

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE CALOR CON CAMBIO DE FASE PARA SECADO SOLAR.

Gabriel Eduardo Díaz Russo^{*+} - gabriel.diazrusso@gmail.com

Miguel Angel Condori^{*} - miguel.angel.condori@gmail.com

Fabiana Noelia Altobelli^{*} - fab_i_altobelli@yahoo.com.ar

Gonzalo José Durán^{*} - gondur99@yahoo.com.ar

⁺Programa Energías Renovables y Cambio Climático. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Gobierno de la Provincia de Salta.

^{*}Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.
Te: 54-387-4255424, Fax: 54-387-4255489

Tema 9: Sistemas de acumulación.

Resumen. *Los sistemas de acumulación son vitales en sistemas de aprovechamiento térmico de la energía solar al permitir superar la limitación de la variabilidad del recurso solar. En el presente trabajo se ensaya un sistema de acumulación por cambio de fase con el uso de Acetato de Sodio Trihidratado. Las razones para la elección de este material se hallan en la temperatura a la cual se produce el cambio de fase, su disponibilidad y su costo. Primeramente fue ensayada una unidad de acumulación aislada obteniendo el punto de cambio de fase de la unidad, su curva de carga y descarga, y sus propiedades físicas de calentamiento. Luego fue ensayado un pequeño prototipo del sistema propuesto, compuesto por varias de estas unidades de calentamiento, expuesto a flujos de aire caliente con temperaturas similares a las que se obtienen a la salida de colectores solares que se utilizan en una aplicación de secado solar. Los resultados muestran gran factibilidad para plantear su empleo a mayor escala, quedando por realizarse mayores ensayos.*

Palabras-clave: *Acumulación térmica, Cambio de fase, Acetato de sodio trihidratado, Secado solar.*

1. INTRODUCCIÓN

Los conocidos problemas de agotamiento de las fuentes fósiles de combustible, y su correlación con la problemática de las emisiones de gases de efecto invernadero, provocan el direccionamiento de los esfuerzos hacia el empleo de fuentes renovables de energía. En este contexto, la energía solar es considerada hoy en el mundo como una de las de mayor proyección. Sin embargo, la limitación de su aprovechamiento en las horas de sol del día la torna poco viable cuando se plantea su utilización en una escala de importancia. La solución a este problema se encuentra en los sistemas de acumulación (Kenisarin y Mahkamov, 2006).

Dentro de los sistemas de acumulación, adquieren particular importancia los materiales que presentan cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés, Phase Change Materials). Este tema ha sido el foco de numerosas investigaciones en el campo de la energía solar durante los últimos 27 años (Zalba, et al, 2003). Lo trascendental de estos sistemas está dado por el hecho de que el material empleado se caracteriza por tener la propiedad de acumular calor sensible hasta llegar a la temperatura en la cual ocurre su cambio de fase; a partir del momento en que se presenta este fenómeno el material sigue acumulando energía en forma de calor latente, el cual es un proceso que se realiza a temperatura constante hasta que se produce todo el cambio de estado. Puede darse la situación que ante la disponibilidad de un mayor recurso solar continúe aumentando la temperatura del material acumulando calor sensible pero con una capacidad calorífica correspondiente al nuevo estado. Al caer la fuente de energía, el material comienza a ceder el calor acumulado durante el día, retornando a su estado de menor contenido energético, logrando de esta manera extender la autonomía del sistema.

El desarrollo de métodos de acumulación de calor es sumamente importante para los procesos industriales que utilizan la energía solar térmica para lograr sus objetivos, como es el caso del secado de productos agrícolas. En el secado solar, una actividad importante en el noroeste de Argentina, principalmente en los Valles Calchaquíes, la discontinuidad del recurso energético durante la noche puede ocasionar la pérdida del producto por formación de hongos, además de extender el tiempo necesario para el secado. Con las tecnologías existentes, por lo general son requeridos tiempos de secado mayores al día, por lo que las horas de sol aprovechables en la mayoría de los casos no son suficientes para llevar a cabo estos procesos y lograr valores nocturnos de temperatura y humedad que garanticen un producto final de características óptimas para su comercialización.

Desde hace unos años se viene trabajando en el departamento de San Carlos, Salta, con sistemas solares que permiten el secado industrial de vegetales. Con estos sistemas se ha logrado obtener una producción continua de productos secos y reducir el tiempo de secado solar de productos tales como pimiento para pimentón secado en vaina, de tres o cuatro semanas a tres días de sol (Durán y Condorí, 2009; Condorí et al., 2009). La fuente de calor en este caso es proporcionada por un banco de calentadores solares de aire (Fig. 1) en los cuales se ha llegado a registrar temperaturas de salidas superiores a los 60 °C (Fig. 2), las que son perniciosas para la calidad del producto.

Generalmente los procesos en cámaras de secado para productos frutihortícolas deben ocurrir a temperaturas entre los 40°C y 50°C, dependiendo del tipo de producto, por lo que una forma de amortiguar el exceso de energía solar se puede lograr con la inclusión de un sistema PCM cuyo cambio de fase ocurra a una temperatura cercana a los 60°C.



Figura 1- Banco de colectores de aire. San Carlos, Salta.

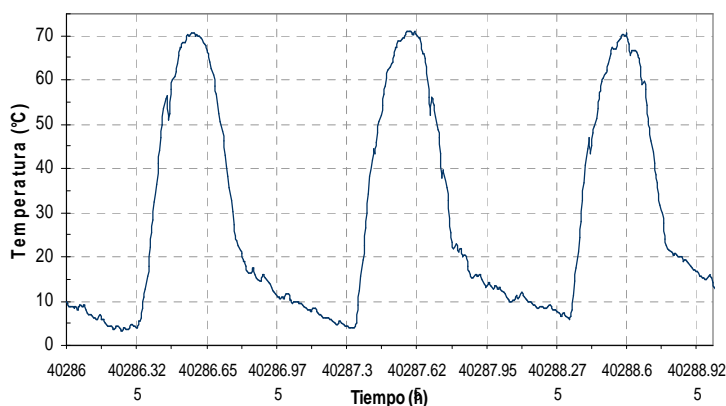


Figura 2- Temperatura de flujo de aire a la salida del colector.

La inclusión de un sistema PCM permitiría proteger al producto de quemaduras por exceso de temperatura, también amortiguar los cambios de la temperatura en la cámara de secado y la prolongación del proceso de secado más allá de la puesta del sol con la consecuente reducción del tiempo de secado final.

En el presente trabajo, el acetato de sodio trihidratado ($C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$) fue elegido como PCM, este compuesto comprende una sal cuya temperatura de cambio de fase se encuentra, de acuerdo a la bibliografía, a los 58 °C (Kenisarin y Mahkamov, cit op). Este valor de temperatura de cambio de fase pone de manifiesto su potencialidad para ser empleado en sistemas de acumulación solar térmica para aplicaciones de media temperatura. Otro aspecto positivo a destacar es su disponibilidad, facilidad de acceso y bajo costo, lo que lo transforma en un material muy atractivo para ser incluido en sistemas de acumulación.

Como antecedentes locales en la temática debe mencionarse que años anteriores, en el Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO) fue diseñado y experimentado un prototipo de acumulador de calor sensible, para ser utilizado como parte de un sistema de acondicionamiento térmico de un invernadero hidropónico (Saravia, et. al.2000). En el mismo se utilizaron envases de politereftalato de etilenglicol (PET) (que se caracterizan por ser de consumo masivo y cuya disposición final constituye un gran problema ambiental), llenos con agua como fluido de acumulación. Dicho acumulador fue ensayado durante los meses de verano, empleándose posteriormente sus resultados en un invernadero de mayores dimensiones (Echazú, et. al, 2002).

No se encontraron, sin embargo, en la región experiencias de acumulación de calor en acetato de sodio trihidratado. Esto puede deberse a que la mayoría de estudios generalmente han sido enfocados en acumulación de calor en materiales para acondicionamiento de viviendas y edificios, donde las temperaturas requeridas son menores a las del secado de productos agrícolas.

A partir de lo anteriormente mencionado puede denotarse la importancia de la experiencia que aquí se muestra para obtener parámetros de análisis para la aplicación de este tipo de acumuladores, en lugares donde los valores de radiación solar son importantes durante gran parte del año, y se los podría aprovechar de una manera más eficiente y con mayor autonomía.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elección del PCM a utilizar en las experiencias se tuvieron en cuenta una serie de parámetros, entre los que se pueden destacar la temperatura de salida de los calentadores de aire, la temperatura requerida en los procesos de secado solar de productos alimenticios, la temperatura de cambio de fase del material a utilizar, la accesibilidad al producto seleccionado y su costo. Teniendo en cuenta los parámetros arriba mencionados se realizó una revisión bibliográfica y se escogió como material al acetato de sodio trihidratado, dado que es una sal que se consigue fácilmente en el mercado, tiene un punto de cambio de fase a una temperatura muy similar a la de salida de los colectores solares planos que se utilizan en los procesos de secado solar y no posee un costo elevado.

Se empleó para la experiencia Acetato de Sodio Trihidratado ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) de calidad ACS, marca Ciccarelli. De acuerdo a la bibliografía, este compuesto presenta su punto de fusión a los 58°C , calor de fusión de 265 KJ/Kg , calor específico sólido de $1.97 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ y calor específico líquido de $3.22 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ (Garg, H., et al, 1985).

Para la elección del recipiente contenedor se tuvo en cuenta la hermeticidad del mismo, la inocuidad en contacto con el aire, su vida útil, el costo y fundamentalmente la optimización del intercambio de calor con el aire. Con respecto a este último punto se tuvo en cuenta la experiencia anterior de acumulación de calor sensible con agua donde se utilizaron botellas PET, generalmente de $2 \frac{1}{4}$ lts como contenedor. Estas son fácilmente apilables y se puede formar un arreglo de un conjunto de ellas con buen contacto de las superficies con el aire y que puede ser tratada en forma análoga a un acumulador del tipo lecho de piedras (Saravia et al., 2000). En nuestro caso se optó por utilizar botellas de 500 cm^3 con la hipótesis de que se puede mejorar el intercambio térmico respecto de la experiencia citada al utilizar cuerpos más pequeños.

La botella y el acetato forman una nueva unidad compuesta de acumulación por lo que se procedió a determinar experimentalmente la temperatura de fusión de un contenedor lleno de acetato en estado sólido. Si bien éste inicialmente tiene una granulometría fina, es altamente higroscópico y al momento del llenado de la botella no se consigue un vacío de aire por lo que la experiencia también permitió observar el comportamiento y la resistencia de las botellas ante los cambios de volumen por dilatación y compresión del PCM.

2.1. Determinación de las curvas de carga y descarga de la unidad de acumulación.

Se construyó un dispositivo de calentamiento para la unidad de acumulación, el mismo consiste en un termo de acero inoxidable en el que se incorpora un volumen medido de agua, al que se le coloca en su parte exterior un aislamiento térmico constituido por una placa de caucho sintético flexible, quedando hermético al momento del ensayo. Se trabajó con la hipótesis de pérdidas despreciables durante el tiempo de la experiencia, por lo que se puso especial atención a la reducción de las mismas de manera de considerar que el calor almacenado en el agua se transfiere en su totalidad a la unidad de acumulación o viceversa.

A continuación se llenó una botella PET de 500 cm^3 con acetato de sodio trihidratado, la cual fue pesada en primera instancia vacía y luego llena con el compuesto, empleando para este paso una balanza de precisión Scout Pro de Ohaus de precisión de $0,1 \text{ gr}$. La botella vacía pesó $17,4 \text{ gr}$ y el acetato $479,9 \text{ gr}$. La tapa de la botella fue sellada con cinta de teflón y en ella se hizo un pequeño orificio por donde se introdujo una termocupla tipo K (NiCr-Ni) con vaina de acero inoxidable, colocando luego sellador siliconado. Esta termocupla se utiliza para obtener los registros del cambio de temperatura experimentado por el PCM en el interior del dispositivo durante la experiencia. También fue colocada otra termocupla similar a la anterior en contacto con el agua contenida en el termo (Fig. 3).

Para determinar la curva de carga se elevó la temperatura del agua con una resistencia eléctrica hasta llegar aproximadamente a los 80°C de temperatura, se procedió a colocar en el dispositivo de calentamiento la botella con Acetato de Sodio Trihidratado, cerrándolo luego, tratando que quede lo más hermético y aislado posible. A partir de este momento fueron registrados los datos de temperatura del agua y del PCM en la botella cada dos minutos. Estos datos fueron cargados en una planilla de Cálculo Excel para graficar luego la curva de carga del material. Se determinó la temperatura a la que se produce el cambio de fase del material, observando en la experiencia el punto en el que la temperatura del compuesto se mantuvo constante, produciendo una meseta en la gráfica.

Para medir la curva de descarga se introdujo la botella con acetato de sodio resultante del paso anterior, que se encontraba a aproximadamente la temperatura de cambio de fase, en un termo con agua a temperatura ambiente. Cuidando de minimizar el tiempo empleado en el cambio, se cerró nuevamente el recipiente y se tomaron los datos de temperatura del agua y de la botella con el compuesto (Fig. 4), observando como ahora el acetato le cedía calor al agua con el transcurso del tiempo hasta equilibrar sus temperaturas.



Figura 3- Vista superior del termo aislado y la botella con acetato de sodio ubicada en su interior.



Figura 4- Dispositivos empleados para el registro de temperatura.

2.2. Construcción de un sistema de acumulación de laboratorio.

Una vez lograda la determinación del punto de cambio de fase de la unidad de acumulación con acetato de sodio trihidratado, se procedió a evaluar el comportamiento de un conjunto de unidades similares, en un túnel de aire caliente controlado en laboratorio.

Se construyó para esto un túnel para contener y aislar el sistema de acumulación de calor y conducir aire caliente por los contenedores de acetato. Dicho túnel posee una forma rectangular, se encuentra construido en su totalidad por poliestireno expandido, sus medidas externas son 23cm. de ancho, 20 cm. de alto y 74 cm. de largo, con paredes de 2 cm. de espesor, a excepción del piso que posee una pared doble, presentado de esta manera un espesor de 4 cm. El interior fue revestido con otro aislante térmico, poliuretano expandido de 0.5 cm. de espesor con una cara aluminizada. Posee dos aberturas, una para la entrada del aire caliente y otra para salida del flujo de aire, siendo estas de 13.5 cm. de diámetro.

En la boca de entrada de flujo de aire se encuentra la fuente de calor, construida por un caño de plástico de 24 cm. de largo y 9 cm. de diámetro con pared de 0.8 cm. de espesor, aislado exteriormente con una placa de caucho sintético flexible de 0.5 cm. de espesor, dentro del cual se colocó una resistencia eléctrica de 600 Vatios que es a partir de la cual se proporciona el calor necesario al dispositivo. La resistencia se encuentra conectada a un variador de tensión de manera de poder controlar la temperatura con la que el flujo de aire ingresa al túnel. Antes de la fuente de calor fue ubicado un ventilador del tipo cooler para fuentes, de 9 cm. de diámetro con el fin de forzar el flujo de aire.

Dicha fuente de calor se encuentra unida al túnel por medio de un tubo de poliestireno expandido de forma cónica aislado en su interior también por poliuretano expandido. En la zona interior de la boca de entrada del aire al túnel se añadieron varias mallas plásticas con un reticulado de 1.5 cm x 2.0 cm, espaciadas para lograr que el flujo de aire se distribuya lo más uniformemente posible en forma de flujo turbulento desarrollado (Fig. 5). Todo el sistema fue sellado en sus uniones con silicona para evitar las pérdidas de flujo de aire.

El sistema contó con recirculación de aire, la abertura de salida fue conectada por medio de dos codos de PVC y un tubo corrugado de chapa de aluminio, a la boca de captación de la fuente de calor. Esto permitió controlar temperaturas de flujo superiores a las de cambio de fase del material acumulador durante toda la experiencia.

Dentro del túnel, a partir de una distancia de 5 cm. de la boca de salida y en dirección a la boca de entrada, fueron ubicadas 10 botellas PET de 500 cm³ de capacidad conteniendo acetato de sodio trihidratado, las mismas se dispusieron en dos filas de 5 botellas de manera alternada (Fig. 6). Se dejó un pleno de unos 20 cm. entre la boca de entrada del aire y las primeras botellas para permitir el desarrollo del flujo de aire. Para finalizar, todo el túnel fue revestido exteriormente con papel aluminizado.

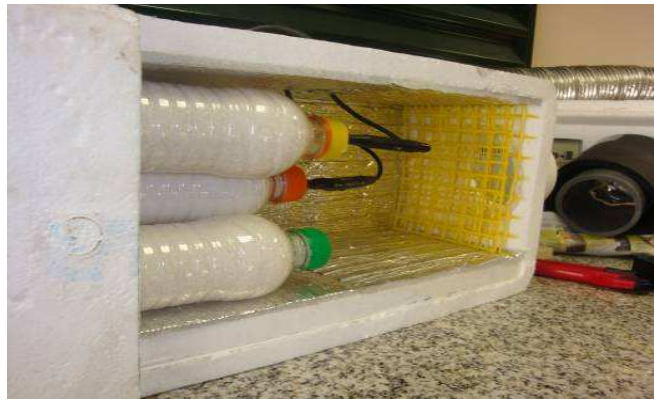


Figura 5- Sistema de acumulación construido en el Laboratorio. Vista interior boca de entrada de flujo de aire con malla plástica para darle un régimen turbulento.



Figura 6- Sistema de acumulación construido en el Laboratorio. Vista disposición de botellas y termocuplas conectadas a las botellas.

2.3. Curvas de carga y descarga del dispositivo de acumulación de calor con acetato de sodio.

Se inició la experiencia con la puesta en funcionamiento del dispositivo (ventilador para forzar el flujo y resistencia para elevar la temperatura), dejándolo acumular calor durante 8 a 10 horas aproximadamente, buscando reproducir la cantidad de horas de sol aprovechable en un día medio. En todo momento se trabajó con recirculación de aire y se buscó que la temperatura de entrada se encuentre entre los 65 °C y los 80 °C, con el fin de simular las condiciones de temperatura que se pueden registrar mediante colectores solares calentadores de aire.

Una vez que el compuesto acumuló el calor necesario y se produjo su cambio de fase, se procedió a apagar la resistencia eléctrica, dejando el ventilador funcionando para que se produzca la descarga del sistema, y se abrió el sistema de recirculación para permitir el ingreso de aire ambiente y simular de esta manera el comportamiento nocturno.

Las variaciones de temperatura en diferentes puntos del dispositivo fueron registradas continuamente, para esto se instalaron cinco termocuplas tipo K convenientemente calibradas. Las mismas fueron ubicadas oportunamente de la siguiente manera: una en la entrada al túnel (Temp_C(1)), tres en distintas botellas con acetato de sodio trihidratado (dos en las botellas que quedaron en el centro de cada paquete de 5 (Temp_C(2) y Temp_C(4)), una en uno de los vértices, elegida de manera aleatoria (Temp_C(3)) y la última a la salida del túnel (Temp_C(5)). Todas estas termocuplas fueron a su vez conectadas a un Datalogger marca CAMPBELL modelo CR-1000, al cual se le estableció una frecuencia de registro de cinco minutos.

Por último se colocó un anemómetro manual de hilo caliente marca TSI modelo Velocicalc 8245 en el pleno anterior a la primera fila de botellas partiendo desde la boca de entrada, para medir el flujo de aire que llega a las mismas.

3. RESULTADOS

3.1. Determinación del punto de cambio de fase. Curva de carga y descarga.

Para determinar el punto de cambio de fase del acetato de sodio trihidratado se efectuó la experiencia en el dispositivo antes descrito. Se llevaron a cabo dos repeticiones de la misma, en la Fig. 7 se muestran los resultados de una de ellas. De las curvas de carga del material se estableció que el cambio de fase del compuesto con el que se trabajó es de 57.7 °C, coincidente con los datos bibliográficos que lo ubican en 58 °C. El pico en la temperatura del agua que se

observa en la curva de carga se debe al recalentamiento que se efectuó de este fluido para lograr que le ceda mayor calor al compuesto en estudio.

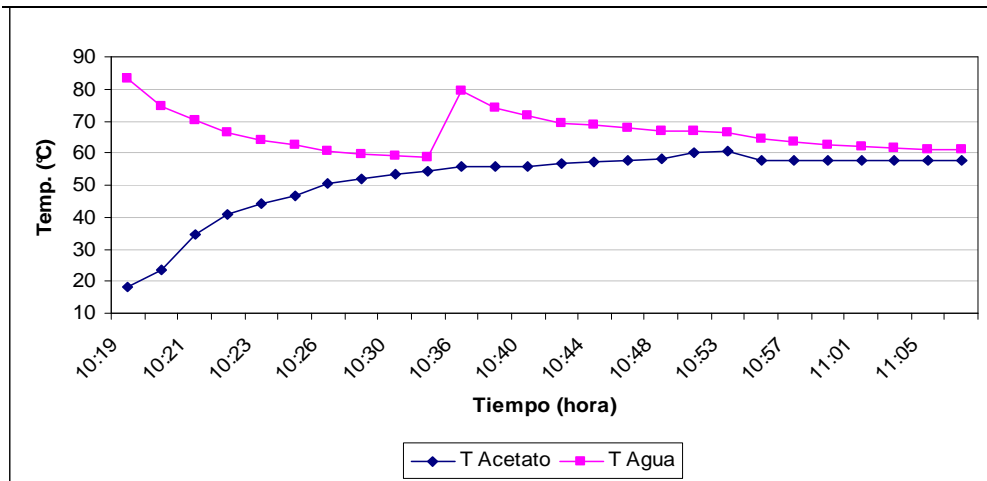


Figura 7 - Curva de carga Acetato de Sodio Trihidratado. Segundo ensayo

A partir de los datos de variación de temperatura, obtenidos en la experiencia, se procedió a calcular el calor específico y el latente de cambio de fase de la unidad de acumulación, compuesta por la botella de 500 cm³ con acetato de sodio trihidratado en su interior. El calor cedido por el agua es ganado por la unidad de calentamiento primero como calor sensible, elevando su temperatura. Mediante la igualación de estas dos cantidades se puede determinar el calor específico de la unidad de calentamiento, ec. (1).

$$C_p = \frac{(M * C_a * \Delta T)}{(m * \Delta T_s)} \tag{1}$$

Donde C_p es el calor específico de la unidad de acumulación, M es la masa de agua, C_a es el calor específico del agua (4,186 KJoule/Kgr. °C) y ΔT es el cambio en la temperatura del agua (°C), m es la masa del PCM y ΔT_s es el cambio de la temperatura del PCM (°C).

El calor específico para la fase sólida de la unidad de acumulación con una masa M de 904,5 gr y una masa m de 497,3 gr obtenido de la experiencia fue igual a 5,54 KJoule/Kgr. °C, siendo aproximadamente el doble de lo que se consigna en la bibliografía. A partir de este valor de calor específico puede ser determinado el calor absorbido por la unidad de acumulación durante el calentamiento sensible utilizando la siguiente fórmula, ec. (2):

$$Q_s = m * C_p * \Delta T_s \tag{2}$$

Donde Q_s es el calor ganado por la unidad de acumulación. En la experiencia el calor absorbido por la unidad de acumulación, para un salto térmico de 36,5 °C, fue de 101,1 KJoule.

Cuando el material llega a la temperatura de cambio de fase, el calor cedido por el agua es acumulado como calor latente hasta que se completa el cambio de fase del PCM en la unidad de acumulación. Mediante la igualación de estas dos cantidades se obtuvo el calor latente involucrado en el cambio de fase, ec. (3):

$$q_l = \frac{(M * C_a * \Delta T)}{m} \tag{3}$$

Donde q_l es el calor latente de fusión. El valor obtenido para este calor latente de la experiencia para la misma unidad de acumulación fue de 166,74 KJoule/Kgr.

Para el cálculo de calor acumulado por la unidad de calentamiento durante el cambio de fase se utilizó la siguiente fórmula, ec. (4):

$$Q_l = m * q_l \tag{4}$$

El calor acumulado durante el cambio de fase fue de 82,92 KJoule.

Para obtener las curvas de descarga (Fig. 8) se procedió a vaciar el termo, el cual fue luego enjuagado y llenado nuevamente con agua a temperatura ambiente. Se introdujo la botella con el compuesto calentado y se selló el

dispositivo para evitar el intercambio de calor con el ambiente. Fueron tomados tanto los datos de temperatura del agua como los de la unidad de calentamiento, observando de esta manera como la mencionada unidad cede calor.

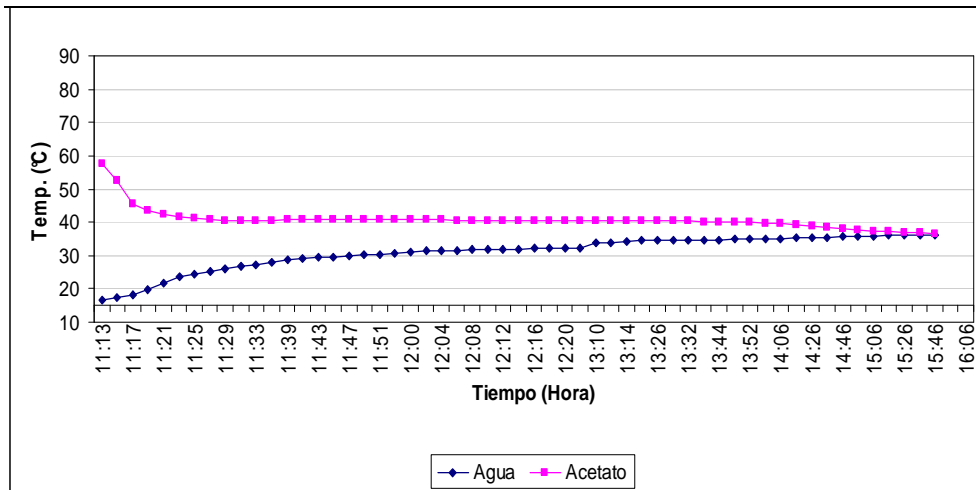


Figura 8– Curva de descarga del Acetato de Sodio Trihidratado. Segundo ensayo.

3.1. Curvas de carga y descarga del acetato de sodio trihidratado dentro del dispositivo de acumulación de calor.

Estas experiencias corresponden al arreglo de 10 unidades de acumulación en contacto con un flujo de aire caliente, la cual comprende una situación similar a la de utilizar colectores solares, contenidas dentro de un túnel. Se repitió la experiencia varias veces para observar si el comportamiento del compuesto sufría algún tipo de modificación ante reiterados procesos de carga y descarga. Se pudo constatar que no se producen variaciones, al obtenerse curvas similares en todas las reiteraciones. Se observaron pequeñas alteraciones en las curvas, estas se deben a cambios introducidos por parte del equipo de trabajo con el variador de tensión que regula la resistencia de calentamiento, lo que produjo aumentos o disminuciones en la temperatura del aire de entrada, esto con el fin de lograr una temperatura adecuada y similar las que se podrían encontrar en situaciones reales de funcionamiento.

A continuación se presentan a modo de ilustración una de las curvas de carga y descarga obtenidas (Fig. 9). La Temp_C(1) de color azul y la Temp_C(5) de color violeta representan las temperaturas de entrada y salida del flujo de aire en el túnel. Las otras tres representan las temperaturas dentro de las unidades de acumulación.

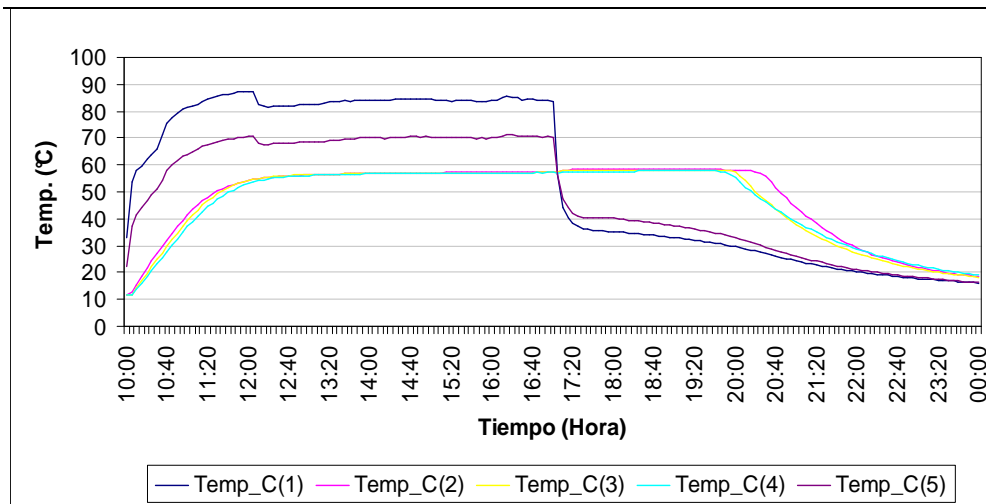


Figura 9 – Curva de carga y descarga del sistema de acumulación con Acetato de Sodio Trihidratado.

Se realizaron cargas entre 8 y 10 horas para asegurar la ocurrencia de cambio de fase en todas las botellas, como surge de la comparación. La descarga se produjo en un lapso de tiempo de entre 6 y 7 horas hasta que se igualaron las temperaturas de las unidades de acumulación y la del ambiente (entrada de aire al túnel). Como puede observarse en la Fig. 9 la temperatura Temp_C(2), correspondiente a una unidad de calentamiento, tiene mayor autonomía que las otras, probablemente esto puede deberse a que se trata de una unidad que se halla ubicada en el centro del arreglo de botellas, recibiendo calor de las que la rodean, aumentando de esta manera su período de descarga.

Puede observarse también que durante el cambio de fase del acetato de sodio trihidratado, al llegar a los 58 °C aproximadamente, las temperaturas de las unidades de acumulación no se mantienen constantes. Esto es debido a que el calor ingresa por las paredes de las botellas, y es luego transmitido por conducción al acetato de sodio trihidratado, por

lo tanto en el momento en que el sensor registra una temperatura similar a la de fusión del material, lo que se tiene en el recipiente es una mezcla de material fusionado y en estado sólido. Esto puede ser interpretado como la causa de que la curva obtenida de la experiencia no refleje la meseta típica del cambio de fase del PCM.

Por observación visual de los ensayos se comprobó que el cambio de fase no se produce en forma uniforme en la botella, sino que ocurre desde la superficie de la botella hacia el centro y desde la tapa de la botella, zona en la que incide el aire caliente, hacia atrás. En todos los casos se esperó el tiempo necesario para que toda la botella estuviese en estado líquido o en estado sólido según fuese carga o descarga. Se observó para todas las repeticiones una compresión del volumen de la botella que puede ser adjudicado a los cambios de presión que ocurren en la fase de solidificación. Sin embargo el material de la botella resultó muy flexible a estos cambios y no sufrió roturas.

En la Fig. 10 se muestra una curva que representa el calor total absorbido (sensible y latente) por la unidad de acumulación en función del tiempo, obteniendo como resultado un valor final de 204,52 Kjoule.

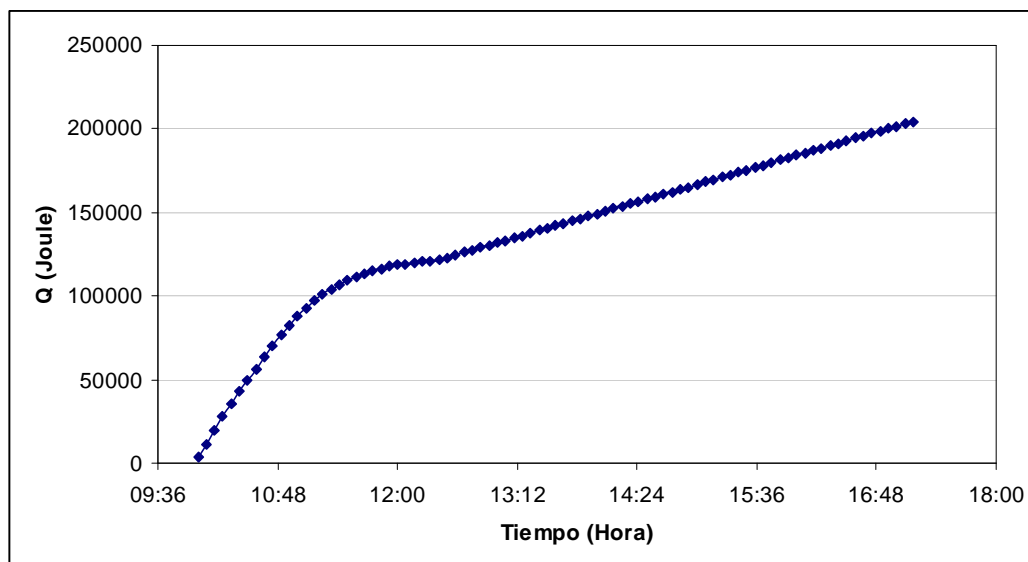


Figura 10– Calor total absorbido por una unidad de acumulación.

4. CONCLUSIONES

Se ha ensayado una unidad de acumulación compuesta de una botella tipo PET con acetato de sodio trihidratado como material de cambio de fase a fin de determinar algunas de las propiedades importantes para el diseño de sistemas de acumulación. Luego fue ensayado un arreglo de diez de estas unidades colocadas en el interior de un sistema con circulación de aire caliente.

En la primer experiencia se obtuvo para el compuesto un valor de calor específico de 5,54 Kjoule/Kgr. y un calor sensible absorbido de 101092,53 Joule para un salto térmico de 36,5 °C.

En el túnel de viento, ensayado en segundo término, se obtuvo un valor de calor total absorbido por la unidad de acumulación de 204,52 Kjoule.

En cuanto a las posibilidades de acumulación para el secado en periodos nocturnos, en la curva de descarga (fig. 9) se observa que la unidad de acumulación durante la primera hora a partir del inicio se mantiene con una temperatura superior a los 40 °C, y con temperaturas aproximadamente de 10 °C por encima de la temperatura ambiente por un periodo de tres horas más. Este tiempo podría ser mayor si se realiza la experiencia con un flujo de menor magnitud que el utilizado en este caso.

Se puede concluir que este material presenta una alta factibilidad de utilización dentro de un sistema de calentadores solares que posean temperaturas de salida por encima de los 60 °C. Pudo constatar que la temperatura de cambio de fase de esta unidad de acumulación se encuentra en los 57.7 °C, muy próximo el valor proporcionado por la bibliografía para acetato puro (58 °C). A su vez el acetato de sodio trihidratado es un material de fácil acceso, relativamente económico. La unidad de calentamiento aprovecha como contenedor un material de desecho como son los envases plásticos de gaseosas, por lo que el costo final de una de estas unidades de acumulación puede llegar a ser mucho más económico que otras opciones. De las experiencias se rescata que las botellas como contenedores no presentan apreciables diferencias o retardo en la transferencia de calor y demostraron ser resistentes a la compresión por solidificación del PCM.

Quedan sin embargo, por realizarse mayores análisis para determinar la vida útil con ciclos de carga y descarga y pruebas a campo con condiciones variables de funcionamiento con sistemas de mayor envergadura de manera de poder concluir con mayor precisión sobre la viabilidad para usar este material en sistemas de acumulación de calor, su eficiencia, así como el período de tiempo durante el cual podría alargarse la autonomía en un sistema a escala real.

5. REFERENCIAS

- Condorí M., Durán G., Vargas D., Echazú R. 2009. Secador solar híbrido. Primeros ensayos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13, 2009; pp 02.35-02.42. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Durán G., Condorí M. 2009. Modelo y simulación de un secador solar pasivo de producción semi industrial. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13, 2009; pp 08.121-08.129. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Garg H., Mullick S., Bhargava A. 1985. Solar thermal energy storage. D Reidel Publishing Company. The Netherlands.
- Kenisarin M., Mahkamov K. 2006. Solar energy storage using phase change materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 11, Issue 9, pp 1913-1965.
- Saravia L., Echazú R., Quiroga M., Robredo P. 2000. Acumulador de agua para climatización de invernaderos armado con botellas de PET.
- Zalba B., Marín J., Cabeza L., Mehling H. 2003. Review on thermal storage with phase change: materials, heat transfer, analysis and applications. Applied thermal engineering. Volume 23, Issue 3, pp 251-283.

STUDY OF A HEAT STORAGE SISTEM WITH PHASE CHANGE FOR SOLAR DRYING.

Abstract. *In the solar energy field, storage systems are vital because they enables overcome the limitation of the variability of solar resources. In the present study a storage system with the use of sodium acetate trihydrate is tested. The reasons for the choice of this material are: the temperature at which phase change occurs, the availability of the material and its cost. Firstly it was tested an isolated accumulation unit getting the phase change point, its loading and unloading curves and its physical heating properties. Later it was tested a small prototype of the proposed system, formed by several of these accumulation units, exposed to hot air flows with temperatures similar to those obtained at the output of solar air collectors that are used in solar drying applications. The results show high feasibility to raise the use of this material on a larger scale, remaining more tests to be done.*

Keywords: *Thermal storage, Phase change, Sodium acetate trihidrated, Solar drying.*