

## EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES DE CAMBIO DE FASE MÁS ADECUADOS PARA EL ALMACENAMIENTO DE CALOR DE UN COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE

**F. López<sup>1</sup> y A. Hernández<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)  
 Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)  
 Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.  
 Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489 e-mail: [fabio.lopez@exa.unsa.edu.ar](mailto:fabio.lopez@exa.unsa.edu.ar)

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta una metodología para evaluar los PCM (materiales de cambio de fase) más adecuados para calentadores solares de aire utilizando métodos de toma de decisiones de múltiples criterios (MCDM). Específicamente, se combinan los métodos TOPSIS y AHP para clasificar los materiales en función del costo, el calor latente, la conductividad térmica y el calor específico. Se evaluaron PCM disponibles localmente y comerciales con puntos de fusión en el rango 20-70°C. El método AHP determinó los pesos para cada criterio que se utilizaron en el análisis TOPSIS. Los resultados mostraron que la grasa vacuna obtuvo la puntuación más alta, seguida por la cera de soja, la parafina, la estearina y luego dos parafinas comercializadas por Rubitherm. Un análisis de sensibilidad verificó la solidez de la clasificación. El estudio demuestra una metodología efectiva para seleccionar PCM óptimos para aplicaciones térmicas solares utilizando múltiples criterios relevantes.

**Palabras clave:** Materiales de cambio de fase, Colector solar calentador de aire, Eficiencia térmica, Análisis TOPSIS y AHP.

### INTRODUCCIÓN

Los materiales de cambio de fase (PCM) son ampliamente utilizados en aplicaciones de almacenamiento de energía térmica debido a su alta densidad energética (Aftab et al., 2021). En particular, en sistemas de calefacción solar de aire, donde su uso puede mejorar significativamente el rendimiento y la eficiencia térmica (Tyagi et al., 2012). Sin embargo, la selección adecuada de los PCM desempeña un papel fundamental para lograr dicha mejora. La figura 1 muestra un esquema que ilustra cómo se incorporan los materiales de cambio de fase con colectores solares calentadores de aire para el calefacción edilicio.

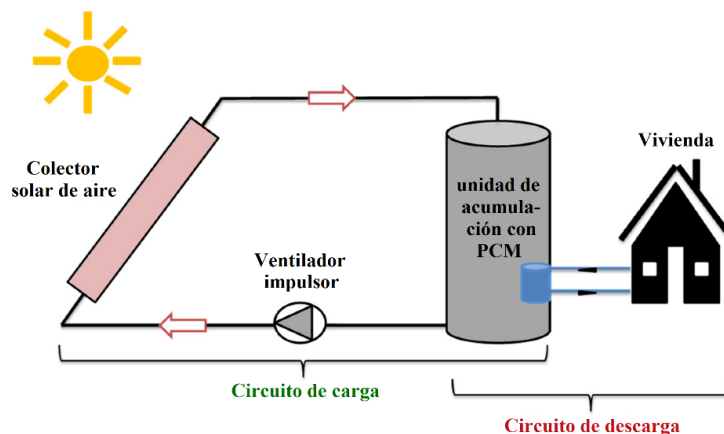


Figura 1. Esquema de un sistema de calefacción solar de aire con tecnología PCM.

El enfoque convencional para la selección de PCM en sistemas de calefacción solar de aire se basa en la experiencia del ingeniero a cargo y/o en la disponibilidad de materiales. Estudios recientes han demostrado que este enfoque no aborda explícitamente los objetivos del sistema ni considera las elecciones subjetivas de los ingenieros (Karami, 2011). Para superar este desafío, la combinación de la Técnica de orden de preferencia por similitud con la solución ideal (TOPSIS) y el Proceso de jerarquía analítica (AHP) se propone como un enfoque más efectivo (Xu et al., 2017). Esta combinación de métodos puede generar resultados más alineados con las decisiones del mundo real (Karim y Karmaker, 2016). Los métodos, TOPSIS y AHP, pertenecen a la categoría de métodos de toma de decisiones con múltiples criterios (MDCM), que han surgido como una herramienta prometedora para identificar los PCM más adecuados para una aplicación determinada Hwang y Yoon (1985) y Thomas L. Saaty (1980).

En el proceso de selección, es crucial elegir las propiedades más representativas del problema a resolver. En este sentido, Ehid y Fleischer (2012) recomienda que se debería considerar: costo, conductividad térmica, tanto en la fase líquida como sólida, capacidad de almacenamiento y temperatura de cambio de fase como propiedades en la elección del PCM más apropiado. Yinping et al., (2007); Zhou et al., (2007); (Waqas y Kumar, 2011) sugieren utilizar PCM con una temperatura de cambio de fase 20 °C y 32 °C si el objetivo del material es el calefacción de viviendas. Además, Jurinak y Abdel (1978) que estudiaron un sistema de calefacción solar de aire con una unidad de almacenamiento de energía con PCM y sugieren que la selección de un PCM debe basarse en su punto de fusión y no en su calor latente.

En este contexto, este estudio investiga el uso de los métodos AHP y TOPSIS en el proceso de selección de sustancias de cambio de fase con punto de fusión en el rango de temperatura de salida esperado para calentadores solares de aire con fines de calefacción edilicia (de 20 a 70 °C). Se evalúa la viabilidad de diferentes materiales ofrecidos tanto localmente en la provincia de Salta como materiales ofrecidos por la compañía alemana Rubitherm. La compañía Rubitherm es una empresa alemana que comercializa PCM para diversas aplicaciones, con precios que oscilan entre 22287 y 24844 ARS/kg.

Los métodos AHP y TOPSIS son adecuados para el estudio presentado porque permiten evaluar y seleccionar los materiales de cambio de fase (PCM) más apropiados para aplicaciones solares térmicas, considerando múltiples criterios relevantes al problema. El método AHP ayuda a determinar los pesos de importancia de cada criterio, mientras que el método TOPSIS ayuda a clasificar los materiales según su cercanía a la solución ideal.

El artículo se organiza de la siguiente manera. Primero, se describe la metodología seguida. Donde se realiza un listado de los materiales PCM disponibles, se identifican las sustancias potencialmente elegibles bajo ciertas restricciones. Mediante el uso combinado de los métodos TOPSIS y AHP se identifican las sustancias PCM más adecuadas de acuerdo a las propiedades más relevantes al problema de la acumulación de calor. Seguido se presentan los resultados de la selección realizada. Luego, se presenta un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados de la selección. Se realiza un análisis y discusión sobre los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan algunas conclusiones.

## **METODOLOGIA**

El proceso de selección se inicia mediante la determinación del objetivo final asignado al material en cuestión. Se lleva a cabo una caracterización y pre-selección de las sustancias en función de sus propiedades termo-físicas. Se realiza un filtrado de las propiedades más relevantes al problema de la acumulación de calor y se determina su importancia relativa mediante el método AHP. A continuación, estos resultados se utilizan en el método TOPSIS para clasificar los PCM según sus puntajes de desempeño. Por último, a través del uso de ambos métodos se realiza un análisis de sensibilidad.

### ***Establecimiento del objetivo final del PCM***

El objetivo principal es obtener PCM que operen a la salida de un colector solar calentador de aire típico para la calefacción de viviendas. Entonces, se establece la restricción de conseguir materiales con temperaturas de fusión dentro del rango 20 a 70 °C y temperaturas de solidificación dentro o superiores al rango de 20 a 32 °C, según lo recomendado por Yinping et al. (2007), Zhou et al. (2007) y Waqas y Kumar (2011).

## ***Caracterización de los PCM***

Los PCM se caracterizan utilizando información de las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes. Se recopila información técnica de las temperaturas de cambio de fase, el costo, el calor latente de fusión, la conductividad térmica, la densidad y el calor específico, las cuales se organizan en tablas.

### ***Pre-selección del PCM de la base de datos***

Se realiza una pre-selección de los PCM a partir de la base de datos creada, eligiendo aquellos que cumplan con las restricciones impuestas.

### ***Determinación de las propiedades más relevantes***

Se determinan las propiedades termo-físicas más relevantes al problema de la acumulación de calor por cambio de fase. En este trabajo, las propiedades del costo, el calor latente, la conductividad térmica y el calor específico se escogieron como las propiedades más relevantes.

### ***Determinación de los pesos iniciales con el método AHP***

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) es un enfoque multi-criterio para la toma de decisiones. Esta técnica integra los procesos de calificación para encontrar las alternativas más relevantes. La selección se realiza con respecto a un objetivo general, que se desglosa en un conjunto de criterios. La metodología consiste en establecer los pesos de importancia de estos criterios, esto se hace al comparar los mismos de a pares. El método también permite verificar la consistencia de los juicios emitidos en las comparaciones, a través del cálculo del índice de consistencia.

Para seguir este método se realizan los siguientes pasos:

#### 1. Construcción de la matriz de comparación por pares

Se establece una matriz cuadrada,  $A$ , de tamaño  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de elementos a comparar.

Se asignan los valores de importancia relativa para cada par de elementos en la matriz  $A$ , basados en la escala de comparación de 1-9, donde 1 representa la misma importancia y 9 la importancia extrema. La diagonal principal de la matriz se llena con unos, ya que representa la comparación de cada elemento consigo mismo.

La matriz de comparación por pares representa los juicios realizados sobre la importancia relativa entre cada par de criterios o alternativas en forma estructurada.

#### 2. Normalización de la matriz

Se calculan las ponderaciones de cada criterio utilizando el método del vector propio. Se obtiene una matriz normalizada,  $A'$ , donde cada elemento  $a'_{ij}$  representa la relación de importancia relativa normalizada entre los elementos  $i$  y  $j$ . La ecuación para la normalización es:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

La matriz normalizada permite obtener los pesos relativos de cada elemento. Esto hace los juicios comparables entre sí.

#### 3. Cálculo de los pesos relativos

Para obtener los pesos relativos de los criterios se suman los elementos de cada columna de la matriz  $A'$  y se dividen por la suma total para obtener los pesos normalizados.

La ecuación para este cálculo es:

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a'_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a'_{ij}}$$

Los pesos relativos permiten obtener las prioridades de cada criterio o alternativa, basado en los juicios de importancia provistos en las comparaciones.

#### 4. Verificación de la consistencia

Se calcula el índice de consistencia ( $IC$ ) y el índice de consistencia aleatoria ( $IR$ ) para evaluar la consistencia de las comparaciones.

Para obtener el  $IR$  se divide la diferencia entre el valor propio máximo  $\lambda_{max}$  y el tamaño de la matriz  $n$ .

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Se utiliza un valor predefinido de  $IR$  basado en el tamaño de la matriz que se calcula de la siguiente manera:

$$IR = \frac{n - 1}{2}$$

Los índices  $IC$  e  $IR$  son indicadores que se utilizan en el método AHP para evaluar la consistencia de los juicios emitidos en las comparaciones por pares.

Se calcula el cociente de consistencia ( $CR$ ) dividiendo el  $IC$  por el  $IR$ .

$$CR = \frac{IC}{IR} = \frac{2 * \lambda_{max}}{(n - 1)^2}$$

El índice de consistencia mide el grado de consistencia inherente en las comparaciones por pares realizadas entre los criterios o alternativas. Se calcula a partir de los valores propios de la matriz de comparación. Si el  $CR$  es superior a 0.1, la matriz se considera inconsistente.

#### **Implementación del método TOPSIS**

El método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) es un método de análisis de decisiones múltiples criterios, que se basa en el concepto de que la alternativa seleccionada debe tener la distancia geométrica más corta desde la solución ideal positiva y la distancia geométrica más larga desde la solución ideal negativa. Esto permite una clasificación objetiva de las alternativas (materiales de cambio de cambio de fase, en este caso).

El método TOPSIS se basa en los siguientes pasos:

##### 1. Construcción de la matriz de decisión

Se comienza construyendo la matriz de decisión  $D$  con los datos de las alternativas (filas) y los criterios considerados (columnas). La matriz de decisión representa los datos del problema de forma organizada, con cada alternativa evaluada en cada criterio. Permite ver toda la información de manera compacta.

##### 2. Normalización de la matriz de decisión

La fórmula para la normalización del valor ( $i, j$ ) en la matriz de decisión  $D$  es:

$$R_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n D_{ij}^2}} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

donde  $n$  es el número de alternativas y  $m$  es el número de criterios.

Se normaliza la matriz para hacer los valores comparables y adimensionales. Esto es necesario ya que cada criterio posee unidades de medida diferentes. La normalización lleva todos los valores a una escala común.

### 3. Construcción de las matrices de decisión ponderadas

La fórmula para la construcción de la matriz de decisión ponderada ( $V$ ) a partir de la matriz de decisión normalizada ( $R$ ) y los pesos de los criterios ( $W$ ) es:

$$V_{ij} = R_{ij} \times W_j$$

donde  $W_j$  es el peso calculado con el método AHP del criterio  $j$ .

Las ponderaciones de los criterios muestran la importancia relativa de cada uno de ellos en la decisión. Criterios más importantes tendrán pesos más altos.

### 4. Determinación de la solución ideal y la solución anti-ideal

Se calcula la solución ideal ( $C^+$ ) y la solución anti-ideal ( $C^-$ ) en función de los valores máximos y mínimos en cada columna de la matriz de decisión ponderada ( $V$ ). La fórmula para la solución ideal ( $C^+$ ) y la solución anti-ideal ( $C^-$ ), donde  $m$  es el número de criterios, es:

$$C_j^+ = \max(V_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, \dots, m$$

$$C_j^- = \min(V_{ij}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{y } j = 1, 2, \dots, m$$

Las soluciones ideal y anti-ideal representan los mejores y peores escenarios posibles respectivamente. Estas sirven como puntos de referencia para evaluar las alternativas.

### 5. Cálculo de la distancia a la solución ideal y la solución anti-ideal

Se calcula la distancia euclidiana entre cada alternativa y la solución ideal y la solución anti-ideal. La fórmula para la distancia a la solución ideal ( $D_i^+$ ) y la distancia a la solución anti-ideal ( $D_i^-$ ), donde  $n$  es el número de alternativas y  $m$  es el número de criterios, es:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - C_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - C_j^-)^2}$$

Se calcula la distancia euclidiana de cada alternativa a la ideal y anti-ideal para medir qué tan cerca o qué tan lejos está de estos escenarios extremos. Esto permite determinar el coeficiente de proximidad.

### 6. Cálculo del coeficiente de proximidad

Se calcula el coeficiente de proximidad relativo a cada alternativa:

$$P_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

La puntuación de proximidad relativa representa la cercanía relativa de una alternativa a la solución ideal.

### 7. Clasificación de las alternativas

Las alternativas se clasifican de acuerdo al valor  $P_i$ . Cuanto más cercana a 1 sea la puntuación, mejor será la alternativa (la mejor alternativa elegida no solo tiene la distancia más corta desde la solución

ideal positiva, sino también la distancia más larga desde la solución ideal negativa (Arroyo-Cañada & Gil-Lafuente, 2019).

Los métodos AHP y TOPSIS son adecuados para el estudio realizado debido a que ambos métodos han sido ampliamente utilizados y validados para problemas de selección multi-criterio (Shukla, Agarwal, Rana y Purohit (2017); Yadav, Joseph y Jigeesh (2018)). Además, no requieren información probabilística de los datos analizados, por lo que son adecuados cuando se dispone solo de información determinística de las alternativas.

### *Aplicación del análisis de sensibilidad*

En este análisis se varían las valoraciones de los criterios introducidas en el método AHP (aumentando o disminuyendo los valores de cada criterio en un 10% aproximadamente) y se observa cómo cambia la clasificación TOPSIS. Este análisis ayuda a identificar los criterios más importantes y las entradas de datos más sensibles que tienen el mayor impacto en la clasificación final.

## **MATERIAL E INFORMACIÓN RECOPIADA**

Después de investigar sobre los PCM disponibles localmente, se identificaron varias sustancias como potenciales acumuladoras de calor. Estas incluyen aceite de coco, grasa vacuna, cera de soja, estearina y parafina, todas ellas de pureza industrial. Además, se seleccionaron dos PCM de pureza analítica, denominados RT 25 HC y RT 28 HC, suministrados por la compañía Rubitherm.

La lista de sustancias PCM consideradas en este trabajo, ya caracterizadas, se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 1: Caracterización de los PCM.*

PCM	Pureza	Calor latente (kJ/kg)	Rango de Temperatura de Cambio de Fase (°C)
Aceite de coco	Industrial	105,0	15 - 22.5
RT 25 HC	Analítica	230,0	25 - 26
RT 28 HC	Analítica	250,0	28 - 29
Grasa Vacuna	Industrial	100,0	28 - 37.5
Cera de soja	Industrial	175,1	45 - 57
Estearina	Industrial	198,8	52 - 58.5
Parafina	Industrial	123,5	52 - 60

La tabla 2 muestra las propiedades termo-físicas encontradas en la bibliografía y en las hojas técnicas:

*Tabla 2: Propiedades termo-físicas de los PCM considerados.*

PCM	Punto de fusión (°C)	Punto de solid. (°C)	Costo (ARS / kg)	Calor latente (kJ/kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
Aceite de coco	22,5	15,0	10000,0	105,0	920,0	0,3	2,8
RT 25 HC	26,0	25,0	24844,2	230,0	825,0	0,2	2,0
RT 28 HC	29,0	28,0	22286,5	250,0	825,0	0,2	2,0
Grasa Vacuna	37,5	28,0	1260,4	100,0	914,2	0,7	3,5
Cera de soja	48,0	33,0	2400,0	175,1	900,0	0,3	1,9
Estearina	58,5	51,0	6000,0	198,8	940,0	0,3	2,6
Parafina	59,0	37,0	2900,0	123,5	825,0	0,2	3,5

## RESULTADOS

### *Pre-selección de los materiales*

Después de filtrar la lista inicial con los requisitos presentados en la sección de Metodología, se seleccionaron los PCM que cumplen con estos requisitos. El aceite de coco fue descartado, si bien su temperatura de fusión de 24 °C cumple con los requisitos establecidos, su temperatura de solidificación reportada de 15 °C se encuentra por debajo del rango objetivo de 20 a 32 °C. Por lo tanto, no fue incluido en el análisis posterior mediante AHP y TOPSIS para la selección final de los PCM más adecuados. Resulta importante tener en cuenta la temperatura de solidificación de los PCM debido a que en este trabajo se buscan materiales PCM destinados al calefaccionado de viviendas.

La Tabla 3 muestra los PCM preseleccionados, junto con las cuatro propiedades más relevantes para el problema planteado.

*Tabla 3: Pre-selección de los PCM.*

PCM	Costo (ARS / kg)	Calor latente (kJ/kg)	Conductividad térmica (W/m °C)	Calor específico (kJ/kg °C)
RT 25 HC	24844,2	230,0	0,2	2,0
RT 28 HC	22286,5	250,0	0,2	2,0
Grasa Vacuna	1260,4	100,0	0,7	3,5
Cera de soja	2400,0	175,1	0,3	1,9
Estearina	6000,0	198,8	0,3	2,6
Parafina	2900,0	123,5	0,2	3,5

### *Ponderación de los criterios mediante el método AHP*

A continuación, se establece el orden de importancia de los criterios de entrada del método AHP y TOPSIS. El costo fue considerado el criterio de mayor importancia, seguido por el calor latente, la conductividad térmica y, en último lugar, el calor específico del material. La valoración inicial de estos criterios se presenta en la Tabla 4.

*Tabla 4: Entrada del método AHP.*

Prioridades AHP		Comparaciones por pares	
		¿Cuánto más?	
Costo (ARS / kg)	vs.	Calor latente (kJ / kg)	2
Costo (ARS / kg)	vs.	Conductividad térmica (W / m °C)	4
Costo (ARS / kg)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	6
Calor latente (kJ / kg)	vs.	Conductividad térmica (W / m °C)	3
Calor latente (kJ / kg)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	5
Conductividad térmica (W / m °C)	vs.	Calor específico (kJ / kg °C)	5

Estos valores se utilizan como entrada para el método AHP a fin de determinar la relación de importancia de cada propiedad. Los resultados obtenidos del AHP se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del método AHP.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	49,0%	1
Calor latente (kJ / kg)	30,8%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	14,9%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	5,3%	4
CR	0,07	

Los resultados del método AHP muestran que el costo tiene una prioridad del 49,0% y que es la propiedad más importante; el calor latente tiene el segundo lugar con una prioridad del 30,8%; la conductividad térmica tiene una prioridad del 14,9%, y el calor específico tiene una prioridad del 5,3%.

El valor de CR de 0,07 indica que la consistencia de las comparaciones realizadas en el proceso de AHP es aceptable y confiable.

### Resultados del método TOPSIS

Se aplica el método TOPSIS para evaluar la idoneidad de los PCM para su aplicación en acumulación de calor para colectores solares calentadores de aire. La Tabla 6 muestra la matriz final obtenida.

Tabla 6: Matriz final para el método TOPSIS.

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,387	0,087	0,184	6
RT 28 HC	0,384	0,101	0,207	5
Grasa Vacuna	0,101	0,387	0,794	1
Cera de soja	0,205	0,196	0,489	2
Estearina	0,323	0,093	0,224	4
Parafina	0,254	0,154	0,378	3

Según estos resultados, se determinó que la grasa vacuna obtuvo la mejor puntuación, seguida de la cera de soja, la parafina, la estearina, el RT 28 HC y el RT 25 HC.

### Resultados del análisis de sensibilidad

Se realiza el análisis de sensibilidad considerando variaciones en la importancia relativa de cada propiedad evaluada. En la Tabla 7 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad considerando el costo, mientras que en la Tabla 8 se muestran los resultados considerando el calor latente.

Tabla 7: Resultados del análisis de sensibilidad considerando el costo.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	66,6%	1
Calor latente (kJ / kg)	19,0%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	10,5%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	3,9%	4
CR	0,13	



PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,517	0,054	0,094	6
RT 28 HC	0,514	0,062	0,108	5
Grasa Vacuna	0,062	0,517	0,893	1
Cera de soja	0,262	0,259	0,497	2
Estearina	0,430	0,096	0,182	4
Parafina	0,316	0,208	0,397	3

Tabla 8: Resultados del análisis de sensibilidad considerando el calor latente.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	48,2%	1
Calor latente (kJ / kg)	30,3%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	17,0%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	4,5%	4
CR	0,16	

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,384	0,086	0,183	6
RT 28 HC	0,381	0,099	0,206	5
Grasa Vacuna	0,099	0,383	0,795	1
Cera de soja	0,205	0,194	0,486	2
Estearina	0,320	0,092	0,223	4
Parafina	0,254	0,151	0,373	3

En ambos casos, se observa que la clasificación de los PCM se mantiene consistente y confiable.

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad considerando la conductividad térmica, cuyos resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados del análisis de sensibilidad considerando la conductividad térmica.

Propiedad	Prioridad	Clasificación
Costo (ARS / kg)	44,2%	1
Calor latente (kJ / kg)	41,1%	2
Conductividad térmica (W / m °C)	10,6%	3
Calor específico (kJ / kg °C)	4,1%	4
CR	0,17	

PCM	Si+	Si-	Pi	Clasificación
RT 25 HC	0,346	0,116	0,252	6
RT 28 HC	0,344	0,134	0,281	5
Grasa Vacuna	0,134	0,346	0,720	1
Cera de soja	0,189	0,184	0,494	2
Estearina	0,291	0,106	0,267	4
Parafina	0,240	0,140	0,369	3

Una vez más, se encontró que la clasificación de los PCM es consistente y confiable.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Se emplearon las técnicas TOPSIS y AHP para seleccionar los materiales de cambio de fase más adecuados en sistemas de calentamiento solar de aire con fines de calefacción de viviendas.

En la aplicación del método AHP no se consideró el criterio de la temperatura de cambio de fase, ya que este fue utilizado previamente como restricción para la pre-selección de los PCM candidatos. Por lo tanto, las temperaturas de fusión y de solidificación no se incluyeron en la matriz de comparaciones del AHP, quedando solo los criterios de costo, calor latente, conductividad térmica y calor específico.

Los resultados del AHP mostraron la siguiente importancia relativa de los criterios evaluados: costo (0,490), calor latente (0,308), conductividad térmica (0,149) y calor específico (0,053). Estos pesos se utilizaron posteriormente en el análisis TOPSIS para clasificar los PCM en función de sus puntajes de desempeño.

De acuerdo al análisis TOPSIS, la grasa vacuna obtuvo la mejor puntuación (0,794), seguida por la cera de soja (0,489), la parafina (0,378), estearina (0,224), RT28HC (0,207) y RT25HC (0,184).

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados de la selección. Para ello, se variaron los pesos de los criterios y se observó que la clasificación final no se alteró frente a los cambios en la entrada introducidos. Esto demuestra la consistencia y confiabilidad del proceso de selección.

Los valores de CR obtenidos en el análisis de sensibilidad resultaron levemente superiores al valor recomendado de 0,1, siendo de 0,13, 0,16 y 0,17 para las variaciones en el costo, el calor latente y la conductividad térmica, respectivamente. Si bien estos valores indican una inconsistencia en las comparaciones realizadas, los mismos se consideran aceptables ya que no invalidan las conclusiones obtenidas ni la clasificación resultante de los PCM mediante el método TOPSIS. En todo caso, debido a que el análisis de sensibilidad arrojó un resultado del TOPSIS robusto y confiable, el hecho de tener un valor de CR superior a 0,1 implica que el análisis se hizo incluso seteando valores de los pesos de las comparaciones de a pares más allá de lo que el análisis de sensibilidad recomienda.

En cuanto a los materiales evaluados, se encontró que los dos PCM de la compañía Rubitherm cumplían con los requisitos de temperatura establecidos. Estos materiales mostraron resultados competitivos en la clasificación final del TOPSIS. Sin embargo, la grasa vacuna, a pesar de no ser un material de pureza analítica, exhibe la mejor puntuación.

## CONCLUSIÓN

En este estudio, se evaluó la idoneidad de materiales disponibles localmente en la provincia de Salta y dos materiales ofrecidos por la empresa Rubitherm. Los siguientes PCM fueron seleccionados como

candidatos para la acumulación de calor en sistemas de calentamiento solar de aire: grasa vacuna, cera de soja, estearina, parafina, RT 28 HC y RT 25 HC.

Utilizando la combinación de los métodos TOPSIS y AHP se estableció los pesos relativos de los criterios de selección. Los resultados del análisis TOPSIS indicaron que la grasa vacuna es el material más adecuado, seguida de la cera de soja, la parafina, la estearina, RT 28 HC y RT 25 HC. La grasa vacuna resultó ser el PCM más adecuado debido principalmente a su bajo costo y alta conductividad térmica. Si bien los productos Rubitherm mostraron buen desempeño, su alto costo los posicionó en los últimos lugares.

Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados, y se determinó que la clasificación final no se vio afectada significativamente por la variación en los pesos asignados a los criterios. Esto valida la consistencia y confiabilidad del proceso de selección realizado.

En conclusión, este estudio demuestra que la combinación de los métodos TOPSIS y AHP es una metodología efectiva para la selección de PCM en aplicaciones solares térmicas. Los hallazgos brindan información valiosa para que investigadores e ingenieros elijan los materiales PCM más apropiados en función de los requisitos de aplicación. Los resultados también proporcionan una guía confiable para la elección de estos materiales, considerando múltiples criterios relevantes al problema.

## REFERENCIAS

- Aftab, W., Usman, A., Shi, J., Yuan, K., Qin, M., y Zou, R. (2021). Phase change material-integrated latent heat storage systems for sustainable energy solutions. *Energy & Environmental Science*, 14(8), 4268-4291.
- Arroyo-Cañada, F. J., y Gil-Lafuente, J. (2019). A fuzzy asymmetric TOPSIS model for optimizing investment in online advertising campaigns. *Operational Research*, 19(3), 701-716.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mastellone, M., y Vanoli, G. P. (2019). Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: A step-by-step retrofit of a Mediterranean educational building. *Energies*, 12(19), 3661.
- Ehid, R., y Fleischer, A. S. (2012). Development and characterization of paraffin-based shape stabilized energy storage materials. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 84-91.
- Jurinak, J., y K. Abdel. (1978). Sizing of phase change energy units for air based solar heating systems. *Solar Energy* 22:355-9.
- Karami, A. (2011). Utilization and comparison of multi attribute decision making techniques to rank bayesian network options (Tesis de Maestría). Recuperado de <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:his:diva-5276>.
- Karim, R., y Karmaker, C. L. (2016). Machine selection by AHP and TOPSIS methods. *American Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 7-13.
- Saaty, T. L., (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Shukla, A., Agarwal, P., Rana, R. S., & Purohit, R. (2017). Applications of TOPSIS algorithm on various manufacturing processes: a review. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5320-5329.
- Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Kaushik, S. C., y Tyagi, S. K. (2012). Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage: an experimental study. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 107(3), 1345-1352.
- Waqas, A., y S. Kumar. (2011). Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation of buildings in hot and dry climates. *International Journal Green Energy* 8(1):1-24.
- Xu, H., Sze, J. Y., Romagnoli, A., y Py, X. (2017). Selection of phase change material for thermal energy storage in solar air conditioning systems. *Energy Procedia*, 105, 4281-4288.
- Yadav, S. K., Joseph, D., & Jigeesh, N. (2018). A review on industrial applications of TOPSIS approach. *International Journal of Services and Operations Management*, 30(1), 23-28.
- Yinping, Z., G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, y H. Di. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment* 42(6):2197-209.
- Yoon, K., y Hwang, C. L. (1985). Manufacturing plant location analysis by multiple attribute decision making: Part II. Multi-plant strategy and plant relocation. *International Journal of Production Research*, 23(2), 361-370.

Zhou, G., Y. Zhang, Q. Zhang, K. Lin, y H. Di. (2007). Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates. *Applied Energy* 84:1068–77.

### **ASSESSMENT OF THE MOST SUITABLE PHASE CHANGE MATERIALS FOR HEAT STORAGE IN A SOLAR AIR HEATER**

**ABSTRACT** In this work a methodology to evaluate the most suitable PCM for solar air heaters using multi-criteria decision-making methods (MCDM) is presented. Specifically, a combination of the TOPSIS and AHP methods is used to rank materials based on cost, latent heat, thermal conductivity, and specific heat capacity. PCM available locally and commercialized with melting points in the range of 20-70°C were evaluated. The AHP method determined weights for each criterion, which are used in the TOPSIS analysis. Results showed that beef tallow achieved the highest score, followed by soy wax, paraffin, stearin, and finally two paraffins marketed by Rubitherm. A sensitivity analysis verified the robustness of the ranking. The study demonstrates an effective methodology for selecting optimal PCM for solar thermal applications using multiple relevant criteria.

**Keywords:** Phase change materials, Solar air heater, Thermal efficiency, TOPSIS and AHP analysis.