

# CÁLCULO DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (MCF) PARA UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN POR ABSORCIÓN

Por Dr. C. César A. Cisneros Ramírez\* e Ing. Ariel Díaz León\*\*

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (Ceter), La Habana, Cuba.

\*<https://orcid.org/0000-0002-9969-801X>

E-mail: cesar@mecanica.cujae.edu.cu

\*\* Autor independiente

## Resumen

En la investigación se realiza el cálculo de dos intercambiadores de calor, acumuladores de energía, que emplean materiales que experimentan cambio de fase (MCF). En uno de los intercambiadores, el material cambia de fase a temperatura de 121 °C y en el otro a 0 °C. La energía acumulada en el intercambiador de alta temperatura se emplea para suplir el calentamiento en el generador de la máquina de absorción, mientras que la energía acumulada en el intercambiador de baja temperatura se emplea para lograr el enfriamiento en el evaporador de dicha máquina. Los materiales de cambio de fase empleados son el eritritol para el calentamiento y hielo para el enfriamiento. La capacidad de frío de la máquina de absorción es de 7 kW. Como resultado se logró obtener las dimensiones principales de cada uno de los intercambiadores.

*Palabras clave: material de cambio de fase (MCF), sistema de refrigeración, transferencia de calor, climatización por absorción.*

---

## CALCULATION OF AN ENERGY STORAGE SYSTEM WITH PHASE CHANGE MATERIAL (MCF) FOR AN ABSORPTION AIR CONDITIONING SYSTEM

### Abstract

In the investigation, the calculation of two heat exchangers, energy storage heat exchangers, using materials undergoing phase change (MCF) is carried out. In one of the exchangers, the material changes phase at a temperature of 121 °C and in the other at 0 °C. The energy stored in the high-temperature exchanger is used to supply the heating in the absorption machine's generator, while the energy stored in the low-temperature exchanger is used for cooling in the absorption machine's evaporator. The phase change materials used are erythritol for heating and ice for cooling. The cooling capacity of the absorption machine is 7 kW. As a result, the main dimensions of the individual heat exchangers were obtained.

*Keywords: phase change material (PCM), refrigeration system, heat transfer, absorption air conditioning.*

---

## I. Introducción

El sistema de climatización por absorción (SCA) es un medio para producir frío que, al igual que el sistema de refrigeración por compresión, aprovecha las sustancias que absorben calor al cambiar el estado de líquido a gaseoso (Cengel y Boles, 2000). Así como en el sistema de compresión el ciclo se hace mediante un compresor, el ciclo de absorción se basa físicamente en la capacidad que tienen algunas sustancias de absorber otra sustancia en fase de vapor (absorción).

Estos sistemas trabajan con energía térmica como principal fuente, la cual puede ser obtenida a través de gases de escape y mediante la energía solar, la cual tiene un carácter intermitente, por lo que para un trabajo continuo del sistema de refrigeración se hace necesario adicionar un sistema de acumulación de energía, con el fin de suministrar esa energía acumulada al sistema de refrigeración en los momentos de déficit de energía solar (Cabeza *et al.*, 2020).

El sistema de acumulación se escogió del tipo *intercambiador de tubos y coraza*.

Estos intercambiadores de calor de casco y tubo son ampliamente utilizados en la industria y su diseño ha experimentado gran desarrollo.

Como medios de acumulación se escogieron materiales de cambio de fase (MCF) ya que estos tienen mayor densidad de energía (cantidad de energía por unidad de masa o volumen) que los materiales que no cambian de fase. Los materiales escogidos son el eritritol y el hielo (Höhlein *et al.*, 2017). El primero cambia de fase a 121 °C y el segundo a 0 °C. Por tanto, el objetivo de la investigación es calcular las dimensiones y parámetros fundamentales para el sistema de acumulación de energía con MCF para el sistema de climatización por absorción amoníaco-agua de 7 kW de potencia.

## Situación energética en Cuba

En la actualidad, las energías renovables representan solo el 4,3 % de la generación eléctrica del país, para el 2030 se prevé sean del 24 % (Minem, 2019).

Acorde al cambio de la matriz energética de la nación, se proyectaron los objetivos estratégicos siguientes:

- Aumentar el porcentaje de utilización de las fuentes renovables de energía.
- Reducir la dependencia de importaciones de combustibles para la generación.
- Reducir los costos de la energía entregada por el Sistema Energético Nacional (SEN).
- Reducir la contaminación medioambiental (gramos de CO<sub>2</sub> por kWh).

Una de las vías para lograr estos objetivos, es mediante el uso de la energía solar en sistemas domésticos e industriales. Cuba, país tropical, tiene magníficas condiciones para su empleo, comportándose la radiación promedio anual alrededor de los 5 kWh/m<sup>2</sup> (Bérriz y Álvarez, 2016; Álvarez y Gutiérrez, 2021).

## Materiales de cambio de fase (MCF)

El calor latente es la cantidad de energía que se almacena en un material cuando cambia su estructura molecular,

su fase o su estado de hidratación. Esta forma de almacenamiento posee grandes ventajas frente a las otras (Argiles, 2012):

- Gran densidad de almacenamiento, muy superior a la de calor sensible y similar a la de las reacciones termoquímicas, por lo que se elimina la necesidad de construcción de grandes instalaciones.
- Reducción de las pérdidas energéticas derivadas de la variación de temperatura (necesaria en la forma de almacenamiento sensible).
- Posibilidad de selección de la temperatura de trabajo (proceso de carga y descarga energética del material) según las necesidades.

Entre los posibles cambios de fase, el más interesante es el de sólido a líquido (Oliver *et al.*, 2012), y aunque la cantidad de energía almacenada es inferior a los sucedidos en otros cambios de estado (sólido-gas), la variación de volumen es menor.

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos.

## II. Materiales y métodos

El objetivo del trabajo se centró en el cálculo de un sistema de acumulación de energía con MCF para un sistema de climatización por absorción de 7 kW de potencia frigorífica. Este sistema de acumulación está compuesto por dos intercambiadores de calor que deberán ser capaces de cumplir la función del generador y del evaporador presentes en el sistema de climatización por absorción. Como muestra la Figura 1, la instalación queda formada por un generador, un absorbedor, un condensador, un evaporador y los dos tanques intercambiadores de calor, además de una bomba y el sistema de colectores solares.

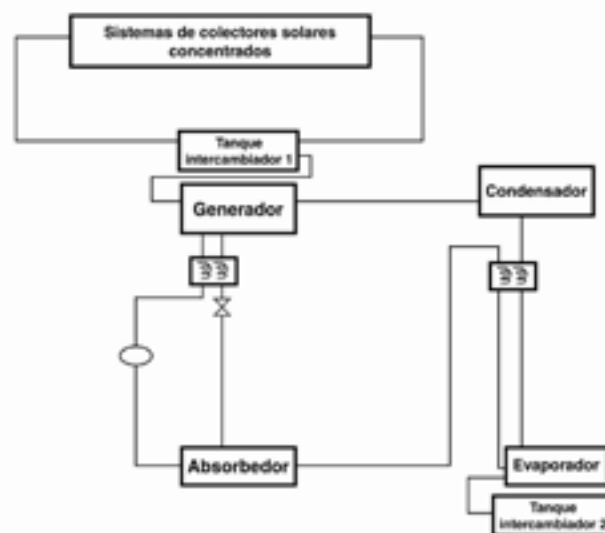


Fig. 1: Esquema del sistema de acumulación térmica en el sistema de climatización por absorción.

Los dos intercambiadores de calor considerados para el cálculo del sistema son de tipo tubo y coraza. Por los tubos circula el fluido de trabajo y en el espacio exterior de los tubos se encuentra el MCF.

En el diseño de los tanques, el material de cambio de fase se consideró en base a investigaciones realizadas en cuanto a MCF utilizados y otros diseños realizados previamente (Argiles, 2012), tomando como solución general, el eritritol para el tanque calentador y el hielo para el tanque de enfriamiento. La temperatura de calentamiento del fluido tomó 136 °C y el tiempo de autonomía 8 horas.

Asumiendo un Coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) de 0,7 (Cengel y Boles, 2000) y el trabajo de la bomba aproximadamente nulo:

$$COP = \frac{q_G}{W_b + q_G} \quad (1)$$

Se obtiene que el calor a entregar en el generador debe ser  $q_G = 10$  kW. Este valor es la potencia para la cual se realizó el cálculo del intercambiador de alta temperatura.

### Cálculo de los tanques

Para la realización de este proyecto se tomaron cuatro variantes de diámetro de tuberías para tubos de acero, mostrados en la Tabla 1 (Azbel y Cheremisinoff, 1986).

Tabla 1. Tuberías normalizadas de acero

Diámetro exterior		Espesor
pulgadas	metros	milímetros
1/8	0,0105	2,00
1/4	0,0135	2,35
3/8	0,0172	2,35
1/2	0,0213	2,65

La energía a acumular ( $E$ ) se determinó (ecuación 2) a partir de la potencia necesaria en el generador ( $q_G$ ) y el tiempo de autonomía ( $\tau$ ). A partir de lo cual la masa de MCF ( $M_{MCF}$ ) necesaria en el intercambiador se determinó (ecuación 3) a partir de la energía a acumular y el calor de cambio de fase del MCF ( $\Delta h_{MCF}$ ),

$$E = q_G \cdot \tau \quad (2)$$

$$E = M_{MCF} \cdot \Delta h_{MCF} \quad (3)$$

El fluido de trabajo ( $m_{FT}$ ) se determinó (ecuación 4) a partir del flujo de calor a intercambiar en el generador de la máquina de absorción y las temperaturas de entrada y salida impuestas por el proceso ( $t_{FT,entrada}$  y  $t_{FT,salida}$ ).

$$m_{FT} = \frac{q_G}{C_{p,FT}(T_{FT,entrada} - T_{FT,salida})} \quad (4)$$

La cantidad de tubos ( $N_{tubos}$ ) se calculó (ecuación 5) a partir del diámetro de los tubos ( $d_{int}$ ), la densidad promedio del fluido de trabajo ( $\rho_{FT}$ ) y la velocidad recomendada para flujo por el interior de tuberías ( $v_{FT}$ ), la cual se asumió de 0,5 m/s (Munson y Okiishi, 2013).

$$N_{tubos} = \frac{m_{FT}}{v_{FT}(\rho_{FT} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot d_{int}^2)} \quad (5)$$

El área de transferencia de calor ( $A_{TC}$ ) necesaria para cumplir con las necesidades energéticas de traspaso de calor se determinó (ecuación 6) a partir del calor a intercambiar ( $q_G$ ), el coeficiente global de traspaso de calor ( $U$ ) y la diferencia de temperaturas entre los medios que intercambian calor ( $\Delta t_{log}$ ), ecuaciones 7 y 8 respectivamente (Bergman *et. al.*, 2011).

$$A_{TC} = \frac{q_G}{U \cdot \Delta T_{log}} \quad (6)$$

La determinación del coeficiente global de traspaso de calor se realizó determinando la resistencia total al paso del calor, la cual está compuesta por la resistencia del lado del fluido de trabajo, por la pared del tubo y por la del lado del MCF;  $R_{FT}$ ,  $R_{pared}$  y  $R_{MCF}$  respectivamente.

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{FT} + R_{pared} + R_{MCF}} \quad (7)$$

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{FT,entrada} - T_{MCF}) - (T_{FT,salida} - T_{MCF})}{\ln \left[ \frac{T_{FT,entrada} - T_{MCF}}{T_{FT,salida} - T_{MCF}} \right]} \quad (8)$$

La longitud de los tubos ( $L_{tubos}$ ) se determinó (ecuación 9) a partir del área de transferencia de calor ( $A_{TC}$ ) necesaria para lograr el calor a intercambiar.

$$L_{tubos} = \frac{A_{TC}}{N_{tubos} \cdot d_{ext} \cdot \pi} \quad (9)$$

El volumen del tanque depende del volumen total del MCF y el volumen de los tubos (ecuaciones 10 y 11).

$$V_{tubos} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{ext}^2 \cdot L_{tubos} \cdot N_{tubos} \quad (10)$$

$$V_{tanque} = V_{MCF} + V_{tubos} \quad (11)$$

Las dimensiones de la coraza, ancho ( $W$ ), altura ( $H$ ) y largo ( $L$ ) se determinan a continuación:

La anchura del tanque ( $W$ ) depende del número de tubos, el paso entre tubos, el número de filas y el diámetro (ecuación 11).

$$W_{tanque} = \frac{2 \cdot N_{tubos} \cdot S \cdot d_{ext}}{\lambda} \quad (12)$$

Cálculo de la altura (H) del tanque (ecuación 13):

$$H_{tanque} = \frac{Z \cdot X \cdot S}{2} \quad (13)$$

Cálculo de largo del tanque teniendo en cuenta los pasos del fluido por los tubos (ecuación 14):

$$L_{tanque} = \frac{V_{tanque}}{W_{tanque} \cdot H_{tanque} \cdot Z} \quad (14)$$

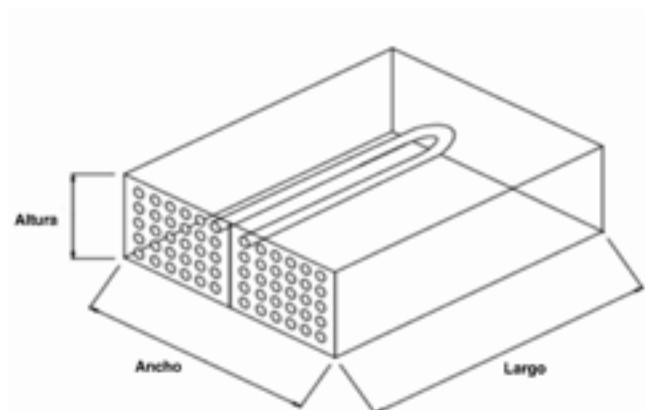


Fig. 2. Vista del tanque y distribución de los tubos.

### III. Resultados

#### Tanque de calentamiento asociado al generador

Este tanque almacena la energía usando eritritol con temperatura de cambio de fase de 121°C. Para calcular las dimensiones del tanque fueron seleccionadas cuatro variantes de diámetros de tubos (Tabla 1).

Tabla 2. Resultados para el intercambiador calentador

Datos				
Potencia (kW)	10			
Tiempo de trabajo (h)	8			
Diámetro exterior de los tubos (m)	0,0213	0,0172	0,0135	0,0105
Resultados de los cálculos				
Cantidad de tubos	8	14	26	48
Volumen del Tanque (m³)	0,603	0,600	0,596	0,594
Ancho del intercambiador (m)	0,187	0,265	0,386	0,554
Altura del intercambiador (m)	0,141	0,114	0,089	0,069
Largo del intercambiador (m)	3,815	3,326	2,889	2,576

#### Tanque de enfriamiento asociado al evaporador

El MCF de este tanque es hielo, el cual cambia de fase a temperatura de 0 °C.

La Tabla 3 muestra los datos de entrada iniciales y resultados de cálculo.

Tabla 3: Resultados para el intercambiador enfriador

Datos				
Potencia (kW)	7			
Tiempo de trabajo (h)	8			
Diámetro exterior de los tubos (m)	0,0213	0,0172	0,0135	0,0105
Resultados de los cálculos				
Volumen del Tanque (m³)	0,665	0,663	0,664	0,662
Ancho del intercambiador (m)	0,187	0,227	0,356	0,485
Altura del intercambiador (m)	0,141	0,114	0,089	0,069
Largo del intercambiador (m)	4,205	4,290	3,486	3,282

#### Cálculo económico

A partir de los precios en el mercado internacional se realizó el cálculo económico. Se consideraron los precios de las tuberías y las planchas de acero en ambos casos. El precio de los tubos es de 700 USD por tonelada y el de las planchas es de 450 USD por metro cuadrado (Alvarado, 2014). De aquí se obtiene que el precio final del tanque es:

Diámetro (pulgadas)	Calentador (USD)	Enfriador (USD)
1/2	1440	1540
3/8	1438	1620
1/4	1572	1728
1/8	1817	2015

Del cálculo realizado se obtiene que el costo específico del sistema de acumulación oscila entre los 205 a 260 \$/kW para el caso del calentador y 220 a 287 \$/kW para el caso del enfriador.

### IV. Conclusiones

El empleo de intercambiadores de acumulación de energía para un sistema de refrigeración por absorción, constituye una opción para hacer continuo el funcionamiento de estos sistemas empleando energía solar u otra fuente intermitente.

La investigación realiza el cálculo de las dimensiones principales de los intercambiadores de calor para el calentamiento y para el enfriamiento con el empleo de materiales de cambio de fase. Este cálculo fue completado con el

cálculo del costo de los acumuladores, el cual arrojó que su costo específico oscila entre los 200 a 287 \$/kW

## V. Referencias bibliográficas

- Alvarado Verdín, V. M.A. (2014). *Ingeniería económica. Nuevo enfoque* (1ra ed.). México
- Álvarez Hernández., O. y Gutiérrez Gárciga, T. (2021). Atlas de radiación solar de la República de Cuba. doi:10.13140/RG.2.2.16821.40167
- Argiles Pérez, M. (2012). *Design of PCM thermal storage unit for a HVAC system*. Universidad de Lleida.
- Azbel, D. y Cheremisinoff, N. (1986). *Chemical and Process Equipment Design vessel design and selection* (Vol. 1): Edición Revolucionaria.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., y Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7<sup>th</sup> ed.): John Wiley & Sons, Inc.
- Bérriz Pérez, L. y Álvarez González, M. (2016). *Manual de calentadores solares*. Editorial Cubasolar, La Habana, Cuba, 194 pp. 978-959-7113-49-2
- Cabeza, L. F., Martorell, I. y Berneche, C. (2020). Introduction to thermal energy storage systems. In L. F. Cabeza (Ed.), *Advance in Thermal Energy Storage Systems. Methods and Applications* (pp. 749-775).
- Cengel Y. A., y Boles, M. A. (2000). *Termodinámica* (6 ed.).
- Höhlein, S., König-Haagen, A., y Brüggemann, D. (2017). Thermophysical Characterization of MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES). *Materials*, 10(444). doi:10.3390/ma10040444
- Minem (2019). Decreto Ley No.345, Ley del desarrollo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía, GOC-2019-1063-095 (28 de noviembre de 2019). Gaceta oficial No. 95 Ordinaria. Gaceta oficial de la República de Cuba. <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2019-095.pdf>
- Munson, B. R., y Okiishi, T. H. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Seventh ed.). United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Oliver, A., Neila, J. y García Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica.pdf. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131-140. doi:10.3989/mc.2012.58010

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

**Contribución de los autores:** César A. Cisneros Ramírez, conceptualización, investigación, redacción-revisión y edición; Ariel Díaz León, análisis formal, metodología, supervisión y redacción-borrador original.

Recibido: 22 de octubre de 2022

Aprobado: 19 de noviembre de 2022