

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención en Fabricación De Autopartes De Vehículos

Almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase para su uso en un
sistema de aislamiento térmico automotriz

Andrés Patricio Méndez Tafur

Nota del Autor

Andrés Méndez, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director: Ing. Javier Martinez

Codirector: Ing. Julio Leguisamo

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

amendez.mdm@uisek.edu.ec

Aprobado
Javier

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Mecánico

Mención en Fabricación De Autopartes De Vehículos

Almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase para su uso en un sistema de aislamiento térmico automotriz

Andrés Patricio Méndez Tafur

Nota del Autor

Andrés Méndez, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director: Ing. Javier Martinez

Codirector: Ing. Julio Leguisamo

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

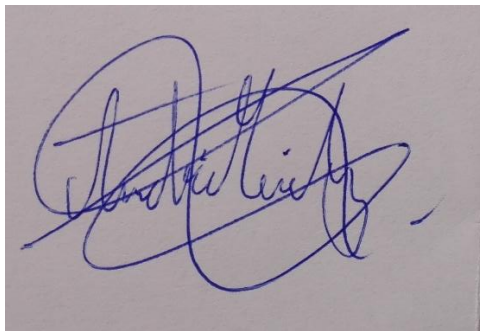
amendez.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Andrés Méndez, con cédula de identidad 1719957738, 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 se ha 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.

El presente trabajo se rige bajo el sistema de ciencia, perteneciendo al desarrollo tecnológico concretamente en la innovación en el diseño de procesos y productos en el Ecuador.



Andrés Méndez Tafur

CI: 1719957738

Índice de contenido**Contenido**

Declaración Juramentada.....	3
Índice de contenido.....	4
Índice de tablas	7
Índice de figuras	10
Resumen	12
Abstrac.....	13
Introducción.....	14
Justificación	15
Problema	17
Objetivo general.....	17
Objetivos específicos	18
Estado del arte.....	19
Almacenamiento térmico.....	19
Material de cambio de fase	20
Propiedades y Características	23
Criterios Termodinámicos	23
Criterios Cinéticos	23
Criterios Químicos.....	24
Criterios Económicos.....	24
Clasificación	24
PCM Orgánicos	25
Parafinas	26

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

No Parafinas.....	29
PCM Inorgánicos	30
Sales Hidratadas.....	31
Metálicos.....	33
PCM eutécticos	34
Encapsulación	34
Micro-encapsulación.....	34
Macro-encapsulación	37
Aplicaciones de los Materiales de Cambio de Fase.....	38
Materiales Aislante	39
Simulación térmica	41
Convergencia de resultados	44
Coeficiente de correlación de Spearman	45
Método	47
Método de selección multicriterio MCDM.....	58
Selección de materiales y características requeridas	64
Métodos de ponderación o pesos	68
Método de Entropía	69
Método de Desviación Estándar	73
Aplicación de métodos multicriterio de selección.....	76
Método Pugh.....	76
Método VIKOR	79
Método TOPSIS.....	86
Método DOMINIC	93
Método PROMETHEE II	97

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Aplicaciones para PCM	103
Simulación	105
Resultados.....	115
Resultado de los métodos de ponderación.....	115
Resultado de los métodos multicriterio MCDM.....	117
Resultados del método Pugh.....	117
Resultados del método VIKOR	119
Resultado del método TOPSIS	120
Resultados del método COPRAS	122
Resultados del método DOMINIC	124
Resultados del método PROMETHEE II	126
Resultados de la correlación de Spearman	128
Resultados de la simulación.....	130
Resultado de la simulación sobre la autoparte.....	141
Convergencia de resultados	143
Discusión de resultados	145
Métodos multicriterio	145
Simulación	147
Correlación de Spearman.....	148
Conclusiones.....	149
Recomendaciones	151
Bibliografía	152

Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las parafinas	27
Tabla 2. Características de la parafina	29
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las no parafinas	30
Tabla 4. Sales hidratadas, ventajas y desventajas	32
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los materiales metálicos.....	33
Tabla 6. Propiedades de los materiales aislantes	41
Tabla 7. Calor específico de distintos materiales	51
Tabla 8. Densidad de varios materiales	52
Tabla 9. Resumen de PCM	55
Tabla 10. Propiedades de las sales hidratadas	56
Tabla 11. Propiedades de las parafinas.....	58
Tabla 12. Componentes de una evaluación multicriterio	61
Tabla 13. Propiedades de las parafinas.....	65
Tabla 14. Propiedades de las sales hidratadas	66
Tabla 15. Matriz de materiales y criterios a ponderar	69
Tabla 16. Cálculo de la entropía (e) y grado de divergencia (d)	72
Tabla 17. Pesos del método de entropía	73
Tabla 18. Resultados intermedios del cálculo de la desviación estándar	74
Tabla 19. Pesos del método de desviación estándar	75
Tabla 20. Comparación de los valores de ponderación obtenidos.....	75
Tabla 21. Pesos a utilizar en MCDM.....	76
Tabla 22. Pasos del método Pugh	77
Tabla 23. Códigos de selección para PCM.....	77

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Tabla 24. Matriz de evaluación. Criterios y valores de los materiales elegidos.....	78
Tabla 25. Matriz de decisión VIKOR.....	79
Tabla 26. Matriz normalizada VIKOR	81
Tabla 27. Matriz estandarizada de pesos VIKOR	82
Tabla 28. Soluciones optimas U_i	84
Tabla 29. Soluciones optimas R_i	84
Tabla 30. Soluciones V_{ij}	85
Tabla 31. Ranking del método VIKOR	85
Tabla 32. Matriz de soluciones ideales positivas y negativas TOPSIS	87
Tabla 33. Matriz de distancias entre soluciones ideales TOPSIS.....	88
Tabla 34. Ranking del método TOPSIS	89
Tabla 35. Matriz de decisión del método COPRAS	89
Tabla 36. Matriz de decisión normalizada COPRAS	90
Tabla 37. Matriz estandarizada de pesos COPRAS.....	91
Tabla 38. Pesos normalizados positivos y negativos.....	91
Tabla 39. Resultados prioridades relativas	92
Tabla 40. Ranking del método COPRAS	92
Tabla 41. Matriz de decisión DOMINIC	93
Tabla 42. Matriz de ponderación DOMINIC	94
Tabla 43. Matriz de ponderación numérica	95
Tabla 44. Matriz de ponderación normalizada DOMINIC.....	95
Tabla 45. Resultados del método DOMINIC	96
Tabla 46. Ranking del método DOMINIC	96
Tabla 47. Matriz de decisión PROMETHEE II.....	97
Tabla 48. Matriz normalizada PROMETHEE II	98

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Tabla 49. Flujos positivos y negativos.	102
Tabla 50. Flujo neto y Ranking del método PROMETHEE II.....	103
Tabla 51. Resultados del método de ponderación	115
Tabla 52. Resultados método Pugh	117
Tabla 53. Resultados del método VIKOR	119
Tabla 54. Resultados del método TOPSIS	121
Tabla 55. Resultado método COPRAS.....	123
Tabla 56. Resultado del método DOMINIC	125
Tabla 57. Resultado del método PROMETHEE II.....	127
Tabla 58. Correlación de Spearman.....	128
Tabla 59. Condiciones de la simulación	132
Tabla 60. Resultados de temperatura.....	133
Tabla 61. Resultados de la simulación sobre el techo del vehículo.....	143

Índice de figuras

Figura 1: Estudios publicados sobre PCM y otros materiales	21
Figura 2: Clasificación de los materiales de cambio de fase	25
Figura 3: Parafina micro encapsulada.....	26
Figura 4: PCM inorgánico. Sal hidratada	31
Figura 5: Esquema del funcionamiento del cambio de fase	36
Figura 6: Ejemplo de una simulación térmica	43
Figura 7: Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía térmica	48
Figura 8: Comparación del calor latente de diversos materiales de cambio de fase	48
Figura 9: Modelo para la toma de decisión	60
Figura 10: Panel interior de la puerta.....	106
Figura 11: Panel interior de una puerta de automóvil.....	107
Figura 12: Creación del nuevo material.....	109
Figura 13: Convección aplicada al cuerpo.....	112
Figura 14: Carga térmica aplicada.....	113
Figura 15: Estructura interna de la puerta.....	114
Figura 16: Resultados de los métodos de ponderación.....	116
Figura 17: Ranking método Pugh	118
Figura 18: Ranking del método VIKOR.....	120
Figura 19: Ranking del método TOPSIS	122
Figura 20: Ranking del método COPRAS.....	124
Figura 21. Ranking del método DOMINIC	126
Figura 22. Ranking del método PROMETHEE II.....	128
Figura 23: Correlación de Spearman	129

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Figura 24: Cara frontal de lámina de parafina	134
Figura 25: Cara posterior de lámina de parafina.....	134
Figura 26: Corte transversal de la lámina de parafina	136
Figura 27: División nodal de la parafina	137
Figura 28: Gradiente de temperatura nodal	138
Figura 29: Acumulación de energía térmica.....	139
Figura 30: Flujo de calor dentro del material	140
Figura 31: Distribución de la temperatura en PCM.....	140
Figura 32: Techo del vehículo	141
Figura 33: Parte interior del techo del vehículo.....	142
Figura 34: Grafica de convergencia.....	144

Resumen

La temperatura que un automóvil puede alcanzar en su interior debido a las condiciones climáticas externas suele llegar a ser extremadamente alta, entre 25°C hasta los 40°C en ciertas circunstancias, por esta razón se han efectuado varios estudios en el campo de la tecnología de nuevos materiales que permitan controlar el ambiente interior de un auto contrarrestando los efectos que tiene sobre éste el clima y las condiciones ambientales, en este estudio se presenta una propuesta de uso de materiales alternativos elegidos mediante un proceso de selección multicriterio con el fin de aplicarlos para aislamiento térmico, para evitar que la temperatura interior del vehículo no se pueda controlar cuando este se encuentre estacionado, además de evitar que el calor del interior escape hacia el exterior en condiciones inversas. Mediante el análisis multicriterio se determina el mejor material que puede ser usado de la lista de materiales candidatos, mismo que cumpla con el objetivo de controlar de forma constante la temperatura interior de un automóvil, teniendo en cuenta que al usar un aislamiento térmico basado en un PCM no se requiere de un sistema de control eléctrico que elevaría el costo de un automóvil. El presente estudio determinó que el PCM ideal para esta aplicación es la parafina, dado su punto de fusión que es de 37°C.

Palabras clave: automóvil, simulación, almacenamiento térmico, cambio de fase, materiales alternativos, comparación, aislamiento térmico, energía, calor.

Abstrac

The inner temperature that a car can reach due the external climatic conditions can be extremely high, between 25°C to 40°C in certain circumstances, for this reason several studies have been made in the field of the technology of new materials that allow to control the internal temperature of a car and reduce the effects that climate and environmental conditions have on it, this study presents an approach on the use of alternative materials chosen by a multicriteria selection process due its application as a thermal isolation, in order to prevent the inner temperature of the vehicle from rising when it is parked under the sun, in addition to prevent the heat from the inside to escape to the outside in reverse conditions. Through the multicriteria analysis the best material is determined among a list of candidate materials, this must fulfill the objective of control in a constant way the inner temperature of the car, taking in account that by using a thermal isolation based on a PCM electronic controls that regularize the inner temperature of the car won't be needed, avoiding an increase in the cost of the car. The present study has determined that paraffin wax is the best PCM for this application, due to its melting point of 37°C.

Keywords: automobile, simulation, thermal storage, phase change, alternative materials, comparison, thermal insulation, energy, heat.

Introducción

Los materiales de cambio de fase en la actualidad poseen una gran aceptación en diversas aplicaciones, esto se debe principalmente a que la tecnología de materiales ha avanzado mucho en los últimos años, lo que ha permitido que exista un mayor desarrollo de nuevos materiales y aplicaciones para los mismos.

En el campo automotriz el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales tiene una orientación específica hacia la conservación medio ambiental, esto involucra todos los aspectos que tienen que ver con el mismo, como reducción de emisiones contaminantes, menor utilización de recursos renovables y no renovables para la fabricación de sus partes, reutilización de materiales reciclables y desarrollo de nuevos compuestos cada vez más amigables con el entorno. En este aspecto los PCM (materiales de cambio de fase por sus siglas en inglés) juegan un papel fundamental en el desarrollo de la tecnología automotriz, puesto que brindan la posibilidad de controlar las distintas temperaturas que se tienen en los componentes de los autos sin depender de la utilización de otros sistemas de enfriamiento como es el aire acondicionado, ya que este sistema usa la energía del motor, lo que aumenta el consumo de combustible del auto y por consiguiente la cantidad de gases y polución emitida al entorno.

Un sistema que utilice materiales de cambio de fase para controlar la temperatura interior del automóvil, sin depender de controles electrónicos o energía proveniente del motor sería una solución efectiva en la reducción de emisiones contaminantes y uso de aire acondicionado. Esto teniendo en cuenta que estos materiales se encuentren incluidos en la

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

tapicería del automóvil, a manera de escudo térmico tanto para el calor del exterior como para evitar la pérdida de energía del interior del habitáculo del auto.

De este modo para buscar la mejor aplicación y uso de PCM es necesario investigar sobre los mismos para así determinar el material que más se ajuste a esta necesidad, ya que estos compuestos se pueden aplicar a distintas partes de los automóviles y así controlar de forma más eficiente la temperatura de los componentes del auto.

El aspecto principal de este estudio es encontrar un material que brinde la posibilidad de controlar la temperatura de distintos componentes, para esta selección se utilizó el método multicriterio de selección MCDM, el cual permite mediante calificación y ponderación escoger el PCM más idóneo para la aplicación, de una lista de materiales candidatos.

Escoger un PCM que sea adecuado para trabajar como aislante térmico requiere de una evaluación comparativa de los atributos y características del propio material, esto quiere decir que la comparación entre los distintos candidatos es la base de la selección multicriterio.

Una vez que se obtiene el material ganador mediante el proceso de selección, se realizó una simulación térmica del mismo, utilizando el software NX de Siemens, a fin de obtener resultados sobre su comportamiento.

Justificación

En nuestro país existe la necesidad de poseer estudios propios que avalen el uso de nuevas tecnologías en materiales para la industria automotriz, lamentablemente no existe la inversión necesaria para el desarrollo e investigación de compuestos que sean destinados a

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

nuevas aplicaciones en las distintas industrias que se posee, siendo una de las más importantes del sector productivo la industria automotriz nacional. En este aspecto es de vital importancia realizar una investigación que avale la factibilidad de desarrollar compuestos nuevos usando materiales existentes en el mercado nacional para aplicaciones automotrices de almacenamiento de energía térmica específicamente.

Un automóvil permanece estacionado alrededor del 80% del tiempo en un uso diario promedio, esto se traduce a que está expuesto constantemente a los cambios atmosféricos y ambientales tales como temperatura y humedad entre las más importantes, estas condiciones exteriores provocan un calentamiento o un enfriamiento, de acuerdo al caso, de todo el vehículo lo que reduce el confort de los ocupantes al momento de ingresar al automotor y demanda el uso de otros sistemas de calefacción o enfriamiento para los distintos componentes del auto después de que este haya permanecido estacionado por largos periodos de tiempo. Por este motivo poseer un aislamiento térmico incluido en las partes del auto que sean necesarias sería muy importante, ya que permitirá controlar casi de forma automática la temperatura del auto sin depender de sistemas de climatización automotriz, la idea es incorporar en el vehículo un material de cambio de fase que trabaje como aislante térmico y que a su vez permita conservar la temperatura del automóvil, siendo necesario para este fin un desarrollo en cuanto a materiales de cambio de fase que permitan cumplir con este objetivo.

El presente trabajo surge de la necesidad de recopilar la información más relevante e importante en materia de almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase para aplicaciones de concentración de temperatura presentes hasta el momento en la literatura. La intención de este documento es ofrecer una base de datos de las distintas tecnologías

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

disponibles, su estado actual, criterios económicos e investigaciones. Esto brinda una idea del “estado del arte” del almacenamiento térmico a escala mundial.

Problema

En nuestro país el uso de materiales para aislamiento térmico es muy limitado, prácticamente está restringido solo al área de la construcción e ingeniería civil, donde los PCM son usados en varias aplicaciones de construcción, siendo estas generalmente formas de aislamiento térmico y acústico para casas y edificios, sin embargo existe la posibilidad de expandir el campo de acción de esta tecnología hacia su uso en el campo de la ingeniería automotriz, en donde su aplicabilidad está dada por la necesidad de controlar la temperatura interna de los automóviles sin depender de los sistemas de aire acondicionado y calefacción, es por esto que existe la necesidad de realizar una mayor investigación sobre la aplicación y uso de los materiales de cambio de fase para los autos, en este campo existe la necesidad de contar con estudios propios en nuestro medio sobre la factibilidad de un sistema de aislamiento térmico para los autos que esté basado en el uso de PCM como parafinas y sales hidratadas, que sean previamente seleccionados mediante un proceso multicriterio para su elección.

Objetivo general

Seleccionar un material de cambio de fase mediante la utilización de las técnicas multicriterio para ser usado como aislante térmico en un automóvil y en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en la industria automotriz.

Objetivos específicos

1. Seleccionar un material aislante térmico de una lista de posibles candidatos que poseen las características necesarias para su aplicación en este estudio.
2. Simular mediante el software NX de Siemens las condiciones térmicas que se presentan en el interior de un automóvil.
3. Determinar la factibilidad de usar materiales de cambio de fase para mejorar el confort térmico.
4. Evaluar la efectividad de la aplicación de los materiales de cambio de fase en el interior de un auto como reguladores de temperatura de distintos componentes.
5. Evaluar las características de distintos materiales de cambio de fase que cumplan los requisitos necesarios para las aplicaciones propuestas.

Estado del arte

Almacenamiento térmico

El almacenamiento de energía térmica es un método de acumulación de energía que aprovecha el calor, subiendo o bajando la temperatura de una sustancia y cambiando su fase. Existen dos mecanismos térmicos para acumular energía, el primero es el calor latente que representa la energía necesaria para producir el cambio de estado de una sustancia, el segundo es el calor sensible y representa la energía necesaria para producir un cambio en la temperatura de la sustancia. (Rosen, 2011).

El almacenamiento por calor latente tiene ciertas ventajas sobre el mecanismo de calor sensible, en un intervalo de temperatura pequeño se puede almacenar más energía y esto implica una mayor densidad de energía. El cambio de fase líquido-gaseoso es el que presenta mayor densidad energética pero tiene un mayor cambio volumétrico, por esto el más conveniente es el cambio de fase sólido-líquido. (Rosen, 2011).

Este sistema de almacenamiento pertenecen una serie de tecnologías que almacenan energía térmica para luego utilizarla cuando sea necesario. La base de estos sistemas consta de la capacidad de ciertos materiales de absorber calor y mantenerlo durante un cierto tiempo. También se basan en la reversibilidad de las reacciones termoquímicas que se dan en estos materiales para absorber o liberar el calor. Estos sistemas se basan en materiales de cambio de fase o por sus siglas en inglés PCM (Phase Change Materials), los mismos utilizan parafinas, esteroides, ácidos grasos y sales hidratadas. Éstos materiales han sido desarrollados para absorber o eliminar calor dentro de rangos de temperatura específicos. (Cabrera, 2012).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Para la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) que almacenan energía se han desarrollado distintas sustancias.

Material de cambio de fase

Los materiales de cambio de fase o PCM, según sus siglas inglesas de “Phase Change Materials”, son sustancias que absorben una gran cantidad de energía térmica para experimentar un cambio de estado (sólido – líquido – gas); entre los cuales, el más interesante es el cambio sólido – líquido ya que, aunque la cantidad de energía almacenada es inferior a la de otros cambios de estado (sólido – gas), la variación de volumen es mucho menor. (Oliver, Neila, & García, 2012).

Un material de cambio de fase, es una sustancia que necesita gran cantidad de energía térmica para cambiar de fase, de forma especial pasar de líquido a sólido o viceversa, el calor que se usa para este efecto se puede aprovechar al devolverlo en el momento necesario. (Manuel Dominguez, 2012).

Estos materiales despiertan cada vez mayor interés en cuanto a su estudio y aplicaciones, en la siguiente imagen se puede ver una comparación entre la cantidad de estudios publicados sobre PCM y otros métodos de almacenamiento de energía, lo que da una idea de su importancia.

La nomenclatura usada en la siguiente imagen es:

- MS: Sales fundidas (Molten Salt)
- CONC: Hormigón (Concrete)
- PCM: Material de cambio de fase (Phase Change Materials)

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- TCHM: Almacenamiento termo-químico (Thermochemical Storage)

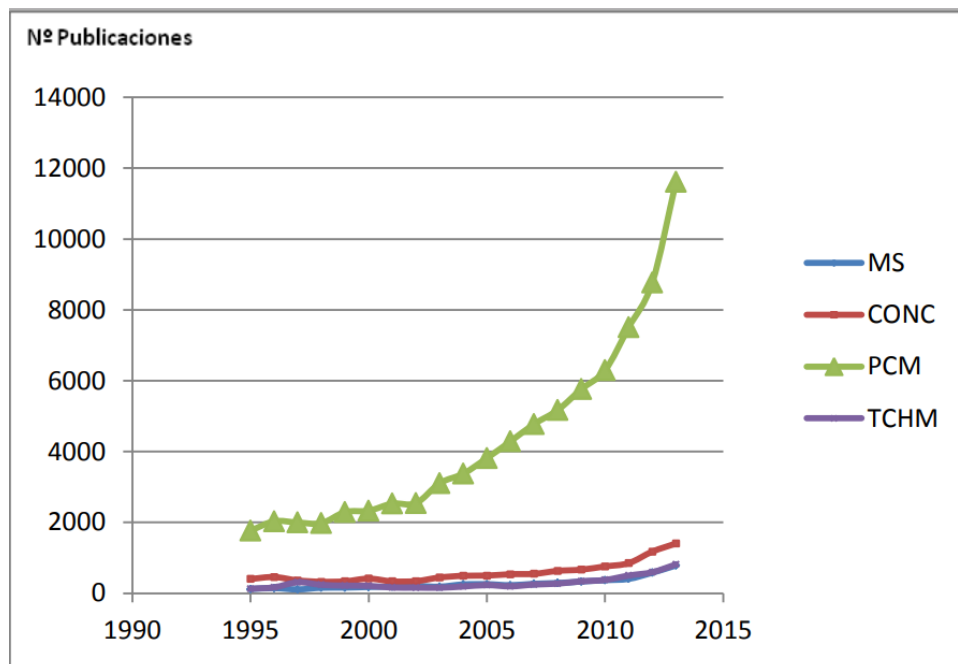


Figura 1: Estudios publicados sobre PCM y otros materiales

Fuente: (Manuel Dominguez, 2012)

Los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar el calor, y el motivo principal por lo cual son diseñados estos materiales es evitar la pérdida de calor mediante la absorción o desprendimiento del mismo. Por esto dichos materiales poseen propiedades que les hacen muy requeridos en el almacenamiento de energía térmica. Poseen la capacidad de almacenar calor latente, un alto calor de fusión y un punto de transición de fase en el entorno de la temperatura de operación. (David Juarez, 2012).

Estos materiales tienen la capacidad de almacenar energía mediante el proceso de cambio de estado, esta energía se encuentra en forma de calor latente. Estos materiales poseen muchas aplicaciones industriales, donde una de las más importantes es su capacidad

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

para aumentar la inercia térmica de cualquier instalación, pudiendo ser estas edificios, fabricas, casas y medios de transporte como trenes y automóviles. (Inocencio, 2016).

La inercia térmica tiene un rol importante al momento de lograr mantener condiciones de confort dentro de edificios o automóviles. En este caso cuando se posee una inercia térmica alta se consigue mantener la temperatura interior más estable. Esto funciona gracias al intercambio de energía que se da con el medio ambiente, esta propiedad depende de la conductividad térmica de los materiales, su calor específico y de su masa. (Inocencio, 2016).

El interés de este tipo de materiales está en que, durante el cambio de fase, la temperatura o calor sensible del material, se mantiene constante, mientras que éste absorbe energía. Este hecho supone una mayor densidad energética, donde los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar 5-14 veces más calor por unidad de volumen de almacenamiento que los demás materiales de almacenamiento de calor sensible tales como el agua, la mampostería o las rocas. (Sharma, V, Chen, & Buddhi, 2009).

En los materiales de cambio de fase se puede analizar la transferencia de calor durante la fusión, determinando así la propagación e inclinación de la interfase a lo largo del tiempo. Además se estudia la preparación, caracterización y propiedades térmicas que poseen para el almacenamiento de energía térmica. (David Juarez, 2012).

El estudio de estos materiales está más desarrollado para las aplicaciones de media y baja temperatura, ya que existe un amplio campo para el desarrollo de nuevos materiales y nuevos sistemas de almacenamiento. (Perez, 2010).

Propiedades y Características

Para el óptimo almacenamiento energético, los materiales de cambio de fase deben exhibir ciertas propiedades en función de los siguientes criterios: (Oliver, Neila, & García, 2012).

Criterios Termodinámicos

El material de cambio de fase debe poseer:

- Temperatura de cambio de fase en una ventana térmica¹ definida y adecuada a la aplicación deseada.
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa, de modo que una menor cantidad de material, almacene mayor cantidad de energía.
- Alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor.
- Fusión congruente, el material debe fundir homogéneamente de manera que las fases líquida y sólida sean idénticas en composición. De lo contrario, la diferencia de densidades entre sólido y líquido, provoca segregación, resultando en cambios en la composición química del material.
- Poca variación de volumen durante la transición de fase, de modo que la utilización de un contenedor simple una geometría de intercambio de calor sea suficiente para su adecuado funcionamiento. (Oliver, Neila, & García, 2012).

Criterios Cinéticos

El material de cambio de fase debe exhibir:

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Poco o ningún sub enfriamiento, la masa fundida debe cristalizar en su punto de congelación termodinámico.
- Poseer suficiente tasa de cristalización. (Zalba, 2002).

Criterios Químicos

El material de cambio de fase debe mostrar:

- Estabilidad química a largo plazo.
- Ninguna descomposición química o degradación luego de haber completado numerosos ciclos de fusión - congelación.
- No corrosividad para los materiales de construcción o los necesarios para su encapsulado.
- Ser no tóxico, no inflamable y no explosivo. (Oliver, Neila, & García, 2012).

Criterios Económicos

- El material de cambio de fase debe tener:
- Disponibilidad en grandes cantidades a bajo coste, de modo que sea viable técnica y económicamente.
- Razonable ciclo de vida útil de acuerdo a su coste.
- Reciclable. (Zalba, 2002).

Clasificación

Existe un gran número de materiales que pueden ser identificados como PCM, debido a que poseen una temperatura y calor latente de fusión dentro del rango operacional deseado,

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

sin embargo, exceptuando por esta característica, la mayoría de estos materiales, no satisfacen los criterios necesarios para un medio de almacenamiento adecuado como los discutidos anteriormente. (Sharma, V, Chen, & Buddhi, 2009).

Sharma y Sagara (2009) presentan una clasificación de los materiales de cambio de fase, que se puede observar en la figura número 2.

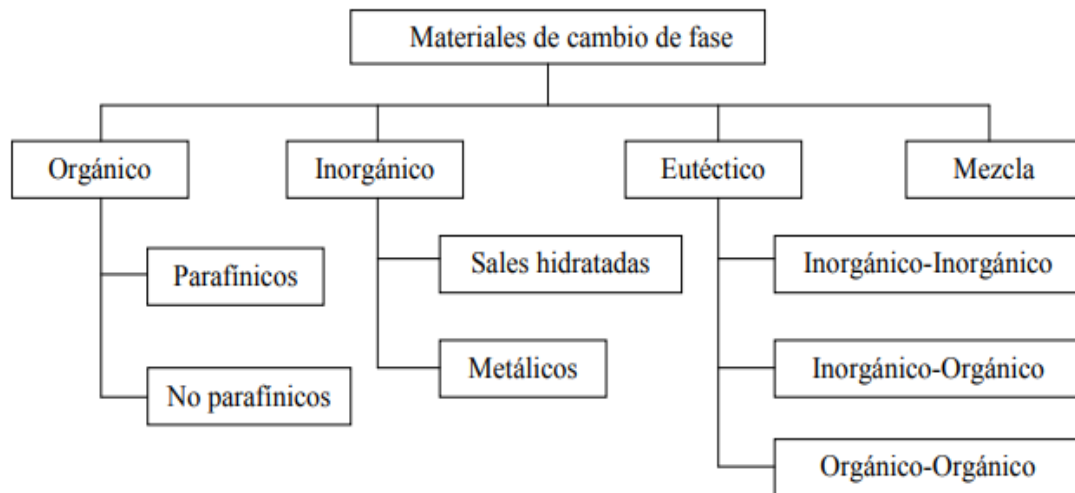


Figura 2: Clasificación de los materiales de cambio de fase

Fuente: (Sharma, V, Chen, & Buddhi, 2009)

PCM Orgánicos

Los PCM orgánicos presentan varias características que los hacen materiales muy útiles para la aplicación en determinadas áreas para el almacenamiento de calor. Los materiales orgánicos son usualmente subdivididos en Parafinas y No Parafinas.

Las PCM que se encuentran dentro del grupo de parafinas implican principalmente los ácidos grasos, alcoholes, ésteres y glicoles. Estos materiales son estables, seguros y

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

tienen un alto calor latente de fusión (180 kJ/kg) y están disponibles en un rango de temperaturas de trabajo bastante amplio entre los 15°C y 45°C lo que los hace compatibles con la mayoría de materiales de construcción. Estos materiales sin embargo son inflamables, tóxicos y poseen baja conductividad térmica, los ejemplos más comunes de PCM orgánicos son las parafinas, ceras y ácidos grasos.



Figura 3: Parafina micro encapsulada

Fuente: (Mehling & Cabeza, 2008)

Parafinas

Las parafinas son esencialmente un alcano sólido refinado. Químicamente, consiste en una mezcla de alcanos en cadena lineal del tipo $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$, donde la cristalización de la cadena (CH_3) libera una gran cantidad de calor latente. Tanto el punto de fusión, como su calor latente, aumentan de acuerdo a la longitud de la cadena. (Mehling & Cabeza, 2008).

La temperatura real de fusión de la parafina depende de la longitud de la cadena, mientras más corta es la longitud de la cadena mayor es su temperatura de fusión, lo que da

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

como resultado que exista una amplia gama de puntos de fusión disponibles para estos materiales.

Las principales ventajas y desventajas de las parafinas se muestran en la tabla número 1.

Tabla 1.

Ventajas y desventajas de las parafinas

Ventajas	Desventajas
Estabilidad química por debajo de los 500°C	Baja conductividad térmica
Químicamente inertes	Alta variación de volumen durante la transición de fase
Auto nucleación, tasa de cristalización con poco o nada de sub enfriamiento	No son compatibles con contenedores plásticos
No corrosividad y baja presión de vapor	Inflamabilidad
Compatibilidad con la mayoría de los materiales de construcción	
Alto calor de fusión por unidad de masa	
Fusión congruente, ciclos homogéneos de fusión y congelamiento sin segregación de fases	

Fuente: (Mehling & Cabeza, 2008)

La parafina es altamente estable a los diferentes ciclos de congelación y fusión, tiene baja reactividad, baja histéresis y está clasificada como no tóxica. Además, puede

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

ajustarse un amplio rango de temperaturas de cambio de fase. El principal inconveniente es su inflamabilidad. (Kalnæs & Jelle, 2015).

Parafina es el nombre común que reciben un grupo de hidrocarburos alcanos, la molécula más simple de parafina es el metano que a temperatura ambiente se encuentra como gas. Las moléculas más pesadas de parafina forman sólidos conocidos como cera de parafina. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Los alcanos en general reciben el nombre técnico de parafina, estos se obtienen del petróleo, de los esquistos bituminosos o del carbón. El proceso se da con la destilación para obtener aceites pesados, esto a una elevada temperatura, después por proceso de enfriamiento estos se cristalizan y se obtiene la parafina. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

La cera de parafina, cuya fórmula química es $C_{25}H_{52}$, se encuentra como sólido, este es un material excelente para almacenar calor debido a su capacidad calorífica y calor de fusión. Una aplicación muy popular de la misma se da en la modificación de placas de construcción como cartón yeso, en este caso la parafina se inyecta en la placa para que durante el día se derrita al absorber calor, mientras que en la noche se solidifica liberando el calor. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

La tabla número 2 muestra los valores de almacenamiento de calor de la parafina, características esenciales a tener en cuenta para que un material pueda ser usado como PCM, además se muestran los valores sobre el peso molecular y tamaño de la estructura molecular de la parafina.

Tabla 2.

Características de la parafina

Característica	Valor
Capacidad calorífica	2.14 a 2.9 JgK ⁻¹
Calor de fusión	200 a 220 J/g
Peso molecular	320 a 560
Longitud de su estructura	C18 hasta C40 (moléculas de carbono)

Fuente: (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011)

No Parafinas

Aquellos materiales orgánicos que no pertenecen al grupo de las parafinas, son los más numerosos de los PCM y poseen propiedades muy variadas. Cada uno cuenta con características particulares, a diferencia de las parafinas, las cuales por lo regular tienen propiedades muy similares entre sí. (Himran & Suwono, 2013).

Los más estudiados y utilizados dentro de esta categoría son los ácidos grasos, los cuales son derivados de productos animales y vegetales y están constituidos por una larga cadena alifática, de más de 12 carbonos. Están caracterizados por la fórmula $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$, en contraste con una parafina, donde un extremo de la molécula termina con un $-\text{COOH}$ en lugar de un grupo $-\text{CH}_3$. Al igual que las parafinas, su temperatura de fusión aumenta de acuerdo a la longitud de la cadena. (Mehling & Cabeza, 2008).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Las ventajas y desventajas de los materiales de cambio de fase que están en el grupo de no parafinas se presentan en la tabla número 3.

Tabla 3.

Ventajas y desventajas de las no parafinas

Ventajas	Desventajas
Estabilidad química	Baja conductividad térmica
Auto nucleación, tasa de cristalización con poco o nada de sub enfriamiento	Costo elevado, de 2 a 3 veces el precio de las parafinas
Alto calor latente de fusión por unidad de masa	Corrosividad debido a su carácter ácido, no son compatibles con metales
Fusión congruente, ciclos homogéneos de fusión y congelamiento sin segregación de fases	

Fuente: (Mehling & Cabeza, 2008)

PCM Inorgánicos

Como su nombre lo indica, los PCM inorgánicos son compuestos de moléculas inorgánicas. Estos materiales tienen la característica principal de proponer una amplia gama de temperaturas de fusión ($5^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$) y una alta tasa de calor latente (220 kJ/kg). Sin embargo su insuficiente estabilidad a largo plazo y forma de almacenamiento compleja es un problema, lo que ha limitado su uso como sistemas de almacenamiento de calor latente. (J. Jaguemont, 2017) .

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Estos materiales tienen un elevado calor escondido por unidad de masa, son más económicos que los materiales orgánicos y son poco inflamables. Se clasifican en sales hidratadas y metálicos.



Figura 4: PCM inorgánico. Sal hidratada

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

Sales Hidratadas

Las sales hidratadas poseen un gran potencial como materiales de cambio de fase para aplicaciones de almacenamiento térmico ya que tienen un espectro de temperatura amplia, entre 5°C a 130°C. Las sales hidratadas son una combinación de moléculas de sal y agua formando una estructura cristalina cuando se encuentran en estado sólido. Los ejemplos más comunes de sales hidratadas son el sulfato de sodio y el disódico dodecahidrato de fosfato de hidrogeno. (J. Jaguemont, 2017).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Las sales hidratadas pueden ser consideradas como aleaciones de sales inorgánicas y agua, formando un cristalino sólido caracterizado por la fórmula general $M \cdot nH_2O$, donde M es un compuesto inorgánico. La transformación sólido-líquido de los hidratos de la sal es en realidad una deshidratación e hidratación de la sal, proceso que, termodinámicamente, se asemeja a los ciclos de fusión y cristalización. Estos hidratos de sal, generalmente se funden y resultan en un mismo hidrato de sal, pero con un menor número de moléculas de agua. (Oliver, Neila, & García, 2012).

Estos materiales forman una clase importante de PCM, debido a su alta capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen. De hecho, la sal hidratada más conocida es la llamada sal de Glauber la cual, ha sido muy estudiada en las primeras etapas de investigación sobre los PCM, gracias a su bajo coste y capacidad de almacenamiento. (Juarez, Balart, Ferrándiz, & García, 2012).

Tabla 4.

Sales hidratadas, ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
Mayor capacidad de almacenamiento de calor latente de fusión por unidad de masa	Fusión incongruente, segregación de fases.
Alta conductividad térmica	Pocas propiedades de nucleación
Compatibilidad con contenedores plásticos	
Poca variación de volumen durante la transición de fase	Corrosividad, no son compatibles con los metales

Fuente: (Juarez, Balart, Ferrándiz, & García, 2012)

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La tabla número 4 muestra las ventajas y desventajas más importantes de las sales hidratadas.

Los materiales de cambio de fase a base de sales hidratadas han presentados varios problemas en su uso después de periodos largos de tiempo, como por ejemplo se dan envejecimientos prematuros por decantación. Sin embargo en la actualidad han aparecido productos que ya no tienen estos problemas y que además se puede escoger la temperatura deseada de cambio de fase. (Manuel Dominguez, 2012).

Metálicos

Los materiales metálicos presentan ventajas y desventajas en su uso, entre las principales están las que se muestran en la tabla número 5, detallada a continuación.

Tabla 5.

Ventajas y desventajas de los materiales metálicos

Ventajas	Desventajas
Alto calor de fusión por unidad de volumen	Bajo calor de fusión por unidad de peso
Alta conductividad térmica	
Bajo calor específico y baja presión de vapor	

Fuente: (Kalnæs & Jelle, 2015)

Esta categoría está compuesta por metales con un bajo punto de fusión. Sin embargo, su implementación en la tecnología de los PCM, aún tiene sus reservas, debido a

penalizaciones de peso. Ahora bien, cuando el volumen es un factor importante, presentan una buena alternativa, debido a su alto calor de fusión por unidad de volumen y altos niveles de conductividad térmica. (Kalnæs & Jelle, 2015).

PCM eutécticos

Las mezclas eutécticas son una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos, gracias a esto poseen más características deseadas para ser usados como PCM, tales como mayor calor latente y un punto de fusión definido. Tienen una estructura sólida laminada en sus compuestos lo que permite un punto de fusión y solidificación de fase sin segregación. Estas mezclas son potenciales candidatos para su uso en aplicaciones automotrices donde se requiere materiales de cambio de fase. (J. Jaguemont, 2017).

Encapsulación

Uno de los criterios que ha limitado el uso generalizado de los PCM, es la incompatibilidad entre estos materiales y sus contenedores, afectando su estabilidad a largo plazo, degradado sus propiedades y provocando la corrosión de sus recipientes de embalaje. Como respuesta a estos inconvenientes, han surgido diferentes técnicas de encapsulación de los PCM. Los métodos de encapsulación, clasificados de acuerdo a su tamaño, pueden ser de dos tipos: micro y macro encapsulados. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Micro-encapsulación

Las micro cápsulas pueden ser de forma esférica, con una pared continua rodeando el núcleo, mientras que otras son asimétricas y con formas variables, con una cantidad de pequeñas gotas de material de núcleo incorporado a lo largo de la micro cápsula. Los tres

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

estados de la materia (sólidos, líquidos y gases) pueden ser micro encapsulado. Esto permite que los materiales en fase líquida y de gas puedan ser manipulados con más facilidad que los de estado sólido, y pueden permitirse un cierto grado de protección a las personas que manipulan materiales peligrosos. (Hauer, 2002).

Debido a la creación y a la existencia nuevas tecnologías, se ha podido desarrollar la técnica de micro-encapsulación, la cual mediante porciones de cualquier principio activo, los PCM, son recubiertas por un segundo material, para de esta manera protegerlo del entorno que lo rodea.

La micro encapsulación puede lograrse a través de gran cantidad de técnicas, en base al propósito que se plantee. Las sustancias pueden ser micro encapsuladas con la intención de que el material base esté confinado dentro de paredes de la cápsula durante un período específico de tiempo. Por otra parte, los materiales del núcleo se pueden encapsular para que se liberen poco a poco a través de las paredes de la cápsula, conocida como de liberación controlada o difusión, o cuando las condiciones externas desencadenen que paredes de la cápsula rompan, fundan o se disuelvan. (Juarez, Balart, Ferrándiz, & García, 2012).

Ventajas:

- Mejora de la transferencia de calor, debido a la gran superficie en relación al volumen de las cápsulas.
- Mejora de la estabilidad de ciclos, ya que la separación de fases está restringida por distancias microscópicas.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Integración de los PCM a las mezclas como un árido más. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Desventajas:

- Aumento de la probabilidad de sub enfriamiento.
- No recomendado para sales hidratadas. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Se puede observar que la micro encapsulación es una solución factible a la demanda de las diferentes industrias para mejorar la eficiencia energética y térmica de los PCM, generalmente las más utilizadas son la parafina o ácidos grasos los cuales pueden absorber y desprender calor con el principal objetivo de mantener la temperatura de los diferentes lugares donde sean utilizados.

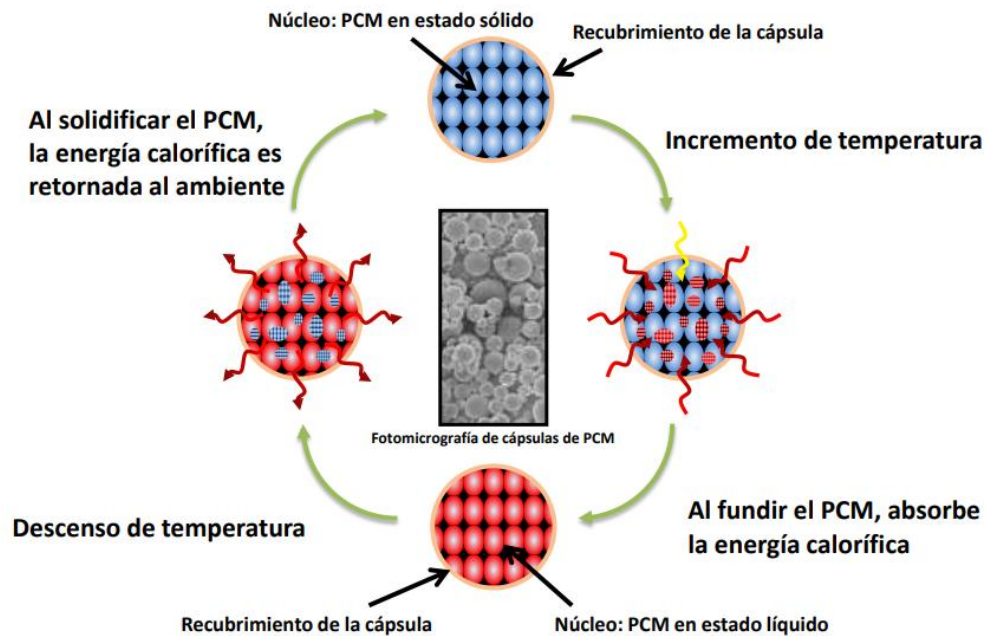


Figura 5: Esquema del funcionamiento del cambio de fase

Fuente: (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011)

Macro-encapsulación

La macro-encapsulación hace referencia a PCM encapsulados en cualquier tipo de recipiente, tal como tubos, esferas o paneles que pueden ser incorporados en materiales de construcción o que actúan como intercambiadores de calor por sí mismos. El tamaño de estos contenedores es por lo general más de 1 cm³, almacenando desde varios mililitros hasta varios litros. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

La tecnología de macro encapsulación emplea un proceso de encapsulación de doble capa, creando una cápsula con una configuración en forma de matriz.

Ventajas:

- Evitar cambios en la composición de los PCM, causados por el contacto con elementos externos.
- Dependiendo de su rigidez, puede añadir estabilidad mecánica al sistema.
- Utilización de recipientes ya disponibles en el mercado. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Desventajas:

- Tendencia a solidificar / fundir en los bordes del recipiente, reduciendo el tiempo de absorción y liberación de energía y evitando que el sistema se descargue completamente durante la noche. La geometría del recipiente juega un papel importante.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Su tamaño implica que tienen que ser protegidos contra la destrucción o la perforación, al igual que una mayor dificultad para integrarlo a otros sistemas. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Por lo general para realizar la macro encapsulación se utilizan envases de plástico o fundas plásticas por gran disponibilidad en el mercado y la facilidad de producirlos en mayor cantidad y de diferentes formas.

Aplicaciones de los Materiales de Cambio de Fase

Los materiales de cambio de fase son utilizados de manera significativa dentro de las diferentes industrias como la alimenticia, transporte, automotriz, medica, textil; gracias a sus grandes propiedades del almacenamiento térmico que ayudan a las industrias a mejorar sus diferentes productos. (Cuevas, Haget, & Mondieig, 2011).

Los PCM tienen una variedad de aplicaciones en el sector de la automoción, por ejemplo mientras se conduce, el PCM almacena el frío proveniente del aire acondicionado. Durante los períodos de espera, este frío almacenado es liberado por un ventilador, manteniendo la temperatura en un nivel confortable. Otra aplicación sería el almacenamiento del calor del motor, de manera que para su siguiente arranque (en frío), se acorte considerablemente la fase de calentamiento del motor, contribuyendo a minimizar su deterioro a largo plazo y reducir el consumo de combustible. (Zalba, 2002).

Los materiales de cambio de fase que sufren su transformación de sólido a líquido son de los sistemas de almacenamiento de calor latente más utilizados en distintas aplicaciones, especialmente en aplicaciones de la industria automotriz. (J. Jaguemont, 2017).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

El aislamiento térmico es el método donde se recubre una superficie con materiales aislantes con la finalidad de proporcionar resistencia al flujo de calor y reducir la transferencia del mismo. Con este proceso se busca minimizar las pérdidas de energía por transferencia de calor, proteger al equipo, a las personas y al medio ambiente. (Torres, 2012).

Entre las funciones de un sistema de aislamiento, se encuentran las siguientes:

- Aumentar la eficiencia del sistema
- Protección personal, de equipos y estructuras
- Mantener y controlar la temperatura de procesos
- Protección contra incendios
- Protección contra congelación
- Reducción del ruido y la vibración
- Disminuye las alteraciones del medio ambiente. (Torres, 2012).

Materiales Aislante

Los materiales aislantes se pueden definir como aquellos que presentan una elevada resistencia al paso del calor, reduciendo la transferencia de este calor a su cara opuesta, por lo tanto se puede decir que protegen del frío y del calor. Por otro lado se sabe que el aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética, que consiste en disminuir el consumo energético sin disminuir el confort. (Palomo, 2017)

Dada las estructuras de los materiales aislantes, se pueden clasificar en:

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Fibrosos: formados por fibras de diámetro muy pequeño, las fibras pueden estar dispuestas de manera vertical u horizontal, así como también pueden o no estar unidas.
- Celulares: contienen diminutas celdas individuales separadas unas de las otras.
- Granulares: constituido por pequeños módulos los cuales contienen espacios vacos, pero permiten el paso de gas entre ellas. (Torres, 2012).

El uso de materiales aislantes se encuentra dentro de un rango de temperatura desde los -73°C hasta los 815°C . En el caso que las temperaturas se encuentren fuera de este rango, se aplicara otro tipo de recubrimiento en las distintas superficies, en los procesos menores de -73°C se emplean criogénicos y para los mayores a 815°C se utilizan materiales refractarios. (Palomo, 2017). Dependiendo del rango de temperatura se clasifica en:

- Baja temperatura (-73°C a 16°C)
- Temperatura intermedia (16°C a 315°C)
- Alta temperatura (315°C a 815°C).

Las propiedades de los materiales aislantes de mayor demanda en la actualidad en diferentes industrias, se muestran en la tabla número 6.

Tabla 6.

Propiedades de los materiales aislantes

Propiedad	Definición
Temperatura límite	Rango de temperatura donde el material conserva sus propiedades
Conductividad térmica	Cantidad de calor que se transfiere a través del material
Alcalinidad o acidez	El material no debe contribuir con la corrosión
Densidad	Afecta el desempeño térmico
Emisividad	Capacidad del material de transferir calor a través del mecanismo de radiación
Impermeabilidad	Capacidad de no permitir el paso de sustancias a través de él
Estabilidad dimensional	Mantener sus propiedades a lo largo de grandes extensiones

Fuente: (Palomo, 2017)

Simulación térmica

La física los automóviles y sus componentes es muy compleja. Entre el exterior del vehículo y los elementos interiores se producen intercambio de flujos energéticos que definen el comportamiento térmico. A la energía que entra en una zona se le denomina ganancia térmica, y a la potencia que hay que introducir o extraer de una zona para

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

mantener unas determinadas condiciones de confort de temperatura y humedad se le denomina carga térmica. (Larsen, 2011).

La suma de las diferentes cargas térmicas a lo largo de un periodo de tiempo corresponde con la demanda térmica del automóvil. Las ganancias térmicas pueden no convertirse instantáneamente en cargas térmicas, debido a la inercia térmica de cada material y esta conversión puede tardar un tiempo. (Larsen, 2011).

La razón por la que se utilizan métodos de simulación para el cálculo de la transferencia y almacenamiento térmico de materiales es que en la práctica resulta ser muy costoso y es difícil medir la demanda real de climatización, ya que se tienen que independizar cada flujo de calor y analizar la posibilidad de reducirlos, por lo que se utilizan modelos computacionales que estiman la demanda teórica de climatización para realizar simulaciones sobre comportamiento térmico de materiales.

Particularmente, muchos programas de simulación, implementan métodos de balance ya que éstos solucionan los problemas del modelado térmico. La estimación de la carga la hacen realizando balances térmicos de conducción, convección y radiación a cada una de las superficies de cada zona. (Latorre & Seco, 2013).

El estudio de la performance térmica mediante programas de simulación como el software NX de Siemens, se ha transformado en una herramienta indispensable para enfrentar problemas en el diseño de vehículos y componentes de los mismos que sean energéticamente eficientes. El Software NX puede simular el comportamiento térmico de cualquier componente de forma independiente a su material, a fin de evaluar el comportamiento de los mismos frente a determinadas variaciones climáticas y detectar de

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

esta manera problemas de falta de confort como pueden ser sobrecalentamiento o bajas temperaturas.

La simulación de condiciones térmicas es una herramienta útil para la evaluación de diferentes alternativas para el diseño, o propiedades térmicas de materiales de construcción. La gestión térmica es un aspecto fundamental a tener en cuenta en una gran variedad de productos, como los vehículos y la electrónica de consumo. El objetivo de cualquier simulación térmica, es mantener la temperatura del producto dentro de un intervalo óptimo para su rendimiento. Sin embargo, conseguirlo puede implicar la adición o la extracción del calor, ya sea de forma activa o pasiva, algo que puede evaluarse mediante un software de simulación térmica como lo es el programa NX. (Hernandez, 2014).

En la figura número 6 se observa un ejemplo de una simulación térmica realizada sobre un sistema de control de calefacción de un automóvil.

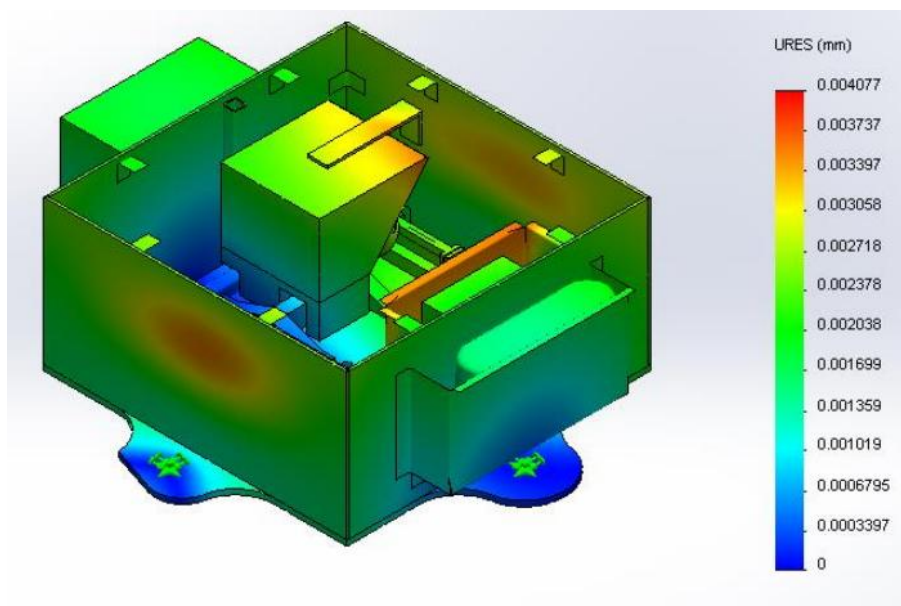


Figura 6: Ejemplo de una simulación térmica

Fuente: (Hernandez, 2014)

Convergencia de resultados

En los estudios en los cuales se realizan simulaciones mediante el apoyo de programas de computador, se utiliza el método de los elementos finitos, este método consiste en crear una malla o hacer un mallado sobre el cuerpo que es objeto de estudio y que se desea analizar, a continuación mediante una serie de iteraciones de cálculos matemáticos se busca llegar a una solución, este método consiste en realizar una matriz de operaciones que a medida que su respuesta se va aproximando al mismo valor, se obtiene el resultado final, a esto se le llama convergencia, esto quiere decir que la convergencia es la búsqueda del valor de respuesta a la simulación conforme las iteraciones van avanzando, este valor se aproxima cada vez más al resultado, obteniendo en cada operación sucesiva valores cada vez más similares.

Convergencia es la propiedad de dos o más cosas que concluyen en un mismo punto, en matemáticas, la convergencia es una propiedad de ciertas sucesiones. La convergencia es la aparición de patrones en los resultados de una variable aleatoria según aumenta la muestra. (Jose Arias Cabezas, 2008).

Una sucesión de elementos de un conjunto es convergente si y solo si en el mismo conjunto existe un elemento al cual la sucesión se aproxima tanto como se desee a partir de un momento dado. Si una sucesión tiene límite, se dice que es una sucesión convergente, y que la sucesión converge o tiende al límite. En caso contrario, la sucesión es divergente. (Jose Arias Cabezas, 2008).

Esta definición significa que eventualmente todos los elementos de la sucesión se aproximan tanto como sea posible al valor límite, o la respuesta buscada. La condición que

impone que los elementos se encuentren arbitrariamente cercanos a los elementos subsiguientes no necesariamente implica que la sucesión tenga un límite.

Coeficiente de correlación de Spearman

Una vez que se obtienen los resultados de los métodos de selección multicriterio (MCDM), se debe medir la existencia de una correlación entre los ellos, para lo cual se utiliza la herramienta conocida como la Correlación de Spearman.

Los valores obtenidos con este método pueden puntuar desde -1.0 hasta 1.0, pasando por el cero absoluto. Estos valores se deben interpretar de la siguiente forma, si se acercan al 1.0 significa que existe una correlación positiva, si se acercan al -0.1 quiere decir que existe una correlación negativa, y en el caso de que el valor sea cero quiere decir que no existe correlación. (Barrera, 2014).

Es decir, en el caso de la correlación positiva existe una asociación en la cual al incrementar el valor en un rango también aumenta el relacionado, y de forma inversa en la correlación negativa, y ausente en el caso de ser cero. Para ello se deben analizar los resultados de los MCDM en parejas, realizando combinaciones de modo tal que todos lleguen a combinarse. (Barrera, 2014).

La correlación de Spearman obedece a la siguiente ecuación:

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Donde:

- R_s = Coeficiente de Correlación de Spearman.
- $\sum_y d^2$ = La sumatoria de las diferencias entre los factores X y Y elevadas al cuadrado.
- n = la cantidad de variables.

La aplicación de esta ecuación se desarrolla en el capítulo que corresponde al método en el presente estudio, una vez que se obtengan los resultados de la selección multicriterio para los materiales candidatos.

Método

El método que se va a usar principalmente para desarrollar y llevar a cabo este estudio es analítico, ya que es necesario conocer el comportamiento de los materiales propuestos para así confirmar su validez de uso en la aplicación seleccionada, que trata sobre el uso de materiales para almacenamiento térmico, es decir que este material no debe permitir ingresar el calor proveniente del medio ambiente, a fin de lograr esto, el desarrollo de este estudio se centrara en realizar una selección multicriterio alrededor de los materiales de cambio de fase, para mediante esta técnica elegir el material más adecuado a esta aplicación. Los materiales que pertenecen al grupo de las parafinas y de las sales hidratadas son los que se tendrán en mayor consideración para el estudio, ya que son los que presentan las mejores propiedades para cumplir con la solución del tema propuesto.

En el año de 1983 Abhat realizo una investigación sobre el tema de almacenamiento de energía térmica (TES) centrado su atención para este punto en los materiales de cambio de fase (PCM) y sus aplicaciones. Esto junto a otros estudios derivo a una clasificación de las sustancias que pueden ser usadas para almacenamiento de energía térmica. (J. Jaguemont, 2017).

Según esta clasificación, el almacenamiento de energía se puede dar en forma de calor sensible en un medio solido o líquido, como productos en una reacción química reversible o energía química y como calor latente o calor de fusión. (J. Jaguemont, 2017).

Esta clasificación se observa en las siguientes figuras, número 7 y 8.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

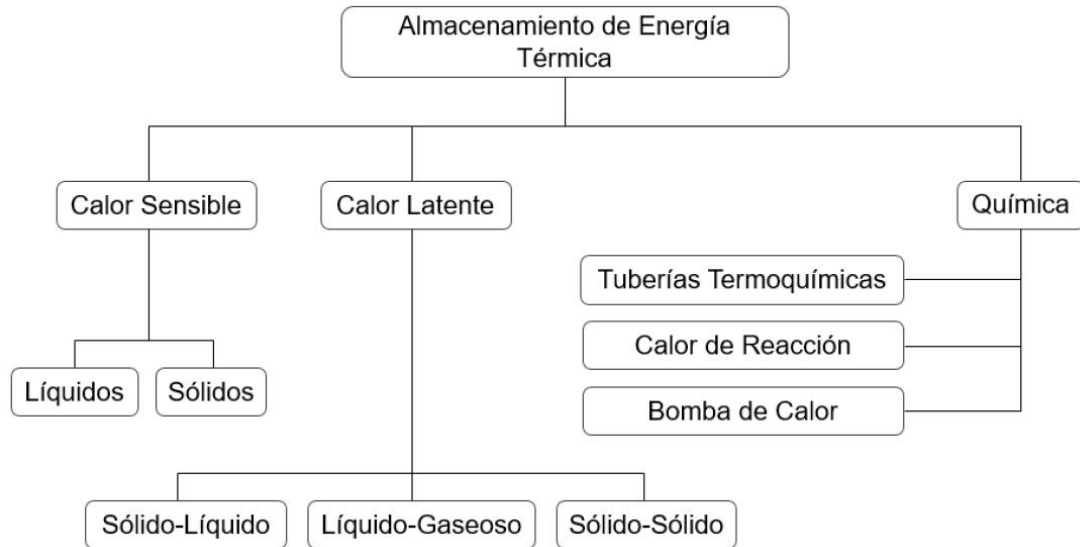


Figura 7: Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía térmica

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

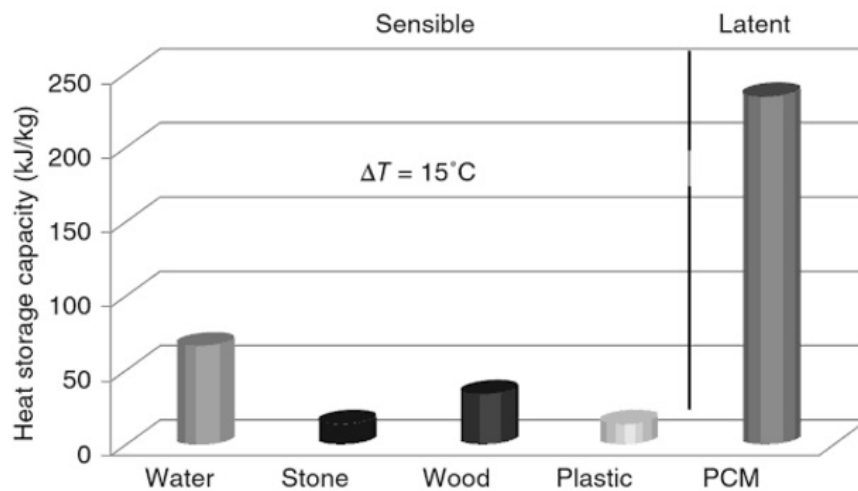


Figura 8: Comparación del calor latente de diversos materiales de cambio de fase

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

De esta clasificación, se destaca que los materiales que pertenecen al grupo de materiales de cambio de fase son los que más ventajas y beneficios presentan, ya que su

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

calor latente va de acuerdo a su aplicación para almacenamiento térmico, y presentan otras ventajas en relación a los grupos de reacciones químicas y al grupo de materiales que usa su calor sensible para almacenar energía térmica.

Los materiales de cambio de fase son materiales “inteligentes” con un alto calor latente. El secreto de estos materiales tiene que ver con la física, es decir, con el cambio de estado. Los materiales de cambio de fase absorben o ceden calor cuando alcanzan la temperatura de cambio de fase, ósea cuando pasan de estado sólido a líquido o viceversa. Durante el cambio de fase la temperatura se mantiene constante y el material sigue absorbiendo energía. (Yuste, 2017).

Los materiales de cambio de fase almacenan energía en forma de calor latente, durante un intervalo corto de temperatura. Su capacidad de almacenamiento es superior en comparación con el almacenamiento de energía en forma de calor sensible. Estos materiales aprovechan toda la energía acumulada para que se produzca el cambio de fase. Las pérdidas energéticas que ocurren también son limitadas. (Yuste, 2017).

La inercia térmica es la propiedad que permite conseguir que un material acumule calor durante el día y luego lo libere cuando baja la temperatura. Es aquí donde aparecen los materiales de cambio de fase que aumentan la capacidad de almacenar calor en elementos que no tienen esta capacidad. La ventaja consiste en que se puede aumentar la inercia térmica de elementos ligeros o con poco espesor añadiendo materiales de cambio de fase, como por ejemplo en placas de yeso laminado. Los materiales de cambio de fase añadidos acumularán energía en forma de calor latente. (Yuste, 2017).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Uno de los mayores beneficios de los materiales de cambio de fase, cuando se encuentran como sustancias puras, es la temperatura constante a la que ocurre el proceso de cambio. El cambio de fase se refiere a las fases de líquido a sólido y viceversa. La energía utilizada para cambiar de fase se llama energía latente. (J. Jaguemont, 2017).

Los materiales de cambio de fase o PCM sirven para almacenar energía principalmente, y para controlar las oscilaciones de la temperatura de un objeto dentro de un rango específico.

Lo que los PCM hacen de forma básica es absorber el calor en un proceso endotérmico cuando la temperatura aumenta y esto provoca su cambio de fase de sólido a líquido, esta característica los convierte en buenos materiales candidatos en aplicaciones de calefacción y refrigeración.

La inercia térmica o capacidad de almacenar calor de un material, depende básicamente de las características del mismo material, entre estas características las más importantes para materiales de uso en sistemas de almacenamiento térmico son su calor específico y la densidad del material.

El calor específico (C_p) de un material representa la cantidad de calor que es necesario suministrar a un kg de material para elevar su temperatura un grado. Esta es la definición de calor sensible, su medida se da en J/KgK. A continuación se presenta la tabla número 7, en la cual se puede comparar los valores de calor específico de distintos materiales, todos usados en sistemas de almacenamiento de calor, sin ser materiales de cambio de fase necesariamente.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Tabla 7.

Calor específico de distintos materiales

Material	Calor específico (J/kgK)
Tierra vegetal	1.840
Arcilla o limo	1.670 – 2.500
Madera frondosa	1.600
Granito	1.000
Corcho comprimido	1.560
Hormigón armado	1.000
Ladrillo perforado	1.000
Placa de yeso laminado (PYL)	1.000

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

La densidad del material, se mide en (Kg/m^3), es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia o material. La densidad media es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa en el espacio.

La siguiente tabla número 8, muestra los valores de densidad de los materiales más comúnmente usados en aplicaciones de almacenamiento térmico, sea de forma pura o combinados con materiales de cambio de fase.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Tabla 8.

Densidad de varios materiales

Material	Densidad (Kg/m³)
Granito	2.500 – 2.700
Hormigón armado	> 2.500
Tierra vegetal	2.050
Arcilla o limo	1.200 – 1.800
Placa de yeso laminado (PYL)	750 – 900
Ladrillo perforado	780
Madera frondosa (peso medio)	565 - 750
Corcho comprimido	<500

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

Los PCM tienen la capacidad para almacenar energía en forma de calor latente y en un rango estrecho de temperatura. Esta propiedad se puede aprovechar en múltiples aplicaciones ya que permite almacenar calor y disponer después de este, también se pueden utilizar como refrigerante para la protección térmica de alimentos, de dispositivos electrónicos, en espacios interiores con altas cargas internas, etc. (Yuste, 2017).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La aplicación de los materiales de cambio de fase consiste en que actúan como termorregulador reduciendo las oscilaciones térmicas en el ambiente de forma pasiva, ya que son capaces de responder a las variaciones de las condiciones térmicas del entorno.

Los PCM se caracterizan por su temperatura de cambio de fase. Por lo tanto los materiales más adecuados serán aquellos cuya temperatura de cambio de fase se aproxime a la temperatura ambiente de confort que se encuentra entre los 20°C y los 30°C.

Los materiales de cambio de fase se clasifican en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son más estables, menos corrosivos pero son potencialmente combustibles y su precio es superior. Los inorgánicos en cambio tienen un mayor calor latente y densidad, no son inflamables y son más baratos. Los PCM orgánicos más comunes son las ceras de parafina, ácidos grasos derivados de productos animales y vegetales y las mezclas orgánicas. Los PCM inorgánicos suelen ser sales hidratadas. Ambos tipos de materiales son reciclables. (Yuste, 2017).

La elección de un PCM depende de la aplicación en la que se busca utilizar y de sus propiedades, en este sentido el método multicriterio de selección brinda la oportunidad de resolver el problema de la selección de materiales.

Antes de seleccionar un PCM para su uso e integración a un sistema de almacenamiento de energía, es importante hacer una lista de los criterios necesarios para la selección de un material de cambio de fase adecuado, entonces la selección debe cumplir o pasar por los siguientes puntos:

- Alto calor latente, alto calor específico y alta conductividad.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Punto de fusión en el intervalo de temperatura deseada.
- Poco subenfriamiento.
- Cambios de volumen pequeños en la transición de fase.
- Estabilidad, no inflamable ni explosivo.
- Disponibilidad en grandes cantidades y a bajo costo.

La clave en la selección de un PCM adecuado requiere alto calor latente y conductividad térmica con el fin de almacenar y rechazar el calor con facilidad. Además, el punto de fusión del material es importante, y el intervalo óptimo de temperatura de operación que se encuentre entre los 15°C y 40°C.

Un PCM adecuado siempre dependerá de la aplicación en la cual será utilizado.

Existen estudios sobre el comportamiento térmico de diferentes materiales de cambio de fase en sistemas de almacenamiento térmico, y los mismos proponen los PCM ideales que se pueden usar en estas aplicaciones.

Los PCM utilizan su capacidad en calor latente para absorber el calor producido por un elemento externo, sin embargo una vez que pasan el punto de fusión la capacidad de actuación del PCM se reduce significativamente y pueden empezar a actuar como un material aislante. En este sentido la combinación de un sistema de enfriamiento con un PCM para regular su temperatura garantizaría un funcionamiento correcto del PCM a mediano y largo plazo. (J. Jaguemont, 2017).

La tabla número 9 indica los materiales que varios autores han reunido como materiales de cambio de fase, en la cual hay una visión general de sus propiedades.

Tabla 9.

Resumen de PCM

PCM	Conductividad térmica (W/(mK))	Calor latente (KJ/kg)	Punto de derritiendo (DO)	Calor especifico (KJ/(kg.K))	Densidad (kg/m³)
Compuesto de grafito	0.29	0.185	44	1.98	789
EGM y grafito	3.95	132.6	21.6	2.39	842
Parafina	30	70	30	2.5	900
Parafina con AL-espuma	0.22	120	57	-	805
Parafina/espuma	0.2	180	37	-	400
Parafina/espuma de cobre	7.65	-	142	42	-
Parafina cera	16.6	127	58.9	1.98	789

Fuente: (J. Jaguemont, 2017)

El calor latente de un material de cambio de fase, se puede definir como la energía que recibe el material, esta energía se ocupa de realizar el cambio de estado pero no cambia su temperatura, mientras ocurre este fenómeno de cambio de fase la temperatura del cuerpo permanece constante, y este es el motivo por el cual estos materiales se usan para aislamiento térmico.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En este aspecto los mejores materiales para almacenar energía térmica y transferirla son las sales hidratadas y las parafinas, y en especial para usarlas en aplicaciones de construcción la micro encapsulación de las parafinas brinda mayores ventajas para su facilidad de uso en distintas aplicaciones.

Las sales hidratadas y las parafinas son materiales conocidos como de cambio de fase, esto se debe a su capacidad para ser utilizados en aplicaciones de almacenamiento térmico, estos materiales poseen ciertas propiedades y características.

La ventaja más grande de las sales hidratadas y parafinas cuando se usan como material de cambio de fase, es que pueden almacenar grandes cantidades de energía a la temperatura de confort, es decir entre los 21°C y los 23°C, a través de su cambio de estado que está en forma de calor latente, estos materiales almacenan el calor en los rangos de temperatura de confort, y es hasta 100 veces superior al que almacenarían otros materiales comunes. (Inocencio, 2016).

Las propiedades de las sales hidratadas como material se pueden observar en la tabla número 10.

Tabla 10.

Propiedades de las sales hidratadas

Propiedades de las sales hidratadas		
Propiedades físicas	Unidades	Comentarios
Densidad a granel	1.00 g/cc	

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Continuación tabla 10.

Tamaño de malla de partícula	≥ 250 malla	$< 2\%$
pH	9.8	2% suspensión
Área superficial específica	$370 \text{ m}^2/\text{g}$	
Propiedades de procesamiento		
Gel time	22.0 min	g
Perdidas por ignición	8.2%	
Elementos componentes		
H ₂ O	$\leq 10\%$	Libre
MgO	27.5%	
Na ₂ O	2.8%	
SiO ₂	59.5%	

Fuente: (Inocencio, 2016)

Otro de los materiales de cambio de fase más utilizados en aplicaciones de almacenamiento térmico son las parafinas, estos materiales poseen ciertas propiedades específicas que se detallan en la tabla presentada a continuación, número 11.

Tabla 11.

Propiedades de las parafinas

Propiedades de las parafinas		
Propiedades físicas	Unidades	Comentarios
Viscosidad	1000 – 8000 cP	En forma dinámica
Propiedades descriptivas		
Número de anima	0.19 ml 1 N HCl/g	
Apariencia	Líquido claro, de incoloro a amarillento	

Fuente: (Inocencio, 2016)

Método de selección multicriterio MCDM

Al momento de tomar decisiones en cualquier proyecto, como por ejemplo cuando se debe elegir un material para trabajar, llega un punto en el cual se deben tomar una decisión sobre cuál es la mejor elección, y de esta decisión dependerá en gran porcentaje el éxito del proyecto.

Entonces surge la necesidad de poseer uno o varios métodos que respalden una elección. Para ello se han desarrollado los métodos multicriterio, estos se caracterizan por cotejar varias variables o criterios y transformarlas en algoritmos o modelos matemáticos. En esta investigación se han elegido los métodos de selección multicriterio que han funcionado en otras investigaciones de selección de materiales.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La toma de decisiones sobre los materiales más óptimos para utilizar se puede volver muy difícil cuando se analizan datos sobre los materiales que son muy complejos, es por esto que se debe crear una discusión así como intercambio de ideas entre expertos con el fin de estructurar y buscar una solución al problema, estos casos se resuelven mediante la utilización del método multicriterio para la selección de materiales. (Quintero, 2012).

El método o análisis multicriterio es un instrumento utilizado para evaluar distintas posibilidades de solución para un mismo problema, teniendo en cuenta un número de variable de criterios que se utilizan para buscar y tomar la mejor decisión en la selección de la solución más conveniente para el problema que se busca resolver. (Commons, 2018).

La metodología multicriterio sirve para evaluar la prioridad de los materiales a usar para el proyecto en este caso en particular. La priorización de los materiales en este caso sirve principalmente para dos cosas, que son el por qué usarlos y el para qué usar estos materiales o compuestos.

Los métodos de evaluación multicriterio que funcionan para el presente estudio son principalmente cuantitativos y cualitativos. Los métodos cuantitativos son aquellos que toman una realidad objetiva y estática estudiando las relaciones entre las variables existentes que pueden ser cuantificadas, y estos resultados pueden ser generalizados. Los métodos cualitativos estudian la parte cualitativa de las variables y permiten obtener información sobre distintos juicios de los materiales, esta evaluación es complementaria a la realizada de forma cuantitativa. Así se consigue una evaluación de los materiales y de sus propiedades y criterios de forma integral. (Grajales, 2013).

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

El método multicriterio se usa porque permite identificar las partes que componen el sistema, reconocer el peso o ponderación de cada parte del sistema, identificar los vínculos entre estas partes mencionadas y proponer la mejor solución después de considerar las variables de estas partes. (Grajales, 2013).

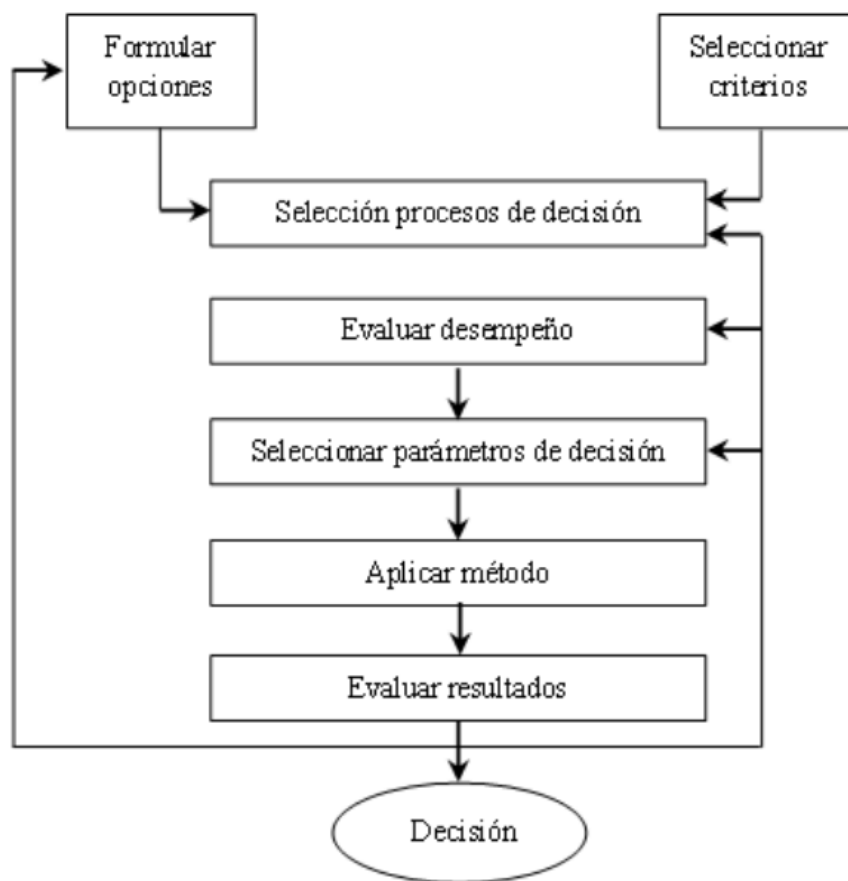


Figura 9: Modelo para la toma de decisión

Fuente: (Quintero, 2012)

Para llevar a cabo este proceso de decidir el material a ser usado se requiere la comparación entre las opciones de las cuales se dispone, que en este caso de estudio son los materiales de cambio de fase, como parafinas y sales hidratadas. En este caso el método

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

multicriterio permite desde el punto de vista analítico encontrar la mejor alternativa para el problema que se busca solucionar.

Una de las ventajas más importantes que brinda el método multicriterio es la diversidad de factores que se pueden integrar en el proceso de evaluación, particularmente la forma de presentar los datos en una escala única que permita comparar los elementos, y así establecer la prioridad de cada uno de ellos. (Quintero, 2012).

El método multicriterio toma en cuenta tanto datos cualitativos como cuantitativos de los elementos que se va analizar, sus componentes más importantes se detallan en la tabla número 12.

Tabla 12.

Componentes de una evaluación multicriterio

Definición y estructuración del problema	Lo define el escenario de evaluación y la disponibilidad de información acerca de los elementos que se analiza
Descripción de alternativas potenciales	Son los elementos sobre los que se va a decidir, este número de opciones es finito
Elección de criterios de evaluación	Debe existir abundantes criterios de evaluación, estos deben poseer propiedades técnicas
Identificación de un sistema para la toma de decisiones	Asignación de peso a los criterios, se debe dar importancia relativa a los diferentes criterios de evaluación.

Fuente: (Quintero, 2012)

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Este estudio busca como fin la selección del material más idóneo para cumplir con la función de almacenamiento térmico, a partir de las propiedades de los materiales que se están analizando y son candidatos a ser usados, para lo que se analizan las propiedades de los materiales que pueden ser usados para cumplir con esta función, lo que da la característica principal de esta investigación que es la de seleccionar un material de acuerdo a sus propiedades aplicado al uso en un sistema de almacenamiento térmico y conservación de energía térmica para ser usado en un automóvil, entonces partiendo de los datos de los materiales en estudio se selecciona al más apto de acuerdo al proceso de análisis multicriterio.

Existen varios métodos multicriterio de acuerdo a varios autores, y cada uno se aplica a una situación distinta y particular, para este estudio se van a aplicar los métodos que brindan una mejor respuesta al momento de seleccionar materiales para una aplicación determinada. A continuación se describe brevemente las características principales de los métodos multicriterio más usados.

El método conocido como “Dominic” es un método cualitativo de selección de materiales en el cual se toman en cuenta factores de peso para los criterios de selección. Esta selección se hace con matrices en las cuales en las filas se colocan los criterios y los factores de peso, y en las columnas van los materiales escogidos como candidatos para la selección identificados con letras. Después en otra matriz se exponen los criterios de prioridad en las columnas y la evaluación individual en las filas. (Javier Martinez, 2015).

El siguiente método utilizado es conocido como “Palh Beitz”, este consiste en separar el diseño del producto en diseño de módulos funcionales separados, lo que hace

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

necesario poseer una jerarquía de funciones para el producto. La ventaja de esto es la simplificación del proceso de diseño a partir de los módulos individuales. Este método se puede explicar de la siguiente forma: primero se debe enumerar los criterios de evaluación, hacer una lista concisa de los factores de diseño que contenga el mayor número de problemas posibles, se deben asignar valores numéricos de 0 a 1. Después hay que asignar los factores de ponderación para los criterios de evaluación, valores de 0 a 1. Luego hay que asignar medidas operativas para cada criterio de evaluación y los parámetros se deben asignar a cada criterio. Luego se debe asignar valores numéricos de evaluación a los criterios individuales, en este apartado se usan valores de 0 a 10. A continuación se obtiene una evaluación global para lo cual se debe tomar en cuenta los pesos asignados en la etapa 4 y los valores del paso 2. Finalmente se debe comparar y contrastar las alternativas, mientras más alto es el valor total mejor es la alternativa propuesta. (Javier Martinez, 2015).

El método de “Pugh” fue creado por Stuart Pugh en los años 90, este es un método que compara los diferentes conceptos de producto con los que se desea trabajar con un concepto para todos común que facilita la elección de la opción que sobresale de las demás al darles una valoración. Este método se basa en que el proyecto debe englobar la confrontación de diversos conceptos diferentes acerca de los mismos. Se hace un análisis de las ventajas o puntos positivos, desventajas o puntos negativos y equivalencia de los conceptos propuestos en relación al concepto de referencia. Esta técnica facilita la elección del mejor concepto, llamado concepto ganador. (Faria, 2006).

El método “VIKOR” es un método de toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM). Fue desarrollado originalmente para resolver problemas de decisión con criterios

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

conflictivos, asumiendo que el compromiso es aceptable para la resolución del problema, quien toma las decisiones desea una solución que sea la más cercana a la ideal, y las alternativas se evalúan de acuerdo a todos los criterios establecidos. (Opricovic, 2011). El nombre VIKOR apareció en 1990, que significa: Optimización multicriterio y solución de compromiso, con pronunciación Vikor. (Opricovic, 2011).

La técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal, es conocida como el método “TOPSIS”. Este es un método de análisis de decisión de criterios múltiples. TOPSIS se basa en el concepto de que la alternativa elegida debe tener la distancia geométrica más corta desde la solución ideal positiva y la distancia geométrica más larga desde la solución ideal negativa. Este es un método de agregación compensatoria que compara un conjunto de alternativas mediante la identificación de ponderaciones para cada criterio, la normalización de las puntuaciones para cada criterio y el cálculo de la distancia geométrica entre cada alternativa y la alternativa ideal, es la mejor puntuación en cada criterio. Un supuesto de TOPSIS es que los criterios aumentan o disminuyen de manera monotonía. Normalmente se requiere la normalización, ya que los criterios son a menudo de dimensiones incongruentes en problemas de criterios múltiples. Los métodos compensatorios como TOPSIS permiten compensaciones entre criterios, donde un resultado pobre en un criterio puede ser negado por un buen resultado en otro criterio. (Mancini, 2012).

Selección de materiales y características requeridas

Los materiales que se van analizar mediante la utilización de los métodos multicriterio pertenecen a las familias de materiales orgánicos e inorgánicos.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Los materiales orgánicos contienen varios grupos pequeños o subdivisiones, de los cuales los que se pueden usar y que cumplen con los requisitos de comportamiento como material de cambio de fase son las parafinas, mientras que en el grupo de materiales que pertenecen a la división de inorgánicos las sales hidratadas son las que cumplen de mejor manera esta función.

Los datos más importantes sobre las parafinas, que son mezclas de hidrocarburos saturados (mezcla de alcanos), se detallan a continuación en la tabla número 13. Estos materiales se obtienen del refinado del petróleo. (Mayayo, 2012).

Tabla 13.

Propiedades de las parafinas

Propiedades de las parafinas	
Formula química	C_nH_{2n+2} (con $n > 16$)
Calor específico	2.1 kJ/kg*K
Temperatura de fusión	entre 20°C y 80°C
Viscosidad	Baja en fase líquida
Punto de ignición	Sobre los 250°C
Calor de fusión	entre 70 y 250 kJ/kg
Densidad de energía acumulada	entre 54 y 71 kW*h/m ³

Fuente: (Mayayo, 2012)

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Las parafinas a comparación del agua poseen hasta cinco veces mayor capacidad para almacenar energía en bajos gradientes de temperatura, además su volumen de expansión es solo de un 10% durante el proceso de cambio de fase, esto debido a su densidad que se encuentra entre 750 a 850 kg/m³ en estado líquido, y de 800 a 900 kg/m³ en estado sólido. (Mayayo, 2012).

Los ácidos grasos son compuestos químicos que pertenecen al mismo grupo de materiales orgánicos, además están en los mismos rangos de temperatura que las parafinas y poseen un calor de fusión comparable, sin embargo su costo es mucho mayor, por lo que en un análisis multicriterio como el que se lleva a cabo pierden importancia sobre las parafinas al obtener una menor puntuación.

Tabla 14.

Propiedades de las sales hidratadas

Propiedades de las sales hidratadas	
Formula química	MH ₂ O (donde M es un compuesto inorgánico)
Conductividad térmica	0.5 W/m°C
Punto de fusión	32.4°C
Calor latente	254 kJ/kg

Fuente: (Mayayo, 2012)

Las mezclas eutécticas tienen un punto de fusión fijo y pertenecen al mismo grupo de materiales, sin embargo su uso e investigación es nueva en el campo de materiales de

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

cambio de fase, por esta razón la información de la que se dispone sobre sus propiedades es muy limitada, lo que resta puntos al momento de realizar la selección.

Las sales hidratadas son compuestos que pertenecen al grupo de los materiales inorgánicos, dentro de los materiales de cambio de fase. Estos compuestos poseen varias propiedades que se detallan en la tabla número 14.

Al momento de realizar una selección las sales hidratadas presentan una ventaja importante sobre las parafinas, su costo es menor, este es uno de los materiales más baratos para su uso como PCM. Sin embargo tienen el inconveniente de segregación de fases y subenfriamiento, para lo cual la solución que se aplica es usar agentes nucleantes, esto elimina el subenfriamiento de las sales hidratadas antes de su cristalización. (Mayayo, 2012).

Para el presente estudio, se buscan características específicas de los materiales para poder ser usados como materiales de cambio de fase (PCM), concretamente materiales que tengan un punto de fusión cercano a los 30°C y una alta entalpia específica de cambio de fase. Los PCM poseen distintas propiedades, pero estas se pueden dividir en grupos para simplificar el proceso de selección del material, puesto que cada material se compara con otros de acuerdo a sus propiedades, estas son térmicas, físicas, químicas, cinéticas y económicas.

Dentro de las propiedades físicas lo que se busca es que el material seleccionado posea un rango estable de temperatura de cambio de fase, esta es la propiedad más importante, así como también una alta entalpia y una alta conductividad térmica en ambas fases, es decir en forma sólida y líquida. Además es importante que los materiales cumplan

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

principalmente con una densidad alta, una fusión del material congruente y que el material presente pequeñas variaciones de densidad entre cambio de fase.

Para las propiedades químicas la más importante es la estabilidad del material y la estabilidad química de todo el sistema, es decir que el material no se degrade con el tiempo y los usos y que además no produzca reacciones químicas con su contenedor.

En las propiedades cinéticas la más importante es que el material a ser usado tenga un subenfriamiento bajo en la fusión, esto quiere decir que el material no necesite de una fuente de frío adicional para poder iniciar el proceso de fusión.

Una de las características más importante dentro de cualquier selección multicriterio es el factor económico, puesto que el material debe tener un costo accesible y una buena disponibilidad en el mercado.

Todos estos factores se evalúan con el uso de métodos multicriterio de selección, estos métodos comparan las propiedades descritas de cada material entre los materiales escogidos para la aplicación, con lo que se obtiene la valoración de las distintas opciones de materiales y así poder elegir el PCM más adecuado a la aplicación.

Métodos de ponderación o pesos

Para poder asignar pesos o prioridad a un criterio y así desarrollar los métodos de selección, existen varios métodos de ponderación los cuales pueden ser subjetivos si se basan en el juicio del decisor, y pueden ser objetivos si utilizan modelos matemáticos que respaldan la decisión. Para este estudio se utilizara métodos objetivos, y al final con estos resultados se trabaja en los métodos multicriterio.

Método de Entropía

Para desarrollar el método de ponderación primero se debe tener los datos de los materiales candidatos con los cuales se va a trabajar en una sola matriz. Esta matriz que agrupa los materiales y criterios respectivos se observa en la tabla número 15.

Tabla 15.

Matriz de materiales y criterios a ponderar

Materiales (M)	Conductividad térmica W/mK (C1)	Punto de fusión °C (C2)	Calor latente KJ/kg (C3)	Calor especifico KJ/kg.k (C4)	Densidad kg/m³ (C5)
Parafina (M1)	30	37	70	2.5	900
Parafina cera (M2)	16.6	37	127	1.98	789
Na₂SO₄ (M3)	0.5	32.4	254	0.80	2660
CaHPO₄ (M4)	0.5	25	127	0.78	2930
MgSO₄ (M5)	0.5	30	136	0.95	2660
Compuesto de grafito (M6)	0.29	0.185	44	1.98	789
Parafina/espuma de cobre (M7)	0.2	180	37	42	400

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Esta tabla se usara para los métodos de ponderación, los materiales se les asigna un código, con la letra *M* y un número respetando el orden. De igual forma a los criterios se les asigna la letra *C* y un número de igual forma.

La matriz de decisión resultante, es la matriz *X*:

$$X = \begin{bmatrix} 30 & 37 & 70 & 2.5 & 900 \\ 16.6 & 37 & 127 & 1.98 & 789 \\ 0.5 & 32.4 & 254 & 0.80 & 2660 \\ 0.5 & 25 & 127 & 0.78 & 2930 \\ 0.5 & 30 & 136 & 0.95 & 2660 \\ 0.29 & 0.18 & 44 & 1.98 & 789 \\ 0.2 & 180 & 37 & 42 & 400 \end{bmatrix}$$

A continuación se debe realizar la normalización de la matriz de decisión, para normalizar la matriz, se utiliza la ecuación número 2, y con su aplicación se obtiene los valores de la matriz *P_{ij}*, que es la matriz normalizada resultante.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} m \quad (2)$$

Donde:

- ***p_{ij}***: son los valores resultantes
- ***m***: son la cantidad de criterios
- ***X_{ij}***: Son los valores de la matriz de decisión

Se obtiene la matriz normalizada resultante:

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0.617 & 0.108 & 0.088 & 0.049 & 0.081 \\ 0.342 & 0.108 & 0.160 & 0.039 & 0.071 \\ 0.010 & 0.095 & 0.319 & 0.016 & 0.239 \\ 0.010 & 0.073 & 0.160 & 0.015 & 0.263 \\ 0.010 & 0.088 & 0.171 & 0.019 & 0.239 \\ 0.006 & 0.001 & 0.055 & 0.039 & 0.071 \\ 0.004 & 0.527 & 0.047 & 0.824 & 0.036 \end{bmatrix}$$

Para calcular el valor de entropía, se debe aplicar la ecuación número 3 y después de esto la ecuación número 4 de donde se emplea la constante K. de este modo se obtiene los valores e para cada uno de los criterios indicados en la tabla número 16.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 7} = 0,514 \quad (4)$$

Donde:

- $k: \frac{1}{\ln m}$: es una constante que corresponde a un valor que establece que $0 \leq e_j \leq 1$
- m : es el número de materiales.
- e_j : es el valor de entropía
- P_{ij} : son los valores de la matriz normalizada
- $\ln$: Logaritmo Natural

A continuación se realiza el cálculo del grado de divergencia, para sacar el grado de divergencia se utiliza la ecuación número 5, de esta se obtiene los valores d , que se observa en la tabla número 16.

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

Donde:

- d_j : es el grado de divergencia
- e_j : es el valor de entropía

Tabla 16.

Calculo de la entropía (e) y grado de divergencia (d)

Entropía (e)	Valor	Divergencia (d)	Valor
e1	0.558	d 1	0.442
e2	0.254	d 2	0.746
e3	0.090	d 3	0.910
e4	0.608	d 4	0.392
e5	0.109	d 5	0.891

Después se debe realizar la obtención de los pesos, para obtener los valores de los pesos, se aplica la ecuación número 6, de la cual se obtiene los valores de d_j y con la sumatoria de estos se obtiene la constante d , que se utiliza para el último paso que corresponde al cálculo de los pesos W , mismos que se puede observar en la tabla número 17.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (6)$$

Donde:

- W_j = Pesos
- Σdj = es la sumatoria de los grados de divergencia

Tabla 17.

Pesos del método de entropía

W1	W2	W3	W4	W5
0.345	0.157	0.056	0.375	0.067

Método de Desviación Estándar

Lo que primero que se necesita para el desarrollo de este método, es la matriz de decisión, para lo cual se emplea la matriz de decisión mostrada en la tabla número 15.

A continuación se debe realizar el cálculo de la desviación estándar, para calcular los valores correspondientes a la desviación estándar se utiliza la ecuación número 7, de donde se obtiene como resultado los valores σ_j , que corresponden al valor de la desviación estándar, sus valores se puede ver en la tabla número 18.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m}} \quad (7)$$

Donde:

- x_{ij} : son los valores de la matriz de decisión.
- m : son número de materiales.

- σ_j : son los valores de la desviación estándar.
- $\bar{x}_j$: es el valor de la sumatoria de los criterios dividido para m

Tabla 18.

Resultados intermedios del cálculo de la desviación estándar

Desviación (numeral)	Valor
σ_1	7.493
σ_2	23.384
σ_3	107.500
σ_4	1.511
σ_5	1436.429

A continuación se puede obtener los pesos para cada criterio, para obtener los pesos de cada criterio, se utiliza la ecuación número 8, de la cual se obtienen los valores W , estos valores se pueden observar en la tabla número 19.

$$w_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (8)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

$\sum_{j=1}^n \sigma_j$: es la sumatoria de los valores de la desviación estándar

Tabla 19.

Pesos del método de desviación estándar

W1	W2	W3	W4	W5
10.949	54.830	68.854	14.187	10.187

Después de realizar los métodos de ponderación, se realiza una comparación de los pesos obtenidos, la comparación y selección de los valores de métodos de ponderación, se observa en la tabla número 20.

Tabla 20.

Comparación de los valores de ponderación obtenidos

Método	W1	W2	W3	W4	W5
Entropía	0.345	0.157	0.056	0.375	0.067
Desviación estándar	10.949	54.830	68.854	14.187	10.187

El material que se busca en este estudio, es un PCM que principalmente va a desempeñar la función de almacenamiento térmico, bajo determinadas condiciones y temperaturas de trabajo, entonces se toma como pesos los valores del método de la

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

desviación estándar, ya que este método presenta los valores más altos referentes a los criterios buscados.

Estos valores se presentan en la tabla número 21, y son los valores que serán utilizados en el desarrollo de los métodos de selección multicriterio.

Tabla 21.

Pesos a utilizar en MCDM

Método	W1	W2	W3	W4	W5
Desviación estándar	10.949	54.830	68.854	14.187	10.187

Aplicación de métodos multicriterio de selección

A continuación se presenta el desarrollo y aplicación de los métodos multicriterio para la selección del material óptimo para este estudio.

Método Pugh

El método que se usara para seleccionar el material más idóneo para la aplicación buscada es este estudio, es el método llamado “Pugh”, ya que brinda la posibilidad de analizar más variables y materiales de una forma muy intuitiva, teniendo en cuenta y basándonos principalmente en las propiedades y características propias de cada material.

El método “Pugh” es muy parecido a tener una lista de ventajas y desventajas, este método se usa para poder evaluar de la mejor manera posible las opciones del diseño del producto. Consiste en cuantificar y categorizar los criterios del material a evaluar

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

basándose principalmente en su importancia, este método se puede describir en los cuatro pasos detallados en la tabla número 22. (Javier Martinez, 2015).

Tabla 22.

Pasos del método Pugh

Pasos	Descripción
Primer paso	Asignar un valor puntual a cada criterio considerando su importancia sobre los parámetros, su valor es entre 1 y 3 de menor a mayor
Segundo paso	La configuración de los materiales se evalúa con respecto a cada criterio, asignando cantidad de valores positivos o negativos hasta un máximo de 3
Tercer paso	Se realiza la sumatoria de los valores, multiplicados por el valor de importancia del criterio
Cuarto paso	Finalmente se selecciona la alternativa que tenga el mayor resultado positivo

Fuente: (Javier Martinez, 2015)

Tabla 23.

Códigos de selección para PCM

Material	Código
Sulfato de sodio trihidratado - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$	A1
Fosfato mono ácido de calcio trihidratado - $\text{CaHPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$	A2
Sulfato de magnesio penta hidratado - $\text{MgSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	A3
Parafina - $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$	B1
Compuesto de grafito	B2
Parafina/espuma de cobre	B3

En la tabla número 23, se presenta los materiales elegidos para el método Pugh en este proceso de selección, a cada opción se le asigna un código, lo que hace más fácil identificarlo dentro de la matriz de decisión, estos PCM se han escogido para comparar sus

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

características físicas y químicas, y de esta forma poder seleccionar el más apto para la aplicación planteada en el presente estudio.

Tabla 24.

Matriz de evaluación. Criterios y valores de los materiales elegidos

Criterio de selección	Valor	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Calor específico	3	+	+	+	++	+	+
Temperatura de fusión	3	++	+	+	+++	++	+
Punto de ignición	2	+	-	+	-	+	++
Calor latente	2	-	+	-	+	-	+
Viscosidad	1	+	-	+	++	+	-
Costo	2	+	+	+	++	-	-
Sumatoria (+)		14	10	11	23	12	12
Sumatoria (0)		0	0	0	0	0	0
Sumatoria (-)		2	3	2	2	4	3
Resultado		12	7	9	21	8	9
Decisión final	OK						

La tabla número 24 muestra la matriz de evaluación con los criterios de diseño de los materiales presentados y sus respectivas valoraciones. Las propiedades se han evaluado para cada uno de los materiales de acuerdo a la metodología “Pugh”.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

De acuerdo a la matriz de selección anterior, basada en el método “Pugh”, el material ganador entre las opciones de materiales elegidos para esta selección corresponde al código B1, mismo que es la parafina. Esto indica que de acuerdo a este método de selección multicriterio la mejor opción para la aplicación determinada en este estudio corresponde a la parafina, ya que esta obtuvo el mayor puntaje, lo que indica que sus propiedades son las que más se ajustan a la necesidad expuesta.

Método VIKOR

A continuación se presenta el desarrollo del llamado método VIKOR para la selección multicriterio de materiales.

Lo primero que se hace para desarrollar este método, es construir la matriz de decisión, misma que agrupa los valores de los materiales y de los criterios que se van a analizar. Esta matriz se puede observar en la tabla número 25, de esta tabla se obtiene la matriz X, misma que agrupa los valores numéricos.

Tabla 25.

Matriz de decisión VIKOR

Materiales (M)	Conductividad térmica W/mK (C1)	Punto de fusión °C (C2)	Calor latente KJ/kg (C3)	Calor especifico KJ/kg.k (C4)	Densidad kg/m³ (C5)
Parafina (M1)	30	37	70	2.5	900
Parafina cera (M2)	16.6	37	127	1.98	789
Na₂SO₄ (M3)	0.5	32.4	254	0.80	2660
CaHPO₄ (M4)	0.5	25	127	0.78	2930
MgSO₄ (M5)	0.5	30	136	0.95	2660
Compuesto de grafito (M6)	0.29	0.185	44	1.98	789
Parafina/espuma de cobre (M7)	0.2	180	37	42	400

$$X = \begin{bmatrix} 30 & 37 & 70 & 2.5 & 900 \\ 16.6 & 37 & 127 & 1.98 & 789 \\ 0.5 & 32.4 & 254 & 0.80 & 2660 \\ 0.5 & 25 & 127 & 0.78 & 2930 \\ 0.5 & 30 & 136 & 0.95 & 2660 \\ 0.29 & 0.185 & 44 & 1.98 & 789 \\ 0.2 & 180 & 37 & 42 & 400 \end{bmatrix}$$

Ahora se debe normalizar la matriz de decisión, para hacer esto en el método VIKOR, se utiliza la ecuación número 9. De esta se obtienen los valores r , con estos se obtiene la matriz R_{ij} , la misma que agrupa los valores normalizados. Estos valores se tiene ordenados en la matriz normalizada de la tabla número 26.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (9)$$

Donde:

a_{ij} = son los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = son los valores pertenecientes a la matriz normalizada

$\sum_{i=1}^m a_{ij}^2$ = es la sumatoria de los valores de la matriz de decisión elevados al cuadrado.

Al final se obtiene la matriz normalizada, ya con sus respectivos valores.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.87 & 0.19 & 0.19 & 0.05 & 0.18 \\ 0.48 & 0.19 & 0.36 & 0.04 & 0.15 \\ 0.01 & 0.16 & 0.73 & 0.01 & 0.53 \\ 0.01 & 0.12 & 0.36 & 0.01 & 0.58 \\ 0.01 & 0.15 & 0.39 & 0.23 & 0.53 \\ 0.008 & 0.001 & 0.12 & 0.04 & 0.15 \\ 0.006 & 0.92 & 0.10 & 0.99 & 0.08 \end{bmatrix}$$

Tabla 26.

Matriz normalizada VIKOR

Código	C1	C2	C3	C4	C5
M1	0.87	0.19	0.19	0.05	0.18
M2	0.48	0.19	0.36	0.04	0.15
M3	0.01	0.16	0.73	0.01	0.53
M4	0.01	0.12	0.36	0.01	0.58
M5	0.01	0.15	0.39	0.023	0.53
M6	0.008	0.001	0.12	0.04	0.15
M7	0.006	0.91	0.10	0.99	0.08

A continuación se realiza la construcción de la matriz estandarizada de pesos, para esto se multiplican los pesos por el valor ponderado ya normalizado, esto se hace con la ecuación número 10, de la cual se obtiene los valores que se muestran en la matriz V_{ij} , y sus resultados están agrupados en la tabla número 27.

Construcción de la matriz estandarizada de pesos. Para ello se multiplican los valores de la matriz normalizada por los pesos de lo cual se obtiene la matriz V_{ij} :

$$V = (w_r) \quad (10)$$

Donde:

w_n = es el valor de los pesos para cada criterio

r = son los valores de la matriz normalizada.

V_{ij} = es la matriz estandarizada de pesos

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.003 & 0.002 & 0.004 & 0.008 \\ 0.04 & 0.003 & 0.005 & 0.003 & 0.007 \\ 0.001 & 0.003 & 0.10 & 0.001 & 0.05 \\ 0.001 & 0.002 & 0.05 & 0.001 & 0.06 \\ 0.001 & 0.002 & 0.05 & 0.001 & 0.05 \\ 0.008 & 0.000 & 0.001 & 0.003 & 0.002 \\ 0.005 & 0.016 & 0.001 & 0.07 & 0.001 \end{bmatrix}$$

Tabla 27.

Matriz estandarizada de pesos VIKOR

Código	C1	C2	C3	C4	C5
M1	0.07	0.003	0.002	0.004	0.008
M2	0.04	0.003	0.005	0.003	0.007
M3	0.001	0.003	0.010	0.001	0.05
M4	0.001	0.002	0.005	0.001	0.06
M5	0.001	0.002	0.005	0.001	0.05
M6	0.008	0.000	0.001	0.003	0.002
M7	0.005	0.016	0.001	0.07	0.001

A continuación se realiza el cálculo de indicadores de resultados positivos y negativos de forma ideal. Para esto se aplican las ecuaciones 11 y 12, de donde se extraen los criterios f , de los cuales se debe tomar el valor mayor en los criterios C donde el valor más alto es el más importante y el mínimo donde el valor más importante es el menor, siendo así el precio del valor mínimo deseado.

$$A^* = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J), (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{max}, M_2^{max}, \dots, M_n^{max}\} \quad (11)$$

$$A^- = \left\{ \max_i M_{ij} \mid j \in J), (\min_i M_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{M_1^{min}, M_2^{min}, \dots, M_n^{min}\} \quad (12)$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Para C1 (mayor es mejor)
- Para C2 (mayor es mejor)
- Para C3 (menor es mejor)
- Para C4 (mayor es mejor)
- Para C5 (mayor es mejor)

A continuación se realiza el cálculo de soluciones óptimas. Las soluciones óptimas son de dos clases denominadas (U_i) y (R_j), para calcular las primeras se aplica la ecuación número 13, de donde se obtienen los valores agrupados en la matriz del mismo nombre (U_i) y que se usan en los siguientes pasos de este método. Los resultados de estas soluciones están agrupados en las tablas número 28 y 29.

En este paso se determinan los valores que determinarán el rango de valores de cada criterio, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (13)$$

Donde:

U_i = es la matriz resultante de la sumatoria

W_f = son los valores de los pesos

F_j = son los valores de la matriz estandarizada de pesos

R_i = es la matriz de los valores de rango

V_i = son los valores finales de cada criterio

α = es una constante cuyo valor es 0,5

$$U_i = \begin{bmatrix} 0 & 43.60 & 58.38 & 13.59 & 817.18 \\ 4.92 & 43.60 & 40.29 & 13.77 & 861.86 \\ 10.83 & 45 & 0 & 14.18 & 108.68 \\ 10.83 & 47.26 & 40.29 & 14.18 & 0 \\ 10.83 & 45.73 & 37.44 & 14.12 & 108.68 \\ 10.91 & 54.83 & 66.63 & 13.77 & 861.86 \\ 10.94 & 0 & 68.85 & 0 & 1018.45 \end{bmatrix}$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Tabla 28.Soluciones optimas U_i

Solución U_i	Valor
U1	983.41
U2	1004.11
U3	246.06
U4	113.03
U5	226.38
U6	1057.13
U7	1165.72
U_i máximo	U_i mínimo
1165.72	113.03

Para obtener los valores de R_i , se utiliza la ecuación número 14, de donde se obtienen los valores que se muestran a continuación:

$$R_i = \max_j \left[\frac{w_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (14)$$

Tabla 29.Soluciones optimas R_i

Solución R_i	Valor
R1	817.18
R2	861.86
R3	108.68
R4	47.26
R5	108.68
R6	861.68
R7	1018.45
R_i máximo	R_i mínimo
1018.45	47.26

A continuación, en el paso siguiente del método se deben calcular los valores denominados V_{ij} , para los cuales se utilizan los valores de U y R respectivamente

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

reemplazados en la ecuación número 15, los valores V obtenidos son los valores finales del método, que se observa en la tabla número 30 y estos son ubicados en el ranking de la tabla número 31.

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1-\alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (15)$$

Tabla 30.

Soluciones V_{ij}

Solución V_{ij}	Valor
V1	0.81
V2	0.84
V3	0.09
V4	0.00
V5	0.09
V6	0.87
V7	1.00

El material ganador en el ranking de acuerdo al método VIKOR, es el valor que más se aproxima a cero, esta escala va de 1 a 5.

Tabla 31.

Ranking del método VIKOR

Material	V_i	Ranking
M1	0.36	2
M2	0.22	4
M3	0.01	7
M4	0.07	5
M5	0.02	6
M6	0.71	1
M7	0.36	3

Método TOPSIS

El método de selección TOPSIS, es también muy utilizado en la selección multicriterio, para su desarrollo se deben seguir los pasos que están descritos a continuación. Este método se basa en las matrices ya construidas en el método anterior.

Primero se debe construir la matriz de decisión, en este caso en particular se emplea la misma matriz del método VIKOR.

Segundo se debe realizar la normalización de la matriz de decisión, para lo cual se emplea la misma matriz normalizada del método VIKOR.

Tercero se realiza la construcción de la matriz estandarizada de pesos, de igual forma se utiliza la misma matriz estandarizada de pesos del método VIKOR, desarrollada anteriormente.

En el cuarto punto se realiza la determinación de las soluciones ideales. Para esto se aplica la ecuación número 16, de donde se obtienen los valores de las soluciones ideales, las mismas que están agrupadas en la matriz de la tabla número 32.

$$A^* = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (16)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-\}$$

Donde:

A^* =Corresponde a los valores positivos ideales

A^- = Corresponde a los valores negativos ideales

$$A^- = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

$$A^- = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-\}$$

Tabla 32.

Matriz de soluciones ideales positivas y negativas TOPSIS

Solución ideal positiva	0.309	3.225	0.084	1.493	0.024	0.953	0.029
Solución ideal negativa	0.051	2.329	0.025	0.803	0.009	0.390	0.006

A continuación, en el quinto paso se realiza el cálculo de diferencias entre mediciones. Para calcular estas diferencias se aplican las ecuaciones número 17 y 18, de donde se obtienen los valores S positivos y S negativos, estos valores están agrupados en la matriz que se presenta en la tabla número 33.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (17)$$

Donde:

 S_i^+ = Separaciones positivas

$$S_1^+ = \sqrt{(v_{11} - v_1^*)^2 + (v_{12} - v_2^*)^2 + (v_{13} - v_3^*)^2 \dots}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (18)$$

Donde:

S_i^- = Separaciones negativas

$$S_i^- = \sqrt{(v_{11} - v_1^-)^2 + (v_{12} - v_2^-)^2 + (v_{13} - v_3^-)^2}$$

Tabla 33.

Matriz de distancias entre soluciones ideales TOPSIS

Código	Distancia hacia la solución positiva ideal	Distancia hacia la solución negativa ideal
M1	3.683	0.021
M2	3.686	0.011
M3	3.691	0.012
M4	3.691	0.013
M5	3.691	0.011
M6	3.693	0.002
M7	3.651	0.019

Como sexto paso, se realiza el cálculo de la proximidad a la solución ideal, para esto se utiliza la ecuación de la cual se obtienen los valores C , los cuales son los valores obtenidos para cada material y se clasifican en el ranking que se presenta en la tabla número 34. El material que obtiene el valor de C más alto es el ganador.

Tabla 34.

Ranking del método TOPSIS

Código	Solución ideal positiva	Ranking
M1	0.012	5
M2	0.011	4
M3	0.021	7
M4	0.013	6
M5	0.0119	3
M6	0.002	1
M7	0.019	2

Método COPRAS

Para la aplicación y resolución de este método, se procede primero a construir la matriz de decisión, como se puede observar en la tabla número 35.

Tabla 35.

Matriz de decisión del método COPRAS

Materiales (M)	Conductividad térmica W/mK (C1)	Punto de fusión °C (C2)	Calor latente KJ/kg (C3)	Calor especifico KJ/kg.k (C4)	Densidad kg/m³ (C5)
Parafina (M1)	30	37	70	2.5	900
Parafina cera (M2)	16.6	37	127	1.98	789
Na₂SO₄ (M3)	0.5	32.4	254	0.80	2660
CaHPO₄ (M4)	0.5	25	127	0.78	2930
MgSO₄ (M5)	0.5	30	136	0.95	2660
Compuesto de grafito (M6)	0.29	0.185	44	1.98	789
Parafina/espuma de cobre (M7)	0.2	180	37	42	400

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

A continuación se realiza el cálculo de la matriz de decisión normalizada, para esto se aplica la ecuación número 11, con esto se obtiene la matriz normalizada R_{ij} , la cual presenta sus valores y la se puede ver en la tabla número 36.

Matriz de decisión normalizada COPRAS:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.875 & 0.191 & 0.199 & 0.059 & 0.180 \\ 0.484 & 0.191 & 0.361 & 0.047 & 0.158 \\ 0.015 & 0.167 & 0.723 & 0.019 & 0.533 \\ 0.015 & 0.129 & 0.361 & 0.018 & 0.587 \\ 0.015 & 0.154 & 0.387 & 0.023 & 0.533 \\ 0.008 & 0.001 & 0.125 & 0.047 & 0.158 \\ 0.006 & 0.927 & 0.105 & 0.995 & 0.080 \end{bmatrix}$$

Tabla 36.

Matriz de decisión normalizada COPRAS

Código	C1	C2	C3	C4	C5
M1	0.875	0.191	0.199	0.059	0.180
M2	0.484	0.191	0.361	0.047	0.158
M3	0.015	0.167	0.723	0.019	0.533
M4	0.015	0.129	0.361	0.018	0.587
M5	0.015	0.154	0.387	0.023	0.533
M6	0.008	0.001	0.125	0.047	0.158
M7	0.006	0.927	0.105	0.995	0.080

A continuación se realiza el cálculo de la matriz estandarizada de pesos, resultando la matriz V_{ij} , la cual indica los valores de los pesos estandarizados, estos datos agrupados por característica y material se observa en la tabla número 37.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 9.576 & 10.446 & 13.171 & 0.840 & 1.83 \\ 5.299 & 10.446 & 24.885 & 0.665 & 1.60 \\ 0.159 & 9.147 & 49.770 & 0.269 & 5.42 \\ 0.159 & 7.058 & 24.885 & 0.262 & 5.97 \\ 0.159 & 8.470 & 26.648 & 0.319 & 5.42 \\ 0.092 & 0.052 & 8.621 & 0.665 & 1.60 \\ 0.063 & 50.812 & 7.250 & 14.121 & 0.81 \end{bmatrix}$$

Tabla 37.

Matriz estandarizada de pesos COPRAS

Código	C1	C2	C3	C4	C5
M1	9.576	10.446	13.71	0.840	1.835
M2	5.299	10.446	24.885	0.665	1.60
M3	0.159	9.147	49.770	0.269	5.42
M4	0.159	7.058	24.885	0.262	5.97
M5	0.159	8.470	26.648	0.319	5.42
M6	0.092	0.052	8.621	0.6665	1.60
M7	0.063	50.812	7.250	14.121	0.81

Una vez que se tiene esta matriz, se puede realizar el cálculo de pesos normalizados, aquí se obtiene los pesos positivos y negativos normalizados respectivamente, estos valores los podemos ver en la tabla número 38.

Tabla 38.

Pesos normalizados positivos y negativos

Código	S+	S-
M1	26.83	9.576
M2	37.60	5.299
M3	64.61	0.159
M4	38.18	0.159
M5	40.83	0.159
M6	10.94	0.092
M7	73.00	0.063

A continuación se debe realizar el cálculo de las prioridades relativas, para esto se utiliza la ecuación número 19, de esta se obtienen los valores que se puede ver en la tabla número 39.

$$\sum_{j=1}^m \frac{1}{s_{-i}} = 24.12 \quad (19)$$

Tabla 39.

Resultados prioridades relativas

	Qi
Q1	26.87
Q2	37.67
Q3	66.75
Q4	40.31
Q5	43.00
Q6	14.63
Q7	78.34
Max: Qi	

A continuación se realiza el cálculo del rendimiento por niveles, de aquí se obtiene el rendimiento en porcentaje, y con este resultado se puede dar un valor en el ranking, en este método y para el ranking, mayor es mejor. El ranking y sus valores se puede observar en la tabla número 40.

Tabla 40.

Ranking del método COPRAS

Código	Valores	Ranking
M1	62.50	3
M2	87.61	4
M3	155.23	7
M4	93.76	5
M5	100	6
M6	34.01	2
M7	18.2	1

Método DOMINIC

Para desarrollar el método DOMINIC, al igual que en los casos anteriores se debe seguir una serie de pasos, para poder llegar a su resolución. Lo primero que se hace es construir la matriz de decisión, para esto se usa la matriz del método VIKOR, la misma que se muestra en la tabla número 41.

Tabla 41.

Matriz de decisión DOMINIC

Materiales (M)	Conductividad térmica W/mK (C1)	Punto de fusión °C (C2)	Calor latente KJ/kg (C3)	Calor especifico KJ/kg.k (C4)	Densidad kg/m³ (C5)
Parafina (M1)	30	37	70	2.5	900
Parafina cera (M2)	16.6	37	127	1.98	789
Na2SO4 (M3)	0.5	32.4	254	0.80	2660
CaHPO4 (M4)	0.5	25	127	0.78	2930
MgSO4 (M5)	0.5	30	136	0.95	2660
Compuesto de grafito (M6)	0.29	0.185	44	1.98	789
Parafina/espuma de cobre (M7)	0.2	180	37	42	400

A continuación se realiza la construcción de la matriz de ponderación, para este paso en el método DOMINIC, se debe construir una matriz en la que se otorgan grados de prioridad a los criterios de los materiales. Para esto se usan palabras, las mismas obedecen a un rango, que se otorga de la siguiente forma:

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

- Excelente = 10
- Bueno = 7
- Razonable = 5
- Pobre = 1

Estos valores se agrupan en una matriz, en las columnas van los materiales y en las filas los criterios que se asigna para cada uno, como se observa en la tabla número 42.

Tabla 42.

Matriz de ponderación DOMINIC

	Prioridad	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	Alta	Razonable	Razonable	Razonable	Bueno	Excelente	Excelente	Excelente
C2	Alta	Razonable	Razonable	Pobre	Pobre	Excelente	Excelente	Bueno
C3	Moderada	Excelente	Excelente	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno	Pobre
C4	Alta	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
C5	Moderada	Excelente	Excelente	Razonable	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

A continuación, se colocan los valores correspondientes a cada palabra, reemplazándolos en la matriz, con lo que se obtiene la tabla número 43.

Tabla 43.

Matriz de ponderación numérica

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	5	5	5	7	10	10	10
C2	5	5	1	1	10	10	7
C3	10	10	7	10	7	7	1
C4	10	10	10	10	10	10	10
C5	10	10	5	10	10	10	10

A continuación se debe realizar la normalización de la matriz de ponderación, esto se hace al reemplazar los valores en la ecuación correspondiente, de la cual se obtiene los valores que podemos observar en la matriz de la tabla número 44.

Tabla 44.

Matriz de ponderación normalizada DOMINIC

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
C1	0.815	0.815	0.815	1.141	1.63	1.63	1.63
C2	0.125	0.125	0.025	0.025	0.25	0.25	0.175
C3	1.23	1.23	0.861	1.23	0.861	0.615	0.123
C4	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
C5	1.86	1.86	0.93	1.86	1.86	1.86	1.86

El siguiente paso es realizar el cálculo de los valores finales, para esto se emplea la ecuación siguiente, de la cual se obtienen los valores V_i , estos valores corresponden al valor final del presente método. Estos valores se observa en la tabla número 45. Para el ranking

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

de este método, mayor es mejor, por lo tanto el resultado final de elección con el uso del método DOMINIC se puede ver en la tabla número 46.

Tabla 45.

Resultados del método DOMINIC

Material	Valor
V1	5.199
V2	6.915
V3	9.452
V4	6.379
V5	5.631
V6	7.486
V7	7.531

Tabla 46.

Ranking del método DOMINIC

Código	Valor	Ranking
M1	5.199	1
M2	6.915	4
M3	9.452	7
M4	6.379	3
M5	5.631	2
M6	7.486	5
M7	7.531	6

Método PROMETHEE II

Para desarrollar este método de selección multicriterio, primero debemos construir la matriz de decisión, para esto se utiliza el mismo procedimiento del método VIKOR, como se puede observar en la tabla número 47.

Tabla 47.

Matriz de decisión PROMETHEE II

Materiales (M)	Conductividad térmica W/mK (C1)	Punto de fusión °C (C2)	Calor latente KJ/kg (C3)	Calor especifico KJ/kg.k (C4)	Densidad kg/m³ (C5)
Parafina (M1)	30	37	70	2.5	900
Parafina cera (M2)	16.6	37	127	1.98	789
Na2SO4 (M3)	0.5	32.4	254	0.80	2660
CaHPO4 (M4)	0.5	25	127	0.78	2930
MgSO4 (M5)	0.5	30	136	0.95	2660
Compuesto de grafito (M6)	0.29	0.185	44	1.98	789
Parafina/espuma de cobre (M7)	0.2	180	37	42	400

A continuación se debe normalizar la matriz de decisión, para esto se utiliza el mismo procedimiento realizado en el método VIKOR, su resultado se observa en la tabla número 48.

Tabla 48.

Matriz normalizada PROMETHEE II

Código	C1	C2	C3	C4	C5
M1	0.87	0.50	0.20	0.71	0.18
M2	0.48	0.50	0.36	0.56	0.16
M3	0.01	0.44	0.73	0.22	0.59
M4	0.01	0.34	0.36	0.22	0.59
M5	0.01	0.41	0.39	0.27	0.54
M6	0.008	0.001	0.12	0.04	0.15
M7	0.006	0.91	0.10	0.99	0.08

Para realizar el cálculo de funciones de diferencias para cada criterio, de tipo usual, se debe realizar los siguientes pasos:

Paso 1. Se realiza la diferencia entre el valor de dos alternativas, matriz C_k , empezando por el primero y restando de sí mismo.

Paso 2. Se reemplazan los valores de las matrices de diferencias por código binario, siendo usado el 0 y el 1 según se determine en cada criterio.

$$C_k = \begin{bmatrix} Ch1 - Ch1 & Ch1 - Ch2 & Ch1 - Ch3 \dots \\ Ch2 - Ch1 & Ch2 - Ch2 & Ch2 - Ch3 \dots \\ Ch3 - Ch1 & Ch3 - Ch2 \dots & \\ Ch4 - Ch1 \dots & & \end{bmatrix}$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Matriz de diferencia para el Criterio 1 (Ch).

$$Ch = \begin{bmatrix} 0 & 13.4 & 29.5 & 29.5 & 29.5 & 29.71 & 29.8 \\ -13.4 & 0 & 16.1 & 16.1 & 16.3 & 16.31 & 16.4 \\ -29.5 & -16.1 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0.3 \\ -29.5 & -16.1 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0.3 \\ -29.5 & -16.1 & 0 & 0 & 0 & 0.21 & 0.3 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 1 (C1). C1 es un criterio donde mayor es mejor.

Dónde: Si $Ch \leq 0 = 0$; Si $Ch > 0 = 1$

$$C1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 2 (Ci).

$$Ci = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4.6 & 12 & 7 & 36.8 & -143 \\ 0 & 0 & 4.6 & 12 & 7 & 36.8 & -143 \\ -4.6 & -4.6 & 0 & 7.4 & 2.4 & 32.2 & -147.6 \\ -12 & -12 & -7.4 & 0 & -5 & 24.8 & -155 \\ -7 & -7 & -2.4 & 5 & 0 & 29.8 & -150 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 2 (C2). C2 es un criterio donde mayor es mejor.

Dónde: Si $Ci \leq 0 = 0$; Si $Ci > 0 = 1$

$$C2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 3 (Cj).

$$Cj = \begin{bmatrix} 0 & -57 & -184 & -57 & -66 & 26 & 33 \\ 57 & 0 & -127 & 0 & -9 & 83 & 90 \\ 184 & 127 & 0 & 127 & 118 & 210 & 217 \\ 57 & 0 & -127 & 0 & -9 & 83 & 90 \\ 66 & 9 & -118 & 9 & 0 & 92 & 99 \end{bmatrix}$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Matriz de Preferencia para el Criterio 3 (C3). C3 es un criterio donde menor es mejor.

Dónde: Si $C_j \geq 0 = 0$; Si $C_j < 0 = 1$

$$C3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 4 (Ck).

$$Ck = \begin{bmatrix} 0 & 0.52 & 1.7 & 1.72 & 1.55 & 0.52 & -39.5 \\ -0.52 & 0 & 1.18 & 1.2 & 1.03 & 0 & -40.02 \\ -1.7 & -1.18 & 0 & 0.02 & -0.15 & -1.18 & -41.2 \\ -1.72 & -1.2 & -0.02 & 0 & -0.17 & -1.2 & -41.22 \\ -1.55 & -1.03 & 0.15 & 0.17 & 0 & -1.03 & -41.05 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 4 (C4). C4 es un criterio donde mayor es mejor.

Dónde: Si $C_i \leq 0 = 0$; Si $C_i > 0 = 1$

$$C4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de diferencia para el Criterio 5 (Cl).

$$Cl = \begin{bmatrix} 0 & 111 & -1760 & -2030 & -1760 & 111 & 500 \\ -111 & 0 & -1871 & -2141 & -1871 & 0 & 389 \\ 1760 & 1871 & 0 & -270 & 0 & 1871 & 2260 \\ 2030 & 2141 & 270 & 0 & 270 & 2141 & 2530 \\ 1760 & 1871 & 0 & -270 & 0 & 1871 & 2260 \end{bmatrix}$$

Matriz de Preferencia para el Criterio 5 (C5). C5 es un criterio donde mayor es mejor.

Dónde: Si $C_i \leq 0 = 0$; Si $C_i > 0 = 1$

$$C5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

A continuación se realiza el cálculo de índices de preferencia agregado. Para esto se desarrolla la ecuación número 26, de lo cual se obtiene las matrices C1, C2, C3, C4 y C5.

Matriz de preferencia para el criterio 1

$$C1 = \begin{bmatrix} 0 & 146.7 & 322.9 & 322.9 & 322.9 & 325.9 & 326.2 \\ -146.7 & 0 & 176.2 & 176.2 & 176.2 & 178.5 & 179.5 \\ -322.9 & -176.2 & 0 & 0 & 0 & 2.29 & 3.28 \\ -322.9 & -176.2 & 0 & 0 & 0 & 2.29 & 3.28 \\ -322.9 & -176.2 & 0 & 0 & 0 & 02.29 & 3.28 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 2

$$C2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 252.2 & 657.9 & 383.8 & 2018.5 & -7840.7 \\ 0 & 0 & 252.2 & 657.9 & 383.8 & 2018.5 & -7840.7 \\ -252.2 & -252.2 & 0 & 405.7 & 131.5 & 1766.3 & -8092.9 \\ -657.9 & -657.9 & -405.7 & 0 & -274.1 & 1360.6 & -8498.6 \\ -383.8 & -383.8 & -131.5 & 274.1 & 0 & 1634.7 & -8224.5 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 3

$$C3 = \begin{bmatrix} 0 & -3924.7 & -12669 & -3924.7 & -4544.3 & 1790.1 & 2272.2 \\ 3924.7 & 0 & -8744.4 & 0 & -619.68 & 5714.8 & 6196.8 \\ 12669 & 8744.4 & 0 & 8744.4 & 8124.7 & 14459.2 & 14941 \\ 3924.7 & 0 & -8744.4 & 0 & -619.6 & 5714.8 & 6196.8 \\ 4544.3 & 619.6 & -8124.7 & 619.6 & 0 & 6334.5 & 6816.5 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 4

$$C4 = \begin{bmatrix} 0 & 7.3 & 24.1 & 24.4 & 21.9 & 7.3 & -560.3 \\ -7.3 & 0 & 16.7 & 17 & 14.6 & 0 & -567.7 \\ -24.1 & -16.7 & 0 & 0.2 & -2.1 & -16.7 & -584.4 \\ -24.4 & -17 & -0.2 & 0 & -2.4 & -17 & -584.7 \\ -21.9 & -14.6 & 2.1 & 2.4 & 0 & -14.6 & -582.3 \end{bmatrix}$$

Matriz de preferencia para el criterio 5

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

$$C5 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 113049 & -2E+06 & -2E+06 & -2E+06 & 113048.9 & 509229 \\ -113049 & 0 & -2E+06 & -2E+06 & -2E+06 & 0 & 396180 \\ 2E+06 & 2E+06 & 0 & -274984 & 0 & 1905536 & 2E+06 \\ 2E+06 & 2E+06 & 274984 & 0 & 274984 & 2180519 & 3E+06 \\ 2E+06 & 2E+06 & 0 & -274984 & 0 & 1905536 & 2E+06 \end{bmatrix}$$

A continuación se debe determinar los flujos de superación, para determinar los flujos de superación positivos y negativos se debe aplicar la ecuación número 27 y 28 respectivamente, y de esto se obtienen los valores agrupados en la tabla número 49 presentada en el siguiente resumen.

Tabla 49.

Flujos positivos y negativos.

Código	Flujo positivo	Flujo negativo
M1	447.66	1299.93
M2	722.89	738.82
M3	603.20	1666.20
M4	1778.4	955.04
M5	2827.1	288.36
M6	46.08	2178.63
M7	752.1	50.47

A continuación se debe determinar el flujo neto, lo que nos permite obtener el ranking de este método, para esto se utiliza la ecuación número 29, con lo cual se obtiene los valores agrupados en la tabla número 50, misma que también presenta el ranking del método, donde mayor es mejor.

Tabla 50.

Flujo neto y Ranking del método PROMETHEE II

Código	Flujo neto	Ranking
M1	852.27	4
M2	15.96	1
M3	2538.79	7
M4	823.36	3
M5	1063.0	5
M6	2132.54	6
M7	701.63	2

Aplicaciones para PCM

El aprovechamiento del calor latente de los materiales de cambio de fase para refrescar el ambiente, es el concepto más antiguo de climatización que existe. Los materiales de cambio de fase poseen un rango amplio de aplicación en la industria, tanto de la construcción como automotriz y de alimentos.

En la industria de la construcción es donde más popular es su uso, ya se usan en sistemas de aislamiento térmico, con lo cual se mejora el confort de edificios y construcciones, ya que los PCM al ser incorporados con los materiales tradicionales de construcción como el yeso, mejoran las propiedades de este y suman sus propias características, con lo que se consiguen nuevos compuestos capaces de aislar la temperatura

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

exterior en las construcciones y mantener la temperatura interna de las habitaciones. (Moscoso, 2016).

La mayor ventaja de los materiales de cambio de fase es el rango térmico en los que pueden trabajar, este rango oscila por debajo de los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta por encima de los $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que da como consecuencia que las aplicaciones de los PCM poseen una extensa gama de posibilidades, dentro de la industria automotriz podemos destacar las siguientes aplicaciones para estos materiales.

En el sector de la logística y transporte los PCM son capaces de garantizar la estabilización de la temperatura de los productos y mercancías. Especialmente en el campo de la logística de productos farmacéuticos, que cumplen con altas exigencias. Además, ya han sido probados para el transporte de máquinas, obras de arte y alimentos; sectores que presentan especial sensibilidad a la temperatura. Los PCM, con ventanas térmicas entre $2 - 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, se vierten en recipientes de plástico y actúan como acumuladores de refrigeración dentro de los contenedores y camiones de transporte. Lo que preserva la calidad e integridad de los productos que se están llevando almacenados en condiciones sin otro tipo de ventilación o climatización. (Moscoso, 2016).

En el sector de la automoción los PCM tienen una variedad de aplicaciones. Mientras se conduce, el PCM almacena el frío proveniente del aire acondicionado. Durante los períodos de espera, este frío almacenado es liberado por un ventilador, manteniendo la temperatura del interior del habitáculo en un nivel confortable.

Otra aplicación dentro de la industria automotriz sería el almacenamiento del calor del motor, de manera que para el siguiente arranque en frío, se acorte considerablemente la

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

fase de calentamiento del motor, contribuyendo a minimizar su deterioro a largo plazo y reducir el consumo de combustible. (Moscoso, 2016).

Simulación

El método de validación de estos resultados obtenidos mediante un proceso de selección basado en métodos multicriterio se llevara a cabo mediante simulación en software, el programa utilizado para este fin será NX10, de Siemens, puesto que este software permite realizar simulación de condiciones térmicas de forma relativamente simple, con el fin de conocer el comportamiento que tendrán los materiales de cambio de fase una vez que estén sometidos a distintas condiciones de temperaturas.

Para llevar a cabo la simulación es necesario seguir una serie de pasos dentro del programa que se detallan a continuación, como breve resumen lo que se debe hacer en el programa es crear un cuerpo que vaya a ser utilizado en la aplicación mencionada, se cargan los datos sobre el material elegido, en el caso de que la propia biblioteca del software no posea este material, después se procede a dar las condiciones de frontera, nombre con el cual se conocen a las variables que van a intervenir en el proceso y que son la base para la simulación, con los datos ingresados este software posee un solver que permite simular las condiciones de almacenamiento y comportamiento térmico que tendrá el material.

A continuación, se detalla el proceso de simulación descrito anteriormente, utilizando el programa NX10. Una vez que se tiene el programa se procede a crear el modelo en 3 dimensiones del material, para lo cual se ingresa al entorno llamado “Modelo” del programa. En el programa es necesario seleccionar un plano de coordenadas sobre el

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

cual trabajar. Una vez seleccionado el plano deseado, se procede a dibujar el croquis en dos dimensiones, que será utilizado para la simulación.

Con el dibujo de la pieza que se desea, se procede a transformarlo en un objeto tridimensional, sobre el cual se puede aplicar un material y las condiciones de frontera necesarias para la simulación, el objeto con el cual se trabaja se puede observar en la figura número 10. Esta figura corresponde al panel interior de la puerta de un auto.

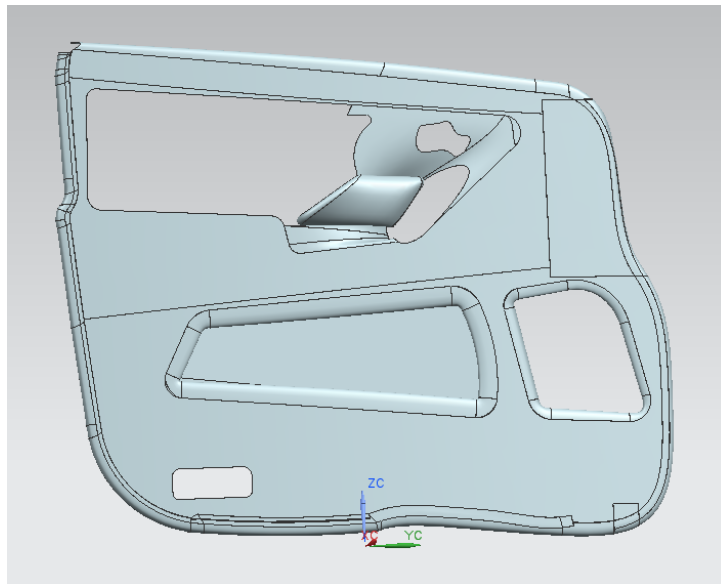


Figura 10: Panel interior de la puerta

La simulación se realiza sobre un panel de la tapicería de un auto, puesto que el objetivo es incorporar el material de cambio de fase en el interior de los vehículos, y así aprovechar sus propiedades como aislante térmico a fin de mejorar el confort de un automóvil.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En la figura número 11 se observa el panel interior de la puerta de un vehículo. La forma con la que se trabaja en la simulación corresponde a la cara posterior del panel, debido a que en esta área estaría incorporado el material.



Figura 11: Panel interior de una puerta de automóvil

Una vez que completado el cuerpo que será utilizado en la simulación, se procede a cambiar de entorno en el programa, al entorno de simulación avanzada propio en el software.

Al entrar al entorno de simulación avanzada que presenta NX, la visualización del programa así como las opciones de trabajo cambian, para poder ingresar los datos que el software requiere y que son necesarios para la simulación. Se procede ahora a entrar al entorno que el programa llama “FEM nuevo y simulación”, esto despliega una ventana emergente en la cual se configura las opciones requeridas de acuerdo al tipo de simulación que se va a realizar, en este caso una simulación de condiciones térmicas.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Una vez hecho esto, la siguiente opción que se despliega pide colocar un nombre para la solución del programa. Se asigna “térmico” para los resultados, esto crea una carpeta nueva en la parte de resultados del programa, en la cual se encuentra la solución a la simulación. Una vez hecho esto se selecciona la opción de aplicar, lo que guarda los cambios descritos anteriormente en el entorno de trabajo de simulación avanzada, y el programa se dirige hacia la ventana que propiamente permite realizar la simulación.

En este entorno de simulación avanzada y con las opciones descritas anteriormente configuradas, lo primero que se hace es darle un material a nuestro objeto, en este caso se va a asignar como material para la simulación la parafina, misma que se busca dentro de la biblioteca de materiales del software.

A esta biblioteca se accede desde la opción “asignar el material” que es un menú que posee el propio software. Al acceder a esta biblioteca se cargan todos los materiales que el programa posee por defecto, sin embargo el software tiene la opción de crear un nuevo material en caso de que el material necesario no esté disponible en el catálogo.

En este caso en particular, la biblioteca del software no posee la parafina, que es el material necesario para la simulación, por lo que se procede a crear el material. Para esto se da clic en el botón de “crear material”, que se encuentra en la misma pestaña de asignación de material, y esto despliega una ventana con varias opciones como se ve en la figura número 12.

En esta ventana se completa todos los datos requeridos por el programa, ya que de esta forma el software puede conocer el comportamiento del material. A este nuevo material se le asigna un nombre, que será “Parafina” y después se completan todos los datos

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

necesarios de acuerdo a las propiedades químicas y físicas del material. Estas propiedades se conocen de acuerdo a la caracterización del material mismo, así se posee todos los datos requeridos por el software.

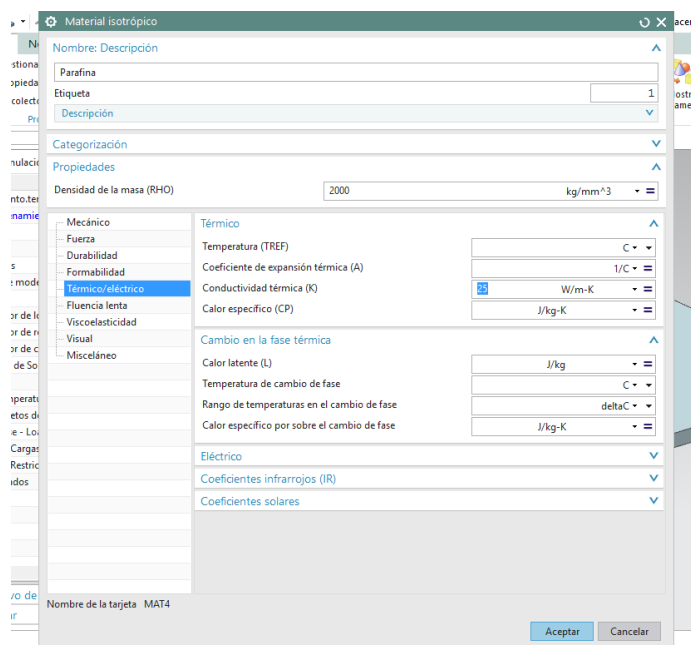


Figura 12: Creación del nuevo material

Una vez que se completa este proceso, se regresa a la ventana de asignación del material, en la cual ya se tiene este nuevo material creado con lo que se procede a asignar al cuerpo tridimensional sobre el cual se trabaja.

A continuación se elige el cuerpo con el cual trabajar y también el material que se creó, para así asignarlo al cuerpo. Una vez que se completa este proceso, el cuerpo cambia de color, lo que indica que tiene un material asignado y que desde este punto ese cuerpo se comporta de acuerdo a las características físicas y químicas del material.

A continuación se debe hacer es un mallado del cuerpo, lo que permitirá dos cosas, primero que el programa utilice su solver mediante el método de elementos finitos para la

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

solución de la simulación, y como segundo punto permite conocer el comportamiento nodal del material, así como también su comportamiento total.

Para mallar el cuerpo se selecciona primero la opción de control de malla, esto permite controlar el tamaño y de la malla en el cuerpo asignado, para esto se selecciona el cuerpo y la opción de mallado automático del programa. Una vez aplicado el control de malla, aparecen sobre el cuerpo puntos que señalan la división que tendrán los nodos en el cuerpo para su posterior análisis, dado que el cuerpo tiene un espesor de 3mm, el tamaño asignado de la malla es de 1mm.

A continuación, se debe mallar todo el cuerpo de acuerdo a los parámetros descritos anteriormente. Para esto se selecciona la opción de “malla de barrido 3D” del software, ya que el cuerpo a estudiar es tridimensional y debe estar mallado completamente para poder hacer la simulación. Una vez seleccionada la opción de mallado y el cuerpo de destino para su aplicación, el tamaño de la malla se asigna de forma automática debido al control de mallado que se hizo anteriormente. Una vez que se aplica la malla sobre el cuerpo este cambia de color nuevamente y se puede ver las divisiones de la malla como líneas negras delgadas sobre el cuerpo.

A continuación, se debe cambiar de entorno dentro del programa para así poder asignar las cargas térmicas con las cuales trabajar en la simulación. Para esto en el árbol de desarrollo se selecciona la carpeta llamada “almacenamiento.termico_sim1”, misma que se crea de forma automática al iniciar el proceso de simulación cuando se seleccionó la opción de simulación avanzada y FEM nuevos, al entrar en esta carpeta el programa se dirige al entorno que permite colocar las cargas y restricciones físicas necesarias para la simulación.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Una vez en este entorno del software, lo primero que se debe hacer es colocar el tipo de restricción que tendrá la simulación, en este caso se selecciona a la opción de tipo de restricción y la opción de “restricciones térmicas”, dentro de esta se selecciona la opción de “temperatura fija” y el cuerpo, que será el objeto sobre el cual se aplique la restricción. Se selecciona aplicar, y esto crea la primera restricción necesaria para la simulación, que es indicarle al cuerpo que tiene una temperatura en su totalidad, la misma que fue ingresada como dato en la ventana anterior. El software simboliza la aplicación de esta restricción como unos pequeños conos azules sobre el cuerpo.

A continuación se gira 180° al cuerpo, para poder aplicar la siguiente restricción en la cara opuesta, esta será una restricción de convección, lo que le indica al programa que la temperatura en esta cara es distinta que la aplicada en la cara anterior. Esto le permite al software simular lo que va a pasar en el interior del material cuando la fuente de calor empiece a actuar sobre el mismo.

Para aplicar esta restricción se selecciona la opción de “tipo de restricción” y se elige “convección”, después de esto se escoge la cara del cuerpo sobre la cual se aplica esta nueva restricción, además es necesario completar los valores de temperatura ambiente que habrá a este lado del cuerpo y su coeficiente de convección. Estos datos se obtiene de las propiedades del material. Una vez completos todos los puntos requeridos se presiona “enter”.

En la figura número 13 se puede observar la aplicación de esta segunda restricción en la cara opuesta a la primera, simbolizada como unos círculos azules en el centro de los cuadrantes de la malla.

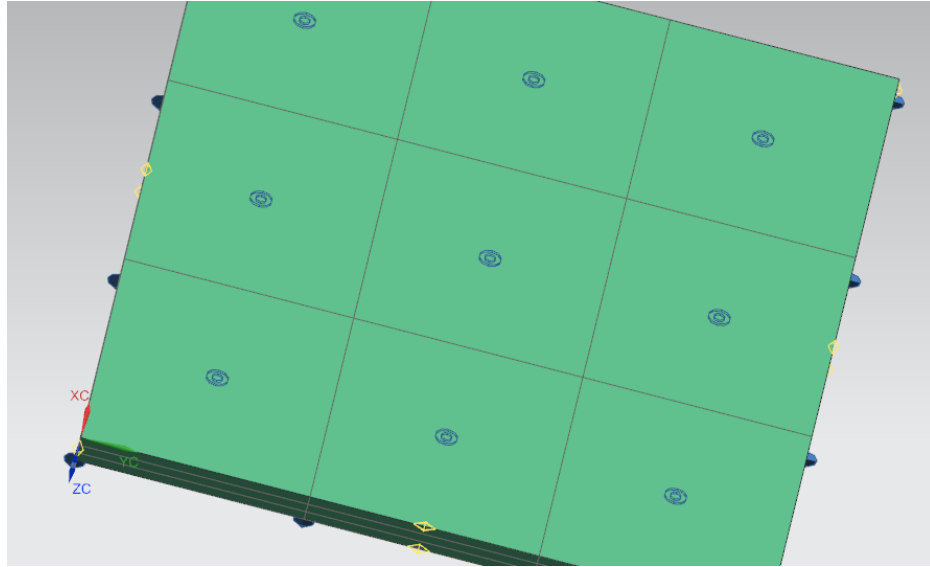


Figura 13: Convección aplicada al cuerpo

A continuación, se aplica las cargas sobre el material, en este caso la carga aplicada será una carga térmica, de generación de calor. Para esto se selecciona la opción de “tipo de carga”, y se elige “generación de calor”. Se abre una pestaña en la cual se debe seleccionar la cara del cuerpo a aplicar la carga así como su valor.

Una vez que esta carga térmica de generación esta aplicada, sobre la superficie del cuerpo aparecen unas pequeñas flechas rojas, las que indican que sobre esa cara del material esta aplicada la carga que será tomada en cuenta para la simulación. En la figura número 14 se puede observar la aplicación de la carga de calor.

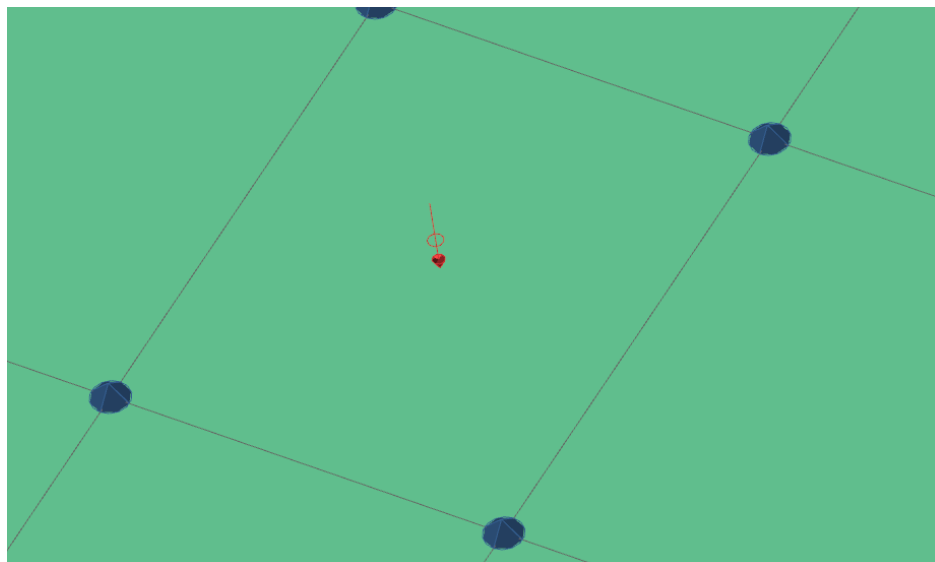


Figura 14: Carga térmica aplicada

Una vez que se tiene estas condiciones del material asignadas, así como todas las restricciones dadas, y las cargas térmicas aplicadas, lo que hace falta es resolver la simulación para así poder conocer los resultados de la misma.

Para resolver la simulación, se ingresa al apartado que tiene el nombre que se asignó a la simulación en el árbol de desarrollo del programa. En este caso el nombre para el solver fue “térmico” por lo que se busca esta carpeta en el desarrollo, después de seleccionarla se activa un menú con varias opciones, de este menú emergente se escoge la opción “resolver” lo que inicia el programa de solución para la simulación.

Cuando se presiona clic en resolver, se abre una ventana que indica que el proceso de simulación va a iniciar, y que en el momento que finalice se desplegará un nuevo mensaje indicando que las respuestas a la simulación ya se generaron y la carpeta de destino en la cual se guardan.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

El solver de la simulación, al dar clic en aceptar inicia el proceso de simulación y de resolución del problema, esto lo hace de acuerdo a los parámetros ingresados anteriormente, que son los datos con los cuales el programa determina el comportamiento del material y así encontrar los resultados según el procesamiento.

Una vez que el software termina de realizar la simulación, en el árbol de desarrollo se crea una carpeta con los resultados de la simulación, en la cual se encuentran las respuestas de la simulación.

La puerta de un vehículo, como se observa en la figura número 15, internamente posee el espacio necesario para alojar este material incorporado en su tapicería, sin que esto afecte su funcionamiento normal.



Figura 15: Estructura interna de la puerta

Fuente: (Alonso, 2009)

Resultados

Los resultados obtenidos de este estudio se presentan a continuación divididos en dos etapas, la primera corresponde a los resultados obtenidos después de aplicar los métodos de ponderación y los métodos multicriterio para la selección de materiales, y la segunda parte corresponde a los resultados obtenidos de la simulación sobre el comportamiento de estos materiales en software.

Resultado de los métodos de ponderación

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de aplicar los métodos de ponderación a los criterios que se dio a los materiales candidatos para la selección. Estos resultados están agrupados en la tabla número 51 y estos mismos resultados se puede observarlos de mejor manera en la figura número 16.

Tabla 51.

Resultados del método de ponderación

Método	W1	W2	W3	W4	W5
Entropía	0.345	0.157	0.056	0.375	0.067
Desviación estándar	10.949	54.830	68.854	14.187	10.187

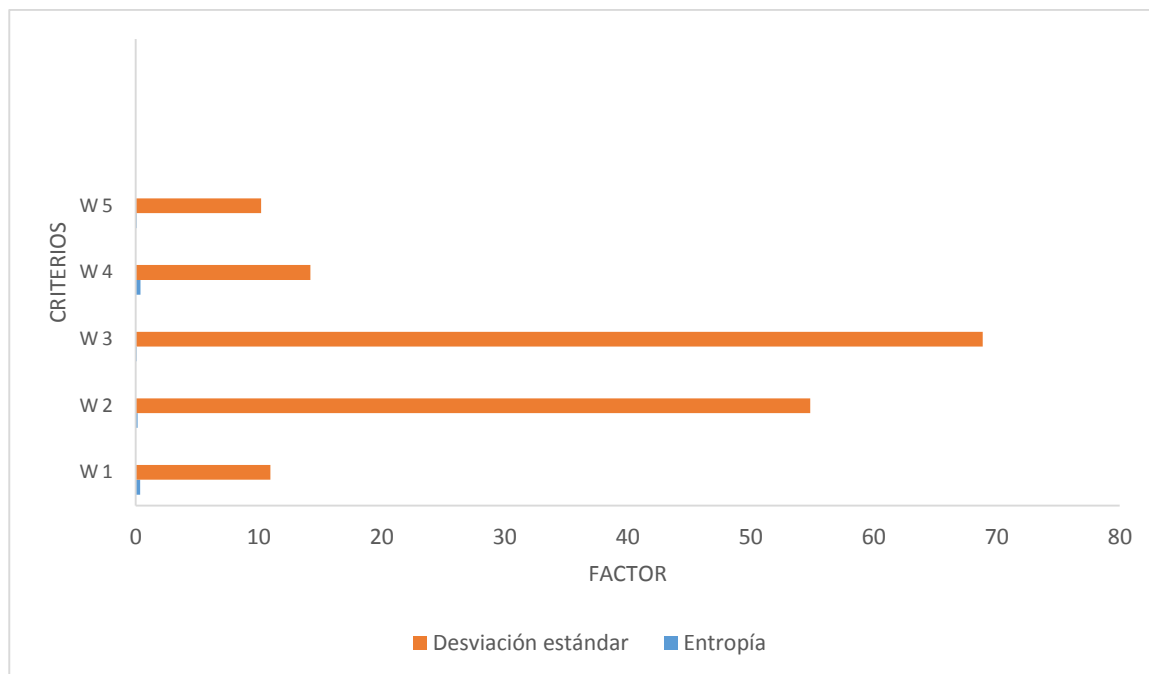


Figura 16: Resultados de los métodos de ponderación

En la figura número 16 se observa que el criterio de conductividad térmica (W1) tiene su valor más alto en el método de desviación estándar, con un valor de 10.949. El siguiente criterio, punto de fusión (W2) obtiene su valor más alto en el método de desviación estándar igualmente, con un valor de 54.830. Para el criterio de calor latente (W3) el método de desviación estándar otorga el valor más alto, llegando a un valor de 68.854. En el criterio de calor específico (W4) nuevamente el valor más alto se obtiene del método de desviación estándar, llegando a un valor de 14.187. Para el criterio de densidad (W5) el método de desviación estándar igualmente que en los criterios anteriores otorga el valor más alto, mismo que es de 10.187.

De esta forma, dado que la necesidad es buscar un material de cambio de fase que pueda ser utilizado en aplicaciones de almacenamiento de energía, se escogió el valor del método de desviación estándar, ya que este método es el que posee el valor más alto para el

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

criterio C2, que es el criterio de punto de fusión, mismo que alcanza un valor de 14.579, este valor es más alto que el de sus competidores.

Los valores de los pesos encontrados con el método de ponderación, son los valores que se utilizaron a lo largo del desarrollo de los métodos multicriterio en el presente estudio.

Resultado de los métodos multicriterio MCDM

Resultados del método Pugh

Los resultados que se obtienen después de la aplicación del método Pugh, se puede observar en la tabla número 52 presentada a continuación, en este método el material ganador resulto la parafina, misma que ocupo el primer lugar del ranking.

Tabla 52.

Resultados método Pugh

Material	Ranking
Sulfato de sodio trihidratado (sal hidratada)	2
Fosfato mono acido de calcio trihidratado (sal hidratada)	6
Sulfato de magnesio penta hidratado (sal hidratada)	4
Parafina (C ₂₅ H ₅₂)	1
Compuesto de grafito	5
Parafina/espuma de cobre	3

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En la figura número 17 se observa el ranking logrado por los materiales de la selección después de la aplicación del método Pugh, en la imagen se puede observar que la posición número uno que corresponde al material ganador está ocupada por la parafina.

Este método le da esta posición a la parafina, debido a que compara directamente los valores de los criterios de las alternativas con los valores originales, ya que al hacer esto puede obtener datos numéricos, y utiliza estos datos para hacer un sistema de eliminación simple. Esto quiere decir que PUGH da una mayor preferencia a los materiales que tienen criterios con valores más altos. Es por esta razón que la parafina resulta ser el material ganador, ya que posee los valores más altos en los criterios frente a los demás materiales candidatos de la selección.

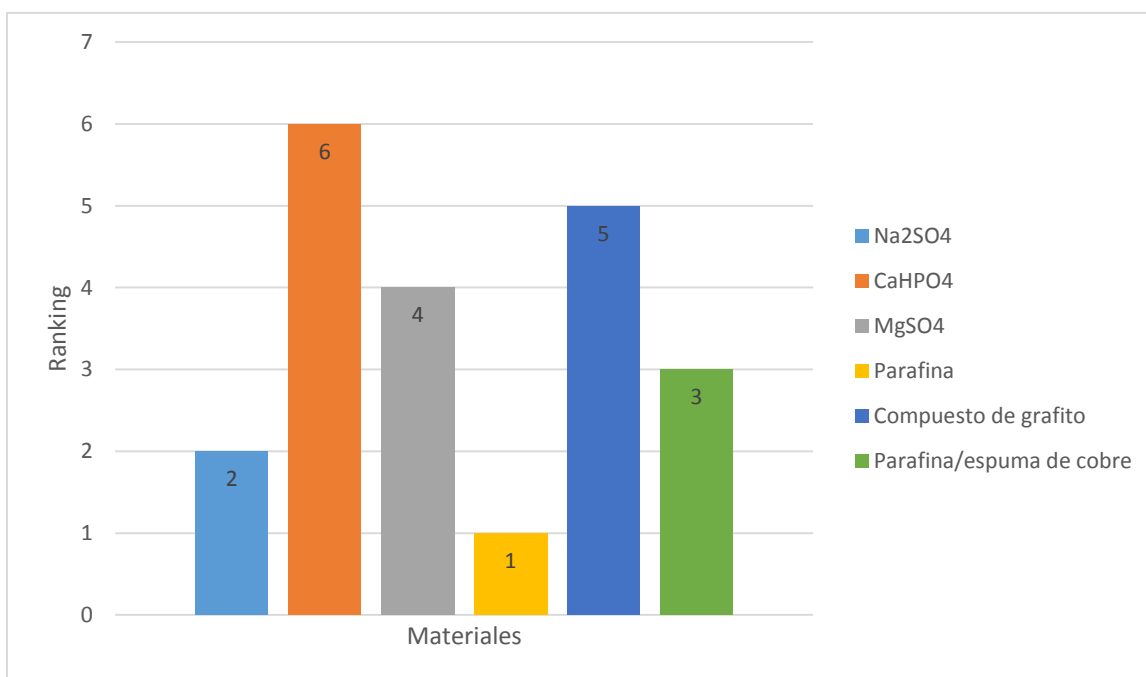


Figura 17: Ranking método Pugh

Resultados del método VIKOR

Los resultados de la aplicación del método VIKOR se pueden observar en la tabla número 53, de acuerdo a este método el material que ocupa el puesto número 1 en el ranking, y que resulta ganador es el fosfato mono acido de calcio trihidratado (CaHPO_4) este material pertenece al grupo de sales hidratadas.

Tabla 53.

Resultados del método VIKOR

Material	Vi	Ranking
Parafina	0.36	2
Parafina cera	0.22	4
Na_2SO_4	0.01	7
CaHPO_4	0.07	5
MgSO_4	0.02	6
Compuesto de grafito	0.71	1
Parafina/espuma de cobre	0.34	3

En la figura número 18 al igual que en la tabla número 49 se observa el ranking de los materiales seleccionados después de la aplicación del método VIKOR, en la aplicación de este método el material ganador que se encuentra en primer lugar, es el fosfato mono acido de calcio trihidratado.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Estos materiales obtienen esas puntuaciones de acuerdo al método VIKOR, esto se debe a que este método utiliza una secuencia de operaciones matemáticas, que a su vez otorgan un grado de preferencia a los materiales que tienen las cualidades que más se aproximan a la solución ideal. Esto quiere decir que al revisar los criterios que se usaron para la resolución de este método, se ve que el fosfato mono ácido de calcio trihidratado es el material que posee los valores que más se aproximan a los valores ideales, razón por la cual este material resulta ganador en la aplicación del método VIKOR.

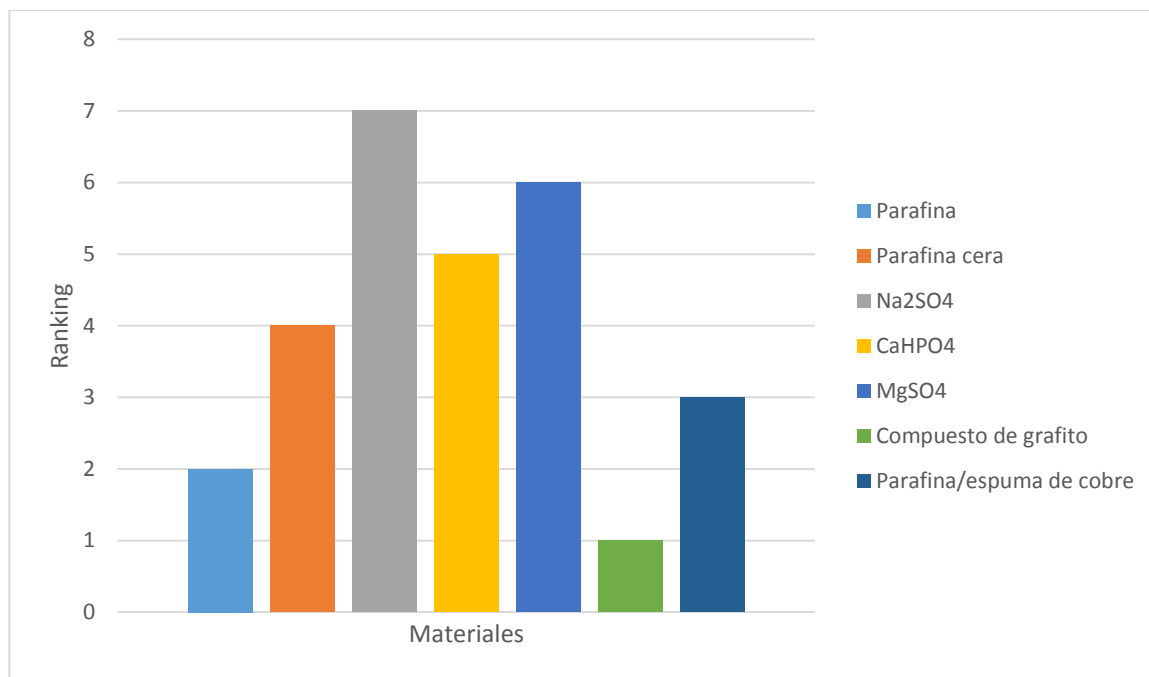


Figura 18: Ranking del método VIKOR

Resultado del método TOPSIS

En la tabla número 54 se pueden ver los resultados de la aplicación del método TOPSIS, de acuerdo a este proceso el material ganador es el fosfato mono ácido de calcio

trihidratado, este mismo material resulta ganador también según VIKOR, lo que indica que es la mejor opción para la aplicación que se busca en este estudio.

Tabla 54.

Resultados del método TOPSIS

Material	Solución ideal	Ranking
Parafina	0.012	5
Parafina cera	0.011	4
Na ₂ SO ₄	0.021	7
CaHPO ₄	0.013	6
MgSO ₄	0.119	3
Compuesto de grafito	0.002	1
Parafina/espuma de cobre	0.019	2

En la figura número 19 se puede ver el ranking de los materiales elegidos para esta selección mediante el método TOPSIS, el material ganador fue el fosfato mono ácido de calcio trihidratado, que corresponde al grupo de sales hidratadas.

En este caso se observa que los resultados son casi los mismos que en la aplicación del método VIKOR, esto se debe a que estos dos métodos aplican las mismas funciones matemáticas, a pesar de esto hay una variación en el resto de posiciones de los

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

otros materiales candidatos, esto se debe a que el método TOPSIS analiza la eficiencia de cada alternativa, lo que provoca que la calificación de los criterios varíe ligeramente, y en este caso la eficiencia del fosfato mono ácido de calcio trihidratado resulta más alta que la de los demás materiales.

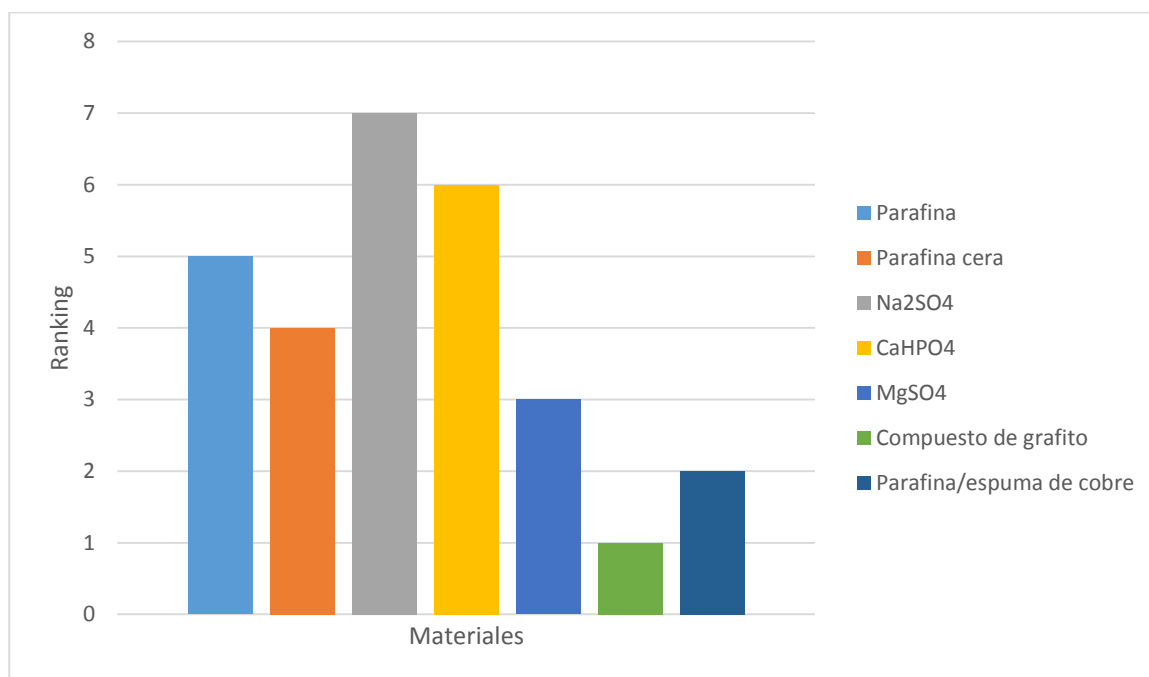


Figura 19: Ranking del método TOPSIS

Resultados del método COPRAS

En la tabla número 55 se puede ver los resultados de la aplicación del método COPRAS, de acuerdo con este método el material ganador es aquel que obtuvo el puntaje más alto, para esta valoración eso equivale a obtener 5 puntos, y en este caso el material ganador resulta ser el fosfato mono ácido de calcio trihidratado.

Tabla 55.

Resultado método COPRAS

Material	Ranking
Parafina	3
Parafina cera	4
Na ₂ SO ₄	7
CaHPO ₄	5
MgSO ₄	6
Compuesto de grafito	2
Parafina/espuma de cobre	1

En la figura número 20 se puede ver el ranking de los materiales elegidos para esta selección mediante el método COPRAS, el material ganador es una sal hidratada, el fosfato mono ácido de calcio trihidratado. La razón por la cual se obtiene este resultado, se debe a que el método COPRAS utiliza umbrales ideales y no ideales para encontrar la solución óptima, y dentro de este aspecto influye mucho el valor de los pesos ponderados.

De esta forma, el peso más fuerte es el C5, que corresponde a la densidad del material, en el cual el valor más alto lo tiene el CaHPO₄, lo que ubica este material en la primera posición.

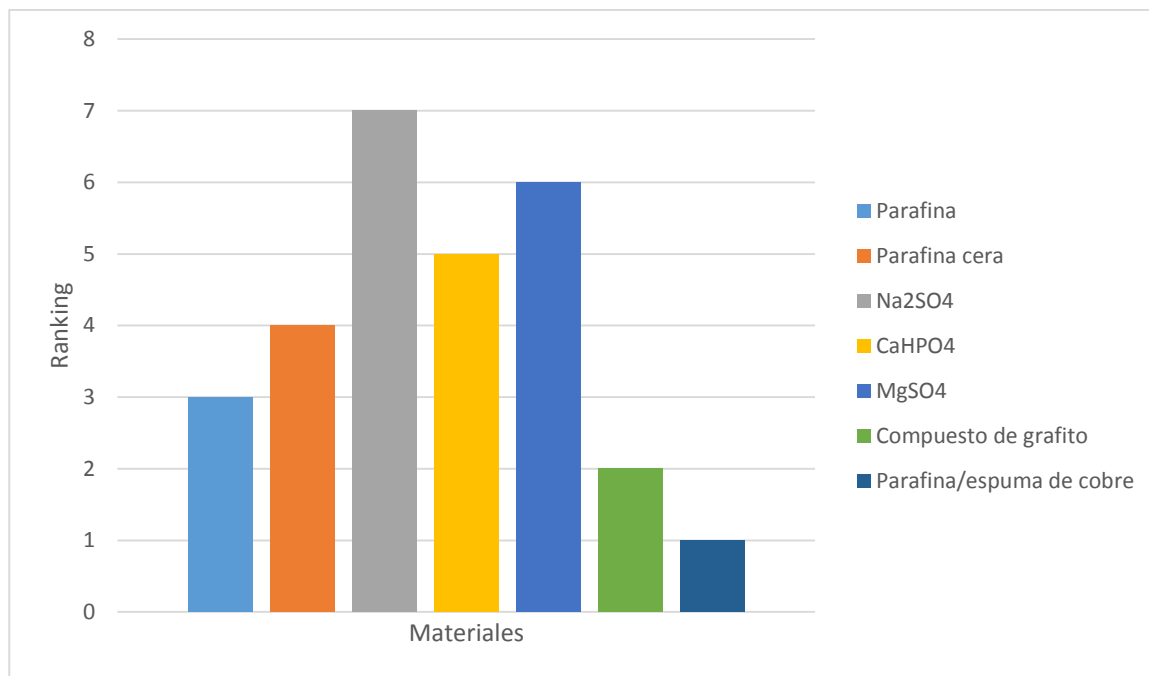


Figura 20: Ranking del método COPRAS

Resultados del método DOMINIC

En la tabla número 56 se observa los resultados de la aplicación del método DOMINIC, de acuerdo con este método el material ganador es aquel que obtuvo el puntaje más alto.

En la figura número 21 se puede ver el ranking de los materiales mediante el método DOMINIC, aquí se observa que el material ubicado en la posición número uno es la parafina.

Tabla 56.

Resultado del método DOMINIC

Material	Código	Ranking
Parafina	M1	1
Parafina cera	M2	4
Na ₂ SO ₄	M3	7
CaHPO ₄	M4	3
MgSO ₄	M5	2
Compuesto de grafito	M6	5
Parafina/espuma de cobre	M7	6

En el método DOMINIC, los resultados son una sumatoria de los valores otorgados a los criterios, y estos a su vez obtienen esta calificación en función de las cualidades buscadas en el material por cada criterio. De esta forma la parafina se impone frente a los demás materiales candidatos ya que posee mejores valores en sus propiedades como son su densidad y punto de fusión para la aplicación determinada. Además la parafina posee un valor de calor latente superior al de los demás materiales candidatos, lo cual le otorga mejor puntaje en la forma de calificación de este método.

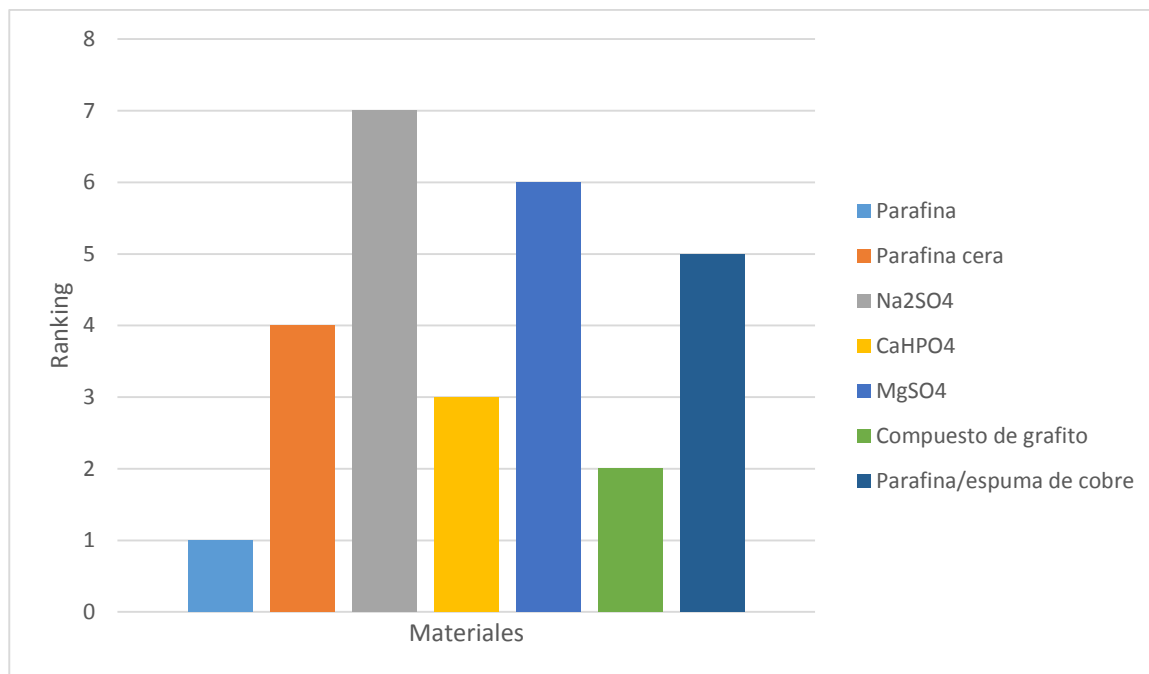


Figura 21. Ranking del método DOMINIC

Resultados del método PROMETHEE II

En la tabla número 57 se observa los resultados de la aplicación del método PROMETHEE II, de acuerdo con este método el material ganador es aquel que obtuvo el puntaje más alto.

Luego de la aplicación del método PROMETHEE II, se observa que en la posición número se encuentra la sal hidratada correspondiente a MgSO₄. Este resultado se explica reconstruyendo el método, el cual realiza una discretización numérica de los criterios, comparando las alternativas en parejas. Es decir, compara un par de alternativas, de las cuales obtiene una preferencia, la misma que es comparada con la preferencia de otra comparación, de un modo secuencial y ordenado, al final, aparecen como ganadores la sal hidratada, ya

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

que es el materiales que coincide en el número de veces que ha logrado valores más altos en un número de comparaciones finitas con el resto de materiales.

Tabla 57.

Resultado del método PROMETHEE II

Material	Código	Rankin
Parafina	M1	4
Parafina cera	M2	1
Na₂SO₄	M3	7
CaHPO₄	M4	3
MgSO₄	M5	5
Compuesto de grafito	M6	6
Parafina/espuma de cobre	M7	2

En la figura número 22 se puede ver el ranking de los materiales mediante este método, aquí se observa que el material ubicado en la posición número uno resulta ser el material ganador.

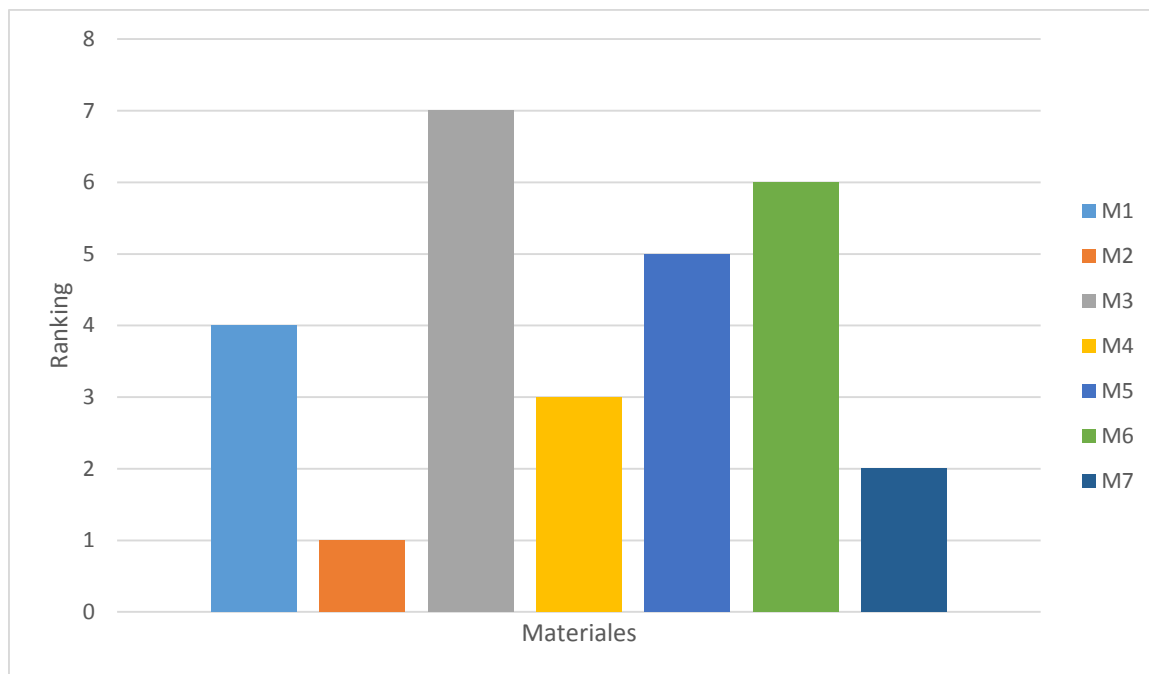


Figura 22. Ranking del método PROMETHEE II

Resultados de la correlación de Spearman

Después de aplicar el método de correlación de Spearman a los resultados de los MCDM en forma emparejada, se obtiene los datos de la tabla número 58.

Tabla 58.

Correlación de Spearman

	VIKOR	PUGH	TOPSIS	DOMINIC	COPRAS
PUGH	0.825	-	-	-	0.607
TOPSIS	0.607	0.843	-	-	0.910
DOMINIC	0.714	0.843	0.857	-	0.892
COPRAS	0.607	0.910	0.892	0.785	0.785
PROMETHEE	0.725	0.874	0.798	0.814	8.825

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

En la tabla número 58 se observa que las combinaciones de los métodos muestra resultados positivos ascendentes, teniendo su valor más bajo en 0.607 y el más alto 0.910, esto quiere decir que existe una correlación positiva entre los resultados de los métodos, lo que a su vez significa que los distintos métodos le otorgan el primer lugar al mismo material.

De acuerdo a esta aplicación no existen correlaciones negativas entre los métodos, lo que indica que un método no le da una posición a un material que en otro método sea una posición opuesta en el ranking, además se puede ver que no existen valores iguales a cero, por lo tanto una correlación nula no existe en este caso.

Lo que indica esta correlación entre los métodos, es que los resultados de los métodos multicriterio son consistentes en el material ganador como material ideal, que para el presente estudio es la parafina.

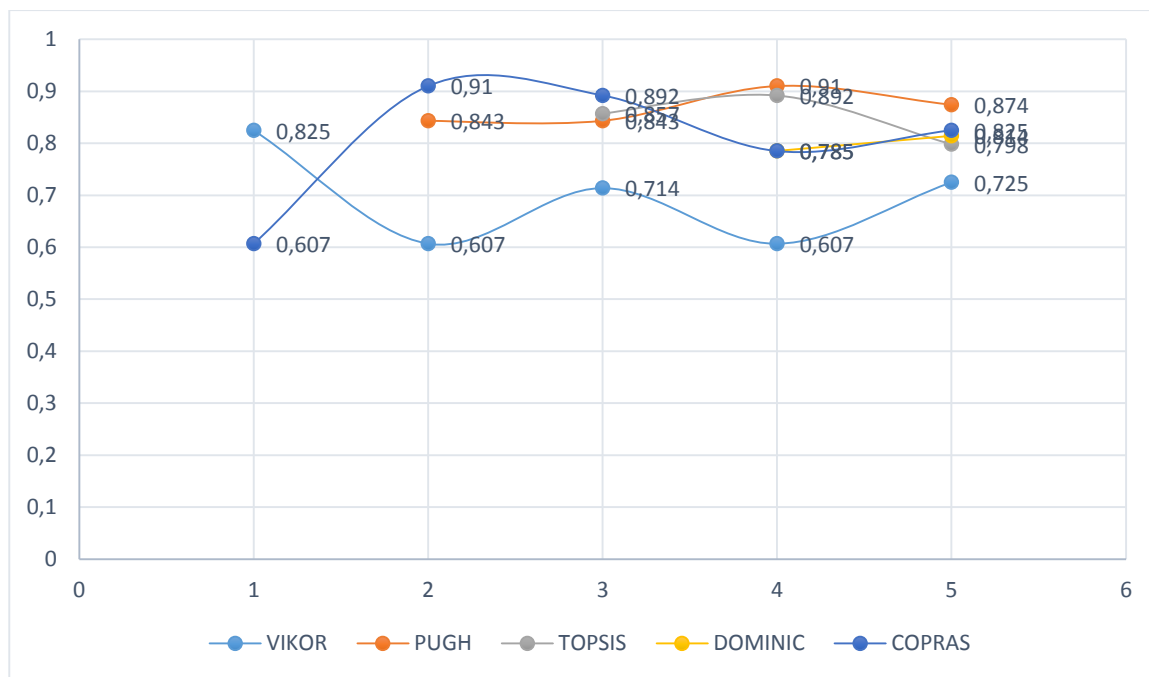


Figura 23: Correlación de Spearman

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La figura número 23 indica de forma gráfica los resultados de la correlación de Spearman entre los métodos multicriterio.

Resultados de la simulación

A continuación se presentan los datos que se obtuvieron como resultado, después de realizar la simulación de condiciones térmicas en el software.

Después de analizar los distintos materiales de cambio de fase que se presentan en este estudio para su aplicación en el campo de almacenamiento de energía térmica mediante el método de selección multicriterio, se escogieron los materiales ganadores, que resultan ser los más óptimos para ser usados de acuerdo a la necesidad presentada, en este caso el material ganador fueron la parafina.

En la industria automotriz los materiales con cambio de fase poseen una capacidad de aplicación un poco limitada, puesto que su función principal es la de almacenar energía térmica, sin embargo y gracias a esta capacidad las parafinas pueden ser usadas en parte de la tapicería del auto, con lo que se logra mejorar el confort en el interior del vehículo.

Las sales hidratadas tienen el potencial de ser usadas en un nuevo sistema para refrigeración del motor y de otros componentes como son las baterías de los vehículos híbridos y eléctricos, este sistema contribuye con una reducción del sistema de refrigeración tanto en volumen y tamaño como prestaciones. Además poseen la capacidad de ser usadas en medios de transporte en el área de refrigeración de contenedores, tanto para transporte de alimentos como productos farmacéuticos y pertenecientes a la industria médica.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Una de los resultados más favorables en este apartado automotriz para los materiales de cambio de fase es gracias a sus prestaciones como termorreguladores, esto sirve para reducir las oscilaciones térmicas de un espacio, como por ejemplo el habitáculo de un auto si el PCM se encuentra incorporado en la tapicería del mismo a manera de aislante, esto teniendo en cuenta que el material siempre trabaje alrededor de la temperatura de cambio de fase propia del material.

Mediante la utilización del software NX10, de Siemens, se puede crear un material y a este asignarle las propiedades físicas y químicas reales que posee, y con estos datos el software nos da la posibilidad de realizar pruebas sobre el material, en este caso en particular una simulación de carga térmica, resuelta mediante el método de elementos finitos incorporado en el solver del mismo programa, permite visualizar el comportamiento que tendrá el material en un entorno real cuando se vea sometido a las condiciones dadas de temperatura, y observar su reacción.

Al ser una simulación sobre comportamiento térmico de un material el programa NX10 nos entrega una serie de resultados que deben ser interpretados para su posterior análisis, lo que permite conocer las respuestas que se buscan sobre el comportamiento de dicho material en las condiciones esperadas de operación.

Las respuestas o soluciones de comportamiento térmico del material que el software entrega, están divididas en varios grupos, misma división la realiza de forma automática el programa, y los resultados de la simulación de condiciones de carga térmica sobre la parafina se presentan a continuación.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La tabla número 59 presentada a continuación, indica las condiciones térmicas en las cuales se realizó la simulación, así como los datos que el programa requiere sobre el material para poder trabajar sobre su comportamiento.

Tabla 59.

Condiciones de la simulación

Condición / características	Valores
Temperatura ambiente	22°C
Temperatura de incidencia sobre el material	50°C
Punto de fusión de la parafina	37°C
Calor latente de la parafina	70 KJ/kg
Calor especifico de la parafina	2.5 KJ/kg.k
Densidad de la parafina	900 kg/m ³
Tiempo total de simulación	720 seg

La tabla número 60, muestra los resultados de los valores obtenidos en la simulación, después de aplicar las condiciones y valores dados, estos valores indican que el material se comporta correctamente, es decir que la simulación da un resultado que es el esperado, mostrando que el material absorbe la energía térmica, o el calor, proveniente del

exterior impidiendo que este ingrese al automóvil, con lo que se puede decir que el PCM cumple con su función.

Tabla 60.

Resultados de temperatura

Condición de temperatura	Valores
Temperatura exterior	50°C
Temperatura interior del PCM	42°C
Temperatura exterior del PCM	18°C
Temperatura en el interior del auto	22°C

Las imágenes número 23 y 24 muestran el resultado de la temperatura acumulada en el material, cuando sobre este se aplica una carga térmica de 50°C en un lado, y en el lado opuesto se da una condición de temperatura ambiente, 22°C.

La figura 24 muestra el material del lado externo, sobre el cual está incidiendo la temperatura que proviene del exterior, misma que se empieza a acumular en el interior de la parafina, cumpliendo así está la función para la cual está pensada de brindar un mejor confort térmico.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

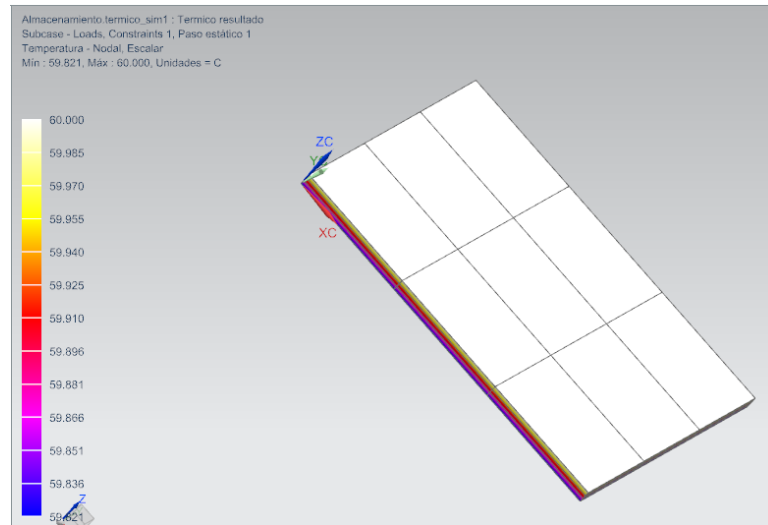


Figura 24: Cara frontal de lámina de parafina

La figura 25 indica la cara posterior de la parafina, en la misma se puede observar que de acuerdo a la escala de color que indica la temperatura, este lado es más frío, debido a que el material está acumulando energía en forma de calor internamente.

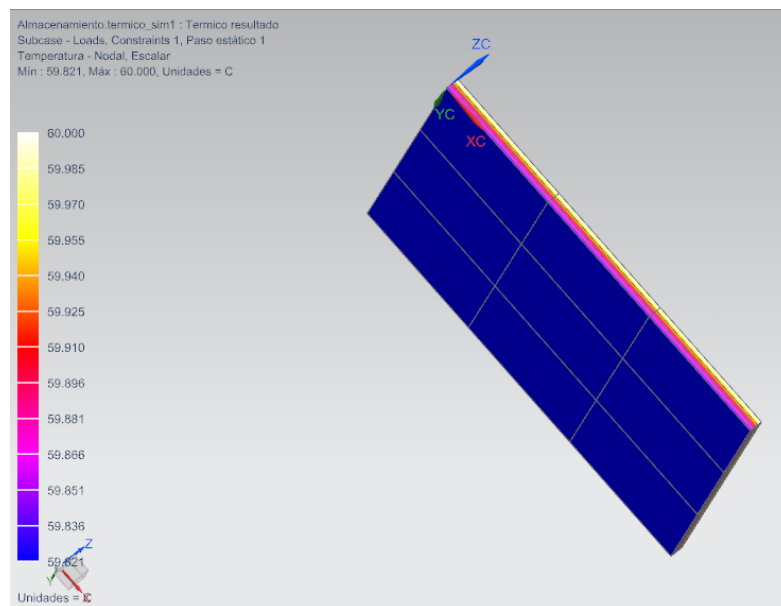


Figura 25: Cara posterior de lámina de parafina

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Como se puede observar en las dos figuras anteriores, la escala de temperatura está dada por colores en el lado izquierdo de la imagen, siendo el color blanco la temperatura más alta, misma que va descendiendo hasta llegar al color azul, que representa la temperatura más baja que se obtiene después de que el material hace su trabajo que es absorber el calor proveniente del lado opuesto del material. Lo que esto indica es que la parafina se comporta de acuerdo a lo esperado cuando está sometida a una carga térmica como almacenador de energía. La temperatura aplicada está en el lado blanco del objeto, mismo que almacena esta energía en su proceso de cambio de fase, evitando así la dispersión del calor, razón por la cual el lado opuesto de la plancha se mantiene azul, lo que indica que la temperatura en esa cara es más baja, la temperatura que se obtiene a este lado del material es de 18°C.

La figura número 26 muestra el interior de la parafina, en la cual se puede observar el proceso de dispersión y almacenamiento de la energía térmica dentro del material. En esta imagen se puede observar que el lado del material que recibe la temperatura o la carga térmica, se calienta notablemente, mientras que el lado opuesto permanece más frío gracias al proceso interno que se da en el material.

Este fenómeno ocurre gracias a las propias características de este material, que permite que se comporte de esa forma, lo que indica la simulación es, que de forma básica, la temperatura o el calor proveniente del exterior queda atrapado en el material, que utiliza esta energía para que se dé su proceso de cambio de fase, en el cual el calor proveniente del exterior derrite la parafina, lo que trae como consecuencia que el material cambie de fase, con lo que esta energía térmica queda retenida en el material y el calor no atraviesa todo el

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

elemento, con lo cual no llega a dispersarse en el interior del automóvil, consiguiendo con esto mejorar el confort en su interior.

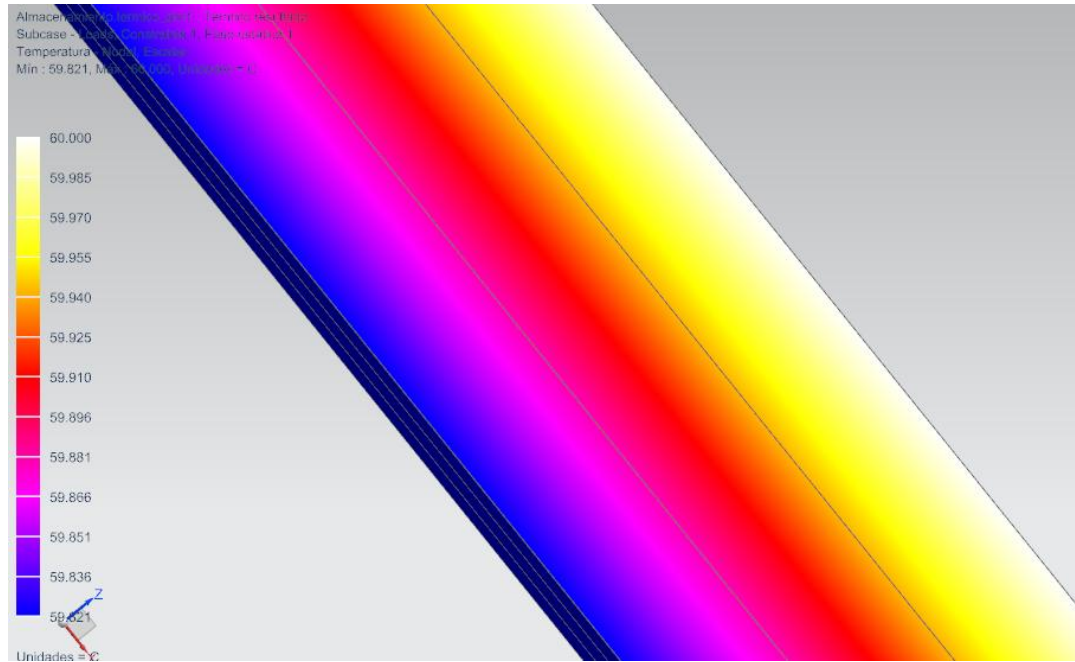


Figura 26: Corte transversal de la lámina de parafina

A continuación, la figura número 27 muestra el resultado sobre el gradiente de temperatura, de forma elemental y como magnitud total. De forma elemental se puede ver el comportamiento del material dividido en nodos, tanto en el eje X, Y y Z. La magnitud se observa de forma total para la plancha de parafina, esta variación de temperatura ocurre en el transcurso del tiempo que requiere el material para que se produzca su cambio de estado.

El resultado del gradiente de temperatura elemental, de acuerdo a la simulación se puede observar en la figura número 27, aquí también se puede observar la división en nodos de la plancha y el mismo código de color para la temperatura aplicada y resultante.

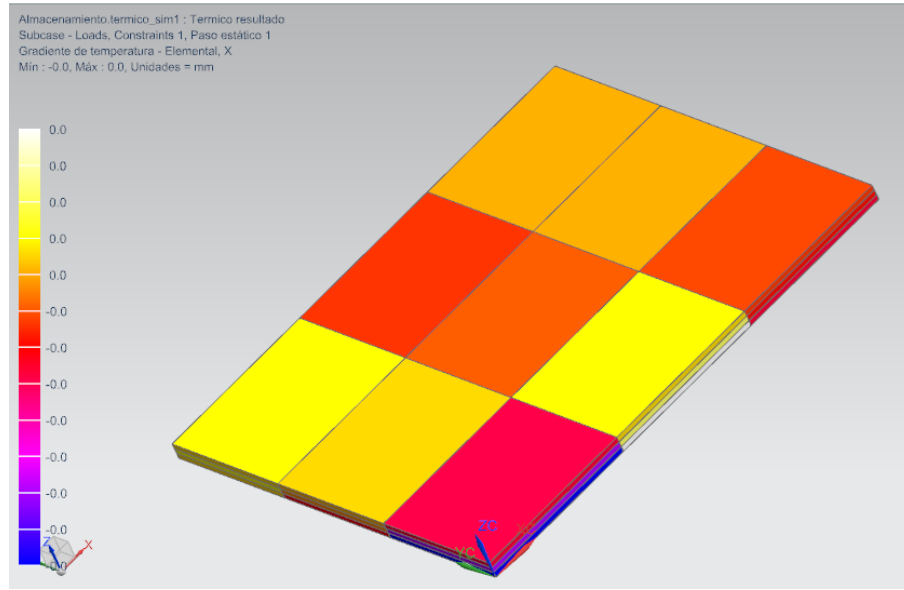


Figura 27: División nodal de la parafina

Como se puede observar, la temperatura siempre es más alta al lado de aplicación de la carga térmica, mientras que en el lado opuesto existe una temperatura más baja, lo que indica que el material se comporta de acuerdo a lo esperado y cumple con su función, de almacenar energía térmica.

De igual manera, la figura número 28 muestra el gradiente de temperatura, pero en este caso se observa la dispersión de la misma sobre el eje Y dentro del análisis. Este cambio de eje indica que la temperatura es absorbida por el material de forma equitativa en toda su superficie. Esto se debe principalmente a dos factores, el primero que la carga térmica aplicada no es puntual, sino que está distribuida sobre toda la superficie de la pieza, y el segundo factor corresponde a la forma en la que el material se comporta, la parafina mantiene su temperatura total mientras se da el cambio de fase, esto quiere decir que una

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

parte del material no puede tener una temperatura mayor al resto del cuerpo durante el proceso de cambio de fase.

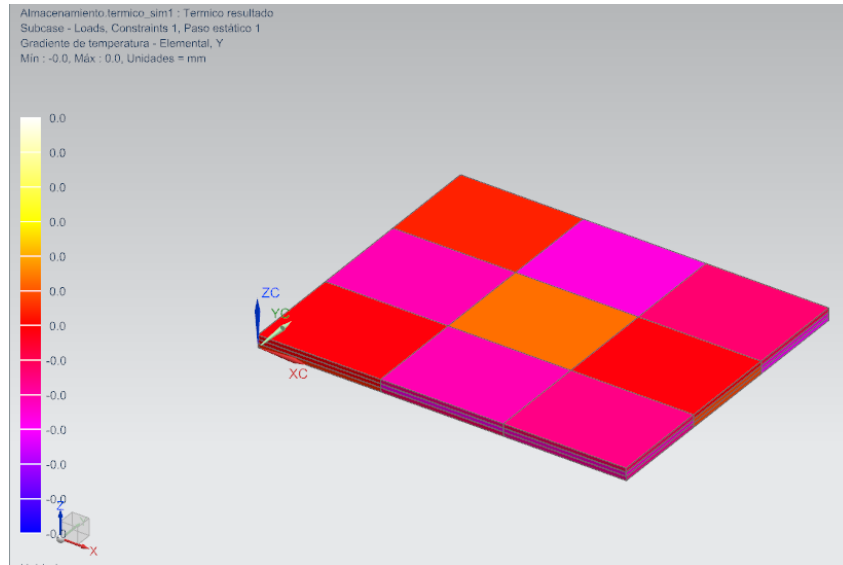


Figura 28: Gradiente de temperatura nodal

En el lado opuesto a la aplicación de calor, se observa rangos menores de temperatura. Esto indica que la dispersión de energía es practicante la misma en ambos sentidos dentro del material.

La magnitud total del gradiente de temperatura se observa en la figura número 29, aquí se puede ver que la acumulación de energía se da en el interior del material, lo que confirma que se comporta como teóricamente se espera, absorbiendo la temperatura desde el lado de su incidencia produciendo el cambio de fase en su interior y manteniendo a una temperatura más baja el lado opuesto. Con esto se consigue que la temperatura del lado interior sea menor que la temperatura exterior.

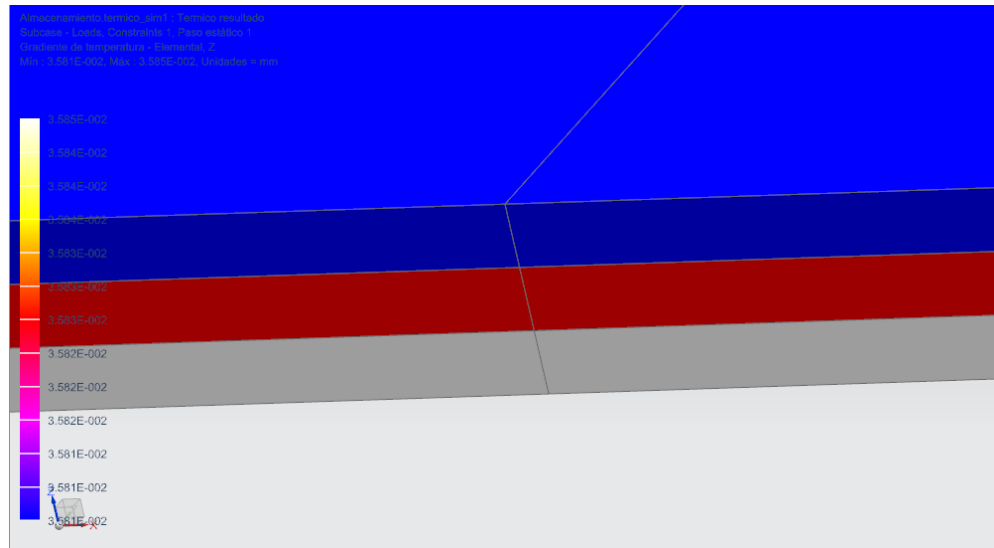


Figura 29: Acumulación de energía térmica

La figura número 30 muestra el resultado obtenido sobre el comportamiento del flujo de calor dentro de la parafina. Esta imagen muestran el flujo del calor en los diferentes sentidos dentro del material, y de la misma forma que anteriormente se indicó, la carga térmica fue aplicada en la cara del material, y en la cara opuesta es donde se ve el resultado, es decir el comportamiento de la parafina.

En este caso la respuesta que entrega la simulación, nos indica que no existe flujo de calor, es por esto que no hay variación de la temperatura, el flujo de calor se mantiene en 0. Esto se debe a que el material está pensado para acumular energía térmica, razón por la cual no debe permitir un flujo de calor, sino la acumulación del mismo, lo que el software lo representa como una temperatura total constante.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

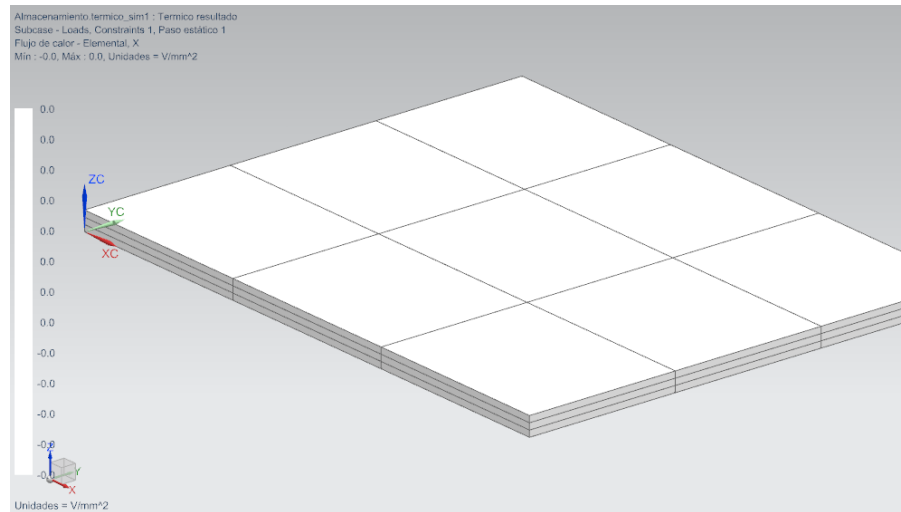


Figura 30: Flujo de calor dentro del material

La magnitud total del flujo de calor se puede observar en la figura número 31, en esta figura se ve como el flujo de calor se da de manera uniforme sobre toda la superficie del material.

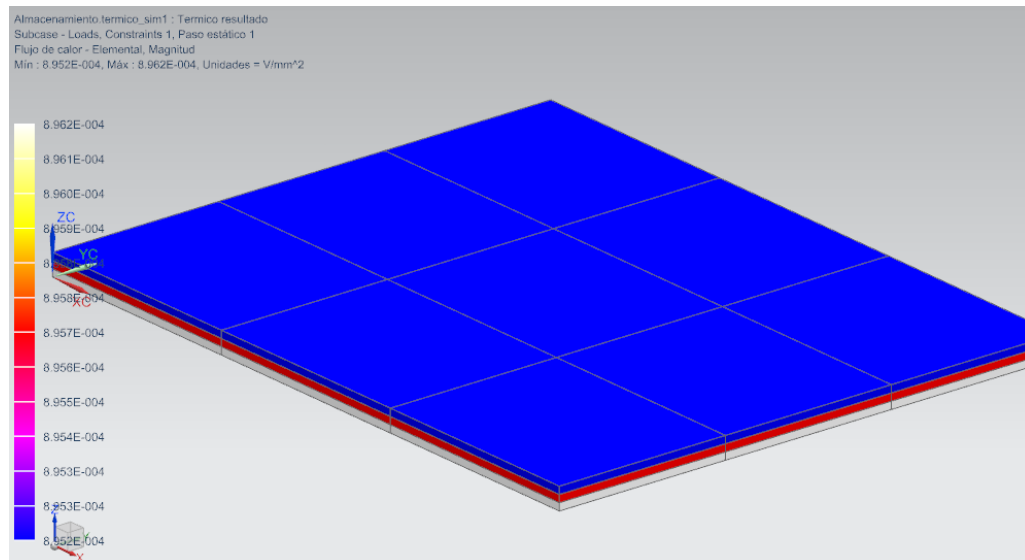


Figura 31: Distribución de la temperatura en PCM

Resultado de la simulación sobre la autoparte

A continuación se presentan los resultados de la simulación realizada con este material directamente sobre una autoparte, para este caso en particular la parte que se tomó en cuenta para la simulación fue el techo del automóvil, puesto que es en esta área donde incide la temperatura exterior de forma directa, y el PCM estaría incorporado a los paneles del mismo en forma de escudo aislante.

El procedimiento que se usó para esta simulación fue igual que el descrito anteriormente, con la diferencia de que en esta simulación el material del que está hecho el panel del techo del vehículo tiene incidencia sobre los resultados del comportamiento del material.

En la figura número 32 se observa el resultado de la simulación sobre el panel del techo de un auto que tiene incorporado nuestro PCM.

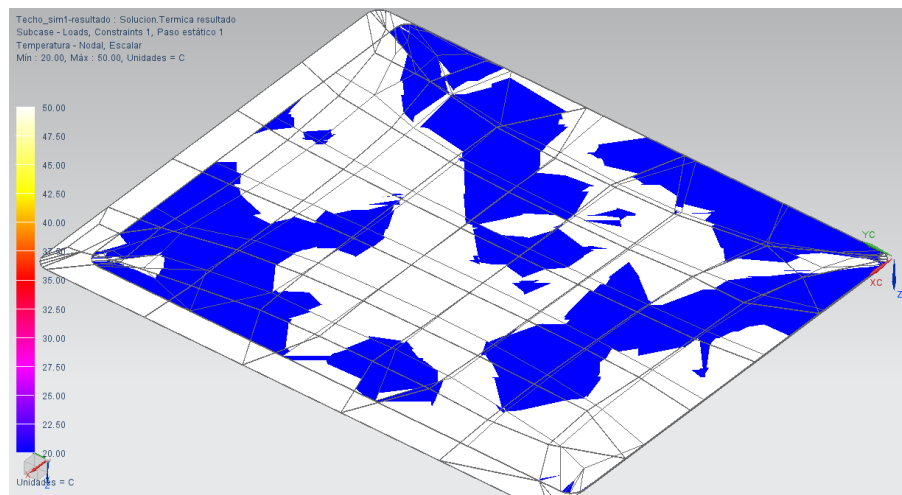


Figura 32: Techo del vehículo

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La figura 31 muestra por colores la temperatura que esta aplicada sobre la parte de metal del techo simulado, esta temperatura es de 50°C a fin de simular la incidencia directa que tendría sobre el auto la temperatura exterior a la cual está sometido.

La figura número 33 a continuación, indica el interior del techo del auto, en la cual esta aplicada la parafina como una capa aislante, que podría incorporarse en la tapicería, a fin de que este material pueda ocupar el espacio disponible, su espesor es de 6mm y las medidas de esta plancha son 10mm menos que las del techo por cada lado. La temperatura que alcanza el PCM en la parte interior del auto es de 20°C, lo que nos indica que el material cumple su función y que el calor queda atrapado en su interior, con lo cual la aplicación de confort térmico es aceptable.

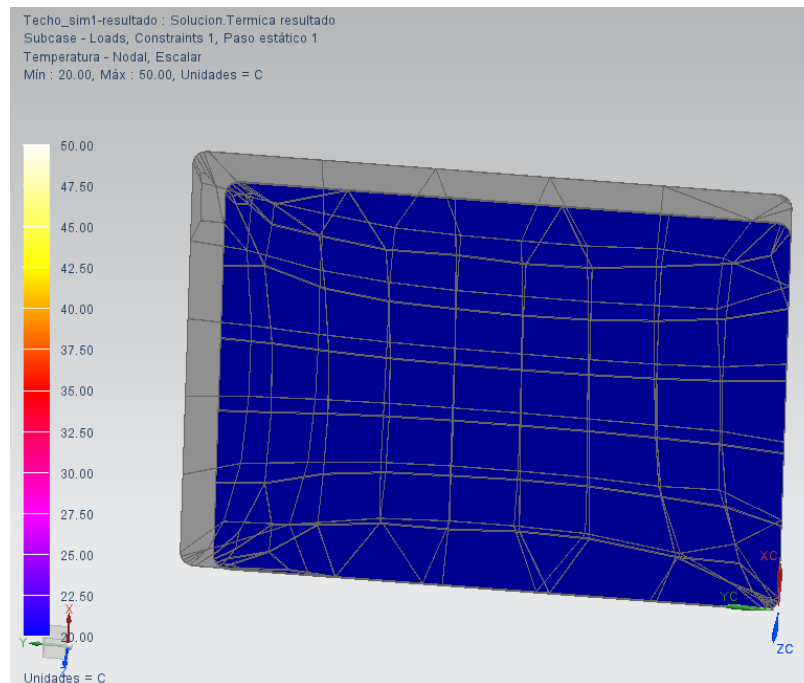


Figura 33: Parte interior del techo del vehículo

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

La tabla número 61 presentada a continuación, muestra un resumen de los valores resultantes de esta simulación y las características de los materiales empleados.

Tabla 61.

Resultados de la simulación sobre el techo del vehículo

Parámetro	Valor
Medidas del techo del auto	1800mm * 1500mm * 1.8mm
Material del techo	Plancha de tool (stell)
Medidas de la plancha de PCM	1700mm * 1400mm * 6mm
Material del PCM	Parafina
Temperatura exterior	50°C
Temperatura interior	20°C

Convergencia de resultados

Los datos que entrega el programa NX10 luego de realizar la simulación contemplan un análisis de convergencia de datos realizado por el mismo programa. Estos resultados indican el punto de convergencia estable, donde se unen los datos del cambio de temperatura máximo con el número de iteraciones o ecuaciones que ha realizado el programa al momento de encontrar los resultados.

Los resultados de convergencia son lineales, ya que los datos ingresados como condiciones de frontera en la simulación, son datos que se mantienen estables, es decir no cambian su valor a lo largo del proceso de simulación, por esta razón los resultados convergen en el mismo punto cada vez, como se observa en la figura número 34 a continuación.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Esta grafica de convergencia se obtiene del mismo software, mediante la opción que nos permite visualizar y graficar el resultado de la convergencia propiamente. Lo que la convergencia indica es la cantidad de iteraciones que realizo el solver hasta llegar al resultado, este solver opera bajo el método de elementos finitos, razón por la cual realiza varias operaciones en una secuencia lógica hasta llegar al resultado. Este número de operaciones se puede controlar de forma manual y automática.

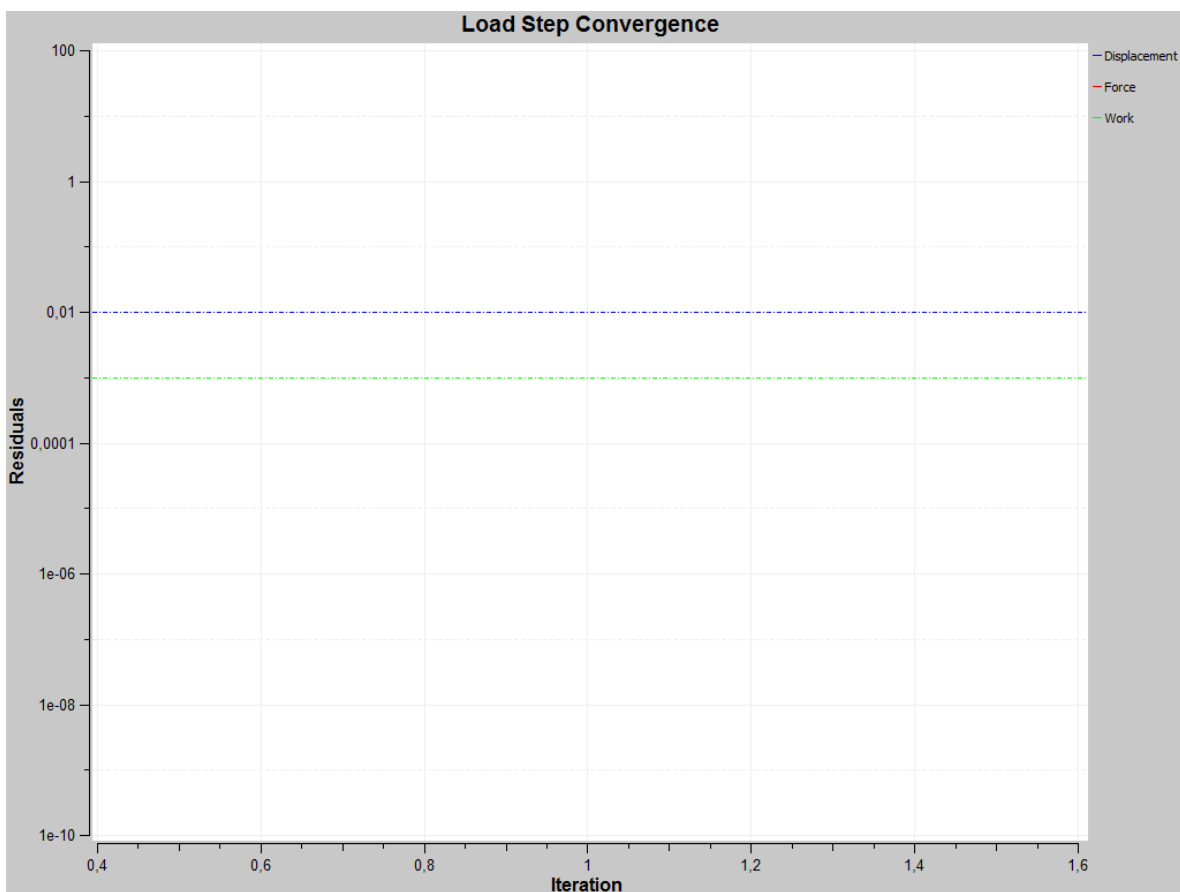


Figura 34: Grafica de convergencia

Discusión de resultados

Los PCM se están desarrollando recientemente para ser aplicados en la industria automotriz y en el sector del transporte, sin embargo en la industria de la construcción y en aplicaciones de climatización industrial su uso está más extendido, como se ha mostrado en este estudio, por esta razón la comparación y análisis de trabajos similares a este de distintos autores, se ha dividido por variables, a fin de hacer más comprensible esta discusión.

Métodos multicriterio

Al momento de seleccionar un material de una lista de materiales candidatos para una determinada aplicación, como en el caso de aislamiento térmico del presente estudio, es necesario tener en cuenta ciertos requerimientos. Para (Javier Martinez, 2015) en su artículo sobre selección de materiales mediante el uso de técnicas multicriterio, el primer paso es identificar los requisitos que debe cumplir el material, teniendo en cuenta que para cada aplicación las necesidades son diferentes. En este sentido lo primero que se hizo en el presente estudio es determinar las características que deben cumplir los materiales candidatos a ser usados en un sistema de aislamiento térmico, entre estas características las más importantes son: su densidad, calor de fusión, punto de fusión y calor latente, por este motivo de la lista de PCM candidatos se eligieron cinco materiales que cumplen con el requisito de poseer valores altos en estos parámetros.

De esta forma se seleccionó siete materiales para analizar mediante la aplicación de métodos multicriterio y obtener el mejor candidato para la aplicación propuesta, los materiales elegidos fueron: la parafina, la parafina cera, el sulfato de sodio trihidratado, el fosfato mono ácido de calcio trihidratado y el sulfato de magnesio penta hidratado. Para (R.

V, 2008) elegir el material más adecuado no es simple, ya que se debe tener en cuenta todos los aspectos posibles que intervienen en el comportamiento del material, lo que quiere decir que para conseguir un material que cumpla con la función de aislamiento térmico se debe tener en cuenta más criterios que solo su calor de fusión y por esta razón se escogió cinco criterios técnicos para realizar la selección de materiales.

Al momento de desarrollar los métodos multicriterio para seleccionar el material de cambio de fase más apto a cumplir la función de aislamiento térmico se debe tener de forma clara los criterios con los cuales se va a evaluar a estos materiales, en el presente estudio los criterios de evaluación son: conductividad térmica, punto de fusión, calor latente, calor específico y densidad. Estos criterios necesitan de una ponderación, que determina cual es el más importante de los criterios. Según (Javier Martinez, 2015) el factor de ponderación indica la importancia de cada criterio, para determinar estos pesos se usan métodos de ponderación como puede ser el método de entropía y el método de desviación estándar.

Según (Martinez, Peralta, Edilberto, & Cherrez, 2018) un criterio de selección posee un peso más alto cuando la diversidad de la evaluación para cada alternativa es mayor, lo que quiere decir que se necesita tener varios métodos para poder comparar sus resultados. Para realizar la selección multicriterio en el presente estudio fue necesario determinar los pesos de cada criterio y para este fin se tomó los valores obtenidos del método de desviación estándar ya que sus resultados fueron mayores para el criterio de punto de fusión con un valor de 14.579, y como el objetivo del estudio es encontrar un material que se pueda aplicar como aislante térmico este criterio es importante.

Según (Garza & Gonzales, 2005) los métodos multicriterio consisten en un proceso matemático que permite obtener una decisión sobre selección, esto quiere decir que la oferta se representa de forma numérica y mediante un proceso de operaciones matemáticas se obtiene un valor que indica que material sobresale. Por esta razón después de determinar los pesos en este estudio se aplicó cinco métodos de selección multicriterio los cuales son: Pugh, Vikor, Topsis, Copras y Dominic, estos métodos se aplicaron para obtener la selección del mejor material para la aplicación determinada.

Simulación

De acuerdo con (Landeta, Olmedo, & Fernandez, 2013) la mejor forma de validar un resultado es mediante una simulación, y para el caso de simulaciones térmicas lo mejor es contar con un software especializado. Por esta razón en el presente estudio se utilizó el software NX10 de Siemens, mismo que permite realizar simulación de condiciones térmicas sobre cualquier material, y después de realizar la simulación térmica sobre la parafina, se pudo observar que cumple con su función de aislamiento térmico y almacenamiento de energía, puesto que la condición de temperatura externa a la cual se sometió en la simulación a este material fue de 50°C, y lo que se obtuvo es que la temperatura interna se mantiene baja, a 20°C, estos datos indican que la parafina usada como aislamiento térmico posee un rango de efectividad del 40% como material aislante.

Según (Larsen, 2011) los programas de simulación facilitan el estudio de la evolución temporal de la temperatura interna de los materiales, lo cual es muy importante para evaluar los requerimientos de calentamiento y/o enfriamiento y para estudiar cómo alcanzar las condiciones de confort térmico dentro de una habitación. En este trabajo se

presenta el mismo principio de simulación de condiciones térmicas, con la diferencia de que no fue aplicado a una habitación de un edificio, sino a una autoparte, el modelo térmico utilizado permite la simulación del comportamiento de componentes a partir de las características geométricas y constructivas de los mismo y de las condiciones climáticas externas, con esto se pudo encontrar que los principios de simulación térmica aplicada a edificios también se puede usar como modelo para simulaciones de condiciones similares en automóviles.

Correlación de Spearman

De acuerdo con (Martinez, Material selection for multitubular fixed bed reactor Fischer-Tropsh reactor, 2018) los resultados de los métodos multicriterio se deben validar con la correlación que existe entre ellos. En el presente estudio se usó el método de correlación de Spearman, el mismo que nos indica que la correlación existente entre los método multicriterio aplicados es positiva, esto quiere decir que los resultados son directamente proporcionales, lo que a su vez indica que el material ganador en un método también gana en los demás métodos, y de acuerdo a los métodos aplicados el material ideal es la parafina.

Conclusiones

Después de analizar los conceptos presentados y revisados en el presente trabajo, así como sus resultados, se puede obtener las siguientes conclusiones:

Los materiales de cambio de fase como la parafina tienen grandes posibilidades de uso en distintas industrias de nuestro país como la construcción y principalmente en el transporte, ya que la implementación de estos materiales dentro de la estructura de vehículos representa una reducción de la necesidad de usar constantemente los sistemas de aire acondicionado.

Los métodos de selección multicriterio son una herramienta poderosa al momento de tomar decisiones sobre la selección de un material en una lista de posibles candidatos. Estos métodos mediante un análisis matemático entregan una respuesta de cuál es la mejor opción, misma que cumple con los parámetros buscados en una aplicación determinada. En este estudio; el material ganador de los métodos multicriterio fue la parafina, ya que esta posee las mejores propiedades para ser usada en un sistema de aislamiento térmico automotriz.

Se puede mejorar la eficiencia de los sistemas de climatización automotriz con el empleo de los PCM que posean la temperatura de cambio de fase adecuada al nivel de acumulación de energía deseada y requerida para el sistema. Esto quiere decir que para su uso en automóviles la parafina es un material ideal, ya que su temperatura de trabajo es de 37°C, y esta es fácilmente alcanzable en nuestro medio ambiente.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON MATERIALES DE CAMBIO DE FASE

Al realizar la simulación térmica en el software NX10, se puede comprobar que la parafina se comporta como idealmente se espera; lo que significa que mientras se da su proceso de cambio de fase, almacena energía térmica de forma eficiente. La simulación muestra cómo se comportaría la parafina en el mundo real, con lo cual se puede establecer que su aplicación en vehículos es aceptable, en busca de tener un control constante sobre la temperatura interior del mismo. La implementación de materiales de cambio de fase, como la parafina, ha demostrado su aporte en el enfriamiento gratuito y control del confort térmico mediante la reducción de las fluctuaciones de temperatura.

La utilización de PCM permite aprovechar la capacidad de almacenamiento de calor latente de los materiales para absorber y liberar energía térmica cuando sea necesario. Existen distintos materiales disponibles en nuestro mercado y métodos de encapsulación para los mismos, dando lugar a una gran variedad de combinaciones posibles que pueden ser diseñadas para adaptarse a las aplicaciones deseadas; como el caso de usar parafina con el objetivo de controlar la temperatura interior de los automotores.

El uso de PCM es un método nuevo pero muy eficiente al momento de obtener efectos de regulación térmica. Su aplicación en una carrocería representa tener el control permanente sobre la temperatura interior del vehículo, sin la necesidad de un sistema de control electrónico para llevar a cabo esta acción. La parafina usada como aislamiento térmico en los vehículos es un método efectivo, que permite mantener una temperatura interior cerca del rango de confort térmico, que se sitúa entre los 18°C y 22°C.

Recomendaciones

Para que los materiales de cambio de fase extiendan sus usos y aplicaciones en nuestro medio es necesario generalizar su empleo en varias industrias; para lograr esto se recomienda realizar nuevos estudios técnicos sobre posibles soluciones que impliquen el uso de esta tecnología. Además es necesario realizar una mayor experimentación de almacenamiento y transmisión de calor, y de forma especial estudios de viabilidad económica, ya que este es un factor determinante en Ecuador para que una nueva tecnología sea aceptada por parte de todos los consumidores.

Se recomienda para futuros estudios la aplicación de la presente investigación de forma física en los paneles interiores de los vehículos ya que de esta forma se podrán comprobar los resultados obtenidos sobre los beneficios en el aspecto de confort. Se considera que en un futuro se deben unir las aplicaciones y esfuerzos de las distintas industrias relacionadas con los PCM, para su mejor aprovechamiento y de esta forma continuar con su desarrollo e investigación de forma independiente.

Bibliografía

- Alonso, J. M. (2009). *Técnicas del Automóvil MOTORES*. Madrid: Paraninfo.
- Aly, M. F., Hamza, K. T., & Farag, M. M. (2014). A materials selection procedure for sandwiched beams via parametric optimization with applications in automotive industry. *Materials & Design*, (1980-2015), 56, 219-226.
- Balat, M., & Balat, H. (2009). *Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. Applied Energy*.
- Barrera, M. A. (2014). Uso de la correlacion de Sperman en un estudio de intervencion en fisioterapia. *Movimiento Cientifico*.
- Cabrera, D. A. (2012). *Almacenamiento termico en aplicaciones solares de concentracion de alta temperatura*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Chandel, A., & Singh, O. (2011). *Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of "Biofuel"*. Chicago.
- Commons, C. (6 de Junio de 2018). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_multicriterio
- Cuevas, M., Haget, Y., & Mondieig, D. (2011). *Nuevos materiales para el almacenamiento de energía térmica: las aleaciones moleculares*. España: Instalador.
- David Juarez, R. B. (2012). Estudio de mmateriales con cambio de fase y analisis SEM de micro. *Revista de invetigacion. Ciencias*.

Escudero, S., Gonzáles, J., Rivas, J., & Suárez, A. (2011). *Motores*. Madrid: MACMILLAN Profesional.

Eyssautier, M. (2016). *METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS APLICADAS*. México: trillas.

Faraldos, M., & Goberna, C. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. . España: CSIC.

Faria, C. (2006). *InfoEscola*. Obtenido de InfoEscola: <https://www.infoescola.com/empresas/metodo-de-pugh/>

Garcia, A. (2017). Motores de combustion interna (MCI) operando con mezclas de etanol gasolina: revision. 8.

Garza, R., & Gonzales, C. (2005). *Aplicacion de las tecnicas multicriterio multiexpertos dentro del perfil del ingeniero industrial*. Ingenieria Industrial.

González, D. (2015). *Motors térmicos y sus sistemas auxiliares* . Madrid: Paraninfo.

Goñi, J., & Rojas, M. (2016). *MANUAL DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Y TECNOLOGÍA AUTOMOTRIZ*. Lima: Fondo.

Grajales, A. (2013). *Scielo Org*.

Groover, M. (2008). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Raeia.

- Grupo Spurrier. (2013). *PRO ECUADOR*. Obtenido de INSTITUTO DE PROMOCIÓN DE EXPORTACIONES E INVERSIONES: <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/06/Perfiles-de-Inversiones-Promocion-de-Inversiones/Perfiles-de-Inversion/Biocombustibles.pdf>
- Hauer, A. (2002). *Innovative Thermal Energy Storage Systems for Residential Use*. USA: Bayern.
- Hernandez, J. (2014). Simulador termico para sistemas de climatizacion basado en componentes polimorficos conexionados mediante grafos. *Revista de investigacion Pensamiento Matematico*, 91-104.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2003). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. México: McGraw-Hill.
- Herranz Méndez, M. (2012). *Lanas minerales y aislantes*. . Afelma.
- Himran, S., & Suwono, A. (2013). *Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium*. Estados Unidos.
- Ingenieria, E. d. (s.f.). Tecnologías de almacenamiento de energia y factibilidad en Chile. *Departamento de Ingenieria Electrica*.
- Inocencio, A. S. (2016). Material de cambio de fase (PCM), inercia termica 100 veces mas eficiente. *Activatie*.
- J. Jaguemont, N. O. (2017). Materiales de cambio de fase (PCM) para aplicaciones de automoción. *Ingenieria Termica Aplicada*.

- Javier Martinez, D. V. (2015). Aplicacion de metodos multicriterio para la seleccion de materiales para menaje de cocinas de induccion. *Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energias Renovables*.
- Jose Arias Cabezas, I. M. (2008). *Aritmetica y Algebra*. Madrid: Grupo Editorial Bruño.
- Juarez, D., Balart, R., Ferrándiz, S., & García, D. (2012). Estudio d emateriales con cambio de fase (PCM) y análisis SEM de micro (PCM). *Revista de investigación Ciencia*.
- Kalnæs, S., & Jelle, B. (2015). *"Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities*. Berlin.
- Landeta, P., Olmedo, F., & Fernandez, E. (2013). *Analisis y simulacion del comportamiento termico del sistema integrado, estructura y componentes electronicos*. Sangolqui: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Larsen, S. F. (2011). *Modelo termico del programa Simedif de simulacion de edificios*. Buenos Aires: Energias Renovables y Medio Ambiente.
- Latorre, M., & Seco, C. (abril de 2013). *UNIVERSIDAD MARCELINO CHAMPAGNAT*.
Obtenido de <http://www.umch.edu.pe/arch/hnomarino/metodo.pdf>
- LLanes, E., & Rocha, J. (2018). Produccion e impacto del biodiesel: una revision.
- López de la Banda, R. (2015). *Asociación Nacional de Poliestireno Expandido*. Anapen.
- Mancini, M. (2012). Un marco para la seleccion de la central nuclear correcta. *Revista Internacional de Investigacion de Produccion*, 4753-4766.

- Manuel Dominguez, J. A. (2012). *Posibilidades de los acumuladores de cambio de fase en la climatización*. España.
- Martinez, J. (2018). Material selection for multitubular fixed bed reactor Fischer-Tropsch reactor. *Journal of mathematics in operational research*.
- Martinez, J., Peralta, D., Edilberto, L., & Cherrez, M. (2018). Metodos multicriterio aplicados en la seleccion de un material para discos de freno. *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnologia*.
- Mayayo, J. G. (2012). *Materiales de cambio de fase. Diseño de una instalacion para la caracterizacion de PCM a altas temperaturas*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Mehling, H., & Cabeza, L. (2008). *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Heidelberg.
- Morales, R., & Guzman. (2010). *Manual para la Instrumentación del banco de Pruebas de Motores de Combustión Interna*. México.
- Moscoso, M. (2016). *Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura*. Barcelona: Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Barcelona.
- Naik, S., Goud, V., Rout, P., & Dalai, A. (2010). *Production of frist and second generation biofuels: A comprehensive review. Renewable and sustainable energy reviews*. Missouri.

Oliver, A., Neila, F., & García, A. (2012). *Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica*. Argentina.

OMS. (2016). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Opricovic, S. (2011). *Optimizacion multicriterio en ingenieria civil*. Belgrado: Facultad de Ingenieria Civil.

Palomo, M. (2017). *Aislantes térmicos: Criterios de selección por requisitos energéticos*. Madrid.: Universidad Politécnica de Madrid.

Payri, F., & Desantes, J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona: REVERTÉ.

Peng, D.-X. (2017). Effect of unleaded gasoline blended with biofuels on gasoline injector wear and exhaust emissions. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69(2),208-214.

Perez, A. (2010). Situacion y futuro de los PCM. *Centro de desarrollo tecnológico* .

Quintero, A. G. (2012). *Los métodos y procesos multicriteri para la evaluación*. España.

R. V, R. (2008). A decision making methodology for material selection. *Materials and Desing*.

- Riberas, C. (2018). *Cosas de arquitectos* . Obtenido de Cosas de arquitectos: <https://bloquescando.com/que-son-los-materiales-de-cambio-de-fase-y-para-que-se-usa/>
- RO-DES. (2016). *RO-DES*. Obtenido de <https://www.ro-des.com/mecanica/que-son-los-inyectores/>
- Rosen, M. (2011). *Thermal energy storage: systems and applications*. Hoboken: N. J. Wiley.
- Sanchez, A. (2016). Propiedades de la parafina. *Revista de la Universidad Bolivariana de Venezuela*, 19.
- Sánchez, C., & Cardona, O. (2007). *Fuel ethanol production process design trends and integration opportunities*.
- Sánchez, J. (2008). *Los tejidos inteligentes y el desarrollo tecnológico de la industria textil*. México: Avac.
- Sempere, J., & E, T. (2008). *El final de la era del petróleo barato*. Barcelona: Icaria.
- Sharma, A., V, T., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications: Renewable and Sustainable Energy*. New Jersey.
- Skoog, D., & West, D. (2001). *Analisis Instrumental*. Madrid: Mc Graw Hill.
- Smith, W. (2011). *Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales*. España.

- Torres, C. (2012). *Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.
- Valenzuela, R. (2002). Caracterización de materiales por espectroscopia. *Revista Cubana de Física*, 81, 82.
- Velazquez, M. (2015). *Materiales aislantes sostenibles*. México: Universidad Pólitecnica de Extremadura.
- Velazquez, M. (2015). *Materiales aislantes sostenibles*. México: Universidad Pólitecnica de Extremadura.
- Vidal, B. (2007). *Aplicaciones a sistemas de acumulacion de energia termica* . Cataluña: Universidad Politecnica de Cataluña.
- Yuste, P. S. (24 de Octubre de 2017). *Certificados Energeticos*. Obtenido de Certificados Energeticos: <https://www.certificadosenergeticos.com/materiales-de-cambio-de-fase-mejorar-eficiencia-energetica-edificios>
- Zalba, B. (2002). *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental*. Zaragoza: Departamente de ingenieria mecanica. Universidad de Zaragoza.
- Zaragosa, M. (2012). *Guía sobre materiales aislantes y eficiencia energética*. Mdrid: Arias.