

CARACTERIZACIÓN Y USO DEL ACEITE DE PEPA DE AGUACATE COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALMACENAMIENTO EN FRÍO

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“CARACTERIZACIÓN Y USO DEL ACEITE DE PEPA DE AGUACATE COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALMACENAMIENTO EN FRÍO”

Realizado por:

EVELYN PAOLA REYES CUEVA

Director del proyecto:

Ing. Javier Martínez Gómez, Ph.D.

Como requisito para la obtención del título de:

**MASTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL
CON MENCIÓN EN EFICIENCIA
ENERGÉTICA**

Quito, 01 de septiembre del 2020

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, EVELYN PAOLA REYES CUEVA, con cédula de identidad # 171765814-8, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.


FIRMA

171765814-8

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“CARACTERIZACIÓN Y USO DEL ACEITE DE PEPA DE AGUACATE COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALMACENAMIENTO EN FRÍO”

Realizado por:

EVELYN PAOLA REYES CUEVA

Como Requisito para la Obtención del Título de:

MÁSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL

CON MENCIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Ha sido dirigido por el profesor

JAVIER MARTÍNEZ GÓMEZ

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Mónica Susana Delgado Yáñez

Jesús López Villada

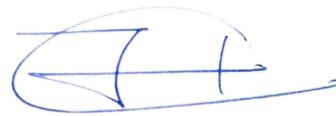
Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 01 de septiembre del 2020

CARACTERIZACIÓN Y USO DEL ACEITE DE PEPA DE AGUACATE COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALMACENAMIENTO EN FRÍO

DEDICATORIA

A ti, hijito mío, Israel Marcel, por quien todo lo he hecho y logrado desde que estas a mi lado, para que sepas que los sueños y las metas los tienes que cumplir, y como siempre te he dicho los obstáculos se superan porque los límites te los pones tú.

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios por la vida y la sabiduría que me ha otorgado para alcanzar esta profesionalización

A mi familia, mi Isra y a ti Santy por el tiempo que les quite y no puede compartir con Uds. Por tener que asistir a mis clases y estudiar, y todo el apoyo recibido de su parte.

A la universidad Internacional Sek por permitirme cursar esta maestría, sobre todo a mis profesores que con su conocimiento impartido fueron ejes principales en este paso.

A mis compañeros y amigos: Cristina, Paúl y Jimena, por tantas noches de desvelos y tantos buenos ratos compartidos.

A mis amigos, guías y compañeros de trabajo Carlos Solís y Marco Dalgo que me dieron la confianza y oportunidad de estudiar mientras laboraba.

A mi director de tesis Javier Martinez, quien me motivó y ayudó a poder culminar este trabajo.

A la gente del Instituto de Investigación Geológico y Energético en especial a Marco Orozco y a Francis Vásquez por su ayuda en los ensayos realizados para esta tesis.

CARACTERIZACIÓN Y USO DEL ACEITE DE PEPA DE AGUACATE COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE PARA LA MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALMACENAMIENTO EN FRÍO

01/09/2020 16:00:00

Para someter a:

To be submitted:

Caracterización y uso del aceite de pepa de aguacate como material de cambio de fase para la mejora de eficiencia energética en el almacenamiento en frío

Evelyn Reyes-Cueva¹, Javier Martínez-Gómez¹,

¹ Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito,

Ecuador. 06/08/2017 23:25:33

*AUTOR DE CORRESPONDENCIA: Javier Martínez-Gómez PhD, Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Ambientales y Naturales, Quito, Ecuador.

Teléfono: +593-; email: javier.martinez@uisek.edu.ec

Título corto o Running title: Caracterización de la pepa de aguacate como PCM.

Resumen.

Es importante el desarrollo de nuevos materiales de cambio de fase que actúen a bajas temperaturas para facilitar su uso en contenedores de transporte y almacenamiento de productos.

Al conocer que los aceites vegetales proveen buenas propiedades para este fin, se realizó el estudio al aceite proveniente de la pepa de aguacate por medio de la Calorimetría Diferencial de Barrido, Espectrometría Infrarroja y Termogravimetría para determinar sus propiedades y catalogarlo como un material de cambio de fase.

Con las propiedades obtenidas a partir de los ensayos realizados se procedió a efectuar una simulación en el programa Solidworks para conocer la diferencia entre usar o no el PCM en una caja isoterma utilizada tanto para el transporte o almacenamiento de productos a bajas temperaturas.

Los análisis se realizaron a diferentes composiciones del aceite según el punto de maduración de las semillas; siendo el producto correspondiente a las pepas maduras el tomado en consideración para la simulación.

Los resultados arrojados principalmente por la DSC nos da una entalpía de fusión de 52.93 J/g, para la Termogravimetría se tiene que a las temperaturas de 308.52°C y 441.43°C se da el inicio y final de la degradación del aceite bajo atmósfera de nitrógeno correspondientemente y que a 240.21 °C y 545.3°C se dan las temperaturas de degradación inicial y final con atmósfera de aire, lo cual, muestra que se puede dar uso al aceite para bajas temperaturas, la prueba de FTIR nos indica los grupos funcionales de los que está formado el aceite y su estabilidad química.

Con la simulación se demostró que el aceite pudo trabajar como un PCM a bajas temperaturas comparando su uso en la caja isotérmica de PPE, teniendo como resultado que sin el PCM el aire interior de la caja llega en promedio a los -8.17 °C y de -11.8°C con el PCM luego de pasadas 7 horas, teniendo en cuenta una temperatura inicial de la caja de -14°C y una temperatura ambiente de 25°C y la temperatura inicial del PCM de -23°C.

Palabras clave:

MCF, aceite pepa de aguacate, caracterización de materiales, FTIR, TGA, DSC, simulación térmica, eficiencia energética, almacenamiento en frío, material cambio de fase, simulación térmica.

Abstract.

The development of new phase change materials that act at low temperatures is important to facilitate their use in product transport and storage containers.

Knowing that vegetable oils provide good properties for this purpose, the oil from avocado seed was studied using Differential Scanning Calorimetry, Infrared Spectrometry and Thermogravimetry to determine its properties and classify it as a material of exchange of phase.

With the properties obtained from the tests carried out, a simulation was processed in the Solidworks program to know the difference between using or not using the PCM in an isothermal box used both for the transport or storage of products at low temperatures.

The analyzes are found at different oil compositions according to the ripening point of the seeds; the product corresponding to the mature seeds being taken into consideration for the simulation.

The results produced mainly by the DSC give us an enthalpy of fusion of 52.93 J / g, for Thermogravimetry it is had that the temperatures of 308.52 ° C and 441.43 ° C give the beginning and end of the degradation of the oil under the temperature of nitrogen correspondingly and at 240.21 ° C and 545.3 ° C the initial and final degradation temperatures are given with an air atmosphere, which shows that the oil can be used for low temperatures, the FTIR test indicates the functional groups of the that the oil is formed and its chemical stability.

The simulation showed that the oil could work as a PCM at low temperatures, comparing its use in the PPE insulated box, with the result that without the PCM, the air inside the box reaches an average of -8.17 ° C and - 11.8 ° C with the PCM after 7 hours, taking into account an initial temperature of the box of -14 ° C and an ambient temperature of 25 ° C and the initial temperature of the PCM of -23 ° C.

Key words:

PCM, avocado seed oil, materials characterization, FTIR, TGA, DSC, energy simulation, energy efficiency, cold storage, phase change material, thermal simulation

Introducción.

Actualmente en el mundo las políticas energéticas se enmarcan en el aprovechamiento de las energías renovables, las cuales aportan con bajar el uso de energías convencionales y por lo tanto apoyar en el mejoramiento del cambio climático (Macas, 2015) (Fontaine & Puyana, 2008) (Altomonte et al., 2003).

El problema es que estas políticas, muchas veces estas presentan una divergencia en el tiempo entre su generación y su demanda, de esta manera los sistemas de almacenamiento de energía diseñados de forma adecuada pueden mejorar este problema (García, 2015).

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ayudar a reducir el consumo de energía, su pico de demanda y por lo tanto las emisiones de CO₂, por lo cual llegan para mejorar la eficiencia energética en los usos en donde se las vincule, de esta manera los sistemas de almacenamiento térmico pueden ayudar a encontrar un arquetipo energético sostenible (Irena, 2013).

Una herramienta útil para el aumento de la eficiencia energética es el almacenamiento de energía ((Rozanna, Chuah, Salmiah, Choong, & Sahari, 2005) (MartChicharro, 2016).

Existen dos formas de almacenamiento de energía térmica como son: la de calor latente y la de calor sensible (Guacaneme et al., 2014) (Oliver, Neila, & García-Santos, 2012) (Mírez Tarrillo, 2012).

La energía de calor latente es la más atractiva por su capacidad de almacenaje y su gran liberación de energía por unidad de peso de los materiales de cambio de fase PCM, por sus siglas en inglés, a una casi constante temperatura y donde se compensa los desequilibrios de energía entre el consumo y la generación de calor (Sharma et al., 2014).

El PCM más conocido es el agua, el cual es utilizado principalmente en el almacenamiento en frío, al ser estable, confiable, seguro y mostrar buenas propiedades térmicas, además de ser económico poseer alta densidad, calor específico y latente alto

(Demirbas, 2006).

El transporte y almacenamiento de alimentos a temperaturas bajas va haciéndose día a día un tema relevante alrededor del mundo, al relacionarse con la creciente población y el actual estilo y ritmo de vida, por lo cual siempre es importante ir mejorando todo lo relacionado con cadenas de frío en las varias aplicaciones que tienes que ver con el almacenamiento y transporte en frío de alimentos (Oró et al., 2012)

Es importante una correcta selección de materiales en lo que respecta al almacenamiento de calor para contar con una buena eficiencia energética, ahorro económico y vida útil del sistema, por lo que el estudio de estos PCM se ha dado para mejorar y desarrollar sus utilidades, con lo cual se han investigado eutécticos inorgánicos-inorgánicos, orgánicos-inorgánicos y orgánicos-orgánicos por sus propiedades energéticas. (Sari, 2006), pero es interesante conocer que la tendencia en el futuro es el desarrollo de PCM orgánicos (Sharma, 2015).

Bajo todos estos estudios realizados los que mayor interés han despertados por sus ventajas con respecto a su fusión adecuada, alto calor de fusión latente, costo bajo, no ser corrosivos, presentar menor variación de volumen en el cambio de fase, disponibilidad, al no ser tóxicos ni inflamables, no presentar subenfriamiento, son los ácidos grasos; además de que estos se encuentran presentes en los aceites animales y vegetales siendo un abastecimiento constante contrario a las fuentes de combustibles habituales (Cedeño, 2001).

Hay que tener en cuenta que los materiales que están siendo utilizados comúnmente en las aplicaciones de calor latente son de alto costo y se producen a partir materia no renovable principalmente derivadas de la industria petroquímica, siendo así que se ha propuesto la producción de este tipo de materiales a partir de materia prima renovable, barata, siendo atractivas aquellas procedentes de grasas animales y aceites vegetales (Fabiani,2020), es así que el almacenamiento de energía con ayuda del uso de ácidos grasos

ha ido en aumento en los últimos años, por su buen desempeño termodinámico y cinético para el almacenamiento de calor latente a baja temperatura (Sharma,2005).

Hay que tener en cuenta que existe una variedad de productos que necesitan conservarse a una temperatura constante, siendo así que deben mantener la misma tanto en su almacenamiento como en su transporte, es así que para esto se necesita mantener una cadena de frío, utilizando para ello vehículos, camiones o buques frigoríficos, pero el problema se da cuando el producto que se transporta o almacena es de pequeñas proporciones, como por ejemplo la transportación de vacunas, medicamentos, muestras o sangre y es en estas donde entra el uso de materiales de cambio de fase, normalmente para este tipo de aplicaciones se usaba la nieve y el hielo, y con el pasar del tiempo se cambió al uso de nitrógeno líquido y de hielo seco (Domínguez et al., 2008).

Las principales características a tomar en cuenta en los PCM y su uso a bajas temperaturas serían: alto calor latente de transición, sin sobre-enfriamiento, alta tasa de cristalización, cambio despreciable de volumen, compatibilidad con materiales de contenedores, ausencia de corrosividad, disponibilidad, bajo costo, reciclabilidad (Abuelnuor et al., 2018). Completar el ciclo de congelación reversible es decir que pueda derretirse, que no exista degradación luego de varios ciclos de congelación y derretimiento, que no produzca corrosión en los materiales a para construcción y los de encapsulación (Oró et al., 2012).

Entre las principales aplicaciones de los PCM a bajas temperaturas se encuentran los contenedores de transporte utilizados para varias aplicaciones entre las cuales se pueden citar, manejo de alimentos, bebidas, productos farmacéuticos derivados de sangre, biomedicinas, circuitos electrónicos (Mehling H., Cabeza L.F., 2008).

Se han realizado estudios con nanofluidos como PCM, teniendo como resultado ser materiales adecuados en usos de almacenamiento de energía a baja temperatura (He, Wang,

Tong, & Liu, 2012).

El estudio de estos materiales ha despertado curiosidad, por lo que con el pasar de los años se investigan nuevos materiales y nuevas formas de obtención, así como mejorar el medio en el que trabajan, para que, sus aplicaciones sean mayores y en las que ya se están utilizados tengan mayor eficiencia energética.

A partir del conocimiento y desarrollo de las propiedades de estos materiales, se ha dado paso a estudios para optimizar el almacenamiento de energía térmica con mejoras en los costos de producción, tomando en cuenta estas cualidades y propiedades, para elegir mediante diferentes métodos de selección los más recomendables (Martínez-Gómez, Urresta & Guerrón, 2017).

El desarrollo e investigación de estos materiales es importante por su alto calor latente durante la transición de fase, por tal razón es necesaria su correcta selección teniendo en cuenta su clasificación (orgánicos/inorgánicos), relación con otros materiales y con ellos mismos y aplicaciones en diferentes ámbitos.

Estos materiales de acuerdo a su composición presentan ventajas y desventajas en sus propiedades, por lo tanto en sus aplicaciones, por lo que es indispensable un buen método de selección y comparación.

Se debe tener en cuenta que las técnicas de encapsulamiento desarrolladas en los últimos años hacen que estos materiales sean amigables con el ambiente, y que puedan ser elementos utilizados en construcción (Hyun et al., 2014).

Las semillas de aguacate se consideran un residuo, desecho o subproducto de la industria alimenticia, (Segovia et al., 2018) (Silva et al., 2017) (Lee & Young, 1984), por lo que da paso a que la investigación realizada sea considerada atractiva al aprovechar este producto para darle un nuevo uso y que no vaya directamente al final de su vida útil, cabe destacar que muchos de los estudios se han enfocado en otras áreas y no la de conservación

de calor a bajas temperaturas, es así que se encuentran usos como: en la industria del recubrimiento como aglutinante de copolímero (Gidigbi et al., 2019), por medio de pirólisis creación de biomasa tanto como carbón mineral y aceite (Durak & Aysu, 2015), su potencial uso como biocombustible (Dominguez, 2014), según estudios las semillas de aguacate han mejorado la hipercolesterolemia, hipertensión, afecciones inflamatorias y diabetes, es decir se han realizado en el campo médico, además de poseer propiedades insecticidas, fungicidas y antimicrobianas, y de su uso como tinta para escribir (Dabas, 2013), la aplicación del aceite virgen de pepa de aguacate como biodiesel (Dagde, 2019), entre otros.

Se debe hacer énfasis que por el contrario otros aceites vegetales o sus mezclas han sido considerados como materiales de cambio de fase, de esta manera se puede mencionar el caso del éster de aceite de maíz y su mezcla con agua como material de cambio de fase para aplicaciones de refrigeración de alimentos, analizando sus propiedades por el método DSC (Nyoman Suamir et al., 2019, estudios con grasa vegetal hidrogenada de almendra de palma, como material de base biológico usado como PCM (Boussaba et al., 2019).

Por otra parte, el desarrollo del presente estudio a la vez implica que:

Otros investigadores puedan Comprender y conocer los beneficios de tratar a este aceite como PCM.

Exista un beneficio al medio ambiente al ser un aceite proveniente de una pepa vegetal lo cual lo hace sostenible y atractivo al mercado nacional, al ser también un producto autóctono pudiéndose encontrar una aplicabilidad interesante a lo que talvez se considera solamente como un desecho orgánico.

Se busca beneficiar al desarrollo de contenedores de almacenamiento y transporte en frío con el uso de productos amigables con el medio ambiente, y que a la vez le permitan mejorar la eficiencia energética en estas aplicaciones, evitando el uso de sistemas de enfriamiento costosos y complejos, y cambiarlos por otros más simples y económicos con el

uso de PCM de ácidos grasos.

Planteamiento del problema

Es frecuente encontrar varios estudios sobre los materiales de cambio de fase (PCM), es así que sus estudios despegan alrededor de los años 70, creciendo exponencialmente hasta la presente fecha según datos obtenidos de SCOPUS como se observa en la Figura 1.

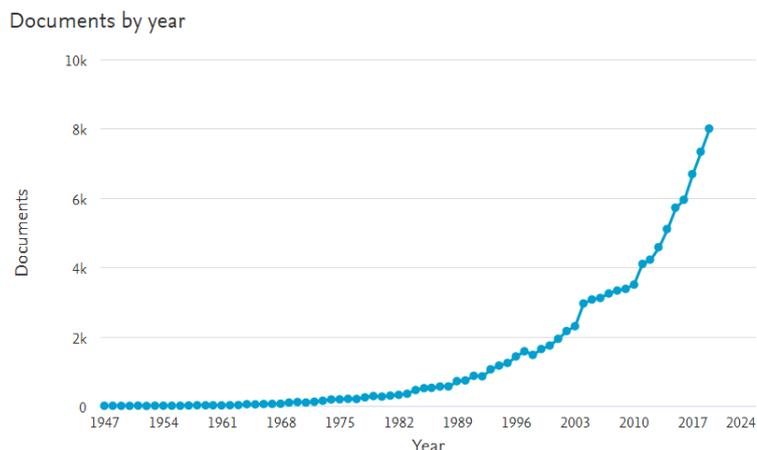


Figura 1. Estudio de materiales de cambio de fase por año

(SCOPUS, 2020)

Se puede evidenciar que existe poco desarrollo en los países de América a excepción de EEUU y Canadá indicados en la figura 2 y Figura 3.

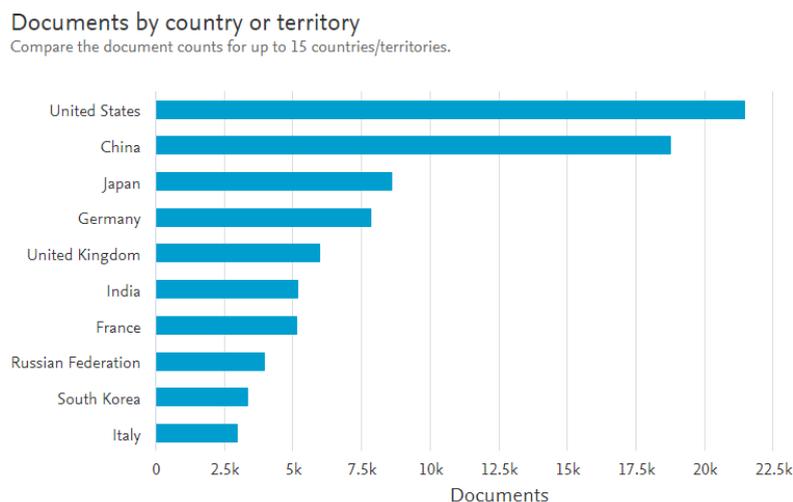


Figura 2. Estudios de materiales de cambio de fase por país (nivel mundial)

(SCOPUS, 2020)

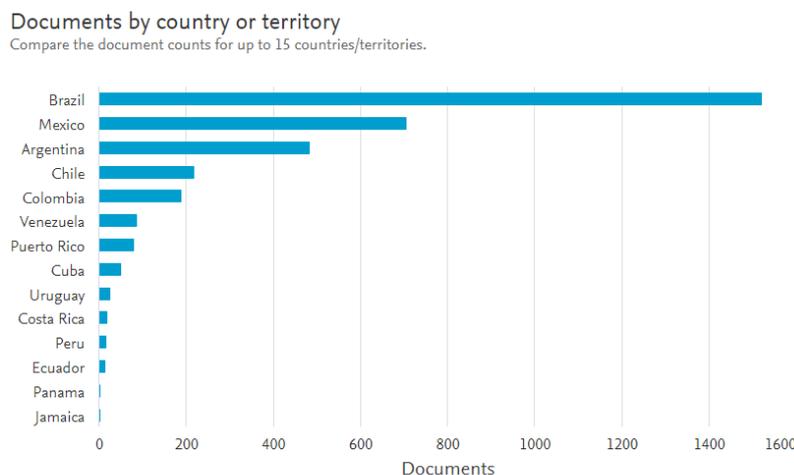


Figura 3. Estudios de materiales de cambio de fase por país (Latinoamérica)

(SCOPUS, 2020)

Por otra parte, si bien se ha tratado de dar aplicabilidad a bajas temperaturas los PCM estudiados han afectado a los sistemas donde se los han utilizado, presentando corrosión y sub-enfriamiento, ya que de los que se disponen datos son en su mayoría mezclas eutécticas de agua y sales, parafinas, y soluciones salinas.

De la misma forma es esencial indicar que tanto medicamentos, vacunas, sangre y ciertos alimentos, son muy idóneos para sufrir cambios bruscos de temperatura, lo que es necesario que se pueda asegurar el control de su temperatura hasta el momento de su utilización, por esta razón es necesario mantener una buena cadena de frío para evitar procesos de degradación de los productos, por lo que es necesario apoyarnos en un estudio de PCM que apoyen a mantener esta cadena aprovechando sus características de eficiencia energética.

Con respecto al tema de PCM orgánicos y nuevos a partir de aceites, no existe una amplia bibliografía.

Por todo lo anteriormente planteado, es muy necesario caracterizar un nuevo PCM para trabajos a bajas temperaturas, para de esta forma dar una nueva posibilidad de aplicación, teniendo en cuenta que el material se vuelve sostenible y se aprovecha su utilidad,

ya que muchas veces estas pepas solamente terminan como desecho orgánico.

Hipótesis

El aceite de pepa de aguacate, manejado como PCM va a ser útil para mejorar la eficiencia energética en los contenedores de transporte y almacenamiento en frío, puesto que, es un material que muestra óptimas características en el cambio de fase sólido-líquido, y no presentan cambios significativos de volumen en este proceso, todo esto a través de la institución de nueva tecnología eco-eficiente.

Objetivos

Objetivo General

- Caracterizar el aceite de pepa de aguacate mediante las técnicas de Espectrometría Infrarroja, Calorimetría Diferencial de Barrido y Termogravimetría, para el respectivo análisis de su temperatura de cristalización, entalpía de cristalización y su capacidad de almacenamiento energético, para que este aceite sea considerado un material de cambio de fase y con base en estas características encontradas buscar mejorar la eficiencia energética en los contenedores de transporte y almacenamiento en frío, utilizando el método de simulación computacional.

Objetivos Específicos

- Reproducir los métodos encontrados tanto para la obtención de ácidos grasos como de caracterización de aceites, para el caso del aceite de la pepa de aguacate.
- Analizar las características térmicas del aceite de pepa de aguacate según la mezcla de porcentaje de maduración.
- Realizar una simulación computacional de la aplicación del PCM del aceite de la pepa de aguacate en contenedores de transporte y almacenamiento en frío.
- Identificar las principales ventajas y desventajas de la utilización del aceite de pepa de aguacate como PCM en contenedores de transporte y almacenamiento en frío

Estado del Arte

Almacenamiento de Energía

La energía que puede ser almacenada por medio de la utilización del calor o frío se conoce como energía térmica, es así que el almacenamiento térmico es aquel que se fundamenta en el calor sensible o en el calor latente (Paredes et al., 2010), este almacenamiento de energía es necesario para poderlo usar con posterioridad, para lo cual debe ser reversible por lo que esta almacenamiento debe ser capaz de liberar y absorber calor (GARCÍA GONZALEZ., 2015).

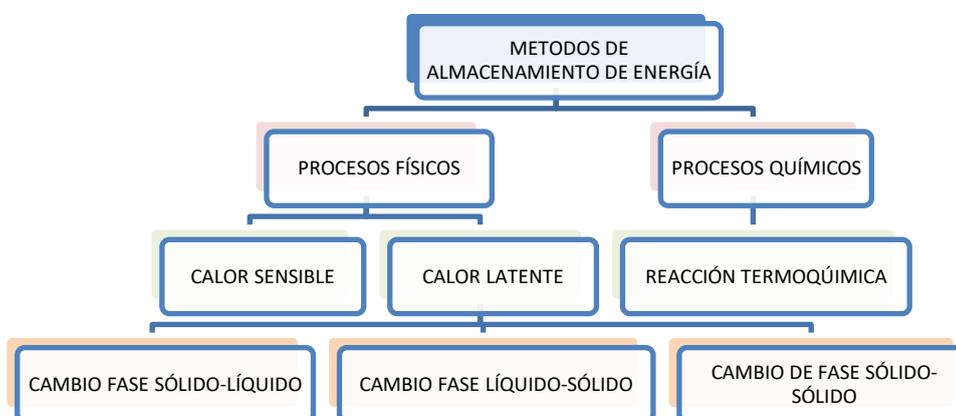


Figura 4. Esquema de métodos posibles de almacenamiento de energía térmica

Adaptado de (Mehling H., 2008)

Calor sensible

Es aquel calor que ingresa a un cuerpo por lo cual aumenta su temperatura, pero no afecta a los estados inicial y final de la materia, por lo tanto, a la estructura molecular cristalina, es así que la cantidad de calor por masa de un cuerpo necesario para elevar su temperatura se conoce como calor específico.

Si se utiliza un material como medio de almacenamiento, la energía térmica depende del calor específico de este, de esta manera se puede acumular energía mediante el calor sensible, calculado de la siguiente forma dada por la Ecuación 1 y Ecuación 2, según

corresponda (García Mayayo, 2012):

$$Q_s = \Delta H = mC_p(T_2 - T_1)$$

Ecuación 1. Energía térmica a presión constante

Donde:

Qs: calor sensible

H: es la entalpía del sistema.

m: masa del cuerpo

Cp: calor específico a presión constante

T2: temperatura final del cuerpo

T1: temperatura inicial del cuerpo

$$Q_s = \Delta U = nC_v(T_2 - T_1)$$

Ecuación 2. Energía térmica a volumen constante

Donde:

Qs: calor sensible

U: es la energía térmica del sistema.

n: moles de sustancia

Cv: calor específico a volumen constante

T2: temperatura final del cuerpo

T1: temperatura inicial del cuerpo

Calor Latente

El calor latente no es más que la cantidad de energía necesaria para que una sustancia cambie de fase, para que esto suceda la sustancia absorbe o cede una cantidad de calor, siendo así que cuando el calor es positivo (calentamiento) existe una absorción y cuando el calor es negativo (enfriamiento) existe una cesión que se puede observar en la Figura 6 (García Mayayo, 2012).



Figura 5. Esquema cambio de fase entre estados de la materia.

En base a varios cálculos se ha determinado que el calor latente de un material es mucho mayor que su calor sensible, de lo que se puede indicar que en el cambio de fase la acumulación de energía es mayor, por lo que con una menor cantidad de masa se puede obtener la mayor densidad de almacenamiento energético.

De esta manera la energía que se acumula por el calor latente se encuentra dada por la Ecuación 3:

$$Q_l = m\Delta h_{cf}$$

Ecuación 3. Energía de calor latente

Donde:

Q_l : calor latente

m : masa de la sustancia

Δh_{cf} : entalpia de cambio de fase

En la Figura 9. Se evidencia la diferencia entre calor latente y calor sensible del estado sólido, cuando en un material es adicionado calor, este almacena energía (calor sensible), por lo tanto, existe un incremento de temperatura, pero una vez que se llega a la temperatura de cambio de fase la energía almacenada se encuentra en forma de calor latente es decir que la temperatura se permanecerá constante en el lapso de cambio de estado, para luego volver al almacenamiento por calor sensible (GARCÍA GONZALEZ., 2015)

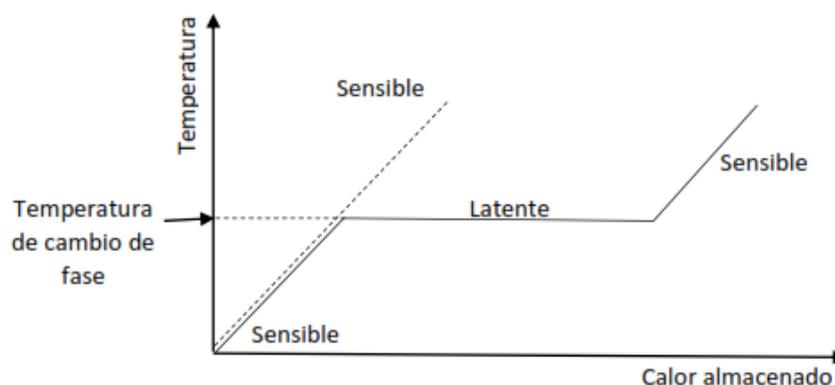


Figura 6. Almacenamiento de calor como calor latente para el caso de cambio de fase sólido-líquido (GARCÍA GONZALEZ., 2015).

Materiales de cambio de fase

Se conoce como materiales de cambio de fase (PCM) a aquellos cuya característica principal es almacenar o ceder energía en grandes cantidades al mantener constante la temperatura durante el cambio de fase o estado, son también conocidos como materiales de almacenamiento de calor latente (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009).

Si hablamos de materiales para almacenamiento y conservación de energía térmica de calor latente, los materiales de cambio de fase son los mejores candidatos, teniendo en cuenta que proveen las siguientes ventajas en sus aplicaciones: pueden almacenar en un pequeño volumen gran calor latente, las pérdidas de calor cuando son aplicados en un sistema son mínimas, al presentar a una temperatura casi constante el cambio de fase se logra tener un excelente confort térmico en aplicaciones para enfriamiento o calentamiento de espacios (Li, Liu, & Zhang, 2014).

Características de los materiales de cambio de fase.

Para generalizar a los materiales de cambio de fase se pueden anotar estas como principales características:

- Poseen una alta densidad de almacenamiento.
- Las pérdidas energéticas provenientes de la variación de temperatura son reducidas en estos materiales.
- Según el tipo de material aportan con la disponibilidad de seleccionar la temperatura a la que van a trabajar según su aplicación (Oliver, Neila, & García-Santos, 2012).

En la Tabla 1 se indican las principales características de los PCM en diferentes ámbitos.

Tabla 1.

Características Materiales Cambio de Fase

| Térmicas | Físicas | Cinéticas | Químicas | Económicas |
|------------------|------------------|---------------------|-----------------|--------------|
| -Adecuada | -Favorable | -Sin sobre- | -Estabilidad | -Abundantes |
| Temperatura de | equilibrio de | enfriamiento | química a largo | -Disponibles |
| Cambio de fase | fase | -Suficiente tasa de | plazo | -Rentables |
| -Alto calor | -Alta densidad | cristalización | -Compatibilidad | |
| latente de | -Pequeñas | | con materiales | |
| transición | variaciones | | de construcción | |
| -Buena | volumétricas | | -sin toxicidad | |
| transferencia de | -Baja presión de | | -sin peligro de | |
| calor | vapor | | incendio | |

Nota, tabla adaptada Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009.

Clasificación de materiales de cambio de fase.

La principal clasificación de los PCM de acuerdo a su composición química es: orgánicos, inorgánicos y eutécticos (Li et al., 2014), (Abuelnuor, Omara, Saqr, & Elhag, 2018) (Juárez Varón et al., 2012) (Hyun, Levinson, Jeong, & Xia, 2014), cada uno con sus sub-clasificación como se muestra en la Figura 5.

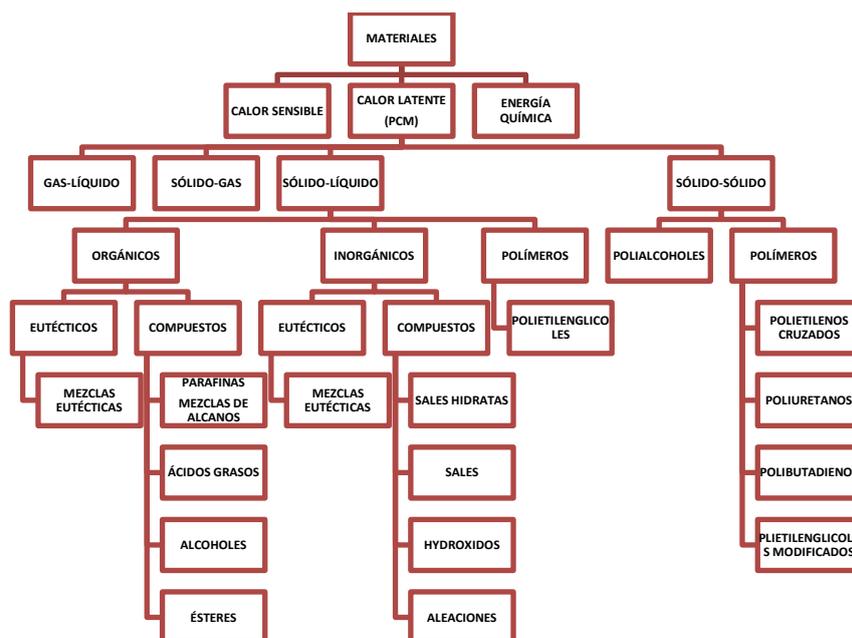


Figura 7. Clasificación de los materiales de cambio de fase

(Pielichowska & Pielichowski, 2014).

Teniendo en cuenta que cada clasificación tiene sus propias características, ventajas y desventajas, lo que abre un amplio campo para su utilización, es así que los orgánicos se pueden considerar confiables, económicos, inertes químicamente, seguros, no corrosivos y estables durante su fundición, propiedades físicas y químicas estables, casi no poseen sobre-enfriamiento ni segregación, como desventaja presentan baja conductividad térmica, inflamabilidad y baja entalpía; los inorgánicos poseen gran capacidad de almacenamiento con respecto a su volumen, no son inflamables, poseen alta capacidad térmica y baja presión de vapor, pero como desventaja, se presentan alta corrosividad, inestabilidad y sobre-enfriamiento; los eutécticos que pueden ser una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos la cual presenta al cambio de fase una temperatura fija, conociendo que los materiales que forman el PCM eutéctico poseen el punto de fusión más elevado que cuando están mezclados, congelan o funden sin segregación además de tener una gran densidad de almacenamiento volumétrico, lastimosamente son muy limitados con respecto a su

disponibilidad (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018), (Abuelnuor et al., 2018).

Usos y aplicaciones de los materiales de cambio de fase.

Las aplicaciones de los PCM abarcan todas aquellas donde se requiera almacenamiento de energía, o mantenimiento de temperatura.

Si bien existe varios tipos de PCM, según su composición y características pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones y usos, entre estos se pueden destacar:

“Sistemas solares térmicos, sistemas de calentamiento de agua, en sistemas de energía de baja entalpía, en sistemas termorreguladores para la conservación de alimentos, en plantas termoeléctricas”. (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018).

Las principales aplicaciones desarrolladas hasta el día de hoy tienen que ver con el confort térmico para construcciones, protección de dispositivos electrónicos y almacenamiento para sistema de enfriamiento (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018).

Otras aplicaciones que se han dado a los PCM son para uso en tanques de agua caliente sanitaria, calefacción y aire acondicionado en edificios, refrigeración, transporte y almacenamiento de alimentos, bebidas, productos farmacéuticos, derivados sanguíneos (Oró, de Gracia, Castell, Farid, & Cabeza, 2012).

Con los últimos avances tecnológicos y un estudio más profundo de este tipo de materiales se han encontrado nuevos usos entre los cuales se pueden citar:

Calentadores (termos) de bolsillo, fibras y tejidos, contenedores de transporte, sistemas de energía solar para almacenamiento de electricidad, administración de fármacos, almacenamiento de información y dispositivos de memoria, detección de biomarcadores de cáncer, códigos de barras (Hyun et al., 2014).

Así mismo, se puede citar, el almacenamiento de energía térmica solar, construcción

bioclimática, regulación de temperatura y protección térmica de dispositivos electrónicos, secado, desalinización de agua, conservación de temperatura de invernadero, terapias de frío y calor para tratamientos médicos, plantas de energía solar, sistemas térmicos aeroespaciales, En reacciones químicas ayuda con el ablandamiento de picos de temperatura exotérmicos (Jain, Kumar, Shukla, & Sharma, 2017).

Materiales de cambio de Fase y Eficiencia Energética.

El estudio de estos materiales ha despertado curiosidad, por lo que con el pasar de los años se investigan nuevos materiales y nuevas formas de obtención, así como mejorar el medio en el que trabajan, para que, sus aplicaciones sean mayores y en las que ya se están utilizados tengan mayor eficiencia energética.

A partir del conocimiento y desarrollo de las propiedades de estos materiales, se ha dado paso a estudios para optimizar el almacenamiento de energía térmica con mejoras en los costos de producción, tomando en cuenta estas cualidades y propiedades, para elegir mediante diferentes métodos de selección los más recomendables (Martínez-Gómez, Urresta & Guerron, 2017).

Para la mejora de rendimientos térmicos se están desarrollando PCM en nanofluidos, que demuestran mayores características de eficiencia para aplicaciones de almacenamiento en frío, con lo que se espera que estos reemplacen a los PCM convencionales en estas aplicaciones (Liu, Zhou, Tong, & Zhou, 2009).

Por sus características técnicas y aplicaciones, por ejemplo, la selección que se realiza tomando en cuenta la aplicación de ahorro de energía en invernaderos, basados en hidratos de sal, parafinas y polietilenglicol, con variaciones en los tipos de intercambiadores de calor, tipo de almacenamiento y cantidades de PCM utilizadas por m² de suelo del invernadero (Kurklo, 1998).

Los ácidos grasos pueden ser otra opción en el momento de querer elegir nuevos

PCM, sobre todo en lo que respecta a aplicaciones para almacenamiento de energía térmica solar, al ser estos derivados de aceites vegetales y animales, garantizan un suministro continuo, teniendo en cuenta, además, del ahorro que ofrecen en el almacenamiento sino también con el efecto de mejora del confort térmico en su uso en aplicaciones para la construcción de edificios (Rozanna, Chuah, Salmiah, Choong, & Sa'ari, 2005).

La eficiencia energética puede mejorarse con el uso de PCM en lo que respecta a instalaciones de climatización, además se debe tener en cuenta que se debe popularizar su empleo, mediante estudio de nuevos PCM con respecto a la transmisión de calor y la viabilidad económica de estas aplicaciones, al tratarse de materiales con pocos riesgos y grandes beneficios, tomando en cuenta que globalmente lo que se necesita es mejorar los costos en la energía (Domínguez, Csic, & Novais, 2009).

Las grasas vegetales como materiales de cambio de fase

Las ácidos grasos que se encuentran en las grasas y aceites vegetales son considerados como PCM orgánicos, muchos de estos tienen mejores propiedades que otros PCM de esta manera presentan gran estabilidad química, un apropiado rango de temperaturas de fusión, no son tóxicos, tienen alto calor latente, no presentan sobreenfriamiento o este es casi nulo, y baja corrosividad (Rozanna et al., 2005) (Bouciquez, 2006).

Hay que tener en cuenta que los aceites y grasas vegetales tienen su punto de fusión a temperatura útiles para el almacenamiento de energía térmica, por lo que por sus características podrían utilizar como materiales de cambio de fase en aplicaciones comerciales, siendo que estos lleguen a ser una mejor alternativa en frente a las sales y parafinas (Suppes et al., 2003).

Ácidos grasos en la pepa de aguacate

Según del estudio de Bora (2001) en la semilla de aguacate se determinaron los siguientes ácidos grasos (Tabla ##) por medio de una cromatografía de gases, teniendo de esta manera

los porcentajes mostrados, para los ácidos grasos saturados un 32,495%, un 20,712% de los monoinsaturados y finalmente 46.726% para los polyinsaturados.

Tabla 2.

Ácidos grasos encontrados en la pepa de aguacate

| Ácidos Grasos | % total de ácidos grasos |
|--|--------------------------|
| Ácidos grasos saturados | 32.495 |
| Hexanóico (C6:0) | 0.800±0.045 |
| Heptanóico (C7:0) | 0.29±0.097 |
| Octanóico (C8:0) | 0.278±0.052 |
| Nonanóico (C9:0) | 0.217±0.006 |
| Decanóico (C10:0) | Tr |
| Undecanóico (C11:0) | Tr |
| Dodecanóico (C12:0) | 0.278±0.051 |
| Tridecanóico (C13:0) | 0.166±0.011 |
| Tetradecanóico (C14:0) | 0.537±0.052 |
| Pentadecanóico (C15:0) | 2.334±0.110 |
| Hexadecanóico (C16:0) | 20.847±0.843 |
| Heptadecanóico (C17:0) | 1.725±0.022 |
| Octadecanóico (C18:0) | 1.185±0.011 |
| Nonadecanóico (C19:0) | 0.610±0.341 |
| Eicosanóico (C20:0) | 0.043±0.020 |
| Docosanóico (C22:0) | 1.114±0.023 |
| Tetracosanóico (C24:0) | 1.685±0.045 |
| Monoinsaturados | 20.712 |
| 9-tetradecenoic acid (C14:1) | 0.251±0.002 |
| 10-pentadecenoic acid (C15:1) | 0.321±0.159 |
| 9-hexadecenoic acid (C16:1) | 1.786±0.325 |
| 10-heptadecanoic acid (C17:1) | 0.372±0.083 |
| 9-octadecenoic acid (C18:1) | 17.410±0.058 |
| 11-eicosenoic acid (C20:1) | 0.448±0.277 |
| 13-docosenoic acid (C22:1) | 0.124±0.043 |
| Polyinsaturados | 46.726 |
| 9,12-octadecadienóico (C18:2) | 38.892±0.585 |
| 9,12,15-octadecatrienoic acid (C18:3) | 6.577±0.028 |
| 11,14,17-eicosatrienoic acid (C20:3) | 1.257±0.030 |
| proporción de ácidos Insaturados/Saturados | 2.07 |
| proporción de Polyinsaturados/Saturados | 1.44 |
| proporción de ácidos oléicos/linoléicos Oleic/Linoleic | 0.45 |

*Tr- Trazas (concentración menor al 0.06% del total de ácidos grasos)

(Bora et al., 2001)

Caracterización de Materiales

Caracterizar materiales es establecer características de un material en especial, es decir conocer al material cualitativa y cuantitativamente, desde el estudio de sus diferentes propiedades sean estas de estructura, físicas, químicas, térmicas, entre otras, según la aplicabilidad de los materiales (Curia, 2010).

Métodos de caracterización.

Para el caso de estudio se tomarán en cuenta los siguientes métodos de caracterización:

- Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018).
- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018). (Solís-fuentes & Durán-de-bazúa, 2010).
- Termogravimetría (TGA) (Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K., 2018), (Solís-fuentes & Durán-de-bazúa, 2010).

Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

Este método estudia la relación entre la radiación infrarroja y la materia.

Los grupos funcionales en una molécula pueden ser perceptibles con la espectroscopia infrarroja, con lo cual se identifican fácilmente propiedades químicas comunes en fragmentos estructurales de estos.

La espectroscopia se fundamenta en el comportamiento que manifiestan las vibraciones y rotaciones de los enlaces los átomos al ser irradiados con luz infrarroja, de este modo cada molécula absorberá radiación según su enlace, por lo que puede ser reconocida (Curia, 2010).

La espectroscopia Infrarroja posibilita identificar varias especies químicas al poder determinar la frecuencia de los diferentes grupos funcionales, al mostrar bandas de absorción

en el espectro infrarrojo, con la ayuda de la intensidad de las mismas se puede determinar la concentración de las diferentes especies, permitiendo de esta forma comparar espectros para saber si varias muestras tienen la misma composición.

Entre las ventajas de este método se tiene que, examina muestras en cualquier estado físico (líquido, sólido, gaseoso), es rápida y simple al dar resultados inmediatos con una buena precisión, es una técnica económica.

Entre sus desventajas es que las muestras deben estar compuestas por enlaces químicos, por lo que no se puede utilizar en iones monoatómicos ni en molecular diatómicas, tiene dificultades al analizar disoluciones acuosas (Faraldos, 2015).

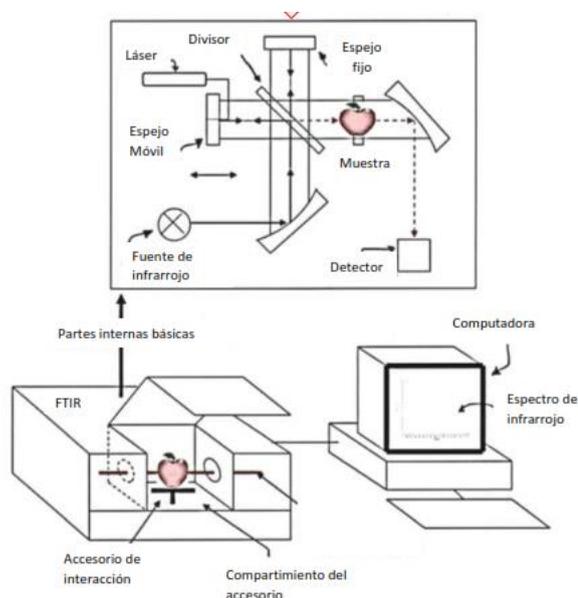


Figura 8. Representación de un espectrómetro infrarrojo

(Mondragón Cortez, 2015)

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

Este método mide la cantidad de calor (desprendido o absorbido) de una sustancia, al mantenerla a una temperatura constante durante un tiempo determinado, o cuando la sustancia se enfría o calienta a una velocidad constante, en un determinado intervalo de

temperaturas (Suriñach, Baro, Bordas, & Clavaguera, 1992).

Los procesos donde existe variación de entalpía son los más convenientes para usar la calorimetría diferencial de barrido, esto gracias a que permite registrar la diferencia en el cambio de entalpía entre el material de referencia y la muestra en función de la temperatura o del tiempo, cuando los dos se encuentran bajo un régimen de temperaturas controladas.

Como resultado de este método se obtienen curvas donde en las unidades del eje de ordenadas se representa el flujo de calor por unidad de tiempo. Teniendo en cuenta que los fenómenos endotérmicos son representados por los picos positivos y los exotérmicos por los negativos (Faraldos, 2015).

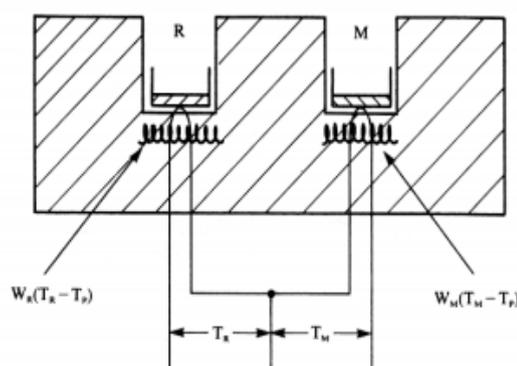


Figura 9. Esquema de un aparato de DSC

(ALBELLA, CINTAS, MIRANDA, SERRATOSA, 1993)

Termogravimetría (TGA).

Este método ayuda con la medición de la rapidez y cantidad de cambio en masa de una muestra en función de la temperatura bajo una atmósfera controlada, además permite caracterizar materiales con pérdida o ganancia de peso por su descomposición, deshidratación u oxidación, obteniendo luego del ensayo datos del cambio de masa en función de la temperatura, tiempo y un termograma que es donde se evidencian las variaciones de masa presentadas (Villegas, 2012).

El análisis termogravimétrico puede ser: isotérmico (cambios a temperatura

constante), cuasi-isotermo (la muestra se calienta o enfría con masa constante y al estabilizarse la temperatura se producen los cambios), dinámico (la muestra se calienta o enfría bajo una atmósfera determinada, con rampa de temperatura controlada) (Faraldos, 2015).

La principal característica que se obtiene con esta técnica es la estabilidad térmica es decir conocer en que rangos de temperatura de calentamiento o enfriamiento las propiedades del material no varían (Faraldos, 2015).

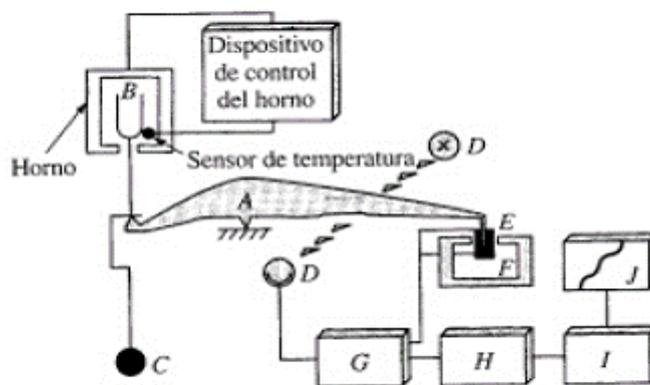


Figura 10. Esquema termobalanza.

Materiales y Métodos

La investigación será del tipo descriptiva al dar una caracterización al PCM estudiado con el propósito de simular su comportamiento en la eficiencia energética para contenedores de transporte y almacenamiento en frío.

También será del tipo Experimental puesto que, se someterá al aceite de pepa de aguacate, a trabajar en el rango de las temperaturas de cambio de fase (variable independiente) que a la vez son las óptimas utilizadas para transporte y almacenamiento en frío de productos y observar los efectos producidos mediante la simulación (variable dependiente).

Obtención de Muestras

Para la realización de la investigación se seleccionará como materia prima la pepa de aguacate, con el fin de obtener los ácidos grasos de su aceite.

Se clasificarán las pepas, unas serán del fruto maduro y otras de frutos tiernos, se retirará la capa delgada que las recubre y guardarán a 5°C hasta que se vayan a usar para la analizarlas o realizar la extracción.

Se pretende realizar la experimentación a partir de dos tipos principales de muestras que son:

1. Aceite de pepa de aguacate tierno.
2. Aceite de pepa de aguacate maduro.

Se analizará las muestras según los porcentajes mostrados en la Tabla 2.

Tabla 3.

Muestras de aceite según porcentaje de composición

| Denominación | Porcentaje aceite con pepas tiernas | Porcentaje aceite con pepas maduras |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 100-T | 100 | 0 |
| 100-M | 0 | 100 |
| 25 T-75M | 25 | 75 |
| 50M-50T | 50 | 50 |
| 75T-25M | 75 | 25 |

Las pepas se deshidratarán en una estufa de aire, se triturarán mediante molino manual y se extraerá con un Soxhlet con hexano hasta el agotamiento. Para la obtención del aceite que se encuentre libre de disolvente la micela del proceso anterior será evaporada en un rotovapor R-100 marca Buchi hasta obtener el aceite puro, esta purificación fue realizada adaptando el método Wesson (Mehlenbacher, 1970; Solís-Fuentes y Durán de Bazúa, 2004; Solís-Fuentes y Durán de Bazúa, 2010), para posteriormente proceder a una purificación del aceite y guardarlo bajo congelación a -5°C en recipientes oscuros, sin luz hasta su posterior análisis (Solís-fuentes & Durán-de-bazúa, 2010).

Métodos

Espectrometría Infrarroja (FTIR)

Para la Espectrometría se realiza un análisis de forma directa ya que son muestra líquidas, por lo que las diferentes muestras de aceite se analizaron en el espectrómetro marca Jasco, modelo FT/IR 4200 mediante la técnica de muestreo por Reflectancia Total Atenuada en el rango de Mediano Infrarrojo: $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$, para proceder al ensayo se coloca una a dos gotas de las muestras de aceite en una celdilla con ventanas de un material transparente infrarrojo, es decir entre dos placas de KBr o NaBr y se inicia el

análisis en el equipo, obteniendo de esta manera un espectro con una resolución de 4 cm^{-1} , con aproximadamente 3500 puntos y 60 segundos de tiempo de integración (Castorena-García, Rojas-López, 2011), una vez conseguidos los datos se retiran los picos correspondientes al agua (H_2O) y al oxígeno (O_2), al obtener la gráfica final se compararon con tablas y gráficos de FTIR para conocer los grupos funcionales obtenidos, ya que al momento el equipo no tiene una actualización de software para asignar automáticamente estos resultados.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Para la realización de la DSC, se utilizó un calorímetro TA Instruments DSC Q2000, el cual es capaz de realizar una caracterización térmica con una sensibilidad menor a 0,2 MW. El intervalo de funcionamiento del calorímetro va desde los -89° a 400°C , se lo realiza en cámara hermética con protección de gas, en este caso se utiliza el nitrógeno como purga con flujo de 20 mL/min , por otra parte, se pesan las diferentes muestras en la balanza analítica Shimadzu, cuyo peso debe ir de entre 5 y 10 mg en cápsulas de aluminio las cuales son selladas herméticamente.

Con el propósito de borrar cualquier historial térmico las muestras se equilibran a 90°C manteniéndolas isotermas por 10 minutos.

A continuación, se enfrían hasta -80°C con una rampa de 5°C/min . Finalmente se calentaron con la misma rampa hasta los 90°C , se debe entonces registrar el perfil y entalpia de cristalización, las temperaturas de inicio y final de cambio de fase, es así que mediante los termogramas obtenidos se podrán determinar las entalpias, los rangos de fusión y cristalización de las muestras (Solís-fuentes & Durán-de-bazúa, 2010).

Termogravimetría (TGA).

El análisis termogravimétrico, fue hecho con un equipo de marca Shimadzu modelo TGA50, con un rango de temperatura de medición que va desde la temperatura ambiente hasta los 1000°C.

Las muestras se analizaron en crisol de platino con una masa referencial de entre 3 y 7 mg registrando los cambios de masa a partir de la temperatura ambiente en el momento del ensayo hasta los 1000°C, bajo dos tipos de atmósferas, una inerte de nitrógeno y otra de aire respectivamente con un flujo de 30 ml/min, realizado a una velocidad de calentamiento constante de 10°C/min.

Simulación Computacional

El modelamiento y simulación térmica se llevó a cabo en el software 3-D SolidWorks, con ayuda de su paquete SolidWorks Simulation.

Previamente se deben definir las condiciones para dicha simulación en este caso:

La simulación se realizará en estado transitorio para conocer el tiempo en que la temperatura interior puede seguir siendo óptima para la transportación y/o almacenamiento, haciendo una comparación con y sin el uso del PCM estudiado

Para la simulación en este programa se tiene la opción de automático para el uso de un solver la cual viene predeterminada para estudios térmicos, el porcentaje de convergencia que presenta el mismo es del 0.1% con un factor de subrelajación automático, el cual es un valor predeterminado calculado por el programa.

En la Tabla 4 se presentan los datos iniciales con los que se realizará la simulación.

Tabla 4.

Datos de iniciales para simulación

| Elemento | Temperatura Inicial |
|----------------------|---------------------|
| Caja isotérmica | -14° C |
| Caja con PCM | -27°C |
| Temperatura ambiente | 25°C |

La Tabla 5 mostrada a continuación presenta los datos relacionados al contenedor sobre el cual se realizará la simulación, el material elegido de la caja isoterma (incluida la placa de soporte del PCM) es el polipropileno expandido de baja densidad (PPE), que según la Asociación Nacional de Poliestireno Expandido de Madrid ANAPE posee un bajo impacto medioambiental al ser 100% reciclable, de bajo costo energético en su proceso de fabricación, es un material inocuo lo cual hace que no se perjudicial para la salud, tiene buena resistencia al envejecimiento, versatilidad y facilidad de conformado, amortiguación de impactos, resistencia química, resistencia a la humedad, además de ser ligero y no actuar como soporte de cultivo de hongos y bacterias.

Tabla 5.

Características Caja Isoterma

| Característica | Descripción |
|-----------------------|--|
| Material | polipropileno extendido de baja densidad (PPE) |
| Densidad | 40 kg/m ³ |
| Conductividad térmica | 0.038 W/m °K |
| Medidas Exteriores | 390x330x265 mm |
| Medidas Interiores | 330x270x117 mm |
| Peso | ±3.01 kg |

La Tabla 6 muestra las características de la caja contenedora del material de cambio de fase, cuyo material escogido es el polietileno de alta densidad por sus características entre

las cuales se puede mencionar su excelente resistencia térmica y química, resistencia al impacto, su procesabilidad, la flexibilidad que posee, aún a bajas temperaturas, ligereza, resistencia máxima de trabajo de 60°, además de su reciclabilidad.

Tabla 6.

Características Caja Contenedora PCM

| Característica | Descripción |
|-----------------------|--|
| Material | polietileno de alta densidad (PEHD) |
| Densidad | 0,95 g/cm ³ o 950 kg/m ³ |
| Conductividad térmica | 0,43 W/m ^{°K} |
| Capacidad calórica | 1900 J/kg ^{°K} |
| Medidas | 325x265x30x1 mm |

En la Tabla 7, se pueden observar las características del PCM a utilizarse para la simulación.

Tabla 7.

Características del PCM

| Característica | Descripción |
|-----------------------|---|
| Material | aceite pepa aguacate (100M) |
| Densidad | 0.86875 g/ml o 686.75 kg/m ³ |
| Conductividad térmica | 0.014 W/m ^{°K} |
| Capacidad calórica | 3589.76 J/kg ^{°K} |

Para la realización de la simulación se realizan los siguientes pasos:

Modelamiento 3D del contenedor de transporte y/o almacenamiento.

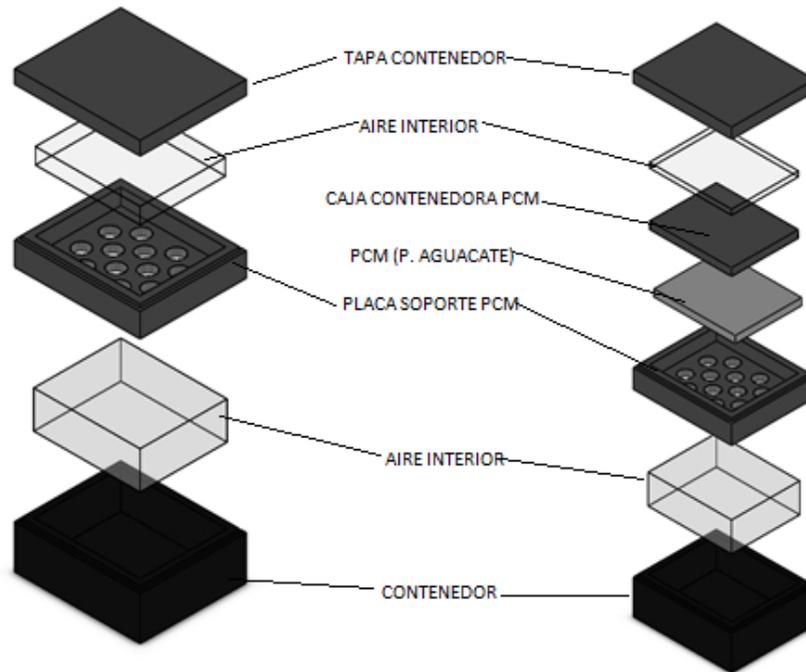


Figura 11. Esquema caja isotérmica con PCM y sin PCM

Crear un nuevo estudio térmico

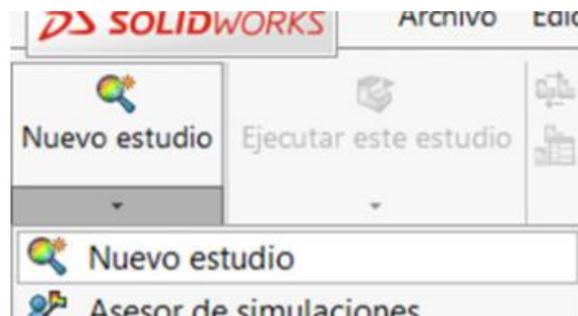


Figura 12. Creación de nuevo estudio en Solidworks

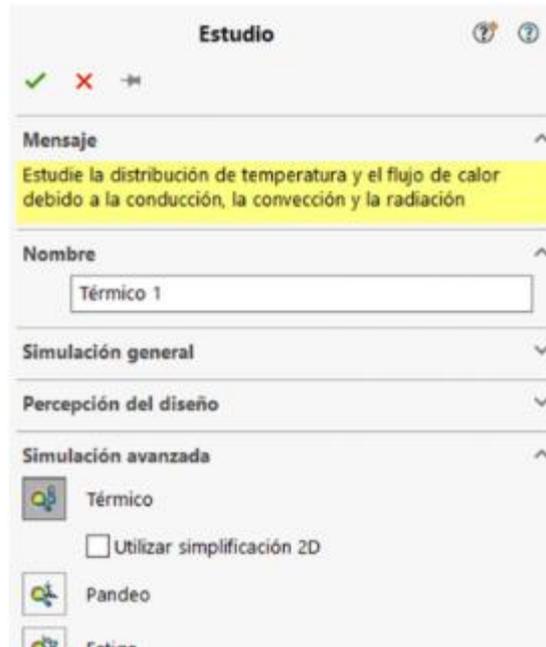


Figura 13. Creación estudio térmico

En este caso serán dos estudios con placa PCM y sin placa PCM.

Se procede a definir el material de las piezas, siendo que existen materiales precargados en la librería de SOLIDWORKS, para los que no estuviesen en la base de datos, este software da la opción de crear el material y definir por parte del usuario sus propiedades.

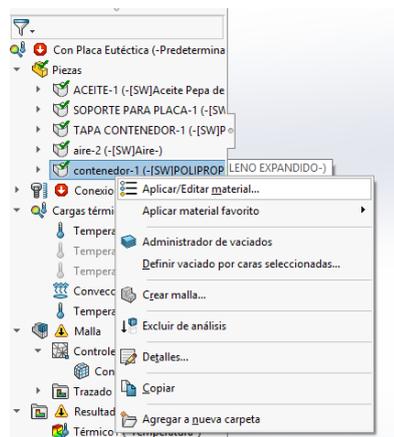


Figura 14. Definición de materiales

Para el caso de la simulación térmica las propiedades de los materiales que se requieren son las marcadas en rojo (densidad, conductividad térmica) al ser estas las que necesita internamente el programa para poder realizar los cálculos matemáticos.

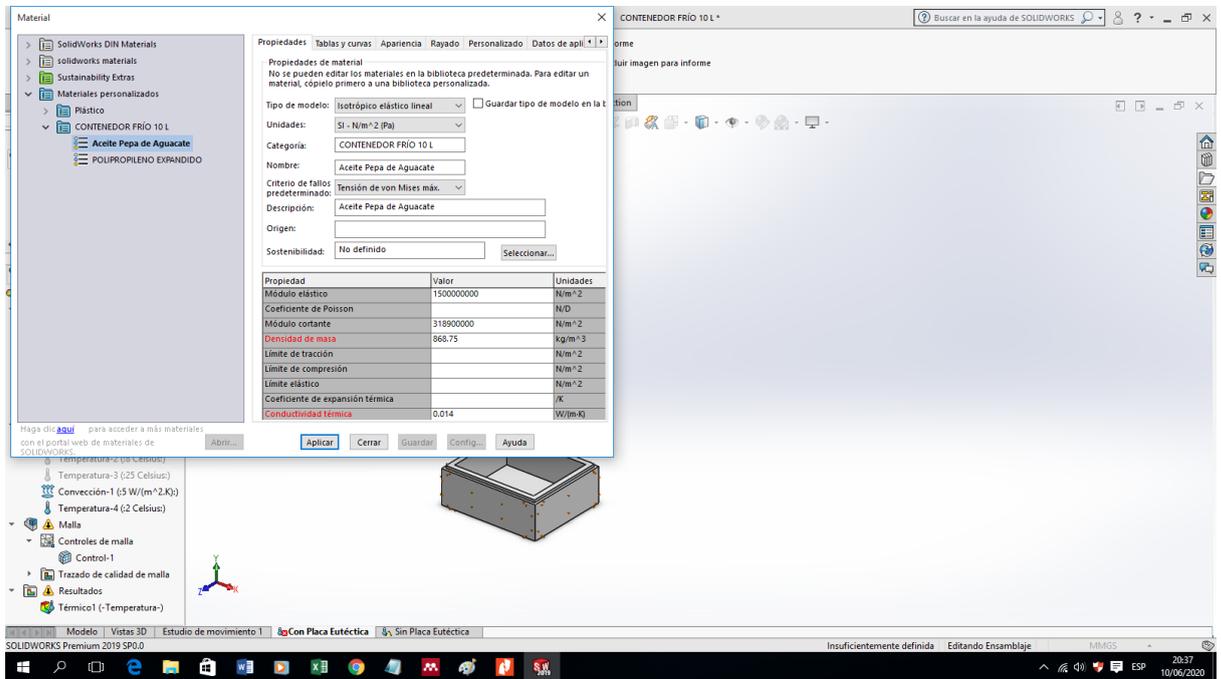


Figura 15. Definición de propiedades en nuevos materiales

Se procede a agregar las cargas térmicas según correspondan

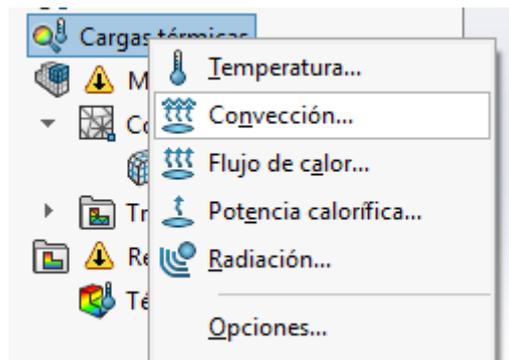


Figura 16. Definición de cargas térmicas

Se seleccionan las superficies de cada carga y se colocan los datos solicitados por el tipo de carga.

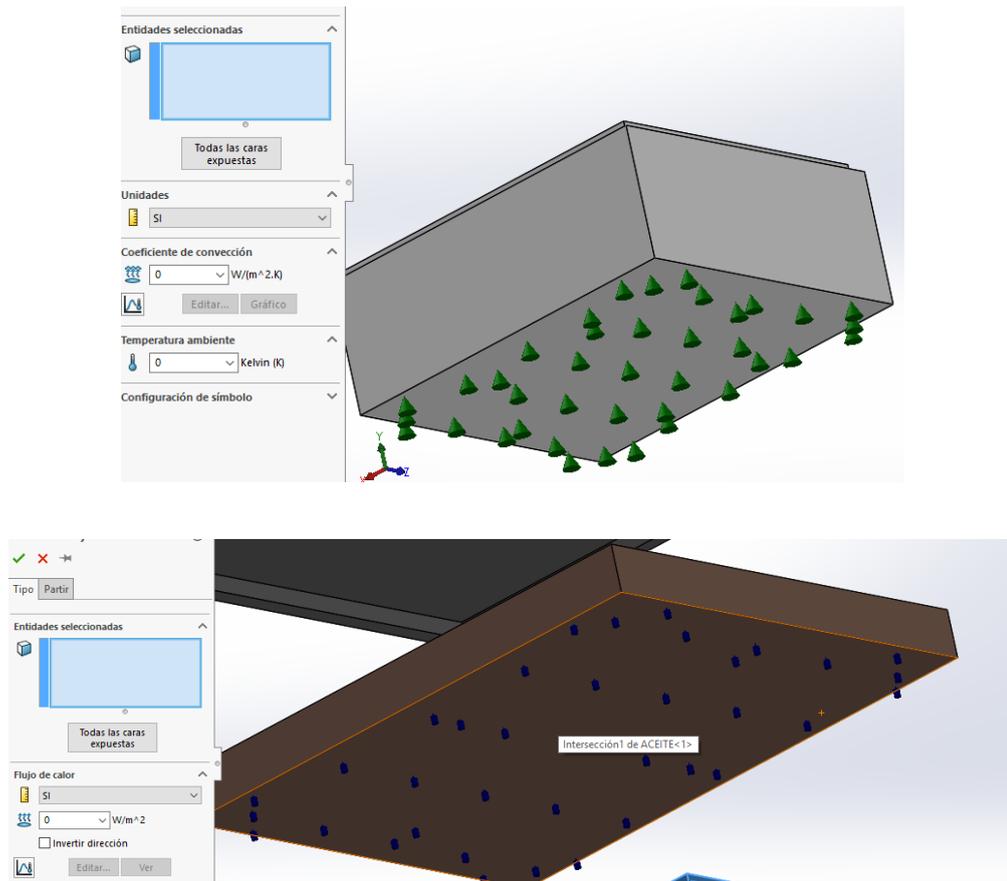


Figura 17. Asignación de cargas térmicas en superficies

Se procede a realizar el mallado del modelo, dando clic derecho en la opción “Malla” y seleccionando “Crear malla”.

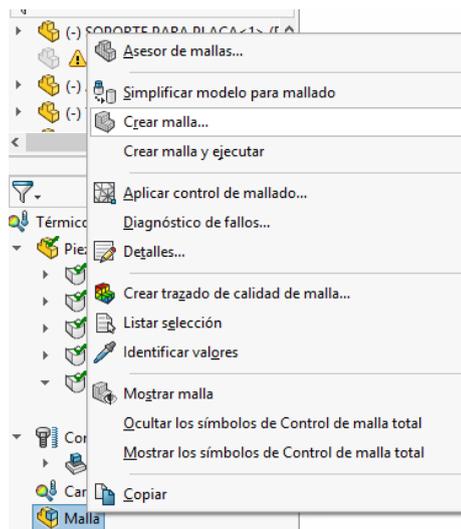


Figura 18. Creación de malla

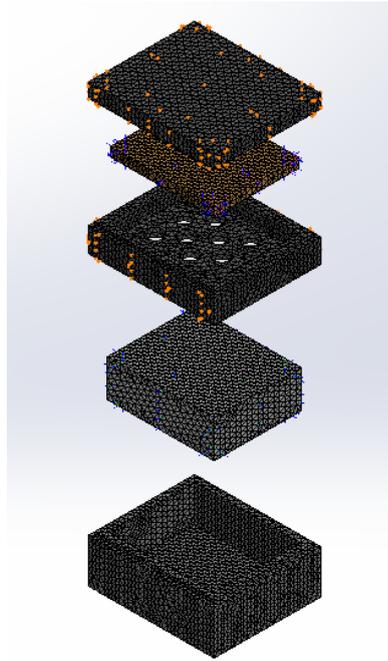


Figura 19. Mallado de la simulación.

Se procede a ejecutar el estudio.

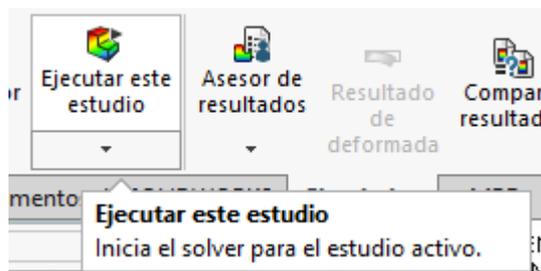


Figura 20. Botón comando ejecución del estudio

El programa crea automáticamente las propiedades del estudio a partir de los datos ingresados, como puede observarse en la tabla 8.

Tabla 8.

Propiedades del Estudio

| NOMBRE DEL ESTUDIO | CONTENEDOR CON PCM | CONTENEDOR SIN PCM |
|---|----------------------|----------------------|
| Tipo de análisis | Térmico(Transitorio) | Térmico(Transitorio) |
| Tipo de malla | Malla sólida | Malla sólida |
| Tipo de solver | Automático | Automático |
| Tipo de solución | Transitorio | Transitorio |
| Tiempo total | 25.200 Segundos | 25.200 Segundos |
| Incremento de tiempo | 900 Segundos | 900 Segundos |
| ¿Se definió la resistencia de contacto? | Sí | Sí |

Resultados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos en los análisis de laboratorios como son la calorimetría diferencial de barrido, la espectroscopia infrarroja y la termogravimetría, para de esta forma poder caracterizar el material y de esta manera realizar la simulación computacional de la cual se obtendrá como resultado el comportamiento térmico virtual del uso del PCM estudiado.

Análisis DSC

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis de la calorimetría diferencial de barrido que nos darán a conocer especialmente la temperaturas de cambio de fase y la entalpía total con las que contarán las muestras para que de esta forma el material ensayado quede caracterizado con respecto a su energía térmica

Bajo el ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se han obtenido las curvas tanto de cristalización como de fusión del aceite de pepa de aguacate, para lo cual se realizará un análisis individual por cada curva, de esta manera en la Figura 21, 22, 23, 24 y 25, en lo que respecta a la curva de cristalización, se puede ver la presencia de un gran pico exotérmico a los $-47,08^{\circ}\text{C}$ para 100T, $-47,43^{\circ}\text{C}$ para 75T y 25 M, $-47,89^{\circ}\text{C}$ para 50T-50M, $-47,66^{\circ}\text{C}$ para 25T-75M y finalmente $-47,67^{\circ}\text{C}$ para 100M, de la misma manera para la curva de fusión de las diferentes muestras se observan dos picos endotérmico de esta forma para 100T: $-0,58^{\circ}\text{C}$ y $10,82^{\circ}\text{C}$, para 75T-25M: $-1,47^{\circ}\text{C}$ y $10,33^{\circ}\text{C}$, para 50T-50M: $-2,16^{\circ}\text{C}$ y $9,64^{\circ}\text{C}$, para 25T y 75M: $-3,11^{\circ}\text{C}$ y $9,57^{\circ}\text{C}$ terminando para 100M: $-4,10^{\circ}\text{C}$ y $9,4^{\circ}\text{C}$.

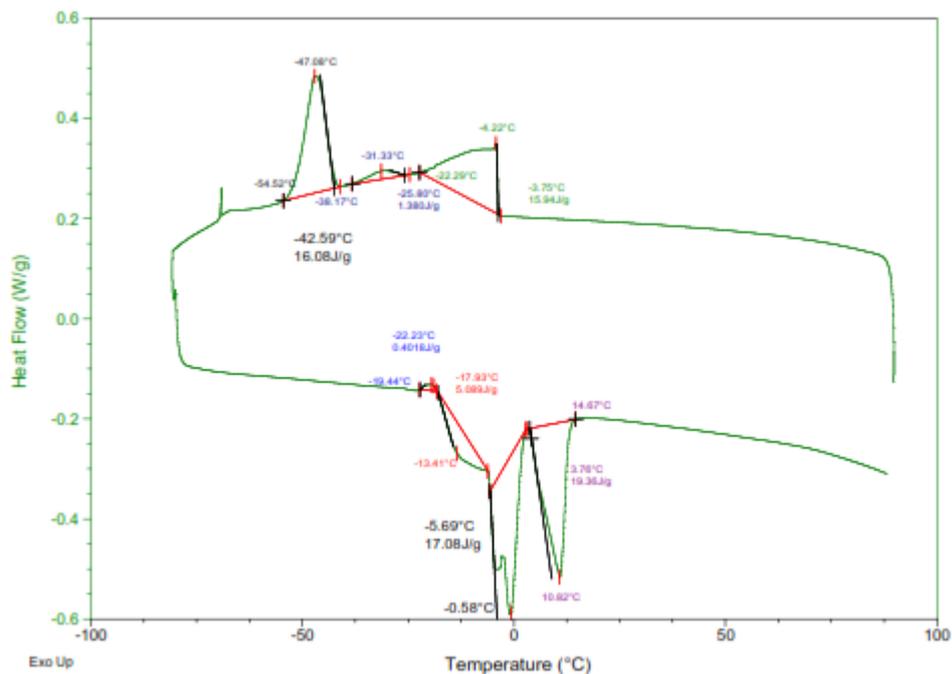


Figura 21. Curvas de cambio de fase muestra 100T

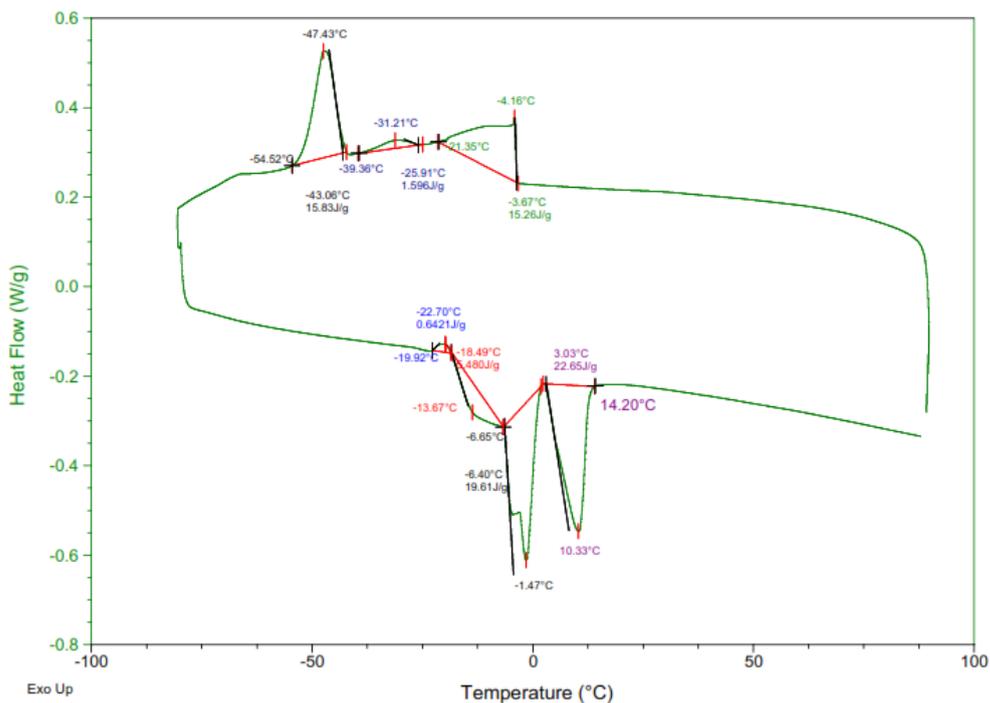


Figura 22. Curvas de cambio de fase muestra 75T-25M

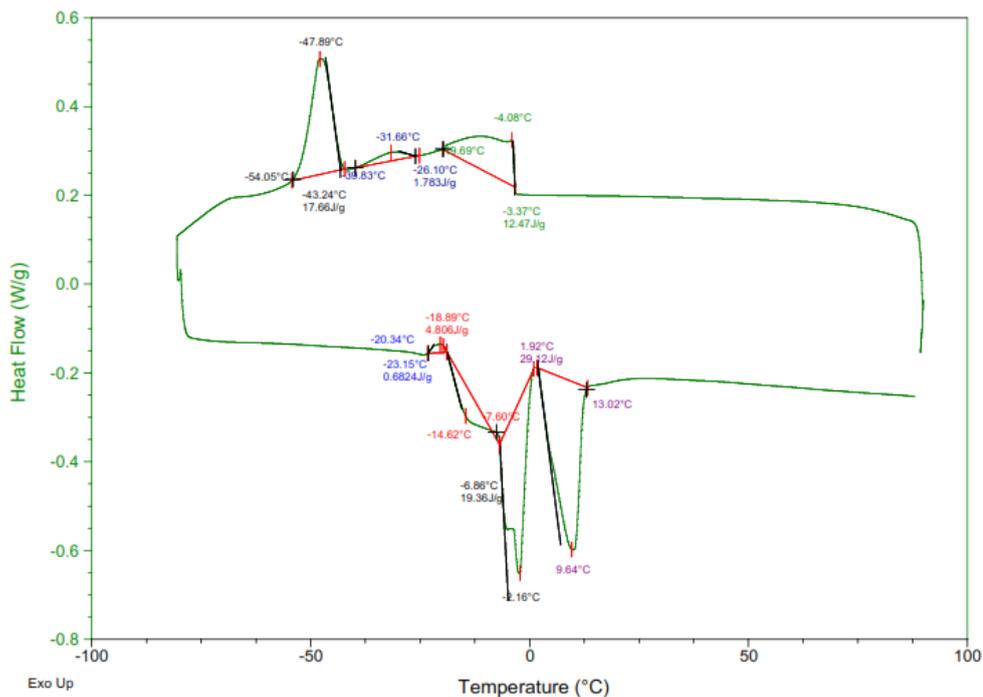


Figura 23. Curvas de cambio de fase muestra 50T-50M

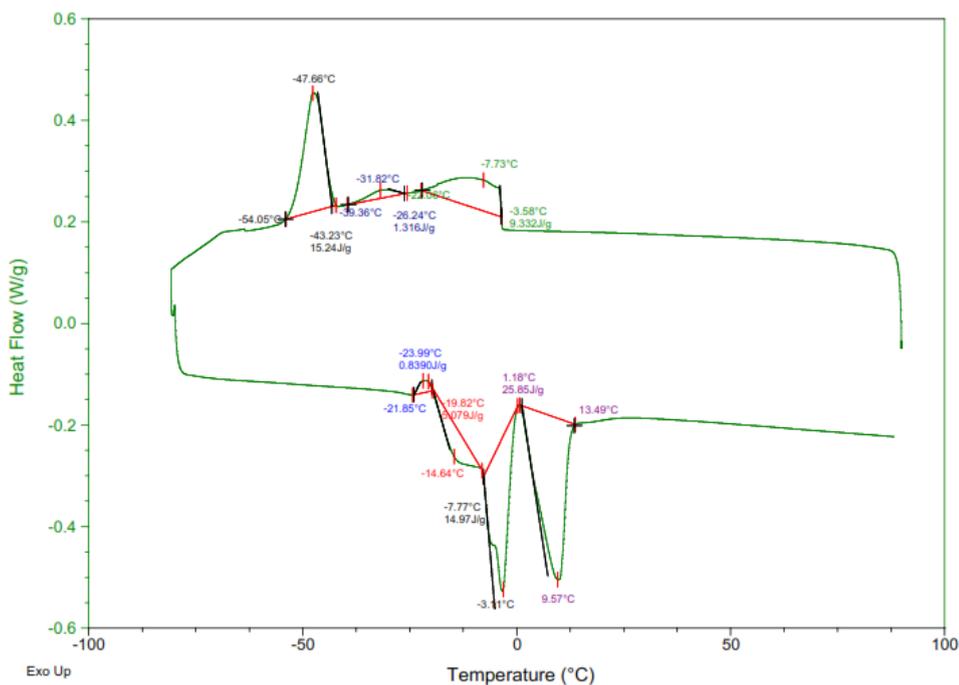


Figura 24. Curvas de cambio de fase muestra 25T-75M

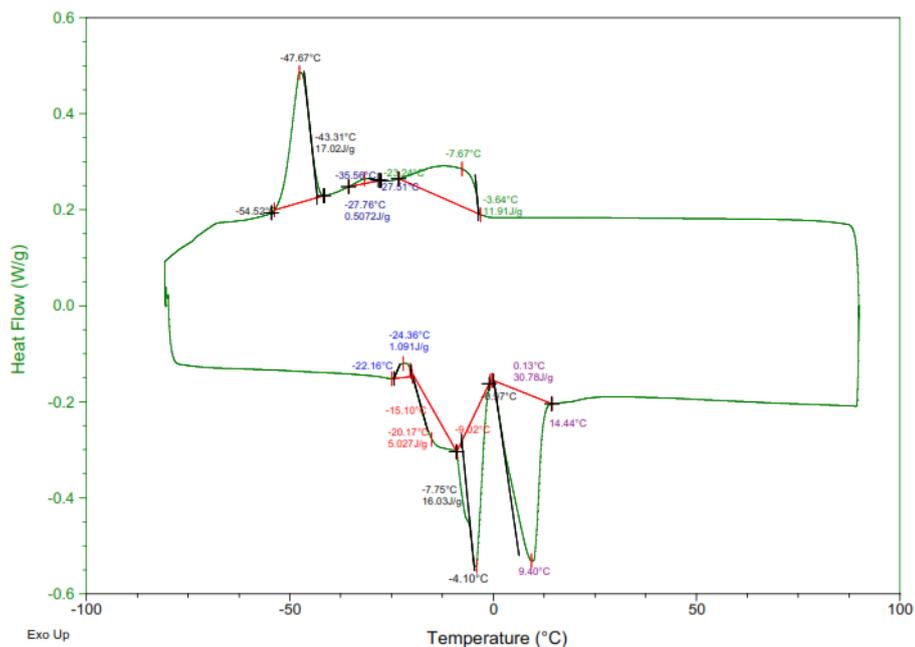


Figura 25. Curvas de cambio de fase muestra 100M

El dato principal que se obtiene de estas curvas es la entalpia de cristalización y de fusión respectivamente la cual es el área bajo la curva, en la Tabla 9 se visualizarán los resultados del DSC y en las Tabla 10 y 11., un condensado de los datos finales obtenidos por el ensayo de DSC para todas las muestras.

Tabla 9.

Datos obtenidos de la calorimetría diferencial de barrido del aceite de pepa de aguacate

| Muestra | Trans. 1 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 1 (Entalpía) (J/g) | Trans. 2 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 2 (Entalpía) (J/g) | Trans. 3 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 3 (Entalpía) (J/g) | Trans. 4 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 4 (Entalpía) (J/g) | Trans. 5 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 5 (Entalpía) (J/g) | Trans. 6 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 6 (Entalpía) (J/g) | Trans. 7 (TI, TM, TF) (°C) | Trans. 7 (Entalpía) (J/g) |
|---------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 100T | -22,29 | | -38,17 | | -54,52 | | -17,93 | | -5,69 | | 3,76 | | 14,67 | |
| | -4,22 | 15,94 | -31,33 | 1,38 | -47,08 | 16,08 | -19,44 | 0,4 | -13,41 | 5,09 | -0,58 | 17,08 | 10,82 | 19,36 |
| | -3,75 | | -25,8 | | -42,59 | | -22,23 | | -17,93 | | -5,69 | | 3,76 | |
| 75T-25M | -21,35 | | -39,36 | | -54,52 | | -18,49 | | -6,65 | | 3,03 | | 14,2 | |
| | -4,16 | 15,26 | -31,21 | 1,6 | -47,43 | 15,83 | -19,92 | 0,64 | -13,67 | 5,48 | -1,47 | 19,61 | 10,33 | 22,65 |
| | -3,67 | | -25,29 | | -43,06 | | -22,7 | | -18,49 | | -6,4 | | 3,03 | |
| 50T-50M | -19,69 | | -39,83 | | -54,05 | | -18,89 | | -7,6 | | 1,92 | | 13,02 | |
| | -4,08 | 12,47 | -31,66 | 1,78 | -47,89 | 17,66 | -20,34 | 0,68 | -14,62 | 4,81 | -2,16 | 19,36 | 9,64 | 29,12 |
| | -3,37 | | -26,1 | | -43,24 | | -23,15 | | -18,89 | | -6,86 | | 1,92 | |
| 25T-75M | -22,06 | | -39,36 | | -54,05 | | -19,82 | | -7,77 | | 1,18 | | 13,49 | |
| | -7,73 | 9,33 | -31,28 | 1,32 | -47,66 | 15,24 | -21,85 | 0,84 | -16,64 | 5,08 | -3,11 | 14,64 | 9,57 | 25,85 |
| | -3,58 | | -26,24 | | -43,23 | | -23,99 | | -19,82 | | -7,77 | | 1,18 | |
| 100M | -23,24 | | -35,36 | | -54,52 | | -15,1 | | -9,02 | | -0,97 | | 14,44 | |
| | -7,67 | 11,91 | -27,76 | 0,51 | -47,67 | 17,02 | -22,16 | 1,09 | -15,1 | 5,03 | -4,1 | 16,03 | 9,4 | 30,78 |
| | -3,64 | | -27,51 | | -43,31 | | -25,36 | | -20,17 | | -7,75 | | 0,13 | |

Trans: Transición, TI: Temperatura inicial de transición, TM: Temperatura máxima de transición, TF: Temperatura final de transición

Tabla 10.

Datos finales obtenidos de la Calorimetría Diferencial de Barrido de la curva de cristalización

| Muestra | Inicio trancisión (°C) | Final trancisión (°C) | Pico 1 (°C) | Entalpía Total (J/g) |
|---------|------------------------|-----------------------|-------------|----------------------|
| 100T | -3,75 | -54,52 | -47,08 | 33,4 |
| 75T-25M | -3,67 | -54,52 | -47,43 | 32,69 |
| 50T-50M | -3,37 | -54,05 | -47,89 | 31,91 |
| 25T-75M | -3,58 | -54,05 | -47,66 | 25,89 |
| 100M | -3,64 | -54,52 | -47,67 | 29,44 |

Tabla 11.

Datos finales obtenidos de la Calorimetría Diferencial de Barrido de la curva de fusión

| Muestra | Inicio trancisión (°C) | Final trancisión (°C) | Pico 1 (°C) | Pico 2 (°C) | Entalpía Total (J/g) |
|---------|------------------------|-----------------------|-------------|-------------|----------------------|
| 100T | -22,23 | 14,67 | -0,58 | 10,82 | 41,93 |
| 75T-25M | -22,7 | 14,2 | -1,47 | 10,33 | 48,38 |
| 50T-50M | -23,15 | 13,02 | -2,16 | 9,64 | 53,97 |
| 25T-75M | -23,99 | 13,49 | -3,11 | 9,57 | 46,41 |
| 100M | -25,36 | 14,44 | -4,1 | 9,4 | 52,93 |

Como se aprecia en la Tabla 11, el calor latente de fusión y la temperatura de los PCM para las diferentes composiciones de muestra no presentan una variación notable, igualmente, los picos que se presentan lo hacen a temperaturas cercanas, las composiciones donde se presentan mayor calor latente son 53.97 J/g y 52.93 J/g para 50T-50M y 100M respectivamente.

Para los datos ingresados en la simulación se ha tomado en cuenta la muestra 100M al ser la más fácil de conseguir por la obtención de las pepas maduras y dar la segunda mejor entalpía de cambio de fase, estos datos se han obtenido en promedio desde los -27°C hasta la terminación del cambio de fase por fusión.

Análisis FTIR

Los resultados expuestos para el análisis FTIR mostrarán los principales grupos funcionales y por lo tanto la estabilidad química de las muestras, y de esta manera tipificar la clase de sustancia analizada.

En la Figura 26 se indican los espectros FTIR de las diferentes composiciones de los aceites de pepa de aguacate, en las cuales se observan que se encuentran en ellas bandas comunes asociadas principalmente a los lípidos ya que los picos principales son angostos e intensos, con esto se confirma que se trata de aceites, al verse que este tipo de picos se relacionan con esta clase de muestras (Mondragón Cortez, 2015).

En todas las gráficas se han retirado los espectros correspondientes al Agua (H₂O) y al oxígeno (O₂), para un mejor análisis.

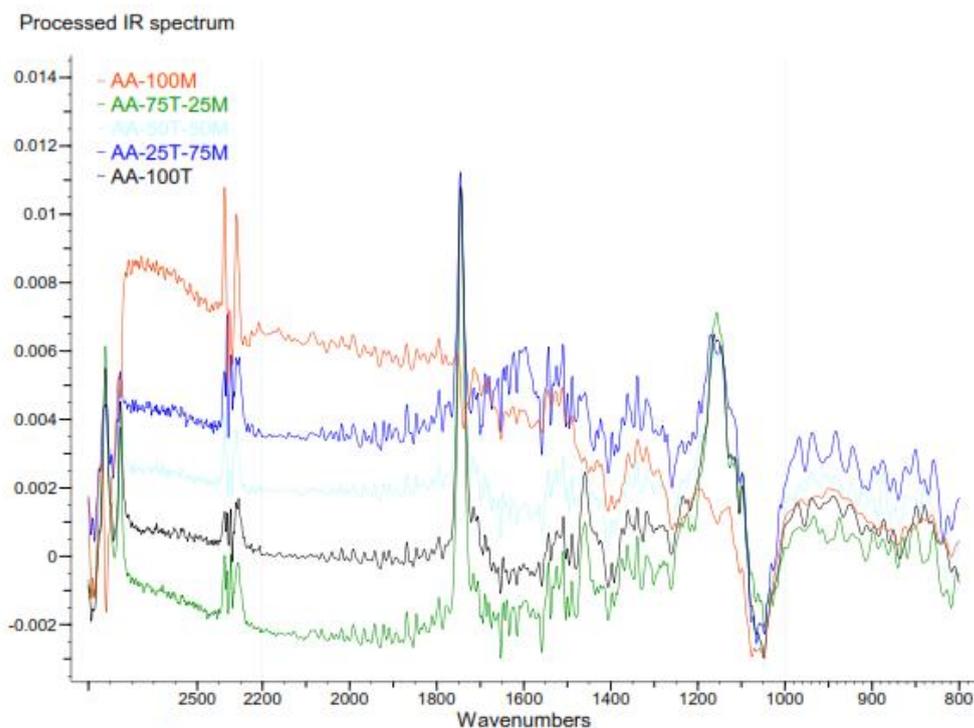


Figura 26. Espectro FTIR de las diferentes composiciones del aceite de pepa de aguacate.

En la Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16 se muestran las frecuencias, intensidad, grupo funcional y modo vibracional del espectro FTIR correspondientemente al aceite de pepa de aguacate 100T, 25T-75M, 50T-50M, 75T-25M, 100M, igualmente en las figuras 27,28,29, 30 y 31 se presentan por separado los espectros para cada una de las muestras, las asignaciones se han realizado en base a la experiencia de varios autores es así que la interpretación de las bandas se realizan según Castorena-García, Rojas-López (2011), Guillén & Cabo (1998), Mondragón Cortez (2015), Rohman & Man (2010) y Rojo Callejas (2000).

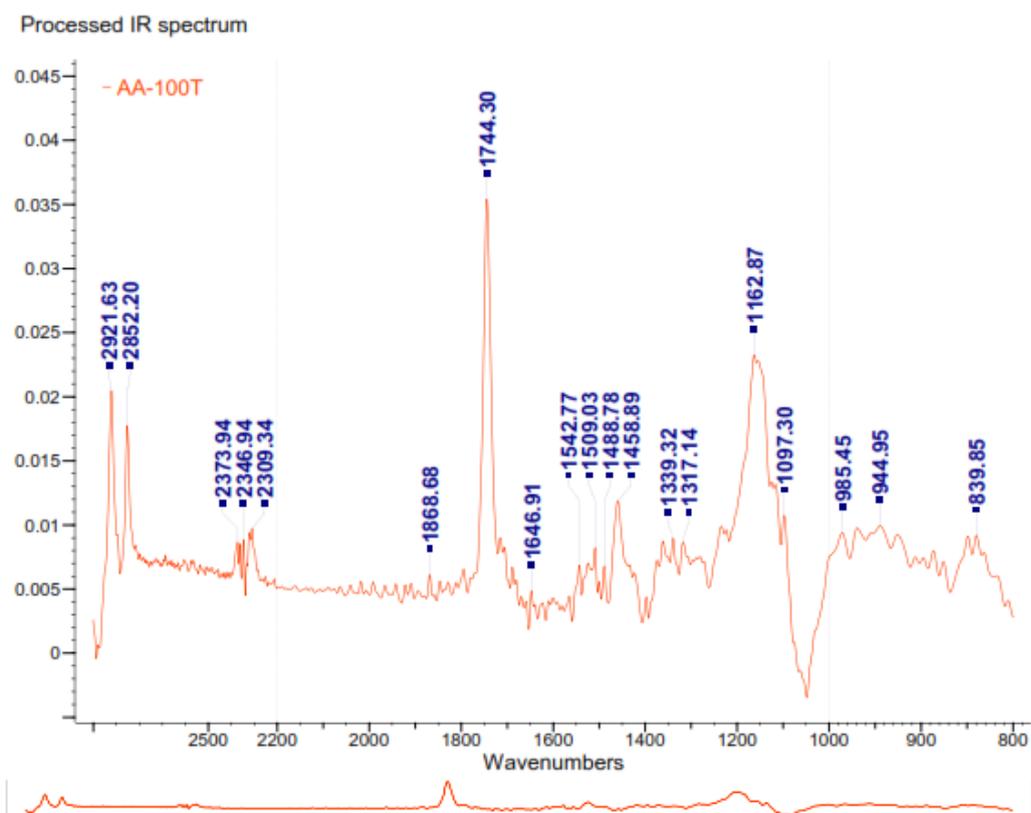


Figura 27. Espectro FTIR para la composición 100T.

Tabla 12.

Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 100T

| Frecuencia FTIR (cm-1) | Intensidad | Grupo Funcional | Modo Vibracional |
|------------------------|------------|---------------------------------|---|
| 2921,63 | 57,78 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2852,20 | 50,09 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2373,94 | 24,39 | CH ₃ | Extensión, asimétrico |
| 2346,94 | 24,97 | CH ₃ | Extensión, simétrico |
| 2309,34 | 27,48 | CH ₃ | Extensión, asimétrico |
| 1744,30 | 100,00 | C=O | Extensión, carbonil ester |
| 1646,91 | 13,69 | C=C | Extensión, (cis), insaturación |
| 1542,77 | 19,37 | Amida II, N-H | Flexión |
| 1458,89 | 33,56 | CH ₂ | Flexión deformación tijera |
| 1339,32 | 25,37 | CH ₃ | Flexión, simétrico |
| 1317,14 | 24,40 | Amida III, C-N/N-H | (C-N)extensión, (N-H) flexión en el plano |
| 1162,87 | 65,70 | CH ₂ | Extensión, flexión |
| 1097,30 | 30,35 | C-O | Simétrico, extensión |
| 985,45 | 26,50 | HC=CH | Flexión fuera del plano, (trans) |
| 944,95 | 28,04 | HC=CH | Flexión fuera del plano, (cis) |
| 839,85 | 25,96 | (CH ₂) _n | Flexión afuera |

Nota, (cis): grupos funcionales al mismo lado de la cadena de carbono; (trans): grupos funcionales en lado opuesto de la cadena de carbono.

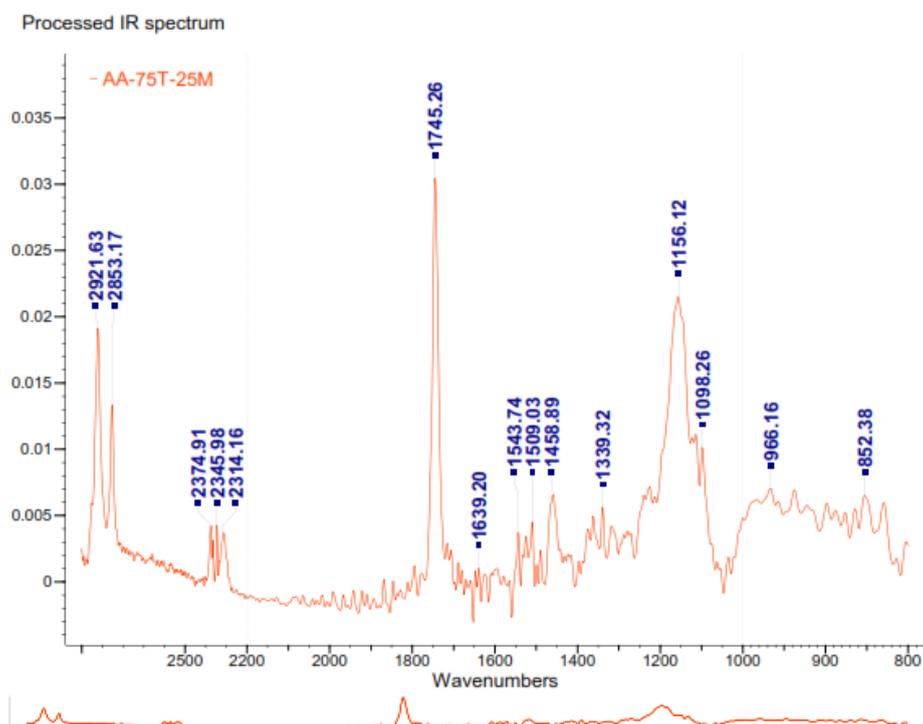


Figura 28. Espectro FTIR para la composición 75T-25M.

Tabla 13.

Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 75T-25M

| Frecuencia FTIR (cm-1) | Intensidad | Grupo Funcional | Modo Vibracional |
|------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 2921,63 | 62,84 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2853,17 | 43,86 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2374,91 | 13,81 | CH ₃ | Extensión, asimétrico |
| 2345,98 | 14,01 | CH ₃ | Extensión, simétrico |
| 2314,16 | 13,81 | CH ₃ | Extensión, asimétrico |
| 1745,26 | 100,00 | C=O | Extensión, carbonil ester |
| 1639,20 | 3,35 | C=C | Extensión, (cis), insaturación |
| 1543,74 | 12,21 | Amida II, N-H | Flexión |
| 1458,89 | 21,59 | CH ₂ | Flexión deformación tijera |
| 1339,32 | 18,46 | CH ₃ | Flexión, simétrico |
| 1156,12 | 70,66 | C-O | Extensión |
| 1098,26 | 33,32 | C-O | Extensión, simétrico |
| 966,16 | 23,08 | HC=CH | Flexión fuera del plano, (trans) |
| 852,38 | 21,37 | (CH ₂) _n | Flexión afuera |

Nota, (cis): grupos funcionales al mismo lado de la cadena de carbono; (trans): grupos funcionales en lado opuesto de la cadena de carbono.

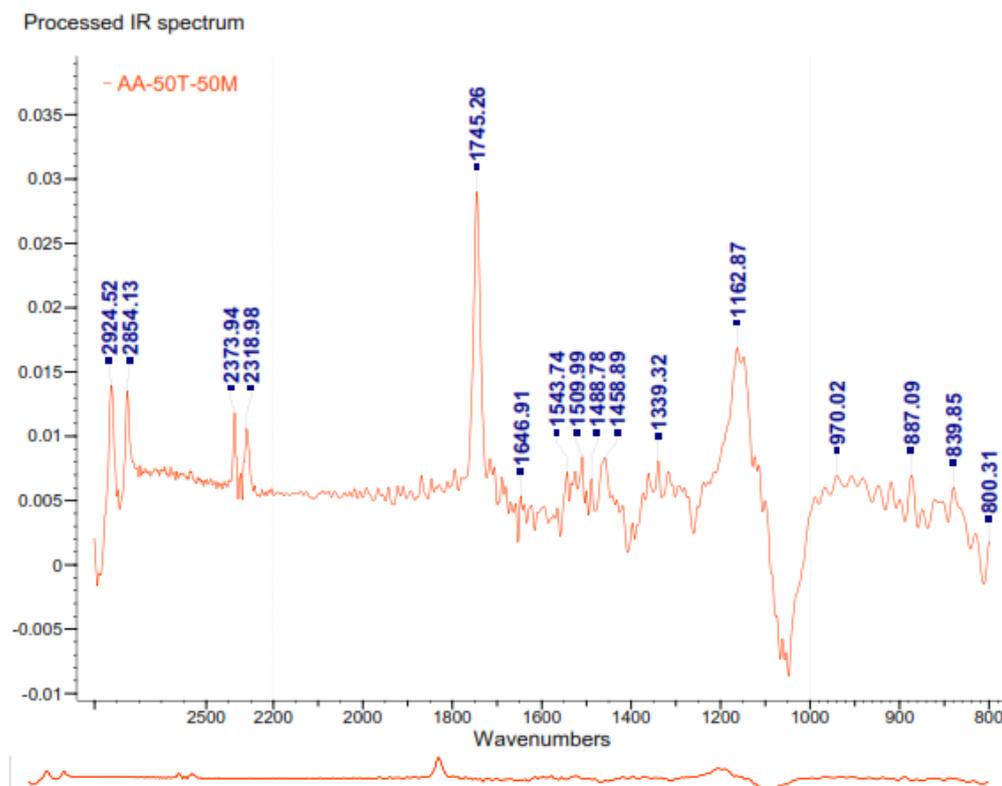


Figura 29. Espectro FTIR para la composición 50T-50M.

Tabla 14.

Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 50T-50M

| Frecuencia FTIR (cm-1) | Intensidad | Grupo Funcional | Modo Vibracional |
|------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 2924,52 | 48,10 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2854,13 | 46,64 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2373,94 | 40,76 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2318,98 | 36,57 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 1745,26 | 100,00 | C=O | Extensión, carbonil ester |
| 1646,91 | 18,47 | C=C | Extensión, (cis), insaturación |
| 1543,74 | 24,86 | Amida II, N-H | Flexión |
| 1458,89 | 28,70 | CH ₂ | Flexión deformación tijera |
| 1162,87 | 58,25 | C-O, CH ₂ | Extensión, flexión |
| 970,02 | 23,93 | HC=CH | Flexión fuera del plano, (trans) |
| 887,09 | 24,05 | (CH ₂) _n | Flexión afuera |

Nota, (cis): grupos funcionales al mismo lado de la cadena de carbono; (trans): grupos funcionales en lado opuesto de la cadena de carbono.

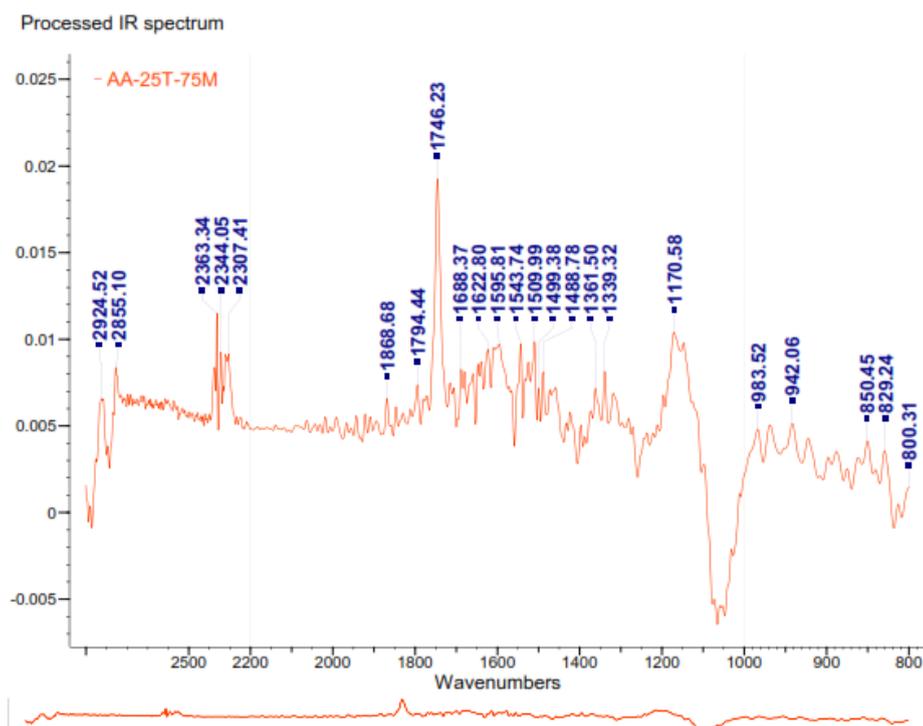


Figura 30. Espectro FTIR para la composición 25T-75M.

Tabla 15.

Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 25T-75M

| Frecuencia FTIR (cm-1) | Intensidad | Grupo Funcional | Modo Vibracional |
|------------------------|------------|---------------------------------|---|
| 2924,52 | 34,11 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2855,10 | 43,44 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2363,34 | 59,70 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2344,05 | 48,14 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2307,41 | 47,57 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 1746,23 | 100,00 | C=O | Extensión , carbonil ester |
| 1688,37 | 42,91 | Amida I, C=O | Extensión |
| 1622,80 | 48,85 | Amida I, C=O | Extensión |
| 1543,74 | 50,59 | Amida II, N-H/C-N | (N-H) flexión en el plano/(C-N) extensión |
| 1361,50 | 37,19 | CH ₃ | Flexión, simétrico |
| 1170,58 | 54,05 | CH ₂ | Extensión, flexión |
| 983,52 | 24,97 | (CH ₂) _n | Flexión afuera |

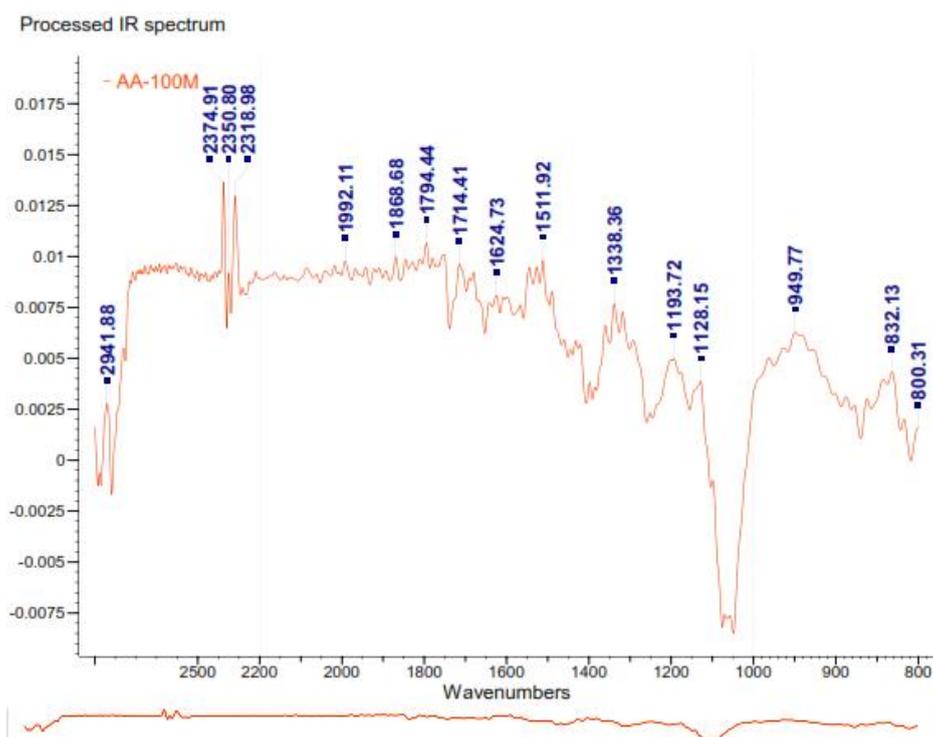


Figura 31. Espectro FTIR para la composición 100M.

Tabla 16.

Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 100M

| Frecuencia FTIR (cm-1) | Intensidad | Grupo Funcional | Modo Vibracional |
|------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------|
| 2941,88 | 20,31 | CH ₃ | Extensión, asimétrico |
| 2374,91 | 100 | CH ₂ | Extensión, asimétrico |
| 2350,80 | 67,43 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 2318,98 | 94,96 | CH ₂ | Extensión, simétrico |
| 1714,41 | 70,60 | C=O (Ácido) | extensión |
| 1193,72 | 36,50 | CH ₂ | Extensión, flexión |
| 1128,15 | 28,35 | C-O | Extensión |
| 949,77 | 45,94 | (CH ₂) _n | Flexión afuera |

Haciendo una revisión de las bandas en general entre los 2942 cm⁻¹ a los 2306 cm⁻¹, están asignadas a las extensiones CH₃ y CH₂, hay que tener en cuenta además de que se tiene una banda característica alrededor de los 1746 a 1744 cm⁻¹, con una intensidad de 100, representando en este caso a un éster carbonilo perteneciente a los triglicéridos o fosfolípidos (Castorena-García, Rojas-López, 2011), pero teniendo en cuenta que en la muestra 100M esta banda no aparece, por otra parte, pero en el caso de esta hay la presencia de un ácido en la banda de 1714,41 con una intensidad fuerte.

Además se puede observar una banda con una intensidad pequeña entre los 1646 a los 1638 cm⁻¹ donde se podría apreciar una insaturación, pero solamente en las muestras 100T, 75T-25M, 50T-50M, entre las bandas 1622 y 1522 cm⁻¹ se observa los grupos de aminas, entre los 1458 y 1162 cm⁻¹ se tienen las flexiones CH₂ y CH₃, correspondientes al grupo metileno, en las bandas comprendidas entre 1156 y 1162 cm⁻¹, se aprecia la extensión C-O correspondiente al grupo éster de los triglicéridos, a partir de los 935 cm⁻¹, se observan los grupos HC=CH con flexiones fuera del plano.

Al observar todos los picos principales, se tiene que son intensos y angostos, con lo que se puede indicar que se trata de un aceite 100% puro, ya que los picos se relacionan con los típicos de muestras oleaginosas.

Análisis TGA

A continuación se presentarán los resultados de la termogravimetría de las diferentes muestras para de esta manera indicar la estabilidad térmica del material ensayado, es decir a partir de que temperatura empieza la degradación de las mismas.

En la figuras 32, 33, 34, 35 y 36 se encuentran las curvas termogravimétricas para los diferentes porcentajes de composición del aceite, al lado izquierdo de cada gráfica se presenta la curva con atmósfera inerte de nitrógeno, donde solamente se presenta el efecto de la temperatura sobre la muestra, y al lado derecho estará la curva de análisis con aire, para mostrar el efecto tanto de la temperatura como del oxígeno presente en el aire, para de esta forma presentar su degradación mediante la oxidación.

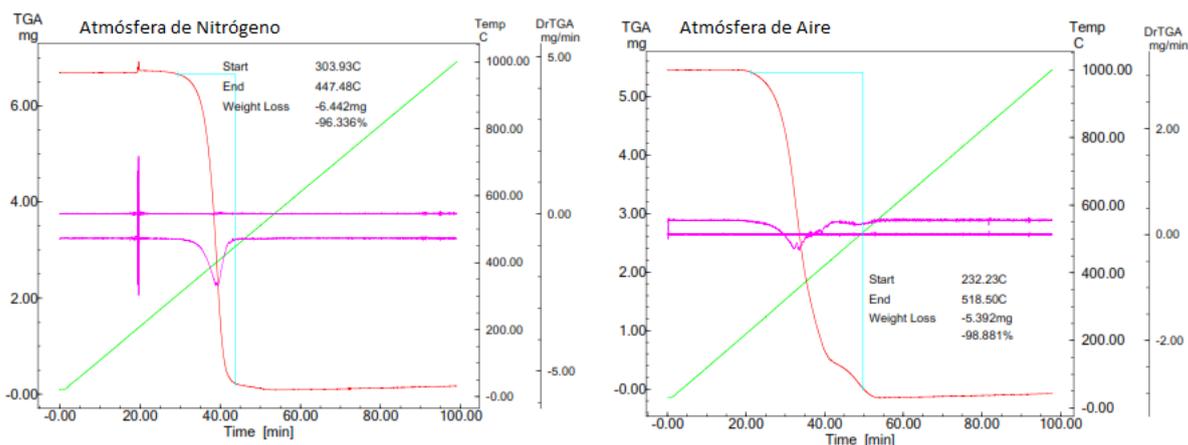


Figura 32. Curvas Termogravimétricas 100T en atmósfera de N2 y aire a 10°C/min.

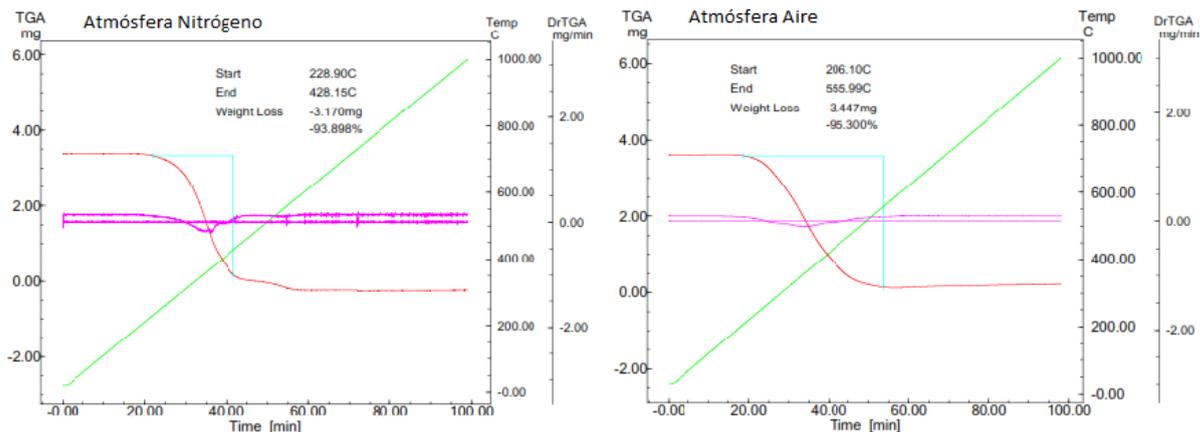


Figura 33. Curvas Termogravimétricas 75T-25M en atmósfera de N2 y aire a 10°C/min.

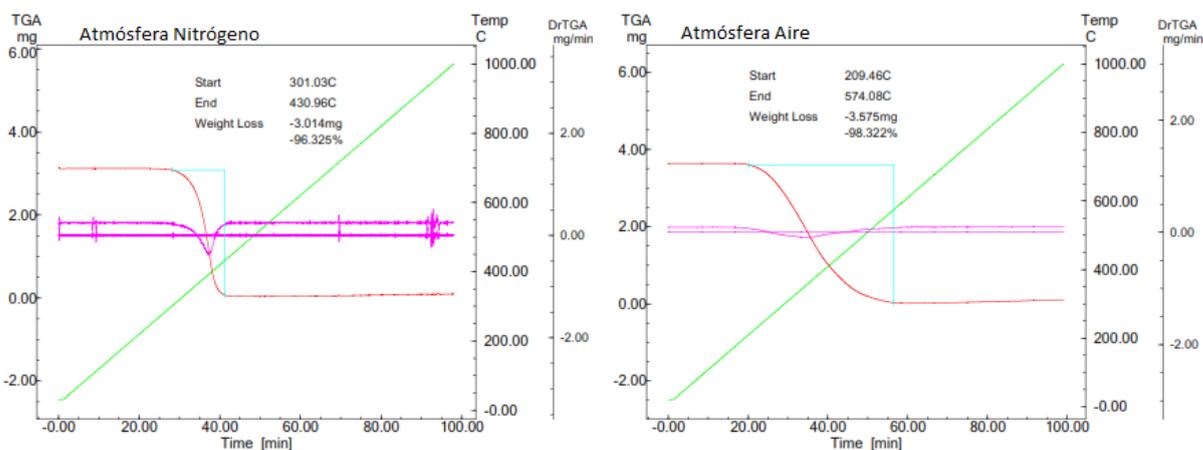


Figura 34. Curvas Termogravimétricas 50T-50M en atmósfera de N2 y aire a 10°C/min.

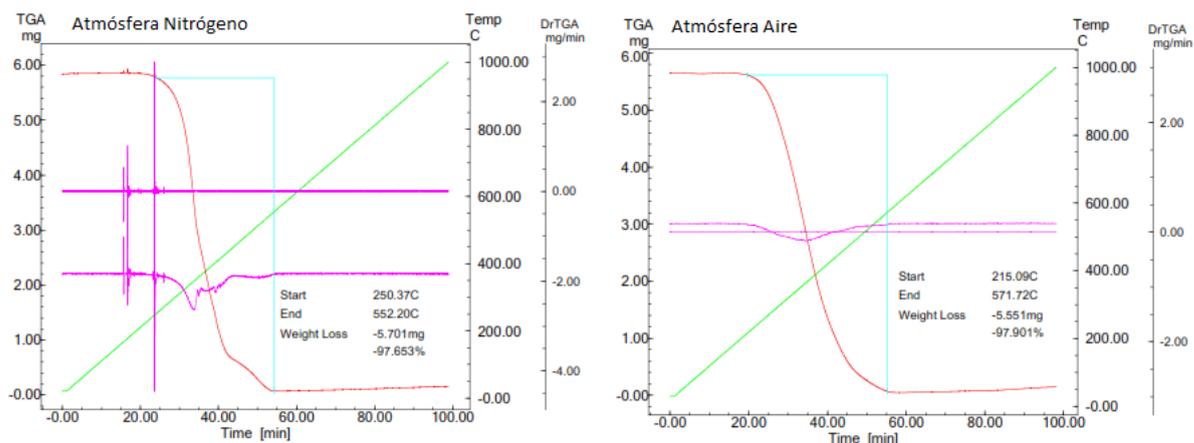


Figura 35. Curvas Termogravimétricas 25T-75M en atmósfera de N2 y aire a 10°C/min.

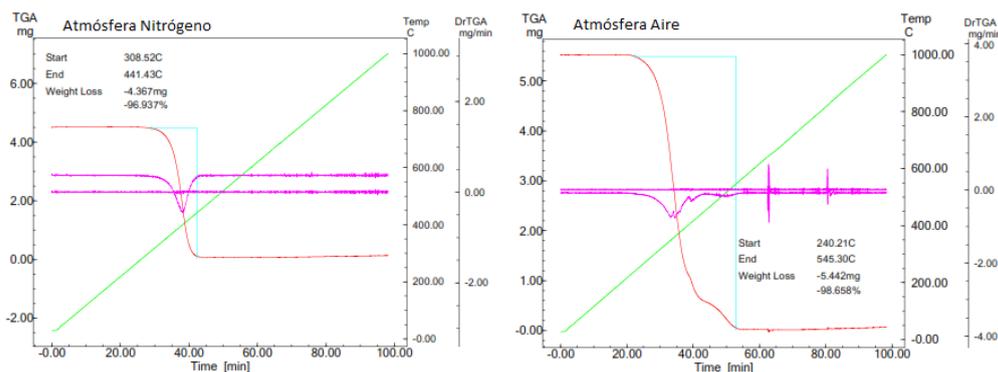


Figura 36. Curvas Termogravimétricas 100M en atmósfera de N2 y aire a 10°C/min.

En la Tabla 17. Se detallan los datos obtenidos de las curvas termogravimétricas, es así que se puede observar diferencias que se pueden dar por la variación de reacciones que ocurren en el calentamiento con diferentes atmósferas, siendo así que la temperatura de degradación con atmósfera de aire es menor a la del nitrógeno, esto dado que la presencia del oxígeno y así mismo hace que la temperatura de degradación final sea mayor, además de que la velocidad de pérdida de peso es más rápida con la de nitrógeno, gracias a que la volatilidad del aceite se compensa con la absorción del oxígeno presente en el aire.

Tabla 17.

Datos obtenidos del análisis termogravimétrico del aceite de pepa de aguacate.

| MUESTRA | ATMÓSFERA | TEMP INICIAL (°C) | TEMP FINAL (°C) | MASA INICIAL (mg) | PÉRDIDA DE MASA (mg) | PORCENTAJE DE PÉRDIDA (%) |
|---------|-----------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------------|---------------------------|
| 100T | Nitrógeno | 303,93 | 447,48 | 6,687 | -6,442 | 96,336 |
| | Aire | 232,23 | 518,5 | 5,453 | -5,392 | 98,881 |
| 75T-25M | Nitrógeno | 228,9 | 428,15 | 3,376 | -3,170 | 93,898 |
| | Aire | 206,1 | 555,99 | 3,617 | -3,447 | 95,300 |
| 50T-50M | Nitrógeno | 301,03 | 430,96 | 3,129 | -3,014 | 96,325 |
| | Aire | 209,46 | 574,08 | 3,636 | -3,575 | 98,322 |
| 25T-75M | Nitrógeno | 250,37 | 552,2 | 5,838 | -5,701 | 97,653 |
| | Aire | 215,09 | 571,72 | 5,67 | -5,551 | 97,901 |
| 100M | Nitrógeno | 308,52 | 441,43 | 4,505 | -4,367 | 96,937 |
| | Aire | 240,21 | 545,3 | 5,416 | -5,442 | 98,658 |

De las pruebas termogravimétricas se puede determinar que los PCM no presentan degradación cuando se exponen a bajas temperaturas, además de que la pérdida de masa desde la temperatura ambiental hasta los 100°C es mucho menor al 2%.

Puede verse que con una atmósfera inerte controlada la degradación térmica con la muestra 75T-25M empieza a la menor temperatura con 228.9 °C mientras que, para la muestra 100M se inicia a 308.52°C, y el mayor rango de temperatura se presenta con la muestra de 25T-75M con una diferencia de 301.83°C, así mismo para la atmósfera de aire se tiene que con la muestra 75T-25M se tiene el inicio de degradación menor es decir a los 206.1 °C y el mayor con la muestra 100M a los 240.21 °C, y el rango mayor se da en la muestra 50T-50M con 364.62 °C.

Para todos los casos analizados por el TGA se evidencia que el cambio de fase se da muy por debajo los 100°C, por lo que las muestras analizadas se consideran térmicamente estables y por lo tanto pueden ser utilizadas como sistemas de almacenamiento de energía.

Simulación computacional

En esta sección se presentarán los resultados de la simulación realizada con el programa Solidworks, los resultados son la comparación entre el uso y no de una caja portadora del PCM en una caja isoterma de 10 L, para conocer la diferencia de temperaturas en el aire interior a través del tiempo.

En la tabla 18. Se presentan los resultados del mallado que el programa seleccionó automáticamente.

Tabla 18.

Información de malla

| MALLADO | SIN PCM | CON PCM |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de malla | Malla sólida | Malla sólida |
| Mallador utilizado: | Malla basada en curvatura | Malla basada en curvatura |
| Puntos jacobianos | 29 Puntos | 29 Puntos |
| Tamaño máximo de elemento | 19,4051 mm | 19,4051 mm |
| Tamaño mínimo del elemento | 6,46829 mm | 6,46829 mm |
| Trazado de calidad de malla | Elementos cuadráticos de alto orden | Elementos cuadráticos de alto orden |
| Número total de nodos | 76930 | 87118 |
| Número total de elementos | 46707 | 51581 |
| Cociente máximo de aspecto | 78,901 | 23,337 |
| % de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3 | 99,6 | 92,2 |
| % de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10 | 0 | 7,42 |
| % de elementos distorsionados (Jacobiana) | 0 | 0 |
| Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss): | 0:00:08 | 0:00:16 |

En la figura 37 y figura 38 se pueden apreciar los resultados térmicos arrojados por el programa de simulación para la caja isoterma sin PCM y con PCM respectivamente, donde se muestran las diferentes temperaturas según la escala cromática que se encuentra en cada figura.

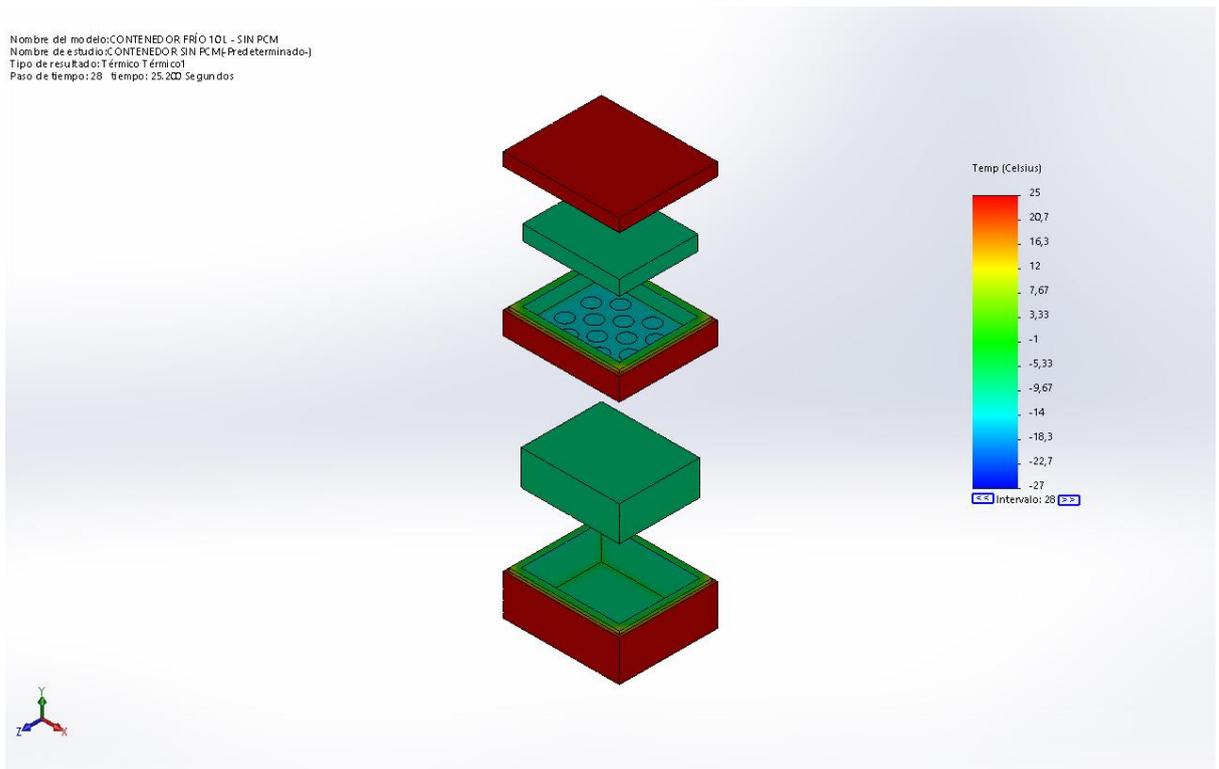


Figura 37. Resultados térmicos de la caja isoterma sin la presencia de PCM al cabo de 7 horas

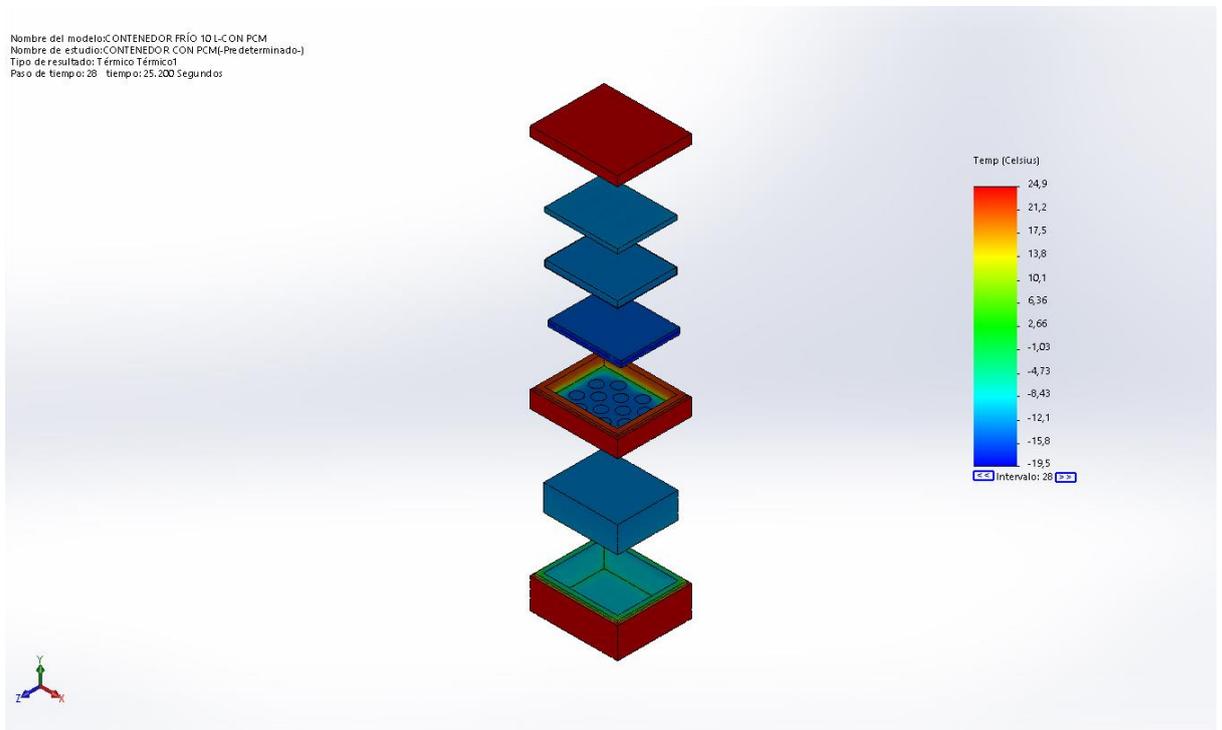


Figura 38. Resultados térmicos de la caja isoterma con la presencia de PCM al cabo de 7 horas

Para entender la Figura 39, donde se ha procedido a levantar un plano cromático por temperaturas relevantes, se ha realizado la Tabla 19, donde se indican la temperatura máxima y mínima encontrada en los elementos principales de la caja con PCM a las 7 horas de simulación.

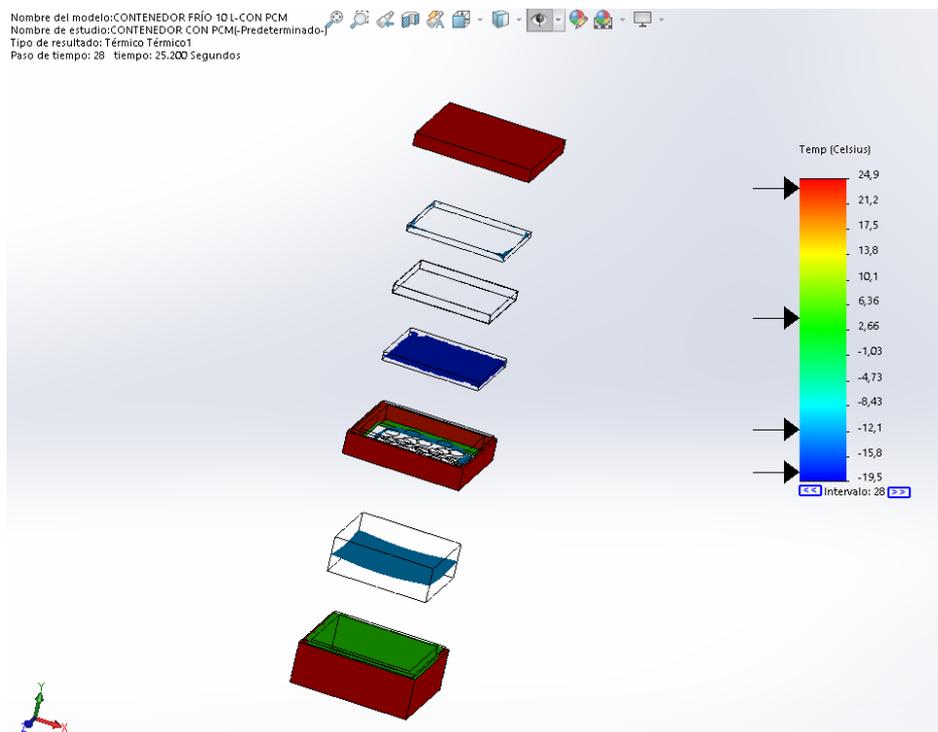


Figura 39. Valores de temperatura en la caja isoterma con la presencia de PCM al cabo de 7 horas

Tabla 19.

Temperaturas en elementos de la caja con PCM @7HORAS

| ELEMENTO | TEMPERATURA MÁXIMA(°C) | TEMPERATURA MÍNIMA (°C) |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| CONTENEDOR | 24,9 | -10,7 |
| AIRE INTERIOR | -11 | -12.6 |
| SOPORTE DE PLACA | 24,9 | -14,1 |
| PCM | -14,3 | -19,5 |
| TAPA | 24,9 | -10 |

Para una mejor comprensión del comportamiento de los elementos en la caja con PCM, se ha tomado un nodo de cada uno, siendo así que en la Figura 40 se puede apreciar la ubicación del nodo y el valor de la temperatura para el tiempo de simulación y estos valores se han plasmado en la Tabla 20, así mismo en la Figura 41 se ha trazado las curvas de comportamiento de la temperatura vs el tiempo de cada uno de estos nodos.

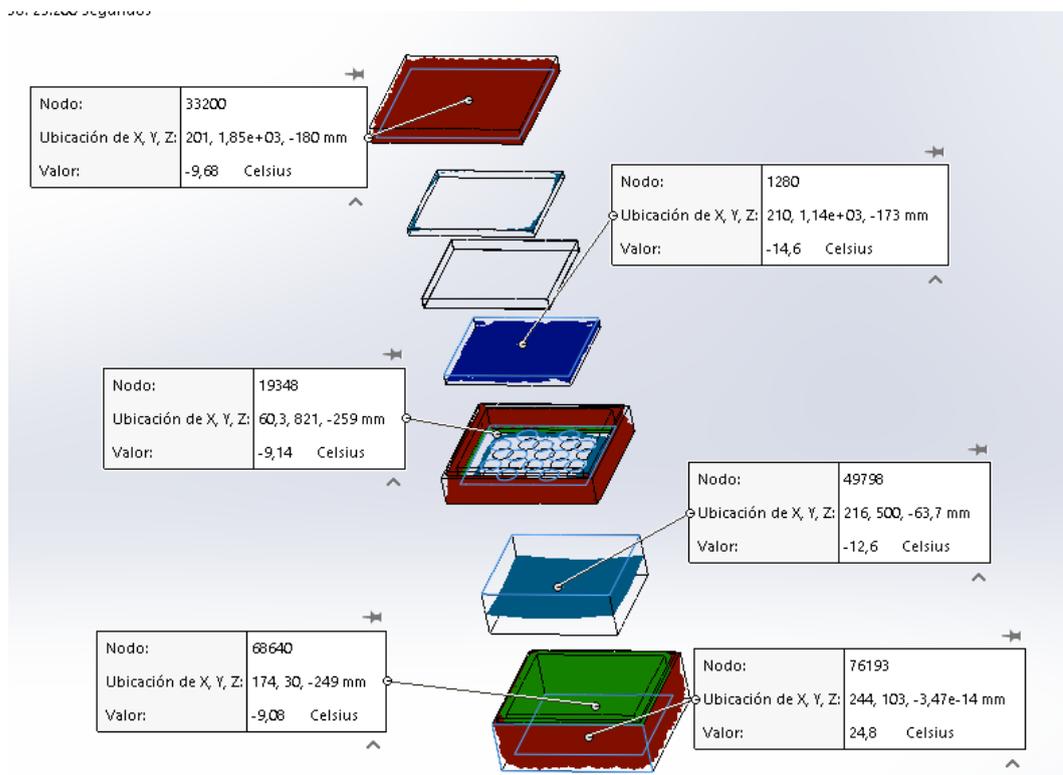


Figura 40. Ubicación de nodos para control de temperatura caja con PCM

Tabla 20.

Temperatura en nodos caja con PCM

| NODO | UBICACIÓN | TEMPERATURA INICIAL (°C) | TEMPERATURA @7HORAS (°C) |
|-------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| 76193 | CONTENEDOR EXTERNO | -14 | 24.8 |
| 68640 | CONTENEDOR INTERNO | -14 | -9.08 |
| 49798 | AIRE INTERIOR | -14 | -12.6 |
| 19348 | SOPORTE DE PLACA | -14 | -9.14 |
| 1280 | PCM | -23 | -14.6 |
| 33200 | TAPA INTERIOR | -14 | -9.68 |

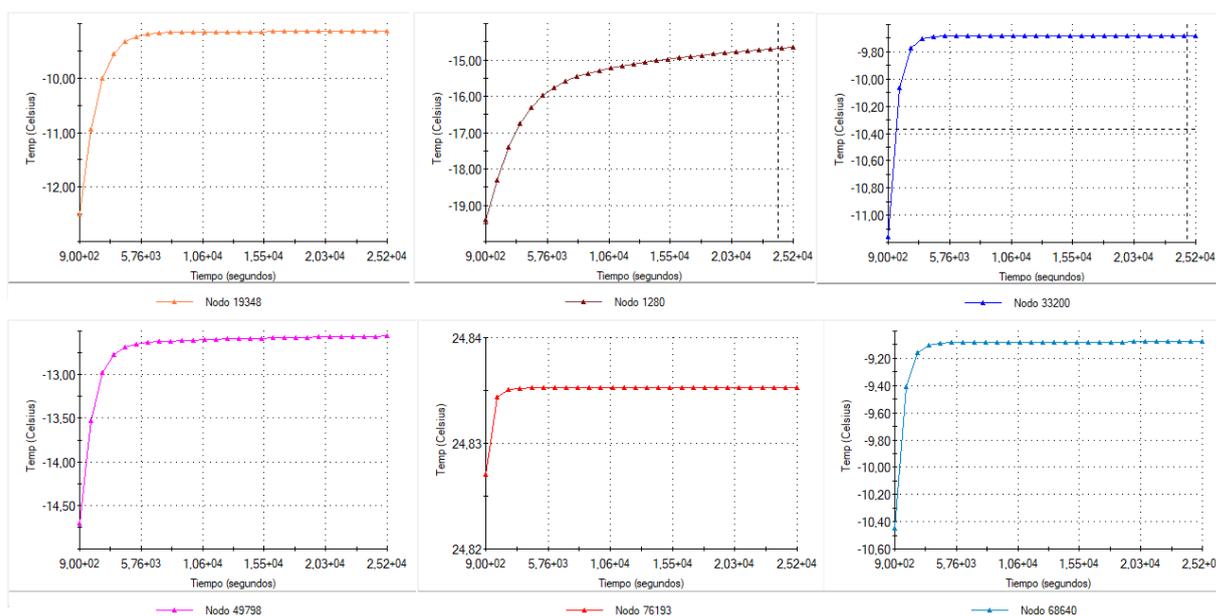


Figura 41. Temperatura vs tiempo de nodos seleccionados por elemento, caja con PCM

Como resultado de la simulación se puede apreciar también en la figura 42 la gráfica de gradiente de Temperatura en forma vectorial para conocer cómo se distribuye la temperatura (°C/cm) en los componentes de la caja.

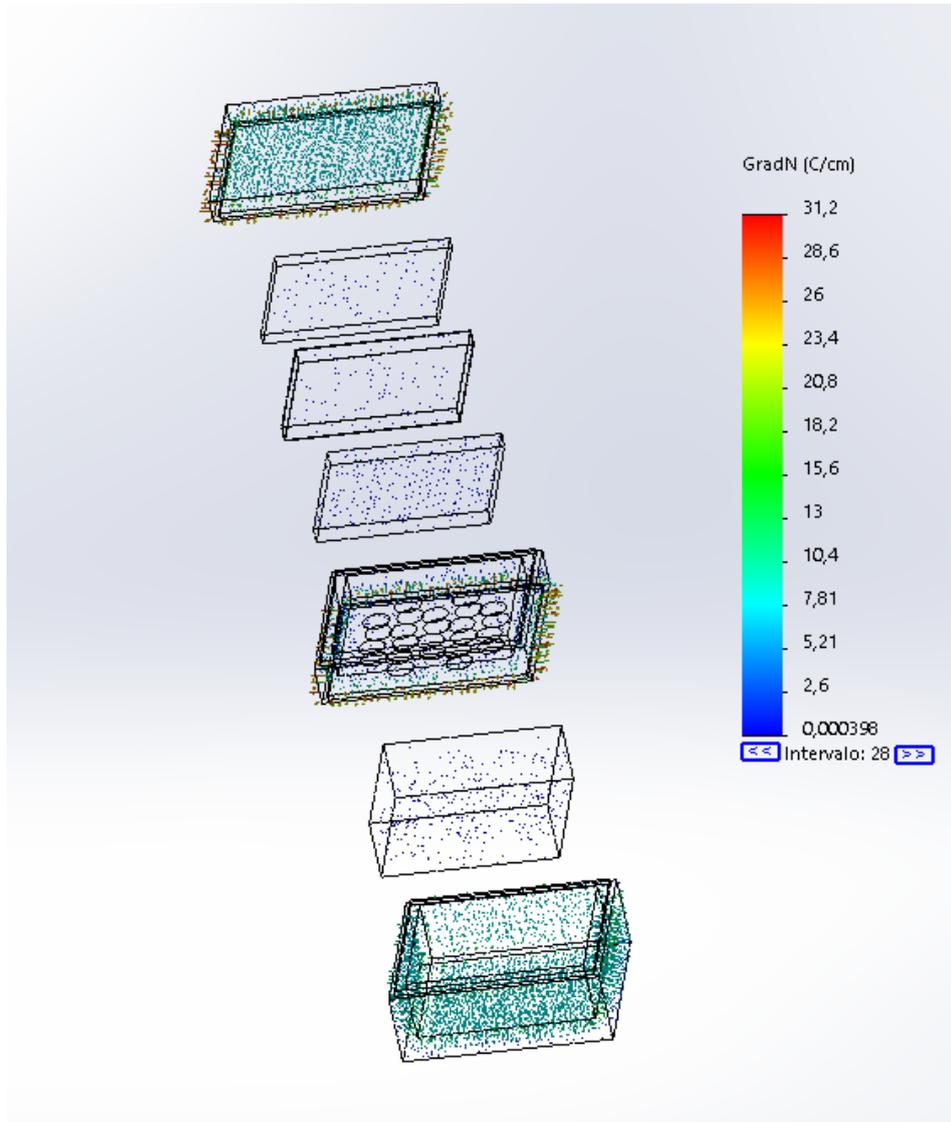


Figura 42. Gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$), caja con PCM

En la Tabla 21, se han resumido los valores importantes de los gradientes de temperatura en los diferentes elementos de la simulación.

Tabla 21.

Gradiente de Temperatura en la caja con PCM

| ELEMENTO | GRADIENTE TEMPERATURA (°C/cm) | |
|------------------|-------------------------------|----------|
| | MÁXIMO | MÍNIMO |
| AIRE | 0.588 | 4.05E-02 |
| CONTENEDOR | 20.4 | 3.98E-04 |
| SOPORTE DE PLACA | 31 | 5.94E-04 |
| TAPA | 31.2 | 6.33E-04 |
| PCM | 6.23 | 6.84E-04 |

La figura 43 muestra el flujo de calor a través de los elementos de la simulación.

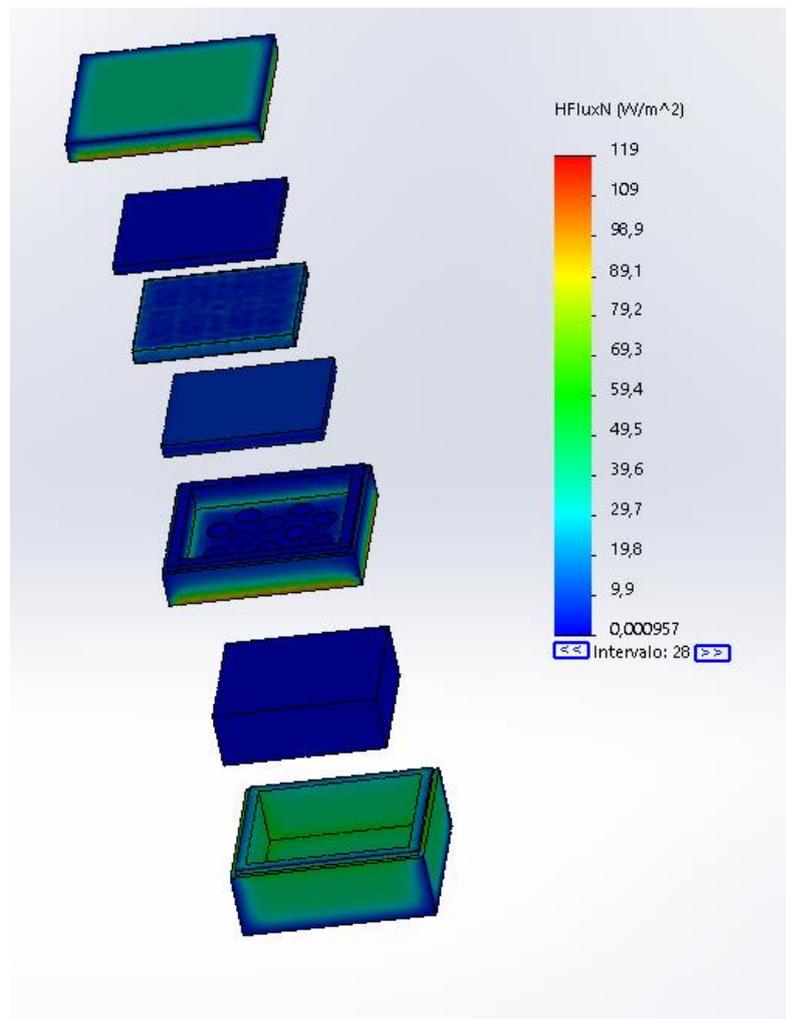


Figura 43. Flujo de calor (W/m2), caja con PCM

En la Tabla 22, se lista el flujo de calor máximo y mínimo correspondiente en los elementos de la simulación al cabo de x horas de simulación.

Tabla 22.

Flujo de calor en la caja con PCM

| ELEMENTO | FLUJO DE CALOR (W/m ²) | |
|------------------|------------------------------------|----------|
| | MÁXIMO | MÍNIMO |
| AIRE | 1.59 | 1.09E-01 |
| CONTENEDOR | 77.5 | 1.51E-03 |
| SOPORTE DE PLACA | 118 | 2.26E-03 |
| TAPA | 119 | 2.41E-03 |
| PCM | 8.72 | 9.57E-04 |

En la Figura 44 se representan diferentes planos cromáticos según las temperaturas relevantes de la simulación, donde posteriormente en la tabla 23 se indican la temperatura máxima y mínima encontrada en los elementos principales de la caja sin PCM a las 7 horas de simulación.

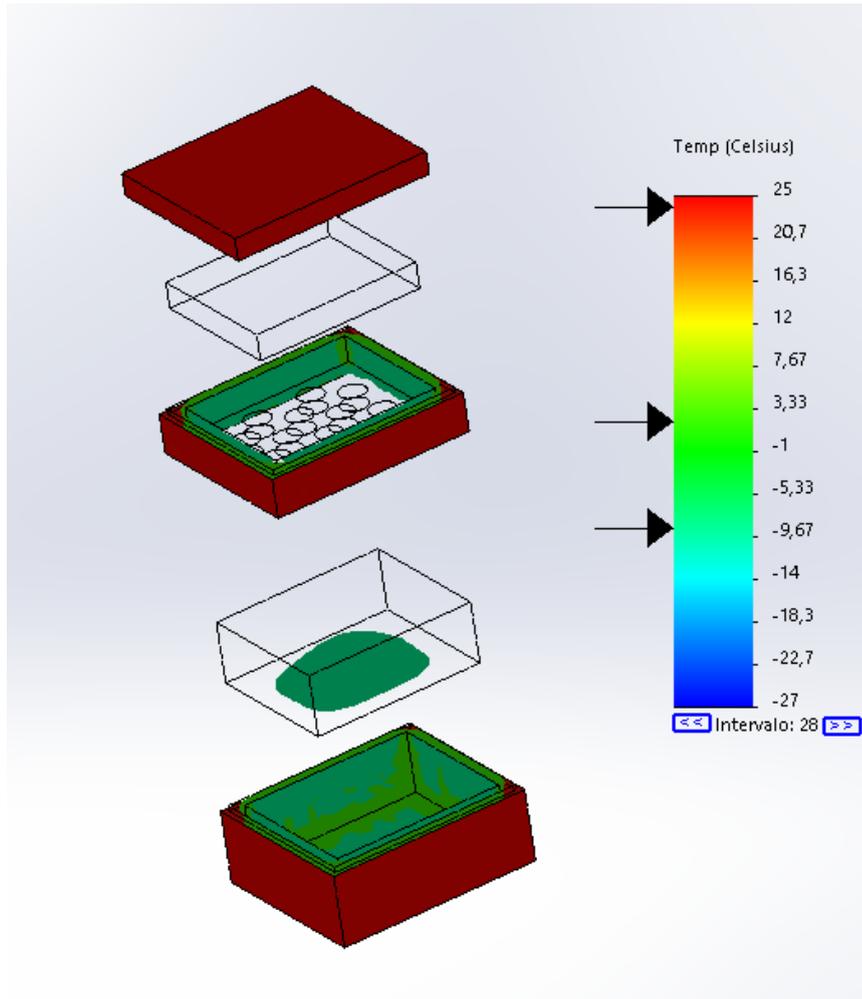


Figura 44. Valores de temperatura en la caja isoterma sin la presencia de PCM al cabo de 7 horas

Tabla 23.

Temperaturas en elementos de la caja con PCM @ 7HORAS

| ELEMENTO | TEMPERATURA MÁXIMA(°C) | TEMPERATURA MÍNIMA (°C) |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| CONTENEDOR | 24,9 | -10,7 |
| SOPORTE PLACA | 24,9 | -14,2 |
| AIRE INTERIOR | -7,37 | -8,97 |
| TAPA | 24,9 | -9,65 |

Para una mejor comprensión del comportamiento de los elementos en la caja sin PCM, se ha tomado un nodo de cada uno, así, en la Figura 45 se muestran la ubicación del nodo y el valor de la temperatura para el tiempo de simulación y estos valores se han plasmado en la Tabla 24, así mismo en la Figura 46 se ha trazado las curvas de comportamiento de la temperatura vs el tiempo de cada uno de estos nodos.

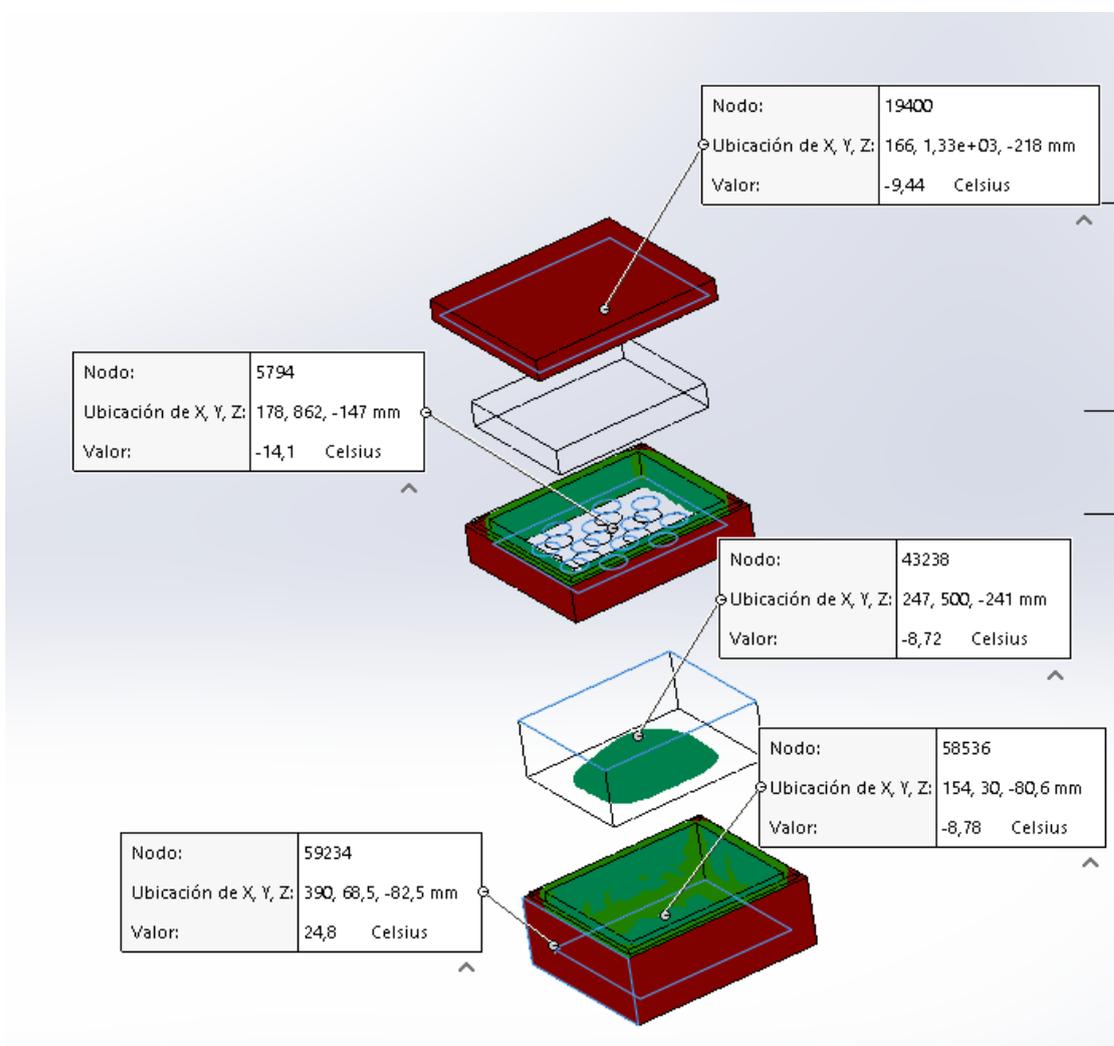


Figura 45. Ubicación de nodos para control de temperatura, caja sin PCM

Tabla 24.

Temperatura en nodos caja sin PCM

| NODO | UBICACIÓN | TEMPERATURA INICIAL (°C) | TEMPERATURA @7HORAS (°C) |
|-------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| 59234 | CONTENEDOR EXTERNO | -14 | 24.8 |
| 58536 | CONTENEDOR INTERNO | -14 | -8.78 |
| 43238 | AIRE INTERIOR | -14 | -8.72 |
| 5794 | SOPORTE DE PLACA | -14 | -14.1 |
| 19400 | TAPA INTERIOR | -14 | -9.44 |

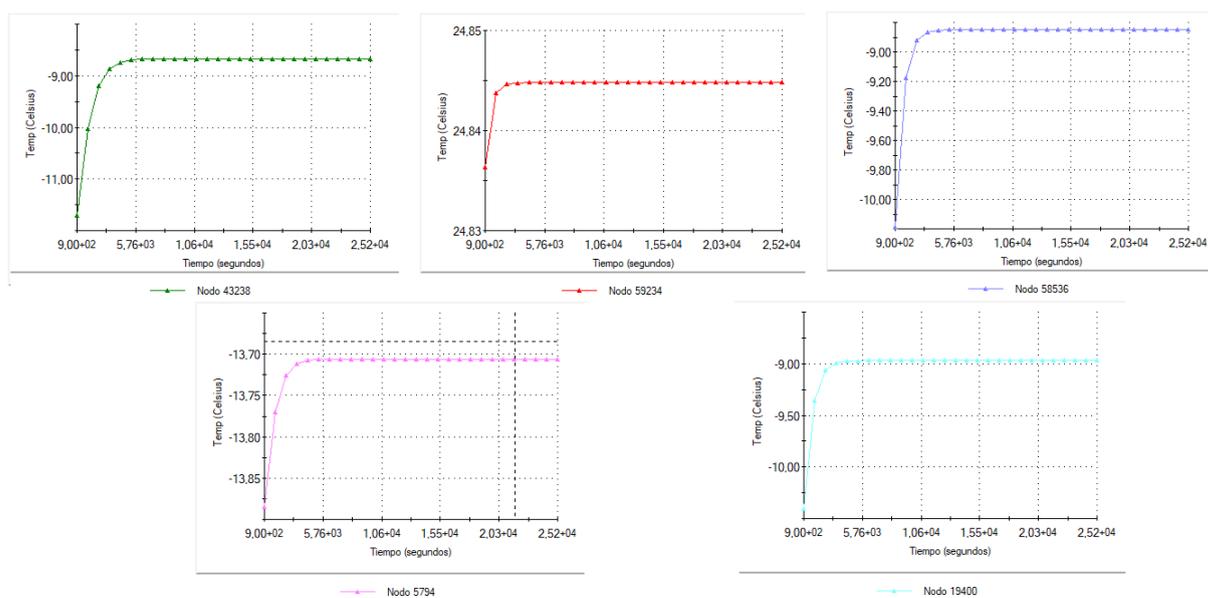


Figura 46. Temperatura vs tiempo de nodos seleccionados por elemento, caja sin PCM

Como resultado de la simulación se puede apreciar en la Figura 47 la gráfica de gradiente de Temperatura en forma vectorial para conocer cómo se distribuye la temperatura (°C/cm) en los componentes de la caja.

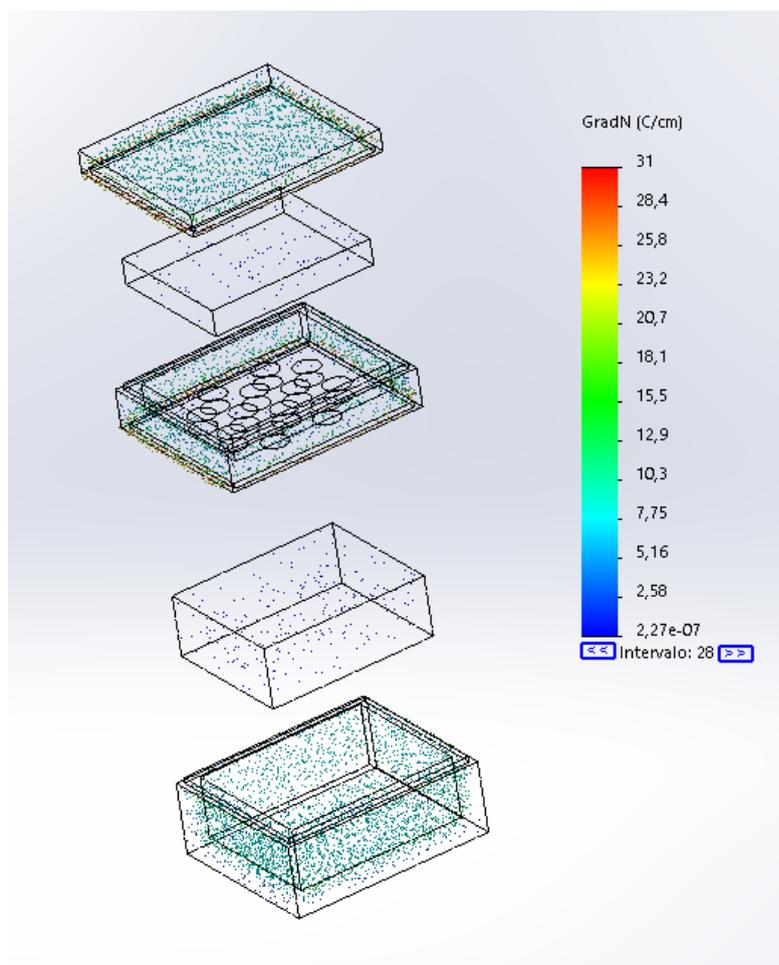


Figura 47. Gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$), caja sin PCM

En la Tabla 25, se han resumido los valores importantes de los gradientes de temperatura en los diferentes elementos de la simulación.

Tabla 25.

Gradiente de Temperatura en la caja sin PCM

| ELEMENTO | GRADIENTE TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) | |
|------------------|--|----------|
| | MÁXIMO | MÍNIMO |
| AIRE | 1.13 | 1.07E-05 |
| CONTENEDOR | 20.4 | 1.92E-04 |
| SOPORTE DE PLACA | 30.4 | 2.27E-07 |
| TAPA | 31 | 1.45E-04 |

La figura 48 muestra el flujo de calor a través de los elementos de la simulación.

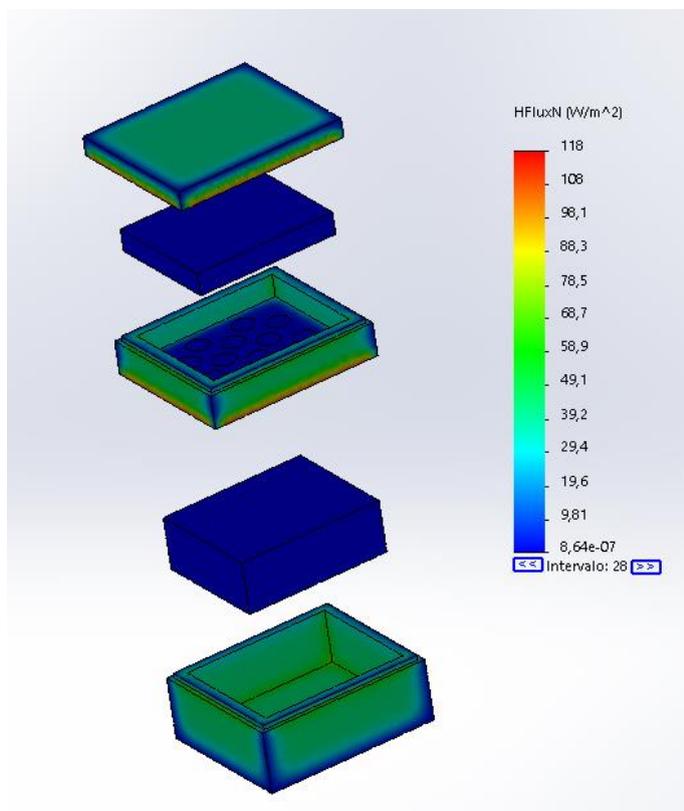


Figura 48. Flujo de calor (W/m²), caja sin PCM

En la Tabla 26, se lista el flujo de calor máximo y mínimo correspondiente en los elementos de la simulación al cabo de x horas de simulación.

Tabla 26.

Flujo de calor en la caja sin PCM

| ELEMENTO | FLUJO DE CALOR (W/m ²) | |
|------------------|------------------------------------|----------|
| | MÁXIMO | MÍNIMO |
| AIRE | 3.06 | 2.90E-05 |
| CONTENEDOR | 77.5 | 7.31E-04 |
| SOPORTE DE PLACA | 116 | 8.64E-07 |
| TAPA | 118 | 5.51E-04 |

En la tabla 27 se resume las temperaturas máximas y mínimas que presentan al final de las x horas de simulación los elementos de las cajas con y sin la presencia del PCM

Tabla 27.

Temperaturas en los diferentes elementos.

| ELEMENTO | CON | SIN | CON | SIN | CON | SIN | CON | SIN |
|---------------|--------------------------|-----|---|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| | PCM | PCM | PCM | PCM | PCM | PCM | PCM | PCM |
| | TEMPERATURA INICIAL (°C) | | TEMPERATURA PROMEDIO (°C) A LAS 7 HORAS | | TEMPERATURA MÁXIMA (°C) A LAS 7 HORAS | | TEMPERATURA MÍNIMA (°C) A LAS 7 HORAS | |
| AIRE INTERIOR | -14 | -14 | -12.08 | -8.68 | -11 | -7.37 | -12.6 | -8.97 |
| PCM | -23 | | -16.64 | | 24.9 | | -19.5 | |
| CONTENEDOR | -14 | -14 | 10.13 | 10.17 | -14.3 | 24.9 | -10.7 | -10.7 |
| PORTA PCM | -14 | -14 | 7.18 | 0.31 | 24.9 | 24.9 | -14.1 | -14.2 |
| TAPA | -14 | -14 | 9.73 | 10.17 | 24.9 | 24.9 | -10 | -9.65 |

Discusión de resultados

Según los resultados de la presente investigación la hipótesis resulta verdadera al ser que el aceite de pepa de aguacate tratado como PCM según la simulación con las características obtenidas de los diferentes análisis, mejora en un 39% el comportamiento térmico de un contenedor para transporte y almacenamiento en frío en un periodo de 7 horas, al presentar buenas características térmicas en su cambio de fase sólido-líquido, y no presentando un cambio significativo en su volumen.

A partir de los análisis termogravimétricos, se puede indicar que el PCM del aceite de pepa de aguacate son estables a temperaturas bajas, ya que, el inicio de la descomposición se da sobre los 100°C, por lo que este material es adecuado para procesos a bajas temperaturas según el criterio de Aydin y Aydin (2012) y Acurio (2018).

Tanto los puntos donde ocurre la solidificación y fusión en los aceites se utilizan para su caracterización ya que estos se relacionan con sus propiedades térmicas, es así que el análisis DSC es útil para esta determinación, tomando en cuenta que esta técnica se ha utilizado para otros aceites como son los de soya y algodón, lo cual es útil para visualizar gráficamente el comportamiento en el cambio de fase (Nassu & Gonçalves, 1999).

Al igual que el estudio realizado por Castorena-García, Rojas-López (2011) con ayuda de la espectrometría infrarroja se identificaron los componentes del aceite de pepa de aguacate, resaltando la identificación de las amidas tipo I, II y III, y los enlaces que se asocian a este aceite, mostrando de esta forma la estabilidad química del material en sus diferentes composiciones al no presentar elementos que posean inestabilidad.

Si bien el aceite de pepa de aguacate a partir de semillas maduras al 100% no posee una entalpía muy alta en comparación con otros PCM utilizados para aplicaciones de bajas temperaturas ha dado un resultado aceptable en la simulación, por lo cual se podría dar paso

a nuevos estudios con este aceite a base de agua para incremento de su entalpía como en los estudios realizados por Suamir (2018) con aceites de maíz y soya en base de agua obteniendo entalpías de fusión entre los 185 y 297 J/g respectivamente, es decir estos tienen más de 3 o 5 veces mayor la entalpía de cambio de fase que la del PCM investigado, pero su aplicación va a temperatura de entre los -1°C a los 5°C .

Mientras tanto el PCM caracterizado puede actuar entre los -23°C y los 14°C , por lo que su aplicación tiene un amplio espectro pudiendo darse su uso para el almacenamiento y transporte de alimentos congelados, semen vacuno y caballar, platos precocinados, plasma sanguíneo que utilizan PCM que actúan a una temperatura de -21°C , para alimentos refrigerados, semen de cerdos y medicamentos alrededor de los -3°C , Mariscos vivos a los 5°C , frutos tropicales y semen de conejos a los 10°C , según Domínguez (2008).

Simulación computacional

Mediante la simulación computacional realizada en el programa Solidworks se obtuvo una diferencia entre el uso o no del PCM en un contenedor para almacenamiento y transportación de productos a bajas temperaturas, es así que con una temperatura ambiente de 25°C y utilizando un contenedor de polipropileno extendido de baja densidad (PPE) sin la presencia de PCM (muestra 100M) al cabo de 7 horas se tiene una temperatura promedio en el aire interno del contenedor de -8.68°C y con la presencia del PCM se llega al mismo tiempo a un promedio de temperatura de -12.08°C , es decir un porcentaje mayor en 39 % con respecto a no utilizar PCM de pepa de aguacate, demostrando según el criterio de Chen (2016) es necesaria una simulación de transferencia de calor en el cambio de fase sólido líquido para investigar el comportamiento del almacenamiento de energía térmica.

El realizar una simulación a partir de un material que ha sido caracterizado como PCM ayuda a conocer su comportamiento más cercano a la realidad y de esta manera poder

llegar a tomar un paso más hacia su producción masiva o según los resultados a descartar su uso, esto por la importancia de poder realizar una simulación 3D para aplicaciones poco estudiadas para entender la distribución térmica con el uso de PCM (Jaguemont et al., 2018).

Es así que según Tardieu (2011), el uso de software de simulación se necesita para la predicción del rendimiento térmico, obteniendo que más tarde las mediciones realizadas lograron una gran concordancia con los resultados virtuales obtenidos, dando buenos resultados con el uso de PCM, por lo que se puede dar paso a un nuevo estudio mediante sensores para poder comparar los datos obtenidos en la simulación y los datos que pueda arrojar un estudio en un contenedor real.

Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar el aceite de pepa de aguacate mediante las técnicas de Espectrometría Infrarroja, Calorimetría Diferencial de Barrido y Termogravimetría, de las cuales las térmicas fueron las características principales para proceder a la simulación computacional obteniendo como resultado que la caja térmica con el PCM puede reducir la temperatura interior hasta un 39% más que el no usar este tipo de material.

Al realizar la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier al aceite de pepa de aguacate muestra principalmente un perfil lipídico, con comportamientos similares en las diferentes composiciones de la muestra, además que al revisar los grupos funcionales ninguno podría considerar con inestabilidad química.

A partir del análisis térmico se puede observar que el aceite se mantiene en estado líquido cuando se encuentra a temperaturas ambientales y comienza su cambio de fase (cristalización) alrededor de los $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y posterior a la solidificación al aumentar la temperatura inicia su fusión alrededor de los $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con respecto a su comportamiento térmico en lo que se trata a la estabilidad, gracias a la termogravimetría, se concluye que su degradación por efecto solamente de la temperatura, inicia alrededor de los $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que por efecto de la temperatura y el ambiente (presencia de oxígeno) estaría alrededor de los $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que el efecto de la degradación térmica no afectaría a la aplicación de bajas temperaturas.

Se da preferencia al uso del aceite 100% elaborado con pepas de aguacate maduro que a pesar de tener la segunda mejor entalpía ($52,93\text{ J/g}$) tiene una rango de temperaturas mayor (para el cambio de fase), además de que es más fácil la recolección de pepas de este tipo, y teniendo en cuenta la sostenibilidad, la pulpa en este estado es utilizada como comestible, lo que no ocurre con la pulpa del fruto tierno.

Los rangos de temperatura óptimos para trabajar con la muestra 100M se encuentra entre los -25°C y 14°C , con lo que hace válido su uso para las aplicaciones a bajas temperaturas, pero, al no poseer un alto valor de calor latente, es mejor utilizar más cantidad de PCM para obtener mejores resultados.

La capacidad del PCM para que la caja isoterma permanezca o mantenga una temperatura de transportación y almacenamiento en frío óptima es evidente.

Referencias Bibliográficas

- Abuelnuor, A. A. A., Omara, A. A. M., Saqr, K. M., & Elhag, I. H. I. (2018). Improving indoor thermal comfort by using phase change materials: A review. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er.4000>
- Acurio, K., Chico-Proano, A., Martínez-Gómez, J., Ávila, C. F., Ávila, Á., & Orozco, M. (2018). Thermal performance enhancement of organic phase change materials using spent diatomite from the palm oil bleaching process as support. *Construction and Building Materials*, 192(March), 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.148>
- Altomonte, H., Coviello, M., & Lutz, W. (2003). Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y en el Caribe. Restricciones y perspectivas. In Cepal. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6426/S039642_es.pdf?sequence=1
- Aydin, A. A., & Aydin, A. (2012). High-chain fatty acid esters of 1-hexadecanol for low temperature thermal energy storage with phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96(1), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.013>
- Boucíguez, A. C., Lozano, R. F., Sánchez, A., & Lara, M. Á. (2006). Conservación de productos agrícolas utilizando sustancias de cambio de fase. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10.
- Boussaba, L., Makhoul, S., Foufa, A., Lefebvre, G., & Royon, L. (2019). vegetable fat: A low-cost bio-based phase change material for thermal energy storage in buildings. *Journal of Building Engineering*, 21, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.10.022>
- Bora, P. S., Narain, N., Rocha, R. V. M., & Queiroz Paulo, M. (2001). Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas y Aceites*, 52(3–

4), 171–174. <https://doi.org/10.3989/gya.2001.v52.i3-4.353>

Castorena-García, Rojas-López, D.-M. (2011). Análisis de Pulpa y Aceite de Aguacate con Espectroscopia Infrarroja. *Conciencia Tecnológica*, 42, 5–10.

Cedeño, F. O., Prieto, M. M., Espina, A., & García, J. R. (2001). Measurements of temperature and melting heat of some pure fatty acids and their binary and ternary mixtures by differential scanning calorimetry. *Thermochimica acta*, 369(1-2), 39-50

Chen, C., Zhang, H., Gao, X., Xu, T., Fang, Y., & Zhang, Z. (2016). Numerical and experimental investigation on latent thermal energy storage system with spiral coil tube and paraffin/expanded graphite composite PCM. *Energy Conversion and Management*, 126, 889–897. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.068>

Curia, M. V. (2010). Estudio Físicoquímico y Catalítico del Sistema Mn-O-V. *Tesis Doctoral*, 209.

Dabas, Deepti; M. Shegog, Rachel; R. Ziegler, Gregory; D. Lambert, Joshua (2013). Avocado (*Persea americana*) Seed as a Source of Bioactive Phytochemicals Current Pharmaceutical Design, Volume 19, Number 34, pp. 6133-6140(8). Bentham Science Publishers

Dagde, K. K. (2019). Extraction of vegetable oil from avocado seeds for production of biodiesel. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(2), 215. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i2.3>

Demirbas, M. F. (2006). Thermal energy storage and phase change materials: an overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 85-95.

Domínguez, M., Csic, F., & Novais, C. A. (2009). Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización Utilization of the Phase Change Materials (

PCM) in the Air Conditioning, 20, 107–115. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4076it.08>

Domínguez MP, Araus K., Bonert P., Sánchez F., San Miguel G., Toledo M. (2014) El aguacate y sus residuos: un enfoque del potencial / aplicación del combustible. En: Lefebvre G., Jiménez E., Cabañas B. (eds) Medio ambiente, energía y cambio climático II. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 34. Springer, Cham

Domínguez, M., García, C., Arias, J. M., & Csic, F. (2008). Los PCM en el transporte de productos perecederos. DIGITAL.CSIC.ES, 1(2008), 15.

Durak, H., & Aysu, T. (2015). Effect of pyrolysis temperature and catalyst on production of bio-oil and bio-char from avocado seeds. Research on Chemical Intermediates, 41(11), 8067–8097. <https://doi.org/10.1007/s11164-014-1878-0>

Fabiani, C., Pisello, A. L., Barbanera, M., & Cabeza, L. F. (2020). Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigation and life cycle assessment. Journal of Energy Storage, 28, 101129.

Faraldos, M. (2011). Técnicas de análisis y caracterización de materiales , Técnicas de análisis y caracterización de MaTeriales.

Fontaine, G., & Puyana, A. (2008). La guerra del fuego: Políticas petroleras y crisis energética en América Latina. Flacso, March 2008, 285.

GARCÍA GONZALEZ., F. E. (2015). DETERMINACION EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES TERMOFISICAS DE UN MATERIAL ORGÁNICO DE CAMBIO DE FASE Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL PROCESO DE CARGA Y DESCARGA EN UN DOMINIO CILINDRICO. 2015, 1–111. <https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2012.01.110>

García Mayo, J. (2012). *Materiales de Cambio de Fase . Diseño de una instalación para la*

caracterización de PCM a altas.

García, M. C. P. (2015). Avances en determinación de propiedades termofísicas de materiales de cambio de fase: búsqueda y análisis de nuevos materiales PCM-TES de bajo coste (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza).

Gidigbi, J. A., Osemeahon, S. A., Ngoshe, A. M. and, & Babanyaya, A. (2019). Modification of Polyvinyl Acetate with Hydroxylated Avocado Seed Oil as a Copolymer Binder for Possible Application in Coating Industry. 2, 231–244.

Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Informacion Tecnologica*, 25(2), 175–188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020>

Guillén, M. D., & Cabo, N. (1998). Relationships between the Composition of Edible Oils and Lard and the Ratio of the Absorbance of Specific Bands of Their Fourier Transform Infrared Spectra. Role of Some Bands of the Fingerprint Region. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(5), 1788–1793. <https://doi.org/10.1021/jf9705274>

He, Q., Wang, S., Tong, M., & Liu, Y. (2012). Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage. *Energy Conversion and Management*, 64, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.010>

Hyun, D. C., Levinson, N. S., Jeong, U., & Xia, Y. (2014). Emerging applications of phase-change materials (PCMs): Teaching an old dog new tricks. *Angewandte Chemie - International Edition*. <https://doi.org/10.1002/anie.201305201>

(IRENA) International Renewable Energy Agency 2013 “Thermal Energy Storage. Technology brief E17” January 2013

- Jain, A., Kumar, A., Shukla, A., & Sharma, A. (2017). Solar Drying Technology.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4>
- Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., & Mierlo, J. (2018). Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 132, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.097>
- Juárez Varón, D., Ferrándiz Bou, S., Balart Gimeno, R. A., & García Sanoguera, D. (2012). Estudio de materiales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro PCM. *3c Tecnología*, 3, 54–77. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/34264%5Cnhttp://www.ebookxp.org/riunet.upv.es/handle/10251/34264?b=4>
- Kurklo, A. (1998). Energy storage applications in greenhouses by means of phase change materials (PCMs) : a review. ~ *Pergamon Renewable Energy*, 13(1), 89–103.
- LEE, S., & YOUNG, R. (1984). Temperature sensitivity of avocado fruit in relation to C. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109(5), 689–692.
- Li, Y., Liu, S., & Zhang, Y. (2014). *Progress in Sustainable Energy Technologies Vol II, II*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07977-6>
- Liu, Y. D., Zhou, Y. G., Tong, M. W., & Zhou, X. S. (2009). Experimental study of thermal conductivity and phase change performance of nanofluids PCMs. *Microfluidics and Nanofluidics*. <https://doi.org/10.1007/s10404-009-0423-8>
- Macas Pallo, L. (2015). Políticas en gestión energética para incentivar el uso de energías renovables en Ecuador ¿cómo incide la crisis del precio del petróleo. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137810>
- Martín Chicharro, G. J. (2016). PPT: Sistemas De Almacenamiento De Energía. Presentation,

1–133. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18325/1/TFG-P-432.pdf>

Mehling H., Cabeza L.F. (2008) Applications in transport and storage containers. In: Heat and cold storage with PCM. Heat and Mass Transfer. Springer, Berlin, Heidelberg.

Mehlenbacher VC. 1970. Análisis de grasas y aceites. Ediciones Urmo. Bilbao, España.

Mírez Tarrillo, J. (2012). Sistemas de almacenamiento energético. Investigación y Ciencia, 432, 70–77. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3999648>

Mondragón Cortez, P. (2015). Espectroscopia de infrarrojo para todos. In Neural Regeneration Research.

Nassu, R. T., & Gonçalves, L. A. G. (1999). Determination of melting point of vegetable oils and fats by differential scanning calorimetry (DSC) technique. *Grasas y Aceites*, 50(1), 16–22. <https://doi.org/10.3989/gya.1999.v50.i1.630>

Nyoman Suamir, I., Made Rasta, I., Sudirman, & Tsamos, K. M. (2019). Development of corn-oil ester and water mixture phase change materials for food refrigeration applications. *Energy Procedia*, 161(2018), 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.082>

Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>

Oró, E., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513–533. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>

Oró, E., Miró, L., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Thermal analysis of a low

temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system.

International Journal of Refrigeration, 35(6), 1709–1714.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.05.004>

Orozco M., Martínez J., Chico A., Acurio K. (2018). Procesado y Caracterización de Nitratos como Materiales de Cambio de Fase para Evaluar su Capacidad de Almacenamiento Energético. *Revista Técnica Energía*, 224-235.

Paredes, H. R., José, J., & García, A. (2010). *ENERGÍA*. 74–85.

Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>

Rasta, I. M., & Suamir, I. N. (2018). The role of vegetable oil in water based phase change materials for medium temperature refrigeration. *Journal of Energy Storage*, 15, 368–378.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2017.12.014>

Rohman, A., & Man, Y. B. C. (2010). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil. *Food Research International*, 43(3), 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.006>

Rajo Callejas, F. (2000). Tablas de Espectroscopía Infrarroja. Facultad de Química - Departamento de Programas Audiovisuales, 14.

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TablasIR_15437.pdf
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IRTablas_33080.pdf

Rozanna, D., Chuah, T. G., Salmiah, A., Choong, T. S. Y., & Sa'ari, M. (2005). Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review.

International Journal of Green Energy. <https://doi.org/10.1081/GE-200038722>

- Sari, A. (2006). Eutectic mixtures of some fatty acids for latent heat storage: thermal properties and thermal reliability with respect to thermal cycling. *Energy conversion and management*, 47(9-10), 1207-1221.
- Segovia, F. J., Hidalgo, G. I., Villasante, J., Ramis, X., & Almajano, M. P. (2018). Avocado seed: A comparative study of antioxidant content and capacity in protecting oil models from oxidation. *Molecules*, 23(10). <https://doi.org/10.3390/molecules23102421>
- Sharma, A., Won, L. D., Buddhi, D., & Park, J. U. (2005). Numerical heat transfer studies of the fatty acids for different heat exchanger materials on the performance of a latent heat storage system. *Renewable Energy*, 30(14), 2179-2187.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Sharma, A., Shukla, A., Chen, C. R., & Wu, T. N. (2014). Development of phase change materials (PCMs) for low temperature energy storage applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.02.009>
- Silva, I. R. A., Magnani, M., de Albuquerque, F. S. M., Batista, K. S., Aquino, J. de S., & Queiroga-Neto, V. (2017). Characterization of the chemical and structural properties of native and acetylated starches from avocado (*Persea americana* Mill.) seeds. *International Journal of Food Properties*, 20(1), S279–S289. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295259>
- Solís-Fuentes JA, Durán-de-Bazúa MC. 2004. Mango seed uses: Thermal behaviour of mango seed almond fat and its mixtures with cocoa butter. *Bioresource Technology* 92, 71-78.

- Solís-fuentes, P. J. A., & Durán-de-bazúa, M. R. H. M. C. (2010). Caracterización físico-química y comportamiento térmico del aceite de “ almendra ” de guanábana (*Annona muricata* , L), *61*(1), 58–66.
- Suppes, G. J., Goff, M. J., & Lopes, S. (2003). Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications. *Chemical Engineering Science*, *58*(9), 1751–1763. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00006-X28](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00006-X28)
- Suriñach, S., Baro, M. D., Bordas, S., & Clavaguera, N. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales, *31*.
- Villegas, E. (2012). Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico, 25–32.

Lista de Figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estudio de materiales de cambio de fase por año..... | 11 |
| Figura 2. Estudios de materiales de cambio de fase por país (nivel mundial) | 11 |
| Figura 3. Estudios de materiales de cambio de fase por país (Latinoamérica) | 12 |
| Figura 4. Esquema de métodos posibles de almacenamiento de energía térmica | 16 |
| Figura 5. Esquema cambio de fase entre estados de la materia. | 17 |
| Figura 6. Almacenamiento de calor como calor latente para el caso de cambio de fase sólido-líquido | 18 |
| Figura 7. Clasificación de los materiales de cambio de fase | 21 |
| Figura 8. Representación de un espectrómetro infrarrojo..... | 27 |
| Figura 9. Esquema de un aparato de DSC..... | 28 |
| Figura 10. Esquema termobalanza. | 29 |
| Figura 11. Esquema caja isotérmica con PCM y sin PCM..... | 36 |
| Figura 12. Creación de nuevo estudio en Solidworks | 36 |
| Figura 13. Creación estudio térmico | 37 |
| Figura 14. Definición de materiales | 37 |
| Figura 15. Definición de propiedades en nuevos materiales | 38 |
| Figura 16. Definición de cargas térmicas | 38 |
| Figura 17. Asignación de cargas térmicas en superficies | 39 |
| Figura 18. Creación de malla | 39 |
| Figura 19. Mallado de la simulación. | 40 |
| Figura 20. Botón comando ejecución del estudio..... | 40 |
| Figura 21. Curvas de cambio de fase muestra 100T..... | 43 |
| Figura 22. Curvas de cambio de fase muestra 75T-25M..... | 43 |
| Figura 23. Curvas de cambio de fase muestra 50T-50M..... | 44 |
| Figura 24. Curvas de cambio de fase muestra 25T-75M..... | 44 |
| Figura 25. Curvas de cambio de fase muestra 100M..... | 45 |
| Figura 26. Espectro FTIR de las diferentes composiciones del aceite de pepa de aguacate. | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 27. Espectro FTIR para la composición 100T..... | 49 |
| Figura 28. Espectro FTIR para la composición 75T-25M..... | 50 |
| Figura 29. Espectro FTIR para la composición 50T-50M..... | 51 |
| Figura 30. Espectro FTIR para la composición 25T-75M..... | 52 |
| Figura 31. Espectro FTIR para la composición 100M..... | 53 |
| Figura 32. Curvas Termogravimétricas 100T en atmósfera de N ₂ y aire a 10°C/min. | 55 |
| Figura 33. Curvas Termogravimétricas 75T-25M en atmósfera de N ₂ y aire a 10°C/min. | 56 |
| Figura 34. Curvas Termogravimétricas 50T-50M en atmósfera de N ₂ y aire a 10°C/min. | 56 |
| Figura 35. Curvas Termogravimétricas 25T-75M en atmósfera de N ₂ y aire a 10°C/min. | 56 |
| Figura 36. Curvas Termogravimétricas 100M en atmósfera de N ₂ y aire a 10°C/min. | 57 |
| Figura 37. Resultados térmicos de la caja isoterma sin la presencia de PCM al cabo de 7 horas | 60 |
| Figura 38. Resultados térmicos de la caja isoterma con la presencia de PCM al cabo de 7 horas | 60 |
| Figura 39. Valores de temperatura en la caja isoterma con la presencia de PCM al cabo de 7 horas . | 61 |
| Figura 40. Ubicación de nodos para control de temperatura caja con PCM | 62 |
| Figura 41. Temperatura vs tiempo de nodos seleccionados por elemento, caja con PCM..... | 63 |
| Figura 42. Gradiente de temperatura (°C/cm), caja con PCM | 64 |
| Figura 43. Flujo de calor (W/m ²), caja con PCM | 65 |
| Figura 44. Valores de temperatura en la caja isoterma sin la presencia de PCM al cabo de 7 horas .. | 67 |
| Figura 45. Ubicación de nodos para control de temperatura, caja sin PCM | 68 |
| Figura 46. Temperatura vs tiempo de nodos seleccionados por elemento, caja sin PCM..... | 69 |
| Figura 47. Gradiente de temperatura (°C/cm), caja sin PCM | 70 |
| Figura 48. Flujo de calor (W/m ²), caja sin PCM | 71 |

Lista de Tablas.

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Características Materiales Cambio de Fase | 20 |
| Tabla 2. Ácidos grasos encontrados en la pepa de aguacate..... | 25 |
| <i>Tabla 3. Muestras de aceite según porcentaje de composición.....</i> | <i>31</i> |
| Tabla 4. Datos de iniciales para simulación | 34 |
| Tabla 5. Características Caja Isotherma | 34 |
| Tabla 6. Características Caja Contenedora PCM | 35 |
| Tabla 7. Características del PCM..... | 35 |
| Tabla 8. Propiedades del Estudio | 41 |
| Tabla 9. Datos obtenidos de la calorimetría diferencial de barrido del aceite de pepa de aguacate | 46 |
| Tabla 10. Datos finales obtenidos de la Calorimetría Diferencial de Barrido de la curva de cristalización..... | 47 |
| Tabla 11. Datos finales obtenidos de la Calorimetría Diferencial de Barrido de la curva de fusión.... | 47 |
| Tabla 12. Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 100T | 50 |
| Tabla 13. Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 75T-25M..... | 51 |
| Tabla 14. Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 50T-50M..... | 52 |
| Tabla 15. Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 25T-75M..... | 53 |
| Tabla 16. Frecuencias, intensidad y asignación del espectro FTIR para la muestra 100M..... | 54 |
| Tabla 17. Datos obtenidos del análisis termogravimétrico del aceite de pepa de aguacate. | 57 |
| Tabla 18. Información de malla | 59 |
| Tabla 19. Temperaturas en elementos de la caja con PCM @7HORAS | 61 |
| Tabla 20. Temperatura en nodos caja con PCM..... | 63 |
| Tabla 21. Gradiente de Temperatura en la caja con PCM..... | 65 |
| Tabla 22. Flujo de calor en la caja con PCM | 66 |
| Tabla 23. Temperaturas en elementos de la caja con PCM @ 7HORAS | 67 |
| Tabla 24. Temperatura en nodos caja sin PCM..... | 69 |
| Tabla 25. Gradiente de Temperatura en la caja sin PCM | 70 |
| Tabla 26. Flujo de calor en la caja sin PCM..... | 71 |

Tabla 27. Temperaturas en los diferentes elementos..... 72