

Planteo, dimensionamiento y simulación de un sistema de acumulación de energía térmica usando sales eutécticas para el suministro de calor en etapas no solares de un deshidratador de alimentos

Raise, dimensioning and simulation of a system of accumulation of heat energy using eutectic salts for heat supply in not solar stages of a food dehydrator

Miguel Ángel Díaz E.¹, Braham David Zapata E.² Gabriel De Jesús Camargo V.³

¹Ingeniero Mecánico (C). Universidad Libre. miguela.diaze@unilibrebog.edu.co

²Ingeniero Mecánico (C). Universidad Libre. brahamd.zapatae@unilibrebog.edu.co

³Ingeniero Químico. Universidad Del Atlántico. Docente Investigador de la Universidad Libre
gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co

Resumen

El uso de energías alternativas se ha masificado mundialmente, con el empleo de fuentes como la radiación solar en la agricultura, esta se ha convertido en un factor importante en la producción. El almacenamiento térmico para periodos prolongados como el secado de alimentos de alta humedad es fundamental para la deshidratación; que tiene una duración entre 10 a 20 horas según el alimento, con un continuo suministro de calor. En esta investigación se planteó y diseño un sistema de acumulación de energía térmica en sales hidratadas eutécticas para el suministro de calor a un deshidratador solar de alimentos en etapas de baja radiación. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de diversos modelos de almacenaje de energía térmica; se analizó estadísticamente la viabilidad y eficacia de los materiales que se requiere para lograr una deshidratación de forma continua; con estos parámetros definidos se procedió al cálculo teórico del sistema que posteriormente se simuló en software de elementos finitos (SolidWorks).

Los resultados muestran que el sistema entrega 10 horas de energía de respaldo por 5 horas de carga, además el encapsulamiento de la sal logra una mejor transferencia y acumulación de energía en un sistema concéntrico almacenador, cumpliendo las especificaciones deseadas.

Abstract

The use of alternative energy has mass worldwide, with the use of sources as solar radiation in agriculture this has become an important factor in the production. The thermal storage for long periods as the drying of high moisture foods is essential to dehydration; that it lasts between 10 to 20 hours depending on the food, with a continuous supply of heat. In this research was raised and design a system of accumulation of heat energy in eutectic hydrated salts for the heat supply to a solar dehydrator food in stages of low radiation. It conducted a literature review of different models of thermal energy storage; statistically analyzed the feasibility and effectiveness of the materials required to achieve a dehydration continuously; with

these parameters defined was the theoretical calculation of the system which was later simulated in software of finite elements (SolidWorks).

The results show that system delivers 10 hours of back-up power for 5 hours of charging, in addition the encapsulation of salt achieves a better transfer and accumulation of energy in a concentric system buffer, meeting the desired specifications.

Palabras Claves

Eutécticas, energía térmica solar, deshidratación de productos alimenticios, acumulación térmica, sales hidratadas.

Key words

Eutectic, solar thermal energy, dehydration of food products, heat accumulation, hydrated salts.

Tabla 1. Nomenclatura usada en el documento

Nomenclatura	
PCM	Material de cambio de fase (sal hidratada)
Re	Numero de Reynolds
ν	Viscosidad cinemática
f	factor de fricción
Un	Numero de Nussel
h	Coefficiente de convección
k	Conductividad térmica
D	Diámetro
Q	calor
h_{if}	Calor de fusión
Δt	Diferencia de tiempo
\dot{Q}	Flujo de calor
$\Delta y, \Delta x$	Diferencial de distancia en el eje x y
ΔT	Diferencial de temperatura
$T_{p+1,n}$	Temp. del punto posterior lineal (x ò y)
r	Radio
T_m	Temperatura de fusión
T_i	Temperatura inicial
T_f	Temperatura final
T_s	Temperatura de superficie
C_p	Calor específico
m	Masa de cambio de fase
m_{am}	Fracción de masa fundida
ΔT_{in}	diferencial de temperatura logarítmica
$T_{p,n}$	Temperatura de nodo
D_o	Diámetro Exterior
Pr	Numero de Prandtl
L	Longitud del sistema de almacenamiento
$T_{p-1,n}$	Temp. del punto nodal anterior lineal (x ò y)

Introducción

Los requerimientos energéticos de la industria alimenticia representan un gran potencial de aplicación para las energías alternativas, sobre todo en lo relacionado con la deshidratación de productos agrícolas, en esta etapa la adecuación de un alimento implica reducir el nivel de agua hasta un mínimo permisible, para desacelerar la descomposición, reducción de costos en el transporte y extender la vida útil del producto. Para lograr una adecuada

deshidratación, el alimento debe ser sometido a una pérdida de humedad mediante el secado con un flujo de aire caliente que es obtenido por radiación solar o por calentamiento del aire indirectamente por medio de calderas. El proceso de secado para alimentos debe durar entre 18 a 24 horas aproximadamente a una temperatura entre 48 a 60 °C, y al finalizar la deshidratación el porcentaje de humedad debe ser entre 15 y 20%. El proceso de deshidratación solar de alimentos al requerir un periodo de tiempo extenso, necesita de un

sistema de apoyo que en etapas no solares aporte el calor faltante para continuar con el proceso de secado, para ello este tipo de dispositivos cuenta con sistemas de almacenamiento de calor, que suplen este déficit de energía, tal como se ve en la Figura 1, [1]-[7].

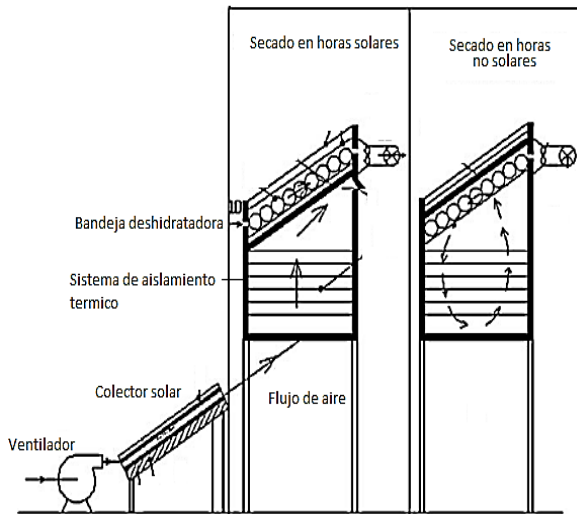


Figura 1. Diagrama descriptivo del sistema deshidratador solar con almacenamiento térmico.

La radiación solar es una fuente abundante de energía gratuita y limpia que se puede aprovechar para diversos propósitos uno de ellos, el almacenamiento de energía térmica, que se puede captar la radiación en forma de calor y transferirse a un material en forma de calor sensible o calor latente. Estos diferentes métodos de almacenamiento de energía térmica (TES por sus siglas en inglés), varían su uso dependiendo de su aplicación y de la relación costo beneficio. En el caso de almacenar la energía en forma de calor sensible se utilizan para cortos periodos de descarga de energía, ya que el principio físico de funcionamiento depende de su capacidad calorífica (C_p), pero las

limitaciones de este método, implica que la energía que el material absorbe o descarga es directamente proporcional a la masa del cuerpo, por lo cual tendrían sistemas de gran volumen con los inconvenientes involucrados para la transferencia de calor, además de ello no se tiene una temperatura controlada, si se requiere, por ejemplo para un proceso industrial. La otra forma de almacenamiento es por medio del calor latente, en el cual el material trabaja en sus puntos de cambio de fase (fusión, vaporación y solidificación). El proceso para transferir cierta cantidad de calor a la masa de un cuerpo de cambio de fase (PCM, por siglas en inglés) se utiliza para acumular grandes volúmenes de energía sin sobredimensionar un acumulador, ya que el principio físico de funcionamiento de estos materiales es el de retener la energía que está siendo usada para pasar de una fase a otra, además de ello el cambio de fase en las sustancias se provoca a una temperatura predeterminada, lo que produce una temperatura de trabajo constante como se aprecia en la Figura 2. Lo que distingue a estos materiales como efectivos para el control de variables del proceso y al compararse con los materiales de calor sensible, se necesita un menor volumen para almacenar la energía por unidad de tiempo como se aprecia en la Figura 3. Varias investigaciones revelan que el medio para transferir energía eficientemente a los acumuladores es por medio de un flujo caloportador de manera indirecta (o sea sin tener en contacto el fluido con el material almacenador), el cual puede ser suministrado por un colector solar de serpentín en el que fluye el líquido caloportador por convección natural hacia el sistema de almacenamiento térmico [1], [8]- [14].

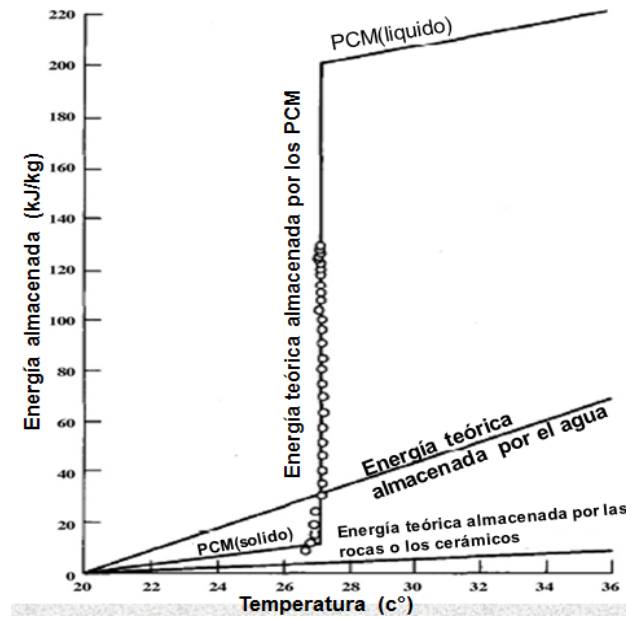


Figura 2. Comportamiento de los materiales de almacenamiento de energía térmica en variación a su temperatura

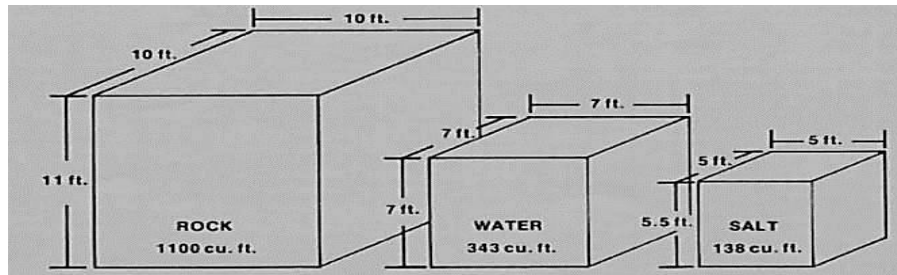


Figura 3. Comparación de volúmenes para almacenar la misma cantidad de energía entre materiales de calor sensible y de calor latente.

Materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía

En esta investigación se hace uso de los PCM para el diseño de un sistema de almacenamiento térmico para el suministro de calor de un deshidratador solar de productos alimenticios debido a la menor cantidad de masa y consecuente volumen implicado. Los PCM basan su almacenamiento en el carácter endotérmico de la fusión, y exotérmico de la solidificación, en el interior de la sustancia,

lo que requiere un trabajo para romper los enlaces entre sus moléculas, que mantienen la masa sólida y del igual forma se requiere disipar el mismo trabajo de la sustancia en fase líquida para convertirla en sólida nuevamente, proceso que se convierte en cíclico aprovechando esta energía, la cual es directamente proporcional a la masa que se desea fundir. Para este proceso se usan diferentes tipos de materiales, ya sea de tipo orgánico o inorgánico y sus diferentes derivaciones como se ve en la Figura 4, [8], [15]-[19].

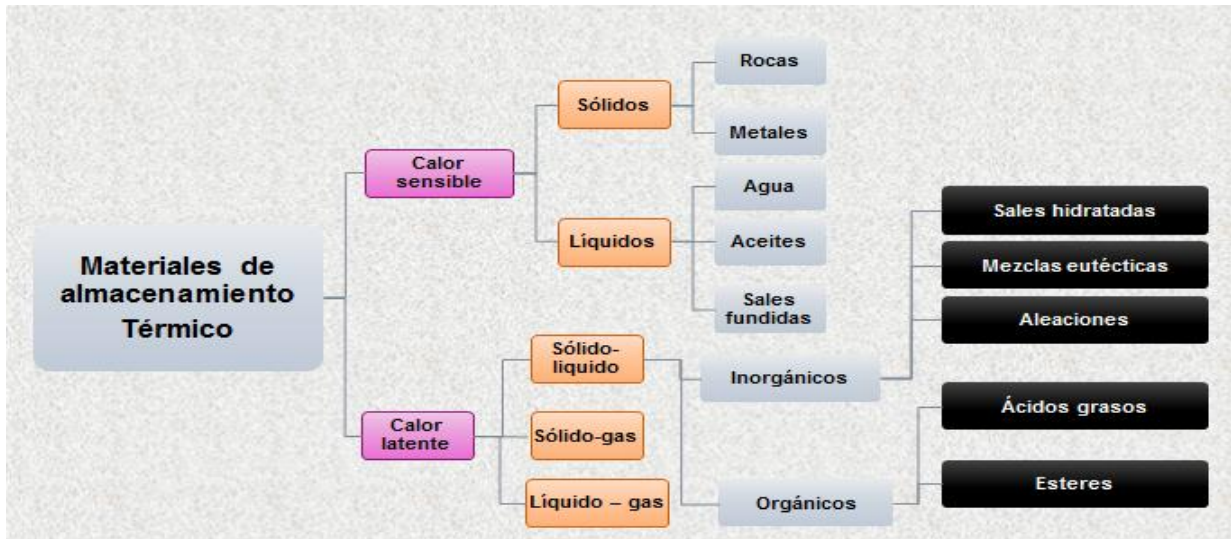


Figura 4. Clasificación de los materiales de almacenamiento térmico.

Una de las ventajas de usar sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos grasos en esta investigación es su temperatura de punto de fusión las cuales rondan en un intervalo de 25°C y 91°C lo cual hace de estos materiales los más factibles para la aplicación en sistemas de almacenamiento para deshidratadores de alimentos. Por ende en el proceso de la investigación se calcula por métodos estadísticos la selección del material que tenga viabilidad y eficacia para los fines del actual proyecto [20], [21], [22].

Mecanismos de transferencia de calor para carga y descarga de energía

Existen diversas formas de transferir calor por todo el sistema de almacenamiento, las tres principales son **la conducción térmica**, en la que hay contacto superficial entre sólidos, **la convección**, en la que hay contacto entre un sólido y un fluido y **la radiación**, en la que se transfiere calor por ondas electromagnéticas. La conducción es la manera más rápida de transferir calor para concentrar energía en un sistema de almacenamiento basado en materiales de

cambio de fase, ya que las moléculas en sólidos presentan mayor vibración estando juntas lo que aumenta la tasa de transferencia de energía, factor fundamental para cargar el acumulador en tiempos cortos de radiación. Para transferir energía proveniente del captador solar se requiere que de un fluido caloportador que circule y cargue el sistema concentrador de calor de manera constante, para ello se determinó usar el sistema de termosifón similar al que se usa en sistemas de agua caliente sanitaria, por su versatilidad y facilidad de construcción. La investigación de los acumuladores de agua caliente sanitaria, se presentan sistemas de circulación por convección natural o termosifones en los cuales el flujo por diferencias de densidades del líquido caloportador en función de su temperatura circula de manera natural, calentándose en la sección que comprende el captador solar, así aumentando su temperatura y enfriándose en el acumulador de agua caliente sanitaria, transfiriendo esa energía proveniente de la radiación solar y convirtiendo este proceso en cíclico [23],[24],[25],[26].

La conducción de calor, en la cual la tasa de transferencia es alta, de acuerdo a la ley de Fourier, en las cuales las variaciones de la cuantía de flujo de calor depende del área, espesores y disposiciones de geometrías de los sólidos en conducción, para lo cual antecedentes experimentales y teóricos han propuesto diferentes formas y conjugaciones en sus sistemas de almacenamiento térmico en base a conducción para la carga y descarga de energía, en el cual se han hecho uso de geometrías de superficies extendidas, analizando el mejoramiento de la

transferencia de calor y su eficacia en la carga completa de la masa del material de cambio de fase y de manera recíproca su descarga, disminuyendo al mínimo las pérdidas de calor y controlando los flujos de calor requeridos para sus respectivas aplicaciones como se muestra en la Figura 9. Además, los materiales de cambio de fase deben ir encapsulados en un material anticorrosivo y polimérico para evitar impacto de estas sustancias sobre el sistema de concentración [1], [8], [9], [10], [18], [21].

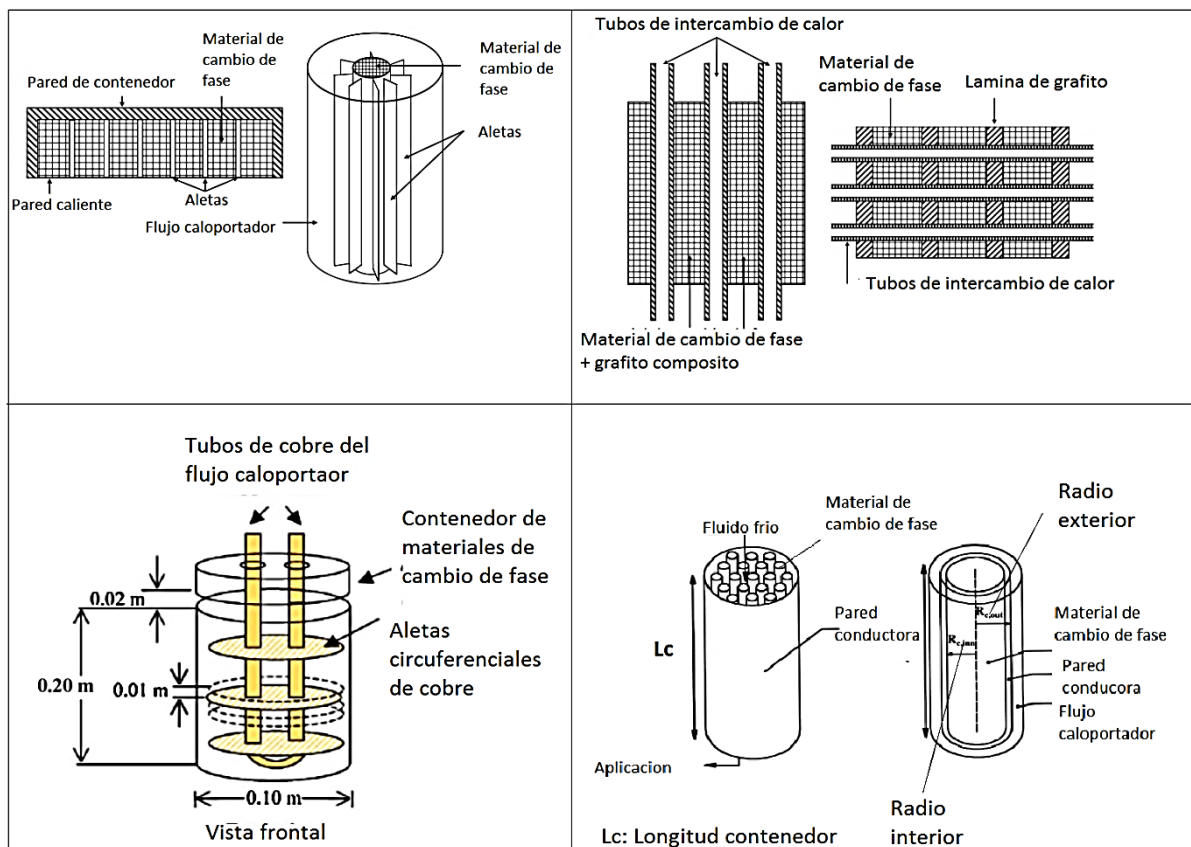


Figura 5. Geometrías y disposiciones de superficies de conducción para el almacenamiento térmico en materiales de cambio de fase según investigaciones estudiadas. [1], [8], [9], [10], [18], [21].

Materiales y Métodos

El diseño del sistema de almacenamiento requirió que se le atribuyeran diferentes factores geométricos, selección de materiales, cálculos térmicos y un diseño final. Para ello la investigación se basó en 3 principales etapas para la obtención de resultados finales, en las cuales se destaca la etapa primaria de estudio de antecedentes, seguida de una etapa de diseño y su posterior simulación para finalizar en la evaluación de resultados, por lo cual la investigación se tipifica como de carácter cuantitativa y explicativa de las decisiones tomadas sobre el diseño.

Estudio de antecedentes

Esta es la etapa primaria de la investigación en la cual se efectuó la revisión teórica de antecedentes sobre la deshidratación de alimentos, con el fin de conocer el procedimiento y los conceptos fundamentales, y así contemplar que parámetros que se deben tener en cuenta para considerar la integración de un sistema de almacenamiento que cubra el déficit de energía que el proceso requiere en etapas no solares; posteriormente se procedió al análisis de documentación del almacenamiento de energía, determinando los parámetros adecuados de diseño como lo son la decisión de forma, materiales acumuladores de cambio de fase, aislamientos y conductores térmicos. En la investigación, se describió los posibles materiales, caracterizándolos por sus propiedades físicotérmicas necesarias para el almacenamiento de energía, entre los cuales por relevancia en estudio se valoraron materiales para el almacenamiento de energía y aislamiento de calor, por lo que autores como Sharma A. [18] menciona el uso de ácidos grasos no parafínicos de tipo orgánico y materiales inorgánicos como

sales hidratadas y eutécticas. Para el almacenamiento de energía en forma de calor el autor menciona que entre las propiedades diferenciadoras de los materiales grasos orgánicos, se encuentran el alto calor de fusión, su inflamabilidad, baja conductividad térmica, bajo punto de ignición, entre otros. Entre los materiales inorgánicos según el autor, los factores diferenciadores son, el alto calor latente de fusión por unidad de volumen, su estabilidad dimensional frente a cambios de temperatura, una conductividad térmica relativamente alta, permisividad de altas temperaturas de fusión por encima de 60 C° , entre otros. En la evaluación de los materiales de cambio de fase se tuvieron en cuenta parámetros que expone el autor sobre propiedades características que son esenciales con el dispositivo de almacenamiento, como lo son un punto de fusión cercano a los 70 C° , la cuál es la temperatura máxima que alcanzaría un sistema de carga termosifónico, alto calor latente que es necesario para un nivel de concentración de energía alto que tendrá el dispositivo, un calor específico elevado, para la acumulación en estado de arranque o sensible del acumulador de calor y alta densidad para mayor acumulación calórica en volumen reducido.

En este punto Sharma. A [18] propone y estudia los siguientes materiales tanto orgánicos e inorgánicos, como el hidróxido de bario octahidratado, el cual contempla un punto de fusión de 78 C° experimentados, un calor latente de 265 J/Kg y una densidad de 2180 kg/m^3 , el problema del material, es su alto costo comercial y su baja viabilidad en altas cantidades; otro material que el autor presenta es el fosfato trisódico dodecahidratado, el cual tiene un punto de fusión de $73,5\text{ C}^\circ$, un calor latente de 190 J/Kg y una densidad de 1620 Kg/m^3 , este material presenta buenas características en bajo costo y cuantía comercial; otro material

es el que presenta autores como Bal. M [1], que menciona el uso de alumbre de potasio, el cual tiene un punto de fusión de 91 C°, un calor latente de 184 J/Kg, y una densidad de 1720 Kg/m³, este material presenta buenas propiedades pero presenta un problema de irreversibilidad en el punto de fusión ya que este al evaporar el agua contenida en su estructura cambia su composición y pierde efectividad para aplicaciones de alto ciclaje; además de estas sustancias los autores como Tyagi. V [10] también analizan materiales como el sulfato de aluminio y sodio, heptadecano-9, acetamida, ácido esteárico y el ácido heptadecanoico, materiales en su mayoría pertenecientes a ácidos grasos que cumple con propiedades de calor latente y densidad, pero se alejan del punto de fusión requerido el cual es el parámetro fundamental del desarrollo y buen funcionamiento del acumulador, el cual está basada esta investigación..

En tanto para materiales de aislamiento en sistemas de almacenamiento de energía, el autor Alkilani. M [9], presenta la espuma de poliuretano rígida y poliuretano expandido R11, materiales que exponen alta estabilidad dimensional y baja conductividad térmica.

El autor describe el poliuretano expandido R11 como un material que presenta unas limitaciones para su uso en dispositivos de almacenamiento de calor de grandes dimensiones (superiores a 200 kg de masa de material almacenador), tales aspectos se caracterizan en un recogimiento superficial del material aislante, debido a que los sistemas de almacenamiento de energía se usan continuamente y por largos periodos de tiempo, y a la vez por su gran peso provocan el deterioro del material aislante, lo que conlleva a pérdidas de estabilidad y de energía en el acumulador, por lo tanto es recomendable aplicarlo en dispositivos de bajo peso (inferiores a 200 kg de masa de

material almacenador); por lo cual el autor afirma que en aplicaciones de gran peso, es recomendable el uso de la espuma de poliuretano rígida, por su gran facilidad de aplicación en grandes volúmenes y estabilidad mecánica.

Con la información de materiales de investigaciones anteriores y de referencias bibliográficas asociadas al tema, se procede al uso de métodos estadísticos de selección de materiales para la ejecución de un diseño preliminar adecuado, viable y eficaz de almacenamiento energético.

El modelo estadístico de selección empleado es el denominado “factores ponderados”; en el cual la asignación de pesos en forma de porcentajes, de las distintas propiedades físicotérmicas de los materiales según su aplicación en el proyecto, calificando con una escala de (0 a 5) todas las propiedades de cada material, para seguidamente multiplicar los pesos con las calificaciones, y sumar todos los resultados de cada propiedad, para tener una calificación final del material que se está evaluando, y así elegir el material de cambio de fase, aislamientos y conductores térmicos que cumpla los requerimientos que se necesiten como se muestra en la Ecuación (1), [27].

$$CFSM = \sum (PPF (\%) \times CPMA) \quad (1)$$

CFSM = Calificación Final de selección del material

PPF = Peso de la propiedad físicotérmica (%)

CPMA = Calificación del valor de la propiedad del material según la aplicación

Diseño preliminar

El diseño preliminar se basa en un análisis técnico y de resultados de investigaciones sobre acumuladores de energía de baja

temperatura, como se aprecia en la Figura 5 presente en páginas anteriores donde autores como Tyagi. V [10], estudian el uso del método de carga interna de materiales de cambio de fase, utilizando tubos de transferencia de calor y placas de grafito en su contorno para la distribución uniforme y rápida de calor a los PCM; otros autores como Bal. M [1] presentan el uso de aletas circunferenciales consecutivas en las cuales el fluido caloportador o de carga principal se encuentra en el centro, y cada una de estas placas circulares deben ir separadas en una corta distancia una de la otra para mantener mejor eficiencia y distribución de carga térmica entre aletas circunferenciales; al igual el autor Laguri. M [21], estudio el uso de aletas longitudinales rectangulares posicionadas hacia el núcleo contenedor del material de cambio de fase, normal a la superficie y equidistanciadas en forma de estrella, formando una geometría que se asemeja al principio de funcionamiento por superficies extendidas para la disipación de calor de un motor eléctrico AC. Otro autor Alkilani. M [9] afirma que el uso de flujos de agua o aire según sea la aplicación, de forma envolvente para cargar un sistema térmico concentrado, es de mayor rapidez de flujo de calor, que un sistema de adentro hacia afuera, ya que el área de transferencia de calor es mayor cuando esta es envolvente. Teniendo en cuenta, los resultados de las investigaciones anteriores, se enfoca en las formas y comportamientos de las diferentes geometrías experimentadas en la mejora de tasa de transferencia de calor, con ello se logra inducir una composición de elementos entre superficies extendidas y encapsulados para el material de cambio de fase, para implementarlos e integrarlos en el núcleo del acumulador de energía, que sea capaz de cumplir con parámetros térmicos de carga y descarga de energía en temperaturas y tiempos preestablecidos.

Diseño Térmico del Sistema de Almacenamiento

Con este diseño se busca dar una autonomía de 10 horas al sistema deshidratador en condiciones de escasa o nula radiación. Para este fin el acumulador de energía debe satisfacer dos requerimientos uno de carga mediante un sistema termosifónico y el otro de descarga por flujo de aire, siendo el último el principal factor que le dará autonomía de secado del alimento durante un tiempo de aproximadamente 10 horas no solares o de escasa radiación. El diseño tiene la siguiente secuencia de cálculos para que el equipo cumpla los parámetros de descarga (caudal de 0.24m³/Kg de aire y temperatura de entrada y salida de 55°C): Cálculo de longitud del dispositivo y masa requerida del material de cambio de fase, cálculo de temperatura efectiva superficial para la carga del núcleo de almacenamiento, análisis en estado estacionario para el dimensionamiento de las superficies extendidas circunferenciales y rectangulares que compone la celdas de almacenamiento, cálculos de volumen de agua para el sistema termosifónico que carga el dispositivo, cálculo de los espesores de los aislamientos para hacer mínimas las pérdidas de calor. Con este procedimiento, se buscó dimensionar el dispositivo, mediante los requerimientos térmicos iniciales y finales que el deshidratador solar necesita para su funcionamiento continuo y mediante la simulación ajustar esas dimensiones y consolidar un diseño final en detalle [28],[29].

Cálculo de longitud del dispositivo y masa del material de cambio de fase

La longitud del tubo central que transporta el aire de intercambio es el dimensionamiento principal para la etapa de descarga de energía al flujo de aire que se dirige a las

bandejas de deshidratación, lo que también fija necesariamente el largo del dispositivo de almacenamiento; para ello se supone el sistema inicialmente como un intercambiador de convección interna forzada, y con los parámetros de descarga antes mencionados, poder calcular el flujo de calor necesario por longitud de tubo central, y así mismo, la masa requerida para mantener dicho calor, para las 10 horas de funcionamiento. Las Ecuación (2-7), constatan esta teoría y muestran a continuación en orden de operación respectivamente.

$$Re = \frac{Vel_{aire} D_{tubo\ central}}{v} \quad (2)$$

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{0,5}*(Pr^{3/2}-1)} \quad (4)$$

$$h = \frac{k_{aire} Nu}{D_{tubo\ central}} \quad (5)$$

$$Q = h * \pi * D_{tubo\ central} * L * \Delta T_{in} * \Delta t \quad (6)$$

$$Masa\ pcm = \frac{Q}{h_{if}} \quad (7)$$

La longitud (L) se calcula mediante iteración verificando que esta cumpla con un perfil térmico e hidráulico de fluido de aire completamente desarrollado en un 66% del tubo central.

Cálculo de la temperatura superficial efectiva de carga de almacenamiento

La Temperatura efectiva de carga, es la temperatura más alta del sistema y en la cual

se realiza el proceso de intercambio indirecto entre el agua del circuito termosifónico y el núcleo donde se encuentran las sales hidratadas. El cálculo de esta temperatura se realizó mediante el análisis de un sistema concéntrico como se muestra en la Figura 11, teniendo en cuenta el flujo de calor y las diferentes resistencias térmicas que se encuentran internamente entre los dos cilindros, compuestas principalmente por superficies extendidas y la sal hidratada, para lo cual se calcula una conductividad térmica equivalente, la cual es un promedio entre el material de alta conductividad y la sal hidratada, relativo al volumen, ocupado por cada material. Para el cálculo de la temperatura efectiva se cuenta inicialmente con parámetros y propiedades de las sustancias ya definidas, para un tiempo de carga de 5 horas de radiación solar plena promedio en Bogotá. Ahora mediante el uso de la Ecuación (10) de flujo de calor, se determina la temperatura efectiva que debe tener el cilindro exterior. A continuación se especifica en orden el proceso de cálculo con sus respectivas ecuaciones, en donde REN es “radio exterior del núcleo”, RTT es “resistencia térmica total”, y TES es “temperatura efectiva superficial.

$$REN = \left(\frac{V_{ocupado\ de\ masa\ PCM}}{\pi * L} + r^2\right)^{0,5} \quad (8)$$

$$RTT = \frac{\ln\left(\frac{R_{Exterior\ núcleo}}{R_{tubo\ central}}\right)}{2\pi * L * K_{Equiv.}} \quad (9)$$

$$TES = \frac{Masa\ pcm * h_{if} * R_{total}}{\Delta t} + T^{\circ} camb\ Fase \quad (10)$$

Cálculo y dimensionamiento de las superficies extendidas rectangulares y circunferenciales

El sistema de almacenamiento de energía basa su funcionamiento en la transferencia de calor, para ello el núcleo de almacenamiento se encuentra compuesto por aletas rectangulares y circunferenciales, como se ve en la Figura 11, que mejoran la tasa de flujo de calor y así mismo la concentración de energía en el acumulador. Para el dimensionamiento, ubicación y número de superficies extendidas requeridas por todo el acumulador se realizó un balance de energía, donde solo se analiza una aleta circunferencial y rectangular de una sección de todo el sistema, resultando la Ecuación (11). Esto con el fin de tener datos exactos de ubicación y volúmenes de encapsulados

de sal hidratada requerida y así repetir este dimensionamiento de celda de almacenamiento por toda la longitud del dispositivo. Para el cálculo de superficies extendidas se usó un análisis en estado estacionario por métodos numéricos, en el cual mediante el proceso de ensayo y error en la iteración de datos de entrada de longitudes de separación de estas tanto rectangulares como circunferenciales como se aprecia en la Figura 6, donde se puede obtener las longitudes de arcos de separación de las superficies extendidas rectangulares óptimos para la transferencia de calor, y así mismo la separación a lo largo del acumulador de las superficies extendidas circunferenciales, definiendo finalmente el volumen que ocupará el encapsulado del material de cambio de fase en cada cavidad como se ve en la Figura 11

$$k\Delta y \frac{T_{p-1,n} - T_{p,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{p-1,n} - T_{p,n}}{\Delta y} + k\Delta y \frac{T_{p+1,n} - T_{p,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{p-1,n} - T_{p,n}}{\Delta y} = 0 \quad (11)$$

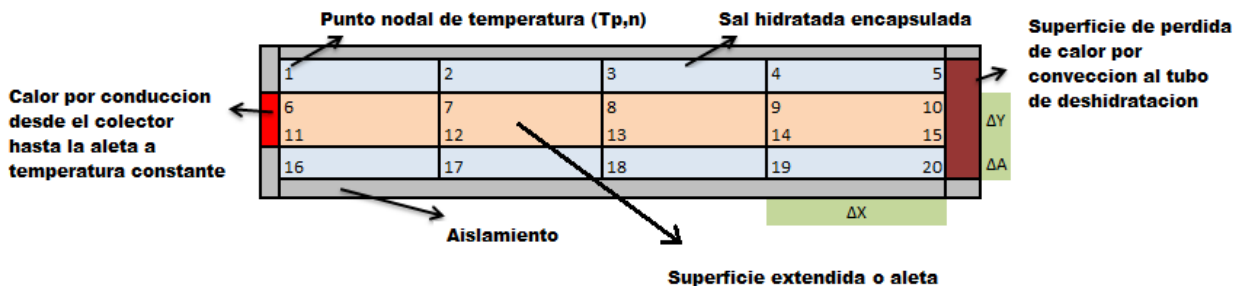


Figura 6. Análisis nodal de la superficie extendida o aleta

Calculo de circuito termosifónico

El cálculo del volumen del fluido termosifónico que cargara el núcleo de almacenamiento, actuará como un sistema de intercambio indirecto envolvente para la carga de energía por convección natural, debe ser calculado para que alcance la temperatura efectiva y así mantener la superficie del núcleo de almacenamiento en condiciones de operación, de este modo evitar fallos en los cálculos por temperaturas menores, que no cumplirían con el fin de fundir completamente el material de cambio de fase. La determinación de este volumen se basó en la teoría de almacenadores de agua caliente sanitaria, donde se hace uso de ecuaciones empíricas que definen el volumen requerido para llegar a temperaturas puntuales como la Ecuación (12). Una vez calculado el volumen se obtiene la holgura que deberá tener el circuito para cumplir estos requerimientos. A continuación se presenta el proceso con ecuaciones, para la obtención de esta holgura. Donde VMP es el “volumen máximo permisible”, RES es el “radio exterior superior”, y HPAC es la “holgura de paso de agua entre cilindros”.

$$VMP = 119 - 1.2 * T_{efectiva\ superficial} \quad (12)$$

$$RES = \left(\frac{VMP}{\pi * L} + (radio\ exterior\ núcleo)^2\right)^{0.5} \quad (13)$$

$$HPAC = R.\ ext\ superior - R.\ ext\ núcleo \quad (14)$$

Cálculo y dimensionamiento del aislamiento térmico

El cálculo del espesor de aislamiento se realiza haciendo un análisis de radios críticos, posteriormente un cálculo del calor perdido en función del aumento del radio, así obteniendo el valor de espesor de aislamiento en donde el flujo de calor al ambiente sea mínimo y que el aumento de este espesor no cambie considerablemente la pérdida de calor, para optimizar costos y evitar sobredimensionamientos del equipo de acumulación de calor. A continuación se muestra el procedimiento para la determinación de este espesor con sus respectivas ecuaciones y posteriormente la gráfica de determinación de espesor en la Figura 7.

$$Re = \frac{Vel_{aire} D_o}{\nu} \quad (15)$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/2}}{(1 + \frac{0,4}{Pr})^{1/4}} * \left(1 + \frac{Re}{282000}\right)^{5/8} \quad (16)$$

$$h = \frac{K_{aire} * Nu}{D_{Tint}} \quad (17)$$

$$\dot{Q} = \frac{T_{efectiva} - T_{ambiente}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{aislamiento}}{r_{exterior\ superior}}\right)}{2\pi * L * K_{aislante}} + \frac{1}{h * (2 * \pi * r_{aislamiento} * L)}} \quad (18)$$

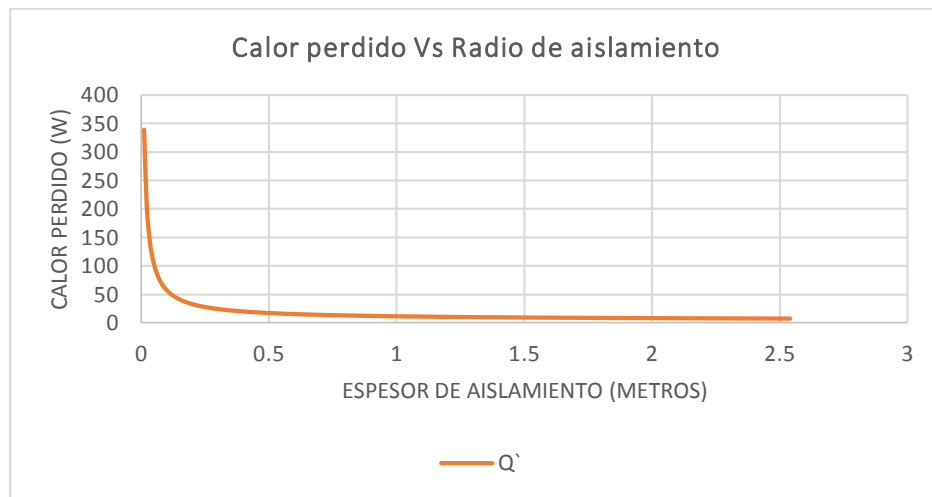


Figura 7. Determinación del espesor de aislamiento en el que se muestra en la gráfica el calor perdido del sistema vs el radio de aislamiento, así aproximándonos a un espesor eficaz, donde la pérdida de calor se mantiene estable y mínima.

Diseño final

Con las dimensiones preestablecidas en el diseño térmico del acumulador, se procedió al diseño en software DAC (diseño asistido por computador), específicamente Solidworks 2014-2015 Student Version, y así se obtiene el dispositivo con materiales y dimensiones reales.

Análisis de carga y descarga de energía

El análisis de carga y descarga del sistema de almacenamiento se realizó con base al método de elementos finitos asistidos por

computadora, en el que se analiza fundamentalmente el comportamiento térmico en estado transitorio hasta el estado estacionario tanto en la etapa de carga como la de descarga, mediante el uso de un enmallado triangular fino basado en curvatura de 4 puntos jacobianos, para alcanzar pequeños espesores como se ve en la Figura 8. Y a su vez mediante la Ec. (19), se obtiene el calor total almacenado en los empaquetados de Fosfato trisódico dodecahidratado.

$$Q = m (C_{p \text{ solido}} (T_m - T_i) + m_{am} h_{if} + C_{p \text{ liquido}} (T_f - T_m)) \quad (19)$$

Malla Detalles	
Nombre de estudio	CARGA (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño máx. de elemento	126.145 mm
Tamaño mín. de elemento	1 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	575269
Número total de elementos	416012
Cociente de aspecto máximo	3995.7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	59.9
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	6.38
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:11:45



Figura 8. Detalles y parámetros de enmallado, para la evaluación por elementos finitos computarizados del sistema de almacenamiento térmico en SolidWorks Thermal Simulation 2014-2015.

Resultados y Discusión

Selección de materiales

En la escogencia de los materiales principales del dispositivo se empleó el

método de los criterios ponderados y los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 2. Materiales principales seleccionados para el sistema de almacenamiento

Tipo de material	Material	Calor específico (J/kg°C)	Conductividad Térmica (W/m°C)	Densidad (kg/m³)	Calor Latente (kJ/kg)	Calificación final de ponderación
Material de almacenamiento	Fosfato Trisódico Dodecahidratado (Sal Hidratada)	2365	0.42	1620	190 (T° de fusión 73.5°C)	4.2
Aislamiento	Espuma Rígida de Poliuretano	800	0.026	130	-	4.125
Conductor Térmico	Cobre Laminado (6mm)	383.1	386	8900	-	3.8

El fosfato trisódico dodecahidratado ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) es una sal utilizada en la industria de agentes químicos para productos de limpieza y de muy bajo costo (\$ 1.1 dólares/kilogramo), el cual como se puede ver en la Tabla 1, es un material de alto almacenamiento de calor sensible y latente lo que lo hace un material eficaz para el almacenamiento de energía, además de ello, cuenta con una alta densidad lo que permite acumular grandes cuantías de energía en reducidos espacios.

El aislamiento de espuma rígida en poliuretano es un material comúnmente utilizado en acumuladores de agua caliente sanitaria y por los resultados de la ponderación resulta ser el material por conductividad, densidad y viabilidad, correcto para la aplicación en la coraza del sistema de almacenamiento.

El cobre laminado (6mm de espesor) es un material de alta conductividad térmica por lo cual lo hace el material perfecto y eficaz para el uso en un sistema concentrador de energía en el cual la meta fundamental es mejora de la tasa de transferencia de calor.

Diseño final del equipo

En el diseño final del equipo se obtuvo un modelo concentrador de superficies extendidas (aletas) circunferenciales y rectangulares que influyen en todos los lados del empaquetado donde se encuentra el material de cambio de fase como se puede observar en la Figura 10 y Figura 11, así aumentando la tasa de transferencia de calor en la carga y disminuyéndola en la descarga en el centro del núcleo. Para así, al final acoplar el sistema de almacenamiento de calor, al circuito del deshidratador solar de alimentos, como se ve en la Figura 9.

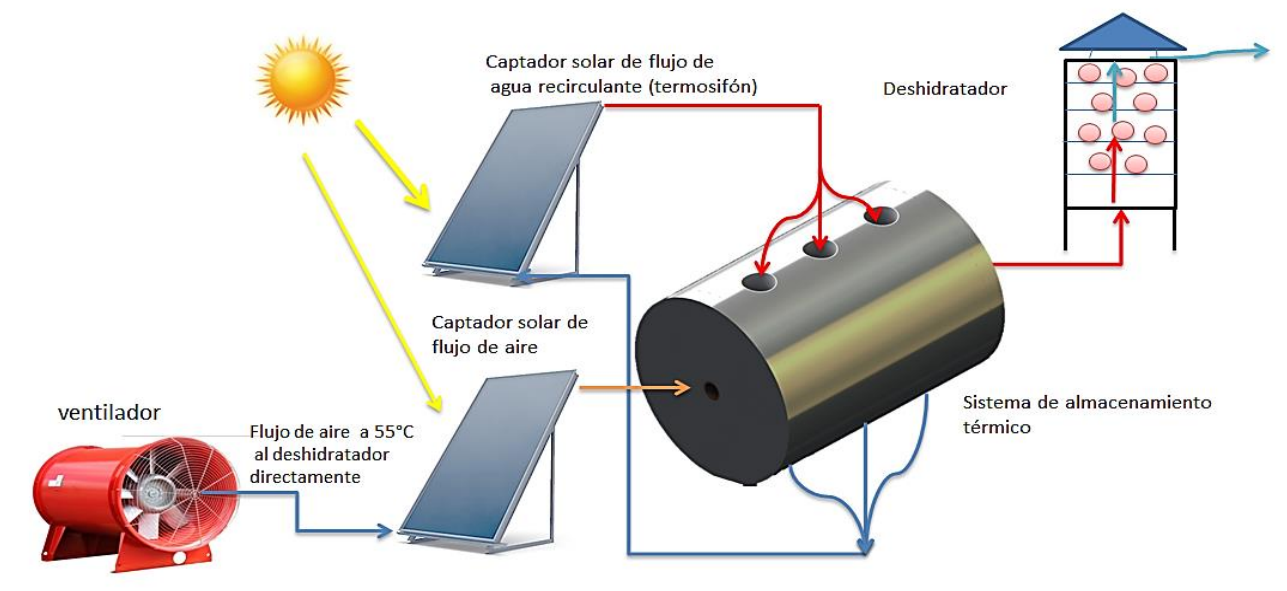


Figura 9. Diagrama de funcionamiento del deshidratador de alimentos.

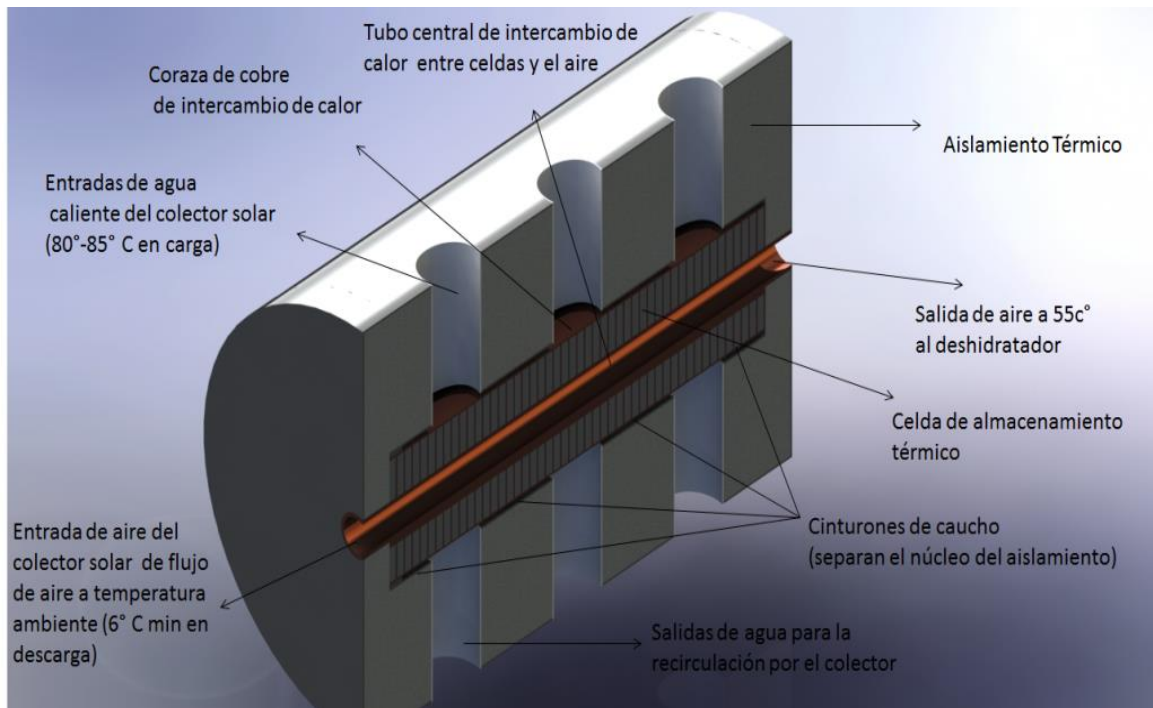
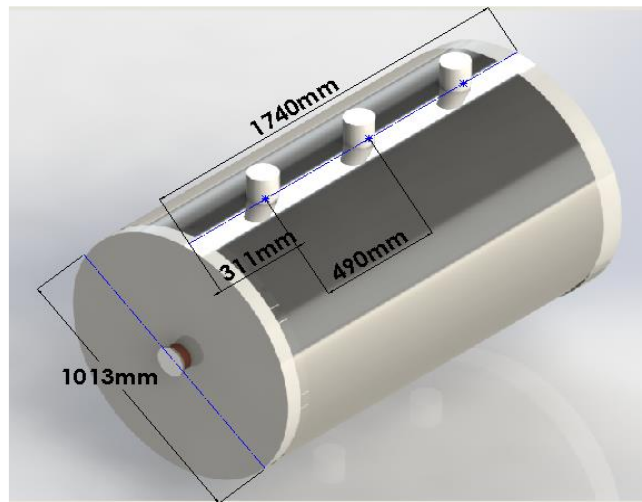
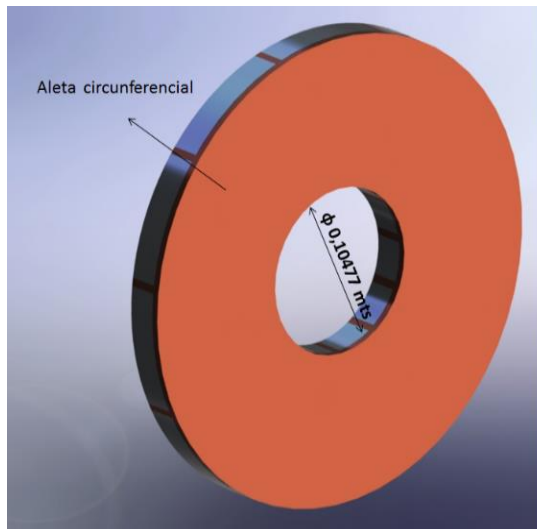


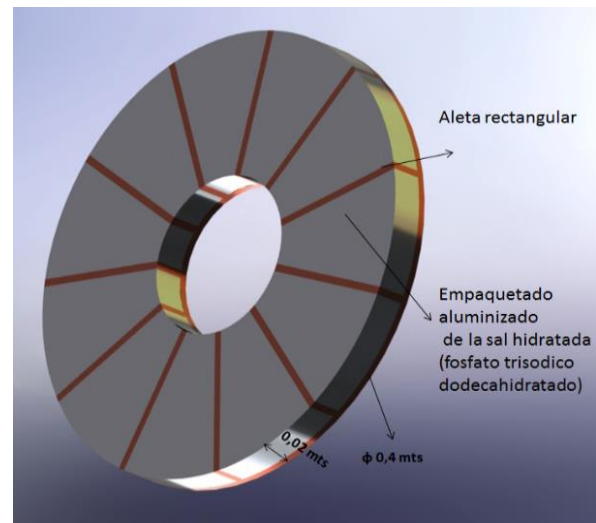
Figura 10. Descripción de las partes internas del acumulador



(a)



(b)



(c)

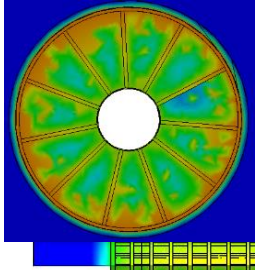
Figura 11. a) Dimensionamiento exterior del acumulador, b) vista posterior de la celda de almacenamiento, c) vista frontal de la celda de almacenamiento.

Simulación

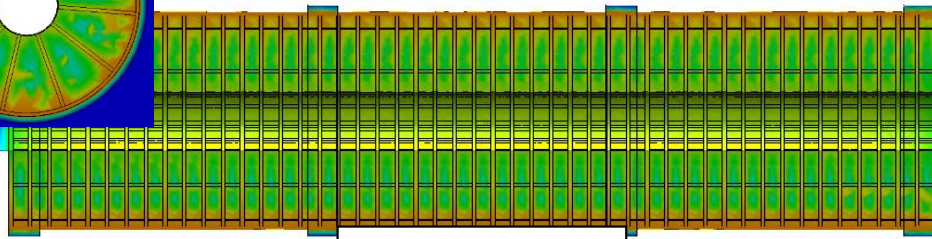
Las simulaciones se realizaron bajo los módulos SolidWorks simulation y SolidWorks flow simulation, como se ven en la Figura 12, en los cuales se establecieron secciones de análisis, principalmente en el núcleo de almacenamiento donde se evalúan los gradientes de temperaturas principales en función de los parámetros de entrada (temperatura superficial de 83,5 °C, convección central de 67,35 W/m²°C y temperatura de flujo de aire a 55 °C en carga y 6°C en descarga), además de ello se simuló el sistema de carga con parámetros iniciales de agua en un circuito termosifónico calentado por radiación solar cuyo fluido es agua a temperatura ambiente inicial (15°C).

Obteniendo termografías en estado estacionario, comprobando así el análisis teórico de que las temperaturas centrales llegan al punto de fusión y superan por un rango de 4 a 10 °C, lo que le brinda al sistema un sobrepico de temperatura en caso de pérdidas de calor, evitando que el material de cambio de fase decarga de su punto de fusión.

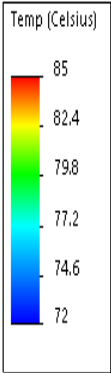
Frontal corte transversal.



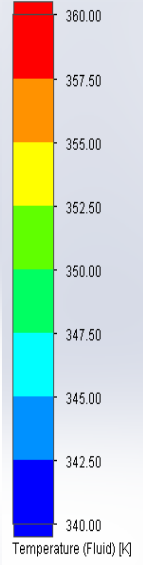
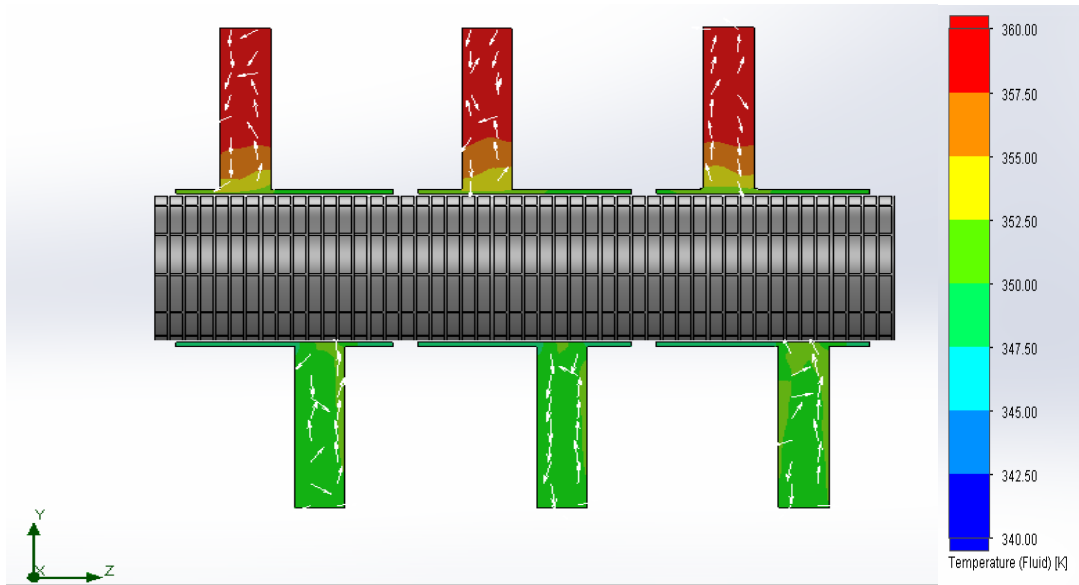
Nombre del modelo: simulacion termica estable
Nombre de estudio: CARGA-[Predeterminado-]
Tipo de resultado: Térmico Térmico1
Paso de tiempo: 30 tiempo: 1800 Segundos



Lateral corte transversal.



(a)



(b)

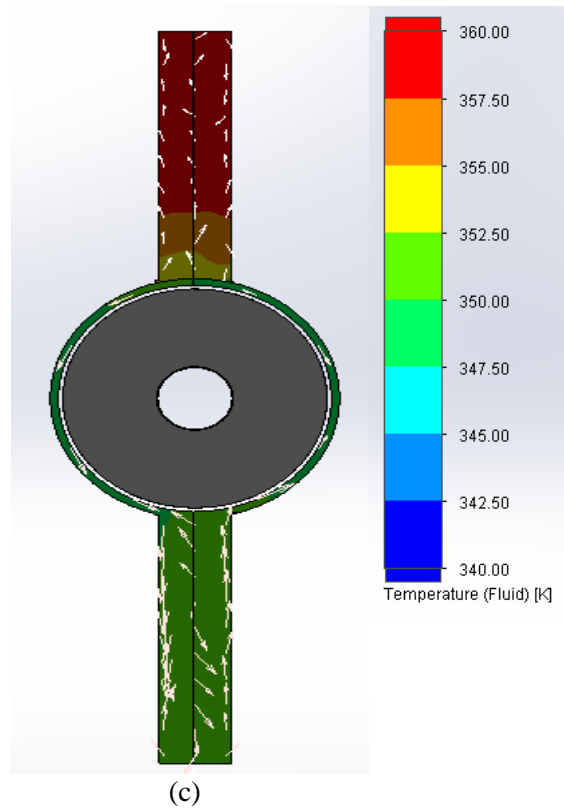


Figura 12. a) Simulación térmica en estado estable del sistema en vista de corte lateral y frontal en un tiempo de 30 min, b) Simulación de líneas de flujo y temperatura del sistema termosifónico de agua en estado de carga en vista de corte lateral, y c) vista frontal de líneas de flujo, alcanzando en alrededor de 40 min la estabilización.

El calor total almacenado en este proceso de 5 horas de carga es de 71838 Kilojulios, lo que equivaldría a una potencia de 4Kw con 209 Kilogramos de Fosfato Trisódico Dodecahidratado (PCM), teniendo un flujo de calor de 80W/m² entrando al núcleo en estado de carga, y una pérdida de calor a exteriores por el aislamiento en condiciones críticas ambientales de extrema convección

basado en simulación térmica de 16 W/m² de flujo de pérdida de calor, para lo cual el sistema de almacenamiento tendría una eficiencia térmica (η_t) calculada en base a la Ec.20 de 79,9%.

$$\eta_t = \frac{\text{Flujo de calor Perdido a amb.}}{\text{Flujo de Calor de Carga al Núcleo}} \quad (20)$$

Conclusiones y Discusión

La investigación demuestra el uso eficaz que tiene este sistema de intercambio de calor a base de una sal hidratada de cambio de fase, a bajo costo y una temperatura de trabajo útil de 73.5 grados, que al utilizar mecanismos

concéntricos para transferir calor y a la vez almacenarlo, corrobora los resultados teóricos con los simulados en Solidworks, lo que permite recomendar su uso para aprovechar su empleo como fuente de energía solar pasiva en horas de baja o nula radiación; entregando calor por alrededor de

10 horas de manera constante en etapas no solares y controlada naturalmente por los efectos de la fusión y solidificación del material, cumpliendo así las temperaturas requeridas de 55 a 60 °C en el flujo de aire central, manteniendo continuo el proceso de deshidratación y definiendo una relación de rendimiento energético en la que por cada hora de carga el sistema puede entregar 2 horas de energía constante de respaldo. Además, este proyecto presenta una buena opción del uso de los sistemas de almacenamiento de energía solar térmica basada en sales hidratadas eutécticas como el fosfato trisódico dodecahidratado como alternativa viable para diversas aplicaciones, ya que trabaja a temperaturas inferiores a los 73,5°C.

Agradecimientos

Al director del proyecto Ing. Gabriel De Jesús Camargo Vargas, al asesor de Proyecto Ing. Ismael Márquez Lasso y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre de Colombia.

Referencias

[1] L. M. Bal, et al, “Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010), pp. 2298-2314, 2010.

[2] O. V. Ekechukwu, “Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory”, *Energy Conversion & Management*, Vol. 10, pp.593-613, 1999.

[3] M. Pontin, et al. “Secadero Solar Para Frutas: Estudio De Caso”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 9, pp. 1-9, 2005.

[4] A.A. Sebaii, S.M. Shalaby, “Solar drying of agricultural products: A review”, *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp.37-43, 2012.

[5] V. Belessiotis, E. Delyannis, “Solar drying”, *Solar energy*, Vol. 85, pp.1665-1691, 2011.

[6] A.I Sharma, et al, “Solar-energy drying systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp.1185-1210, 2008.

[7] D. J. Mejía, Tesis, “Diseño y Construcción de un Deshidratador Solar de Productos Tropicales”, Dept Ingeniería Mecánica, Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2011.

[8] I. Dincer, M. A. Rosen, *Thermal Energy storage Systems and Applications*, John Wiley & Sons Ltd, Reino Unido , 2002, pp. (51-207).

[9] M. M. Alkilani, et al, “Review of solar air collectors with thermal storage units”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011), pp.1476-1490, 2011

[10] V.V. Tyagi, et al, “Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), pp.2289-2303, 2012.

[11] M. Rostamizadeha, et al, “Simulation of energy storage system with phase change material (PCM)”, *Energy and Buildings*, 49 (2012), pp. 419-422, 2012.

[12] Sarada Kuravi, et al, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol 30 (2013), pp. 1-35, 2013.

[13] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes And Systems*, Editorial Academic press, Reino Unido, 2009, pp. (255-285).

[14] D. S. García, “Calculo, Diseño y Análisis de una Central Termosolar de Colectores Cilindrico-Parabolicos Operando con Sales

Fundidas”, Tesis de Grado, Dept Ing. Mecánica, Universidad Carlos III, Madrid, España 2012.

[15] A. Kocaa, et al, “Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase”, *Renewable Energy*, 33 (2008), pp.567-574, 2008

[16] S. Esakkimuthu, et al, “Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications”, *Renewable Energy*, 88 (2013), pp.144-153, 2013.

[17] B. Cardenas, N. Leon, “High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27 (2013), pp. 724-737, 2013.

[18] V.V. Tyagi, et al, “Review on thermal energy storage with phase change Atul Sharma materials and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2009), pp.318-345, 2009.

[19] M. K. Rathod, J. Banerjee, “Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18 (2013), pp.246-258, 2013.

[20] S. Jededheeswaran, S.D. Pohakar, T. Kousksou, “Conductivity particles dispersed organic and inorganic phase change materials for solar energy storage-an exergy based comparative evaluation”, *Renewable Energy*, 14 (2012), pp.643-648, 2012.

[21] E. M. Languri, C. O. Aigbotsua, “Latent thermal energy storage system using phase

change material in corrugated enclosures”, *Applied Thermal Engineering*, 50 (2013), pp.1008-1014, 2013.

[22] A. Oliver, et al, “clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica”, *Materiales de construcción Vol. 62*, pp.131-305, 2012.

[23] J. M. Fernández, “Compendio De La Energia Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica (Adaptado al Código Técnico de la Educación y al nuevo RITE)”, *Universitat Politècnica De Valencia, España*, 2010, pp. (113-162).

[24] J. C. Ribera, “Manual de ingeniería solar térmica diseño y cálculo de instalaciones”, *Universitat politècnica de valencia, España*, 2008, pp. (77-159).

[25] L. Juanico, “Diseño De Techo Solar Adaptable Innovativo Para Refrigeración Y Calefacción Hogareña Pasivas”, *ASADES Vol. 10*, pp. 1-9, 2006.

[26] S. A. Kalogirou, “Solar Thermal Collectors of and applications”, *ScienceDirect, Vol. 30*, pp.231-295, 2004.

[27] T. Renea, A.M. Campos y J.P. Galindo, “Dirección de operaciones”, *Málaga, Publicaciones Vértices S.L*, 2008, pp. (119-130).

[28] Y. A. Cengel, “Transferencia De Calor y Masa”, *McGraw-Hill, Canadá*, 2007, pp. (159-543).

[29] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, “Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa”, *Prentice Hall, México*, 1999, pp. (104-565).