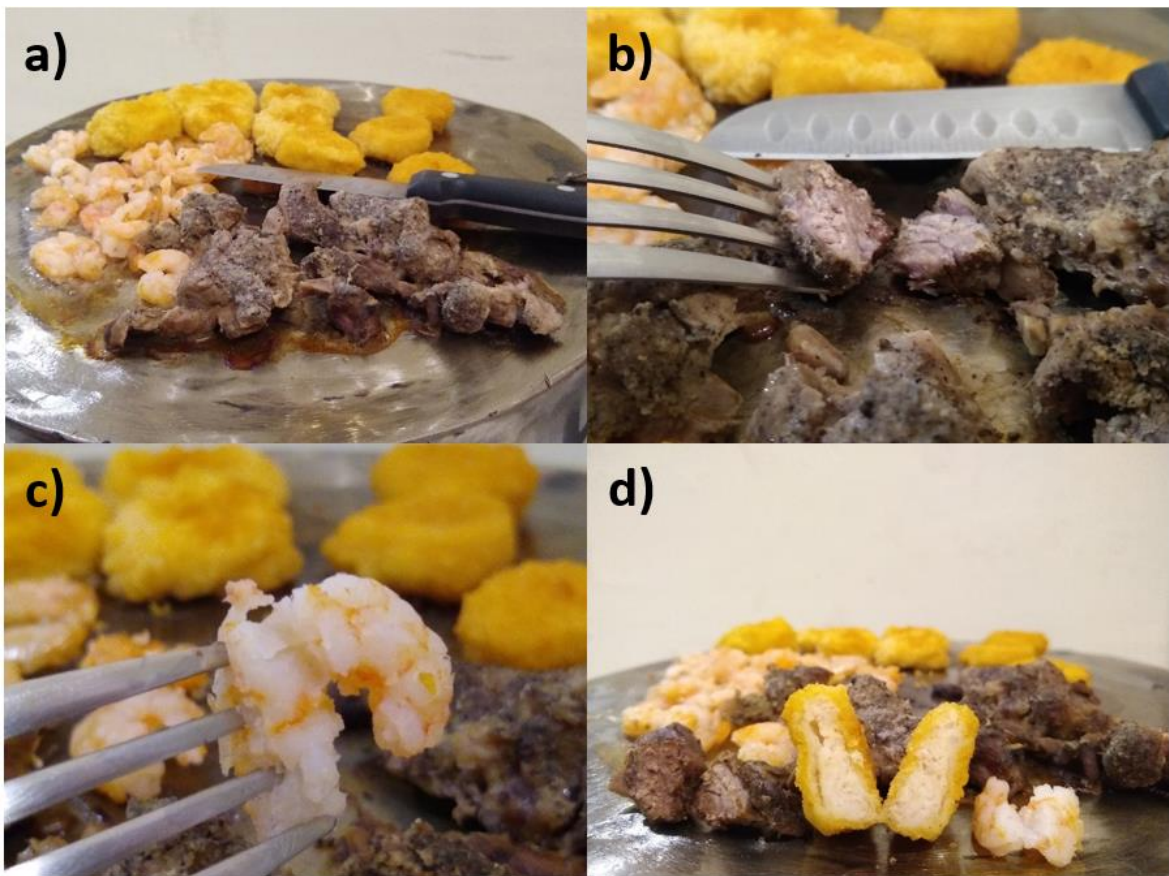


Figura 44. Alimentos cocidos con acumulador térmico. a) Carne de res, nuggets de pollo y camarones después de 2.25 h de cocción. b) Corte realizado en trozo de carne de res para observar su cocción interna. c) Corte realizado en camarón para observar su cocción interna. d) Cortes realizados en los 3 alimentos mostrando su cocción interna.

En la Figura 44 - b) se comprobó la cocción de la carne realizando un corte para observar su coloración en el interior, en donde la carne presentó un color homogéneo indicando una buena transferencia de calor hacía el interior de la carne. Para la Figura 44 - c) se nota lo mismo pero esta vez con un camarón y, por último, en la Figura 44 - d) se observa el interior de los 3 alimentos cocinados en la superficie del acumulador térmico.

La prueba duró hasta que la comida alcanzó los 70 °C pues las temperaturas de cocción recomendadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica para 4 tipos de carnes se acercan a esta temperatura (Tabla 12 [60]).

Tabla 12. Temperaturas recomendadas para cocinar 4 tipos de carnes [60].

Alimento	Temperatura (°C)
Bistec	62.8
Pescado	71.1
Puerco	76.7
Pollo	82

Se graficaron los valores de la temperatura en función del tiempo para la cocción de los 3 alimentos presentados en la Figura 44, estos valores se muestran en la Figura 45. Las temperaturas 1 y 2 fueron diferentes pues midieron zonas distintas de la parte exterior de la superficie del acumulador térmico.

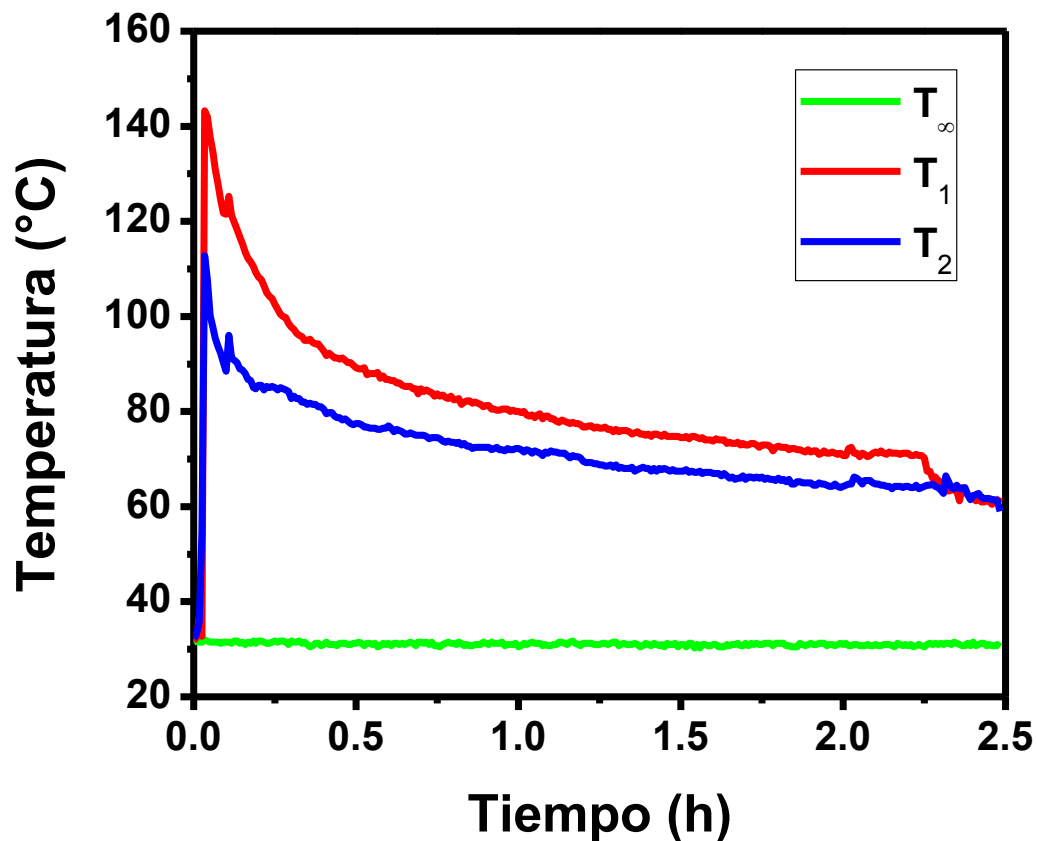


Figura 45. Temperatura en función del tiempo del acumulador térmico mientras cocinaba carne de res, nuggets de pollo y camarones.

También se midió la temperatura ambiente (T_{∞}) la cual no presentó cambios durante todo el proceso. La temperatura máxima reportada fue de 143 °C y la cocción se detuvo después de 2.25 h cuando la T_1 llegó a 70 °C, de hecho, cuando esto sucede se observa la perturbación de la lectura pues se movieron los termopares tipo K afectando la medición.

El uso de una tapa al cocinar es una buena práctica para ahorrar energía, por esta razón se utilizó una en el acumulador térmico (ver Figura 46 - a)). Para observar la distribución de temperaturas en la superficie de la tapa se tomó una termografía del proceso como se muestra en la Figura 46 - b), ésta dejó ver que el calor se distribuye homogéneamente entre el acumulador y la tapa, permitiendo que los alimentos se cocinen adecuadamente y no queden crudos o quemados por recibir más o menos calor.

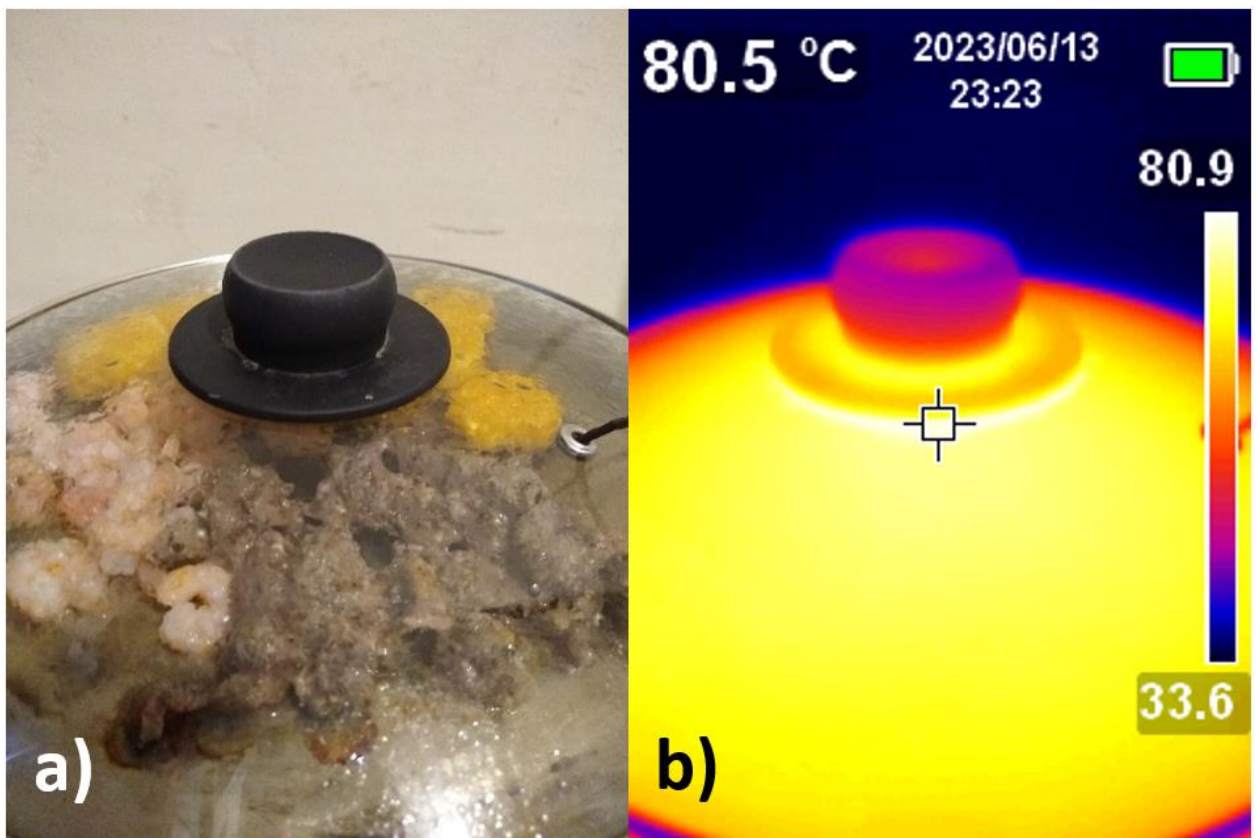


Figura 46. Comparación de fotografía y termografía de la tapa mientras se cocina con el acumulador térmico. a) Fotografía de la tapa con un termopar tipo K midiendo la temperatura en el interior. b) Termografía de la tapa durante el proceso de cocción.

Una vez que la temperatura baja entre los 80 y 100 °C la transferencia de calor se vuelve lenta por lo que es ideal para calentar un espacio, por ejemplo, durante toda la noche. Esto

puede resolver el problema de la intoxicación por dióxido y monóxido de carbono por utilizar calentadores que utilizan gas o bien reducir el costo de energía eléctrica por utilizar aire acondicionado.

Para comprobar si este dispositivo puede ser útil para dicha aplicación se realizó una última prueba, la cual consistió en medir la temperatura de un cuarto de $4 \times 3.2 \times 2.7$ metros mientras el acumulador térmico se descargó por 10.17 h. Se calculó la potencia y la energía transferida al aire en función del tiempo, ambas se graficaron y se muestran en la Figura 47. La densidad del aire utilizada fue de 1.15 kg/m^3 , la masa total de aire en el cuarto fue de 44.58 kg y el calor específico considerado fue de $700 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. La potencia llegó hasta los 145.52 W y la energía máxima transferida fue de 32.66 kJ.

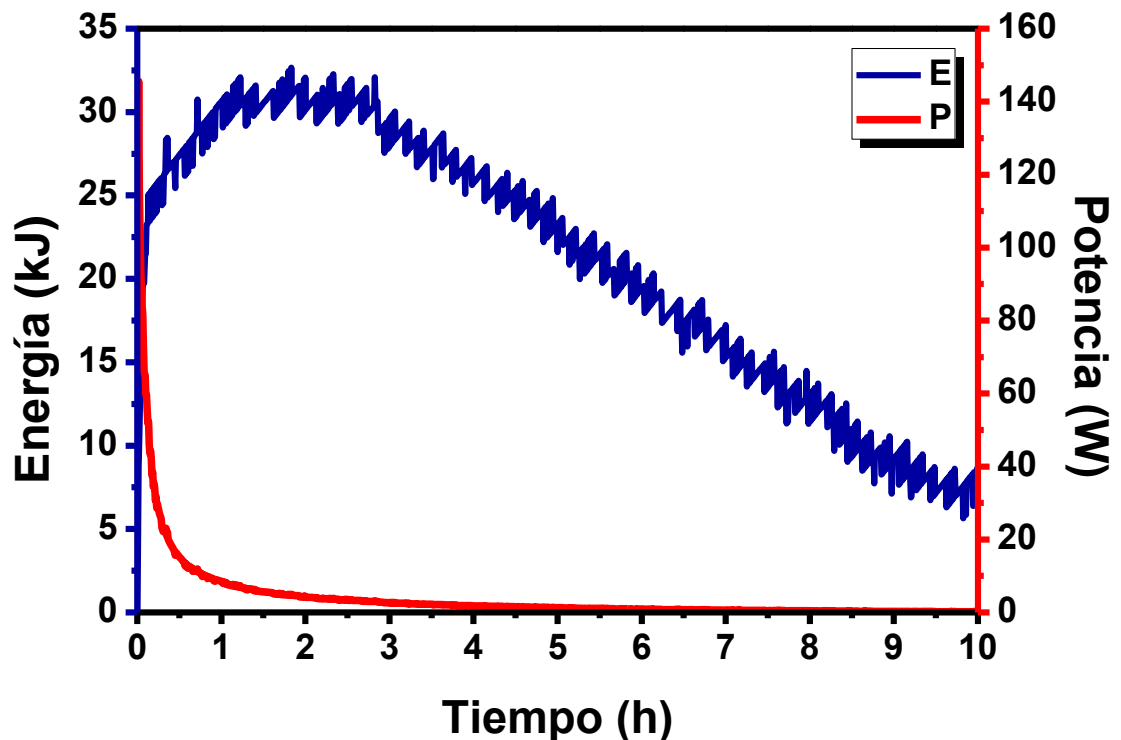


Figura 47. Potencia y energía transferida desde el acumulador térmico al aire de un cuarto de 34.56 m^3 en función del tiempo.

Después de 0.5 h la potencia empezó a disminuir y después de 2 h el acumulador térmico transfirió la cantidad máxima de energía térmica. Lo más relevante de la prueba es que la temperatura disminuyó lentamente durante las 10 h de medición, la rampa de calentamiento

calculada fue de $3.85 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, esto es atractivo para calentar un espacio y mantenerlo así durante largos periodos.

Si bien el acumulador térmico tiene la capacidad de cocinar y calentar alimentos, su uso puede resultar complicado debido a su masa de 16.90 kg.

Debido que el acumulador térmico se utilizará para cocinar y calentar alimentos, este deberá ser trasladado cada día y esto es un proceso cansado para el usuario, por otro lado, si se utiliza este dispositivo solamente para climatizar un espacio se utilizaría menos aligerando la carga de trabajo. Sin embargo, esto tiene una clara desventaja y es que entre menos se utilice el acumulador térmico para aprovechar energía térmica solar, mayor será el tiempo de recuperación de la inversión. Además, el utilizar el acumulador térmico para transferir calor hacia un objeto en concreto es ineficiente al menos con este diseño, la eficiencia térmica del concentrador solar es de 52.72 % y cuando la energía térmica se transfiere del acumulador a un objeto, baja hasta el 15.43 %. Esto no es atractivo pues la mayor parte se disipa hacia el medio ambiente, en cambio, si el objetivo es calentar ese medio ambiente, entonces sí será atractivo.

Una alternativa para aprovechar al máximo la energía térmica solar, sería utilizar el concentrador para cocinar cuando esté presente la radiación solar y después de este proceso, proceder a colocar el acumulador para almacenar toda la energía térmica posible. Después utilizar la energía almacenada para recalentar los alimentos previamente cocinados o bien para calentar un espacio en el interior de una vivienda.

6.13 Evaluación del acumulador térmico mediante matriz QFD

Después de que se obtuvo información del acumulador térmico se agrupó en una matriz QFD (Figura 48) para su comparación con otras alternativas que ya se utilizan actualmente para cubrir la necesidad de cocinar y calentar alimentos, además, la de calentar un espacio. En la Figura 48 se muestran los requerimientos del cliente con su correspondiente ponderación, en esta sección el acumulador térmico obtuvo buen puntaje relativo del 23 %, debido a la seguridad, beneficio económico y medio ambiental. Por otro lado, los requerimientos referentes a la practicidad fueron los que presentaron un resultado insatisfactorio, el más recalado podría ser la baja eficiencia y la dificultad de traslado.

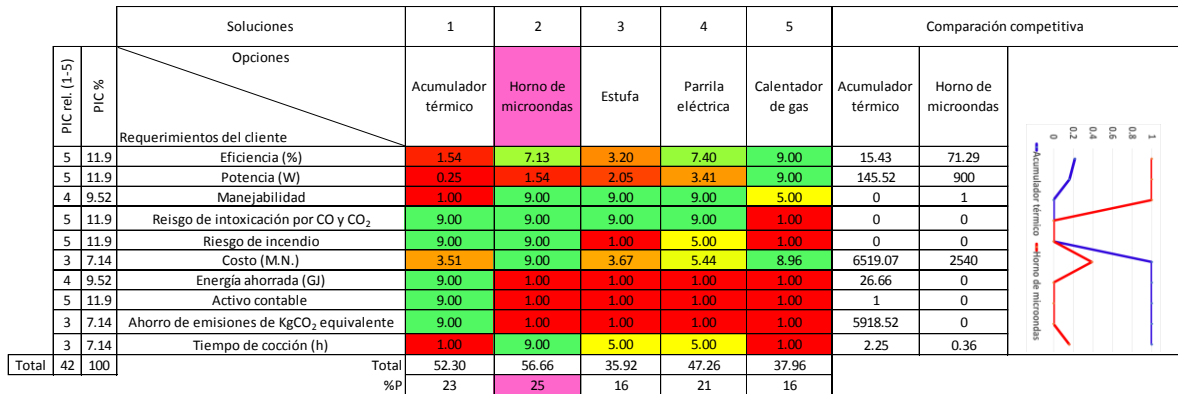


Figura 48. Matriz QFD del acumulador térmico.

Las otras soluciones fueron evaluadas de la misma manera y se encontró que la mejor opción es utilizar un horno de microondas para cocinar y calentar comida. Sin embargo, un horno de microondas no puede calentar un espacio, puede afectar el sabor y textura de la comida e incrementa el consumo de energía eléctrica. Aun así, considerando la ponderación de los requerimientos evaluados resultó ser la mejor opción con un puntaje relativo del 25 %.

Esta matriz QFD permite observar las ventajas y desventajas de cada solución, lo anterior es importante porque indica el rumbo de un siguiente paso. Por ejemplo, las nuevas investigaciones para un acumulador térmico deben considerar los siguientes puntos: que el acumulador térmico de gran capacidad sea estacionario para evitar problemas asociados a su portabilidad, que tenga una tapa mejor aislada para mejorar la eficiencia y que tenga un mejor disipador para aumentar la potencia y a su vez reducir el tiempo de cocción. Estas alternativas también pueden ser evaluadas con una matriz QFD.

7 Conclusiones

Se logró el objetivo general tras evaluar la adición de 0, 5, 10, y 15 % de grafito en masa a la mezcla eutéctica compuesta por KNO_3 , NaNO_3 y NaNO_2 (53/7/40 % m/m) mediante la metodología QFD y se pudo determinar que la mezcla sin grafito fue la mejor opción para utilizarse en un acumulador térmico como PCM. El PCM se preparó mediante el método de dos pasos debido a que mezclaba mejor los componentes. Además, mediante simulación térmica utilizando el software SolidWorks® se determinó que son necesarias 17 superficies extendidas para poder fundir el PCM y aumentar la eficiencia térmica del dispositivo. Después se encontró que el concentrador solar de disco parabólico fue atractivo para aprovechar la energía térmica solar debido a su potencia y eficiencia térmica. El acumulador térmico tuvo la capacidad de cocinar y calentar alimentos, sin embargo, su uso no fue práctico debido a su masa, la eficiencia de éste se redujo en un 70.73 % en comparación con la eficiencia obtenida por el concentrador de disco parabólico, esto indica que el aislamiento puede ser mejorado. Por último, se encontró que un horno de microondas resultó ser más atractivo para cocinar y calentar alimentos que el acumulador térmico debido a su corto tiempo de cocción, manejabilidad y eficiencia lo cual fue evaluado mediante la metodología QFD.

8 Recomendaciones para trabajos futuros

Utilizar sensores Pt100 de mayor precisión para medir la temperatura al caracterizar por THM, o bien, utilizar un método más preciso para medir la conductividad térmica, por ejemplo, el método del láser flash, el método del alambre caliente o calorimetría diferencial de barrido modulada.

Considerar diferentes espesores de acuerdo con las funciones de cada sección del acumulador para reducir su peso y evitar deformaciones.

El acero inoxidable 316 contribuyó en 56.78 % del costo total del acumulador por lo que se recomienda el acero inoxidable 304.

Evaluar la implementación del sistema de seguimiento solar en el concentrador de disco parabólico para mejorar la eficiencia de captación de la energía térmica solar.

9 Referencias

- [1] S. Sorrell, “Reducing energy demand: A review of issues, challenges and approaches” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 74–82.
- [2] L. Gan, P. Jiang, B. Lev, and X. Zhou, “Balancing of supply and demand of renewable energy power system: A review and bibliometric analysis” *Sustainable Futures* 2 (2020) 100013.
- [3] International Energy Agency, “Renewables 2019 – Market analysis and forecast from 2019 to 2024,” (2019). [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>
- [4] INEGI, “Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI),” 2018. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- [5] L. de J. Ramos Gutiérrez and M. Montenegro Fragoso, “La generación de energía eléctrica en México” *Tecnología y Ciencias del Agua* 3 (2012) 197–211..
- [6] N. Camargo and D. Williams, “Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta” *Tecnura* 16 (2012) 142–156..
- [7] S. M. Ebersviller and J. J. Jetter, “Evaluation of performance of household solar cookers” *Solar Energy* 208 (2021) 166–172.
- [8] Samaan Ladkany, William Culbreth, and Nathan Loyd, “Molten Salts and Applications I: Molten Salt History, Types, Thermodynamic and Physical Properties, and Cost” *Journal of Energy and Power Engineering* 12 (2018) 507–516.
- [9] V. S. Thakur, S. Sarode, R. Sharma, and S. A. Patil, “A review of thermal energy storage materials used in various types of solar cookers” 6 (2020) 1696–1702..
- [10] SCI, “Popular box cooker designs,” *Solar box cooker designs*, 2021.
- [11] SCI, “Fun-Panel,” *Fun-Panel Solar Panel*, 2020. <https://solarcooking.fandom.com/wiki/Fun-Panel>

- [12] W. B. Stine, “Progress in Parabolic Dish Technology (US Department of Energy),” (1989).
- [13] M. Janich, “Building a DIY parabolic solar cooker,” *A dish served hot*, 2017. <https://www.offgridweb.com/preparation/building-a-diy-parabolic-solar-cooker/>
- [14] A. Sharma and A. Yadav, “Experimental Study of a Solar Oven based on Evacuated Tube Collector in Indian Climatic Conditions” *Journal of Physics: Conference Series* 1240 (2019) 1–9.
- [15] L. Schlussler, “No TitleSun Frost Cooker – Sterilizer,” *A Major Leap Forward in the Art of Solar Cooking*, 2010. <http://www.sunfrost.com/blog/sun-frost-cooker-sterilizer/>
- [16] L. Nkhonjera, T. Bello-Ochende, G. John, and C. K. King’ ondu, “A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (2017) 157–167.
- [17] Bharataher, Sagarghotekar, Navnathbhagat, Roshanbarate4, and Sunilchougule, “Review on Phase Changing Material as the Energy Storage in Solar Cooker,” in *1st National Conference On Recent Innovations in Mechanical Engineering*, 2018, 1–5.
- [18] M. M. A. Khan, R. Saidur, and F. A. Al-Sulaiman, “A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017) 105–137.
- [19] T. X. Li, J. X. Xu, D. L. Wu, F. He, and R. Z. Wang, “High energy-density and power-density thermal storage prototype with hydrated salt for hot water and space heating” *Applied Energy* 248 (2019) 406–414.
- [20] M. A. Orozco, K. Acurio, F. Vásquez-Aza, J. Martínez-Gómez, and A. Chico-Proano, “Thermal Storage of Nitrate Salts as Phase Change Materials (PCMs)” *Materials* 14 (2021) 7223..
- [21] M. D. Muhammad, “Review of PCMs and heat transfer enhancement methods applied in parabolic trough solar plants thermal storage systems” *Nigerian Journal of Technology* 37 (2018) 96–107..

- [22] Q. G. Zhao, C. X. Hu, S. J. Liu, H. Guo, and Y. T. Wu, “The thermal conductivity of molten NaNO₃, KNO₃, and their mixtures” *Energy Procedia* 143 (2017) 774–779.
- [23] P. Royo, L. Acevedo, V. J. Ferreira, T. García-Armingol, A. M. López-Sabirón, and G. Ferreira, “High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries” *Energy* 173 (2019) 1030–1040.
- [24] S. Sau, M. Ferrara, N. Corsaro, E. Veca, P. Coppa, and G. Bovesechi, “Solar Facilities for the European Research Area (SFERA II Project),” (2017).
- [25] T. Bauer, “PCM-Graphite Composites for High Temperature Thermal Energy Storage,” in *The Tenth International Conference on Thermal Energy Storage*, 2006, 1–19.
- [26] E. G. Bohlmann, “Heat transfer salt for high temperature steam generation (U.S. Atomic Energy Commission),” (1972).
- [27] V. Yadav, Y. Kumar, H. Agrawal, and A. Yadav, “Thermal performance evaluation of solar cooker with latent and sensible heat storage unit for evening cooking” *Australian Journal of Mechanical Engineering* 15 (2017) 1–10.
- [28] N. Nayak, H. Abu Jarir, and H. Al Ghassani, “Solar Cooker Study under Oman Conditions for Late Evening Cooking Using Stearic Acid and Acetanilide as PCM Materials” *Journal of Solar Energy* 1 (2016) 1–6.
- [29] J. Nébié, S. Zongo, G. C. Tubreoumya, A. S. Zongo, I. Konkobo, B. Bagré, A. Diané, T. Daho, S. W. Igo, B. Zeghmati, and A. Béré, “Performance Assessment of a Box Type Solar Cooker Using Jatropha Oil as a Heat Storage Material” *Energy and Power Engineering* 14 (2022) 124–132.
- [30] M. B. Maina, A. T. Abdulrahim, and S. Shodiya, “Application of Groundnut Oil as Thermal Energy Storage in a Solar Box Cooker for Enhanced Cooking Under Maiduguri Weather Condition” *Journal of Science Technology and Education* 7 (2019) 268–276..
- [31] B. Kanimozhi, K. Sanandharya, S. Anand, and S. Kumar, “Experimental Study on Solar Cooker Using Phase Change Materials” *Applied Mechanics and Materials* 766–

- 767 (2015) 463–467.
- [32] E. Vinay Prakash, “Performance Evaluation of Box Type Solar Cooker using PCM” *International Journal of Research in Advent Technology* 7 (2019) 25–28.
- [33] N. Kumar, A. Budhiraja, and S. Rohilla, “Feasibility of a Solar Cooker in Off Sunshine Hours Using Pcm As the Source of Heat” *Advances in Engineering: an International Journal (ADEIJ)* 1 (2016) 33–39..
- [34] C. V. Papade and A. B. Kanase-Patil, “Day and night parabolic concentrating solar cooker using nano-mixed phase change material,” in *AIP Conference Proceedings*, 2021, 1–6.
- [35] S. Jegadheeswaran, A. Sundaramahalingam, and S. D. Pohekar, “High-conductivity nanomaterials for enhancing thermal performance of latent heat thermal energy storage systems” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 138 (2019) 1137–1166.
- [36] S. C. Costa, K. Mahkamov, M. Kenisarin, M. Ismail, K. Lynn, E. Halimic, and D. Mullen, “Solar salt latent heat thermal storage for a small solar organic rankine cycle plant” *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* 142 (2020) 1–9.
- [37] E. Pop, V. Varshney, and A. K. Roy, “Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications” *MRS BULLETIN* 37 (2012) 1273–1281.
- [38] T. Rainer, B. Thomas, B. Jochen, L. Doerte, M.-S. Hans, and S. Wolf-Dieter, “Latent heat storage above 120°C for applications in the industrial process heat sector and solar power generation” *Int. J. Energy Res.* 32 (2008) 264–271.
- [39] W. Song, Y. Lu, Z. Fan, and Y. Wu, “Preparation and Thermophysical Properties of Sodium Nitrate / Nanoparticle / Expanded Graphite Composite Heat Storage Material” *Front. Energy Res.* 10 (2022) 1–15.
- [40] V. Chinnasamy and H. Cho, “Investigation on thermal properties enhancement of lauryl alcohol with multi-walled carbon nanotubes as phase change material for thermal energy storage” *Case Studies in Thermal Engineering* 31 (2022) 1–13.

- [41] M. Li, “A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity” *Applied Energy* 106 (2013) 25–30.
- [42] A. Babapoor, A. R. Haghghi, S. M. Jokar, and M. Ahmadi Mezjin, “The Performance Enhancement of Paraffin as a PCM During the Solidification Process: Utilization of Graphene and Metal Oxide Nanoparticles” *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* 41 (2022) 37–48.
- [43] M. Lachheb, A. Adili, F. Albouchi, F. Mzali, and S. Ben, “Thermal properties improvement of Lithium nitrate / Graphite composite phase change materials” *Applied Thermal Engineering* 102 (2016) 922–931.
- [44] Y. Ren, C. Xu, M. Yuan, F. Ye, X. Ju, and X. Du, “Ca(NO₃)₂-NaNO₃/expanded graphite composite as a novel shape-stable phase change material for mid- to high-temperature thermal energy storage” *Energy Conversion and Management* 163 (2018) 50–58..
- [45] Priyanka and S. Priya, “Effect of Expanded Graphite on Nitrate-Based Phase Change Materials being used in Thermal Energy Storage Systems” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 795 (2021) 1–8.
- [46] Z. Acem, J. Lopez, and E. Palomo Del Barrio, “KNO₃/NaNO₃-Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I.-Elaboration methods and thermal properties” *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1580–1585.
- [47] Y. Sheikh, M. F. Orhan, M. Umair, E. Mehaisi, and A. Azmeer, “Variation in cooling performance of a bio-based phase change material by adding graphene nanoplatelets with surfactants” *International Journal of Thermofluids* 16 (2022) 1–11.
- [48] Y. Grosu, U. Nithiyantham, L. González-Fernández, and A. Faik, “Preparation and characterization of nanofluids based on molten salts with enhanced thermophysical properties for thermal energy storage at concentrate solar power,” in *AIP Conference Proceedings*, 2019, 200021.
- [49] M. Chieruzzi, G. F. Cerritelli, A. Miliozzi, J. M. Kenny, and L. Torre, “Heat capacity of nanofluids for solar energy storage produced by dispersing oxide nanoparticles in

- nitrate salt mixture directly at high temperature” *Solar Energy Materials and Solar Cells* 167 (2017) 60–69.
- [50] A. Devpura, P. E. Phelan, and R. S. Prasher, “Percolation theory applied to the analysis of thermal interface materials in flip-chip technology,” in *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2000, 21–28.
- [51] I. Y. Forero-Sandoval, F. Cervantes-Alvarez, J. A. Ramirez-Rincon, J. D. Macias, N. W. Pech-May, J. Ordonez-Miranda, and J. J. Alvarado-Gil, “Percolation Threshold of the Thermal, Electrical and Optical Properties of Carbonyl-Iron Microcomposites” *Applied Composite Materials* 28 (2021) 447–463.
- [52] D. S. Smith, F. Puech, B. Nait-Ali, A. Alzina, and S. Honda, “Grain boundary thermal resistance and finite grain size effects for heat conduction through porous polycrystalline alumina” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (2018) 1273–1280.
- [53] H. Dong, B. Wen, and R. Melnik, “Relative importance of grain boundaries and size effects in thermal conductivity of nanocrystalline materials” *Scientific Reports* 4 (2014) 7037.
- [54] C. Thirugnanam, S. Karthikeyan, and K. Kalaimurugan, “Study of phase change materials and its application in solar cooker” *Materials Today: Proceedings* 33 (2020) 2890–2896.
- [55] D. K. De, M. Nathaniel, and O. Olawole, “Cooking with Minimum Energy and Protection of Environments and Health” *IERI Procedia* 9 (2014) 148–155.
- [56] N. Scott, M. Barnard-tallier, and S. Batchelor, “Losing the energy to cook: An exploration of modern food systems and energy consumption in domestic kitchens” *Energies* 14 (2021) 1–17.
- [57] U. Sonesson, H. Janestad, and B. Raaholt, *Energy for Preparation and Storing of Food - Models for calculation of energy use for cooking and cold storage in households*. 2003.
- [58] H. Rasugu Ayub, W. Jakanyango Ambusso, F. Muriuki Manene, and D. Mongeri

- Nyaanga, “A Review of Cooking Systems and Energy Efficiencies” *American Journal of Energy Engineering* 9 (2021) 1–7.
- [59] R. M. Muthusivagami, R. Velraj, and R. Sethumadhavan, “Solar cookers with and without thermal storage-A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 691–701.
- [60] P. B. Pathare and A. P. Roskilly, “Quality and Energy Evaluation in Meat Cooking” *Food Engineering Reviews* 8 (2016) 435–447.
- [61] U. Jamil and W. Ali, “Performance tests and efficiency analysis of Solar Invictus 53S - A parabolic dish solar collector for direct steam generation,” in *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1–8.
- [62] K. Esmail Amori and R. Rashid Sari, “Thermal performance of parabolic trough solar collectors” *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering* 18 (2018) 389–404.
- [63] A. Sharma, C. R. Chen, V. V. S. Murty, and A. Shukla, “Solar cooker with latent heat storage systems: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1599–1605.
- [64] B. D. Iverson, S. T. Broome, A. M. Kruiuzenga, and J. G. Cordaro, “Thermal and mechanical properties of nitrate thermal storage salts in the solid-phase” *Solar Energy* 86 (2012) 2897–2911.
- [65] Samaan Ladkany, William Culbreth, and Nathan Loyd, “Molten Salts and Applications II: 565 °C Molten Salt Solar Energy Storage Design, Corrosion, and Insulation” *Journal of Energy and Power Engineering* 12 (2018) 517–532.
- [66] N. Loyd and S. Ladkany, “Alternative designs of molten salt storage shells for use in solar energy storage” *Proceedings of International Structural Engineering and Construction* 7 (2020) 1–6.
- [67] P. A. Matthew, K. Jahnke, C. Zhou, and B. Elliott-Litchfield, “Performance Testing of a Portable Stored Solar Thermal Energy Cooking System: Household Energy Without Fuel, Fire, or Emissions.” 1–10., 2016.

- [68] A. Ruiz-falcó Rojas, “Despliegue de la función calidad (QFD),” (2009). [Online]. Available: <https://web.cortland.edu/matresearch/qfd.pdf>
- [69] J. Jimeno, “El portal de la gestión, calidad y mejora continua,” *Despliegue de la función calidad (QFD): Guía de uso. Para qué sirve el QFD y cómo realizarlo*, 2012. <https://www.pdcahome.com/1932/qfd-despliegue-calidad/>
- [70] ENCEVI, “Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares,” *Presentación de Resultados*, 2018. [https://cemioceano.mx/downloads/Presentación de resultados ENCEVI 2018.pdf](https://cemioceano.mx/downloads/Presentación%20de%20resultados%20ENCEVI%202018.pdf)
- [71] E. Biermann, M. Grupp, and R. Palmer, “Solar cooker acceptance in South Africa: Results of a comparative field-test” *Solar Energy* 66 (1999) 401–407.
- [72] D. Bravo Hidalgo, “Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica” *Ingeniería* 23 (2018) 144–165.
- [73] I. Samylingam, K. Kadirgama, N. Aslfattahi, L. Samylingam, D. Ramasamy, W. S. W. Harun, M. Samykano, and R. Saidur, “Review on thermal energy storage and eutectic nitrate salt melting point” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1078 (2021) 1–20.
- [74] W. Lu, G. Liu, Z. Xiong, Z. Wu, and G. Zhang, “An experimental investigation of composite phase change materials of ternary nitrate and expanded graphite for medium-temperature thermal energy storage” *Solar Energy* 195 (2020) 573–580.
- [75] D. Grogan, “Development of Molten-Salt Heat Transfer Fluid Technology for Parabolic Trough Solar Power Plants,” (2013).
- [76] J. Lopez, Z. Acem, and E. Palomo Del Barrio, “KNO₃/NaNO₃ - Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part II. - Phase transition properties” *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1586–1593.
- [77] GoSun, “All Products,” 2022. <https://gosun.co/collections/all>
- [78] B. J. Huang, Y. C. Huang, G. Y. Chen, P. C. Hsu, and K. Li, “Improving solar PV system efficiency using one-axis 3-position sun tracking” *Energy Procedia* 33 (2013)

280–287.

- [79] GoSun, “Fusion,” *Collection*, 2022. <https://gosun.co/products/fusion>
- [80] L. Harp, “Haines Solar Cookers LLC,” *Haines 2.0 Solar Cooker with Cooking Pot*, 2022. <https://hainessolarcookers.com/>
- [81] Y. Kong and J. N. Hay, “The enthalpy of fusion and degree of crystallinity of polymers as measured by DSC” *European Polymer Journal* 39 (2003) 1721–1727.
- [82] Y. Wang and P. Wang, “Application of Fourier’s Law in One-Dimensional Steady Heat Conduction Calculation of Cylinder Wall” *Journal of Physics: Conference Series* 2381 (2022) 012002.
- [83] D. D. Yahya, “Thermal Performance Testing of Parabolic Solar” *International Journal of Engineering Research and Technology* 6 (2013) 323–332..
- [84] ASAE Standard S-580.1, “Testing and Reporting Solar Cooker Performance.” 6., 2013. [Online]. Available: http://solarcooking.org/asae_test_std.pdf
- [85] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A heat transfer textbook, fourth edition*. 2017. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/lienhard/www/ahttv211.pdf>
- [86] E. Umbu Lolo, A. Y. Krismani, C. Sudaryantingsih, R. I. Gunawan, Y. S. Pambudi, Widiyanto, and A. D. Ngalung, “Analysis of Material and Energy Effects of Tofu Industry on Environmental Quality Using OpenLCA 1.103 Software (Case Study: Sari Murni Tofu Factory, Kampung Krajan, Mojosongo, Surakarta, Central Java, Indonesia)” *East Asian Journal of Multidisciplinary Research* 2 (2023) 1233–1250.
- [87] A. L. Norasikin, “Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region,” (2019). [Online]. Available: www.apec.org
- [88] M. Vásquez, L. Vásquez-Ibarra, R. Musule, and A. Iriarte, “Carbon Footprint of Wooden and Plastic Pallets: a Quantification With Different Software Tools” *Maderas: Ciencia y Tecnologia* 24 (2022) 1–16.
- [89] R. B. Cassel, “How Tzero Technology Improves DSC Performance Part V: Reducing Thermal Lag” *TA Instruments* (2001) 1–5..

- [90] R. B. Cassel, "High Heating Rate DSC," *TA Instruments*, 297. 1–11.
- [91] C. C. Co. L.L.C., "HITEC ® Heat Transfer Salt." 1–10., 2011.
- [92] J. Hyeon, J. Kim, C. Kang, and H. Hong, "A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method" *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 1225–1232.
- [93] L. Zou, X. Chen, Y. Wu, X. Wang, and C. Ma, "Experimental study of thermophysical properties and thermal stability of quaternary nitrate molten salts for thermal energy storage" *Solar Energy Materials and Solar Cells* 190 (2019) 12–19.
- [94] A. G. Fernández, H. Galleguillos, E. Fuentealba, and F. J. Pérez, "Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology" *J Therm Anal Calorim* (2015) 1–7.
- [95] T. R. Penki, D. Shanmugasundaram, B. Kishore, and N. Munichandraiah, "High rate capability of coconut kernel derived carbon as an anode material for lithium-ion batteries" *Adv. Mat. Lett.* 5 (2014) 184–190.
- [96] C. A. Wood, "An Analysis of the Rhombohedral and Hexagonal Structures," 2021.
- [97] T. Qiu, J. Yang, X. Bai, and Y. Wang, "The preparation of synthetic graphite materials with hierarchical pores from lignite by one-step impregnation and their characterization as dye absorbents" *RSC Adv.* 9 (2019) 12737–12746.
- [98] C. Spinel, "Detection of carbon nanostructures in carburized chromium-iron spinel" *Russian Physics Journal* 50 (2007) 87–92..
- [99] H. Marsh and F. Rodríguez-Reinoso, "Chapter 9 - Production and Reference Material," in *Activated Carbon*, 2006, 454–508.
- [100] D. Hou, K. Li, R. Ma, and Q. Liu, "Influence of order degree of coaly graphite on its structure change during preparation of graphene oxide" *Journal of Materiomics* 6 (2020) 628–641.
- [101] M. S. Sohal, M. A. Ebner, S. Piyush, and S. Phil, "Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties," (2013).

- [102] M. X. Ho and C. Pan, “Optimal concentration of alumina nanoparticles in molten hitec salt to maximize its specific heat capacity” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 70 (2014) 174–184.
- [103] B. Chakma, L. Serto, S. Kharpude, P. Narale, and S. M. Seveda, “Life cycle assessment analysis , embodied energy evaluation and economic aspect study of double mirror reflector box type solar cooker for NEH region of Sikkim” *International Journal of Green Energy* 19 (2022) 1005–1022.
- [104] P. Bendt, A. Rabl, H. W. Gaul, and K. A. Reed, *Optical Analysis and Optimization of Line Focus Solar Collectors*. 1979. [Online]. Available: https://solarcooking.fandom.com/wiki/Category:Solar_box_cooker_designs
- [105] United Nations Economic Commission for Europe, “Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources,” (2021). [Online]. Available: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>
- [106] A. Gallego-Schmid, J. M. F. Mendoza, and A. Azapagic, “Environmental assessment of microwaves and the effect of European energy efficiency and waste management legislation” *Science of the Total Environment* 618 (2017) 487–499.
- [107] Zeinscott, “STARLA,” *The Base Reaction Of NaOH HNO3*, 2023. <https://www.starlanguageblog.com/the-base-reaction-of-naoh-hno3/>
- [108] A. Bonk, M. Braun, and T. Bauer, “Phase diagram, thermodynamic properties and long-term isothermal stability of quaternary molten nitrate salts for thermal energy storage” *Solar Energy* 231 (2022) 1061–1071.