

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD SALTILLO

**“Diseño, modelado y simulación de un acumulador térmico combinado
usando calor sensible y reacciones químicas reversibles”**

TESIS

Que presenta

ING. JOSÉ MANUEL ZAPIÉN FLORES

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUSTENTABILIDAD DE LOS
RECURSOS NATURALES Y ENERGÍA

Directores:

DR. GREGORIO VARGAS GUTIÉRREZ

DR. EDDIE LÓPEZ HONORATO

Ramos Arizpe, Coahuila

Noviembre, 2016



Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado en cada momento, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CINVESTAV IPN Unidad Saltillo, por las facilidades otorgadas para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

A mis asesores el Dr. Gregorio Vargas Gutiérrez y el Dr. Eddie López Honorato, por la confianza, la orientación, la amistad, el apoyo económico y por las valiosas enseñanzas aportadas.

Al comité de evaluación de tesis conformado por el Dr. Salvador Carlos Hernández y el Dr. Arturo Isaías Martínez Enríquez, por su amistad, paciencia, orientación y por el tiempo dedicado para revisar este escrito y por sus valiosas aportaciones.

A la Dra. Claudia López por sus valiosas aportaciones durante la revisión de la tesis.

A mis familiares y amigos, por su apoyo incondicional.



Dedicatoria

A mis padres María Teresa y José Luis, que siempre confiaron en mí, me apoyaron y me enseñaron a perseguir mis sueños. Por el amor que me han dado durante toda mi vida y por ser el pilar más importante, en el cual me he apoyado siempre.

A mis hermanos Luis Fernando, Oscar, Diego y Teresa de Jesús, que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas y de los cuales estoy orgullosos.

A mi esposa Liliana a quien amo y que sin su apoyo muchas cosas no hubieran podido ocurrir. Porque sigues caminando a mi lado y aprietas mi mano cada vez que he tropezado y no me has dejado caer. Gracias por todo tu apoyo y porque crees en mí.

Y por último, pero no menos importante, a la persona que vino a llenar mi vida de ilusiones, de ternura, de alegrías y de amor. A ti hijo, ya que eres lo más importante de mi vida y eres la razón que me mueve día a día. Te amo Oscar Daniel.

Hace tiempo que salí de casa con el objetivo de luchar por alcanzar una meta, sin pensar en lo que dejé atrás. Papás, hermanos, Lili, Dani sé que he perdido mucho tiempo sin tenerlos a mi lado, tiempo que jamás regresará, pero les aseguro que ha valido la pena. Hoy solo quiero que sientan que este logro lo hemos alcanzamos juntos y también es de ustedes.



Resumen

El desarrollo de dispositivos de almacenamiento de energía eficientes y baratos es tan importante como el desarrollo de nuevas fuentes de energía. El almacenamiento de energía térmica no es un tema nuevo, y ha sido utilizado durante siglos. Existen tres métodos básicos para almacenar la energía térmica: calor sensible, calor latente y reacciones químicas. Los tanques de agua se utilizan tradicionalmente en colectores solares y algunos prototipos de acumuladores térmicos de calor latente y de reacciones químicas han sido desarrollados. En la presente tesis se realizó el diseño de un acumulador térmico de tipo combinado, basado en calor sensible y reacciones químicas reversibles. Dicho acumulador fue evaluado durante el proceso de carga, almacenamiento y descarga de energía térmica; evaluando también el proceso global. El acumulador térmico combinado fue comparado con un acumulador térmico basado en calor sensible y otro basado en calor latente del mismo volumen. El acumulador se diseñó con el apoyo del software AutoCAD y de un modelo basado en análisis de energía y de exergía. Como resultado de lo anterior, el acumulador termoquímico combinado con un tanque de agua demostró ser 14.79 y 18.8 % más eficiente en el corto plazo que el tanque de agua y el acumulador de calor latente. Por lo tanto, el acumulador combinado es una opción viable para utilizarse en viviendas unifamiliares, debido a que es más eficiente.



Abstract

Developing efficient and inexpensive energy storage devices is as important as developing new sources of energy. The thermal energy storage is not a new topic, and it has been used for centuries. There are three basic methods for storing thermal energy: sensible heat, latent heat and chemical reactions. Water tanks are traditionally used in solar collectors and some prototypes of thermal accumulators of latent heat and chemical reactions have been developed. In this thesis was carried out the design of a combined thermal accumulator, based on sensible heat and reversible chemical reactions. This accumulator was evaluated during charging process, storing and discharging of thermal energy, the overall process was also evaluated. The combined thermal accumulator was compared with a thermal accumulator based on sensible heat and another based on latent heat of the same volume. The accumulator was designed with the support of AutoCAD software and a model based on energy and exergy analysis. As a result above, the combined thermochemical accumulator with a water tank showed to be 14.79 and 18.8 % more efficient in the short term than the water tank and the accumulator of latent heat. Therefore, the combined accumulator is a viable option for use at single family homes, due it is more efficient.



Índice general

Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	10
Acrónimos	12
Glosario	13
1. – Introducción.	14
2. – Antecedentes.	16
2.1. – Almacenamiento térmico.	16
2.2. - Análisis de energía y exergía de los acumuladores térmicos.	27
3. – Objetivos.	30
3.1. – General.	30
3.2. – Específicos.	30
4. – Metodología.	31
4.1.- Diseño conceptual.	31
4.1.1. - Aspectos a considerar.	32
4.1.2. – Evaporador.	33
4.1.3. – Condensador.	35
4.2. – Evaluación de materiales para el almacenamiento térmico.	37
4.2.1. – Desarrollo experimental.	37
4.2.2. – Caracterización.	39
4.2.3. – Experimentación a nivel laboratorio.	39
4.3. – Modelo matemático del acumulador combinado de calor sensible-termoquímico.	40
4.4.- Simulación.	41
4.4.1. – Evaluación.	41
4.4.2. – Consideraciones.	42



4.5. – Análisis de energía y exergía. _____	43
4.5.1.- Acumulador combinado. _____	43
4.5.2. - Tanque de agua _____	44
4.6. - Análisis de costos. _____	45
5. – Resultados. _____	47
5.1. – Diseño. _____	47
5.2. - Materiales para el almacenamiento térmico. _____	50
5.2.1. - Desarrollo experimental. _____	50
5.2.2. - Capacidad de almacenamiento. _____	52
5.2.3. - Experimentación a escala laboratorio. _____	54
5.3. – Modelo matemático. _____	55
5.3.1. - Análisis de energía de un acumulador térmico combinado sensible- termoquímico. _____	56
5.3.2. - Análisis de exergía de un acumulador combinado de calor sensible- termoquímico. _____	58
5.4. – Simulación. _____	59
5.4.1. - Almacenamiento térmico en verano. _____	60
5.4.2. - Almacenamiento térmico en invierno. _____	62
5.4.3. - Almacenamiento térmico en función del volumen del tanque de agua, empleando un colector solar de placa plana. _____	64
5.4.4. - Almacenamiento térmico en función del volumen del tanque de agua, empleando un colector solar de tubos al vacío. _____	71
5.4.5. – Comparación. _____	76
5.4.6. – Emisiones de CO ₂ . _____	82
5.5. – Análisis de energía y exergía. _____	83
5.5.1. – Acumulador combinado sensible-termoquímico. _____	83



5.5.2. - Acumulador empacado con PCM encapsulado. _____	89
5.5.3. - Tanque de agua. _____	91
5.5.4. - Resumen de resultados de los análisis energéticos y exergéticos de cada acumulador térmico. _____	92
5.6. - Análisis de costos. _____	94
5.6.2. – Costo del acumulador termoquímico. _____	94
5.6.3. - Retorno de la inversión. _____	95
6. – Conclusiones. _____	99
7. - Trabajos futuros _____	101
8. - Bibliografía _____	102
Anexos _____	108
I. – Montaje experimental. _____	108
II. – Diagramas de flujo para las simulaciones. _____	109



Índice de Figuras

Figura 1.- Etapas de almacenamiento térmico [8].	16
Figura 2.- Formas de almacenamiento térmico [8].	17
Figura 3.- Actividades de los principales institutos europeos que desarrollan investigación en almacenamiento térmico.	18
Figura 4.- Clasificación de los PCM [7].	19
Figura 5.- Clasificación de los procesos químicos y termoquímicos para aplicaciones de almacenamiento de calor [14].	20
Figura 6.- Tipos de reactores basados en hidratación-deshidratación de sales, a) separado y b) el integrado [18].	22
Figura 7.- Reactores separados. a) reactor helicoidal o de tornillo, b) reactor de lecho fluidizado y c) reactor de flujo a granel asistido por gravedad [19].	22
Figura 8.- a) Montaje experimental de almacenamiento térmico para reactores de lecho fluidizado, con CaCl_2 en polvo y b) prototipo de reactor de lecho fluidizado, con CaCl_2 en suspensión [21].	23
Figura 9.- Prototipo de laboratorio.	24
Figura 10.- Máquina de climatización ClimateWell [23].	24
Figura 11.- Diseño de acumulador térmico de un recipiente [10].	25
Figura 12.- Prototipo de acumulador térmico separado [20].	25
Figura 13.- Esquema de un acumulador termoquímico.	28
Figura 14.- Metodología general del trabajo.	31
Figura 15.- Metodología para la evaluación de los materiales.	37
Figura 16.- Desarrollo experimental para obtener las curvas de hidratación.	38
Figura 17.- Esquema del montaje experimental.	39
Figura 18.- Esquema del almacenamiento térmico sensible-termoquímico.	40



Figura 19.- Diseño en dos dimensiones. a) acumulador termoquímico. b) acumulador térmico combinado. _____	47
Figura 20.- Diseño del acumulador térmico combinado en 3 dimensiones. Fuente: Elaboración propia con el software AutoCAD. _____	48
Figura 21.- Diseño del acumulador termoquímico en tres dimensiones. Fuente: Elaboración propia con el software AutoCAD. _____	49
Figura 22.- Esquema de los tipos de acumuladores térmicos analizados y comparados. Fuente: Adaptación propia. _____	49
Figura 23.- Curva de deshidratación del sulfato de magnesio heptahidratado. _____	51
Figura 24.- Termograma del sulfato de magnesio heptahidratado. _____	52
Figura 25.- Termograma del acetato de sodio trihidratado. _____	53
Figura 26.- Curva de deshidratación del sulfato de magnesio heptahidratado. _____	54
Figura 27.- Curva de hidratación del sulfato de magnesio heptahidratado. _____	55
Figura 28.- Simulación del proceso de carga del acumulador en verano, en función del cambio de temperatura del agua. _____	61
Figura 29.- Simulación del flujo de transferencia de calor del acumulador de calor sensible para deshidratar la sal (termoquímico). _____	62
Figura 30.- Simulación del proceso de carga del acumulador en invierno, en función del cambio de temperatura del agua. _____	63
Figura 31.- Simulación del flujo de calor transferido al acumulador termoquímico en clima semidesértico. _____	64
Figura 32.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima semidesértico. _____	65
Figura 33.- Simulación del flujo de calor transferido al acumulador termoquímico en clima tropical. _____	67
Figura 34.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima tropical. _____	67
	<u>7</u>



Figura 35.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima templado. _____	69
Figura 36.- Energía almacenada / volumen del acumulador combinado, acoplado a un colector de placa plana. ♣ es el volumen del acumulador termoquímico. ____	70
Figura 37.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima semidesértico. _____	72
Figura 38.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima tropical. _____	73
Figura 39.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima templado. _____	74
Figura 40.- Energía almacenada / volumen del acumulador combinado, acoplado a un colector de tubos al vacío. _____	75
Figura 41.- Capacidad de almacenamiento térmico de los acumuladores. _____	76
Figura 42.- Proceso de descarga de energía de los acumuladores térmicos. _____	77
Figura 43.- Descarga de energía con acumuladores de la misma capacidad de almacenamiento térmico y diferente volumen. _____	79
Figura 44.- Gasto diario para cubrir la demanda de energía en las viviendas B y C. _____	81
Figura 45.- Eficiencia energética de la etapa de almacenamiento. _____	85
Figura 46.- Proceso de descarga de la energía. _____	86
Figura 47.- Exergía durante la etapa de almacenamiento térmico. _____	88
Figura 48.-Montaje experimental para las pruebas de hidratación-deshidratación de los TCM. _____	108
Figura 49.- Reactor y elementos de medición. _____	108
Figura 50.- Diagrama de flujo para calcular la temperatura del agua en el tanque. ____	109
Figura 52.- Diagrama de flujo para calcular la temperatura del agua en acumulador empacado con PCM encapsulado _____	110



Figura 52.- Diagrama de flujo para calcular el número de esferas. _____	111
Figura 53.- Diagrama de flujo para calcular la temperatura del agua en el acumulador combinado. _____	112
Figura 54.- Hoja de datos para simular el comportamiento del tanque de agua. _____	113
Figura 55.- Hoja de datos para simular el comportamiento del acumulador empacado con PCM encapsulado. _____	113
Figura 56.- Hoja de datos para simular el comportamiento del acumulador combinado.	114



Índice de Tablas

Tabla 1.- Sales hidratadas con mayor potencial de almacenamiento térmico _____	27
Tabla 2.- Irradiancia solar promedio en México. _____	41
Tabla 3.- Datos del colector de placa plana TopSon F3-1. _____	43
Tabla 4.- Ecuaciones para el análisis de energía y exergía para un tanque de agua. _____	45
Tabla 5.- Flujo de vapor generado durante la deshidratación. _____	51
Tabla 6.- Porcentaje de carga del acumulador termoquímico en variación del volumen del tanque de agua. _____	66
Tabla 7.- Porcentaje de carga del acumulador termoquímico en variación del volumen del tanque de agua. _____	68
Tabla 8.- Cantidad de material que se puede deshidratar en verano. _____	69
Tabla 9.- Datos técnicos del colector de tubos al vacío Wolf-CRK. _____	72
Tabla 10.- Porcentajes de carga del acumulador termoquímico en función del volumen del tanque de agua. _____	74
Tabla 11.- Contexto en el que el acumulador térmico puede utilizarse. _____	75
Tabla 12.- Energía potencial de los combustibles. _____	80
Tabla 13.- Energía adicional necesaria para cubrir la demanda de energía en las viviendas B y C. _____	81
Tabla 14.- Precio de los combustibles. _____	81
Tabla 15.- Ahorro energético y económico diario de la vivienda que utiliza 100 % energía solar. _____	82
Tabla 16.- Exergía química estándar de los compuestos. _____	87
Tabla 17.- Exergía química estándar de los productos y el reactivo. _____	87
Tabla 18.- Resumen de evaluación de eficiencia. _____	93
Tabla 19.- Materiales para la construcción del acumulador termoquímico. _____	94



Tabla 20- Desglose de costo del acumulador térmico combinado. _____	95
Tabla 21.- Retorno de la inversión del acumulador termoquímico. _____	96
Tabla 22.- Costo de los sistemas solares de calentamiento de agua. _____	97
Tabla 23.- Retorno de inversión del sistema que integra un acumulador térmico combinado _____	98



Acrónimos

AIT	Austrian Institute of Technology
ALPO	Óxidos de Aluminio-Fósforo. Por sus siglas en inglés de <i>oxides aluminum-phosphate</i>
ASIC	Austrian Institute of Technology
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DSC	Calorimetría diferencial de barrido. Por sus siglas en inglés de <i>Differential scanning calorimetry</i>
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EST	Energía Solar térmica.
GEI	Gases de efecto invernadero.
MOF	Estructuras Organometálicas. Por sus siglas en inglés <i>metal-organic framework</i>
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIC	National Institute for Chemistry
NTU	Número de unidades transferidas. Por sus siglas en inglés <i>Number of Transfer Units</i>
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCM	Materiales de cambio de fase. Por sus siglas en inglés <i>Phase change materials</i> .
SAPO	Zeolitas con Silicio, Aluminio, Fósforo
SPF	Solartechnik Prüfung Forschung
TCM	Materiales termoquímicos. Por sus siglas en inglés <i>Thermochemical materials</i> .
TG	Termogravimetría. Por sus siglas en inglés <i>Thermogravimetric</i>
TNO	The Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
ZAE Bayern	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung



Glosario

Acumulador estratificado	Que almacena energía en estratos a diferente temperatura dentro del mismo acumulador.
Anhidro	Que no contiene agua.
Calor latente	Es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido o de líquido a gaseoso.
Calor sensible	Es aquella energía que recibe un cuerpo o un objeto y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado.
Calor termoquímico	Es la energía producto de una reacción química.
Deshidratación	Pérdida del agua que contiene una sustancia.
Energía	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.
Entalpía de reacción	Cantidad de calor que se desprende o se absorbe durante una reacción química.
Exergía	Propiedad termodinámica que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción espontánea entre un sistema y su entorno.
Intermitencia solar	Incidencia discontinua de la radiación solar sobre una superficie.
Irradiancia	Magnitud utilizada para medir la incidencia de radiación solar por unidad de área.
Muestra	Parte o cantidad pequeña de una cosa que se considera representativa del total y que se toma para someterla a estudio
Sorción	Retención de una sustancia por otra cuando están en contacto.
Sorbente	Material utilizado para absorber líquidos y gases.
Termopares	Son sensores para medir la temperatura



1. – Introducción.

En 1997 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) aprobó el protocolo de Kioto como una medida para responder al problema del calentamiento global. El protocolo establece el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) 5.2 % con respecto al año 1990, sin comprometer el abastecimiento de energía. Gran parte de los GEI son generados a consecuencia del consumo de los combustibles fósiles y estos son en gran medida los causantes del deterioro del efecto invernadero [1]. Por lo tanto, los gobiernos de todo el mundo se impusieron como objetivo a corto plazo impulsar el uso de las energías renovables [2, 3].

El sol es la principal fuente de energía renovable que tiene disponible nuestro planeta, la cual puede aprovecharse para generar energía eléctrica y térmica. Por tal motivo, el sol se ha convertido en una fuente de energía prometedora. La cantidad de energía que incide sobre la superficie de cada hogar (energía que se puede aprovechar) es mayor de la necesaria para satisfacer su demanda energética.

La energía solar puede ser utilizada para calentar agua y utilizarla en aplicaciones domésticas como; la ducha y limpieza (aseo de la vivienda, lava platos y ropa). Las actividades anteriormente mencionadas demandan entre el 17 y 39 % del total de energía consumida en un hogar promedio [4]. Debido a que dichas actividades representan el 30 % de las emisiones de CO₂ que se generan en una vivienda [5], los calentadores solares se han convertido en una opción importante que permiten reducir las emisiones de CO₂ en las viviendas. Por esta razón se buscan aplicaciones que permitan aprovechar la energía solar de forma más eficiente.

Los acumuladores térmicos son dispositivos apropiados para el aprovechamiento de la energía solar. Dichos dispositivos nos permiten almacenar y disponer de energía a pesar de la intermitencia solar (durante la noche y ante la presencia de nubosidad), ya que los periodos de producción y consumo de energía están desfasados en el tiempo [6]. Por esta razón es muy importante el poder almacenar la energía solar térmica (EST) para disponer de ella cuando más se requiere y cuando se tiene carencia de su suministro. En esta dirección, los calentadores solares se han convertido en un medio práctico para el aprovechamiento de la energía solar para uso residencial.



La EST se puede almacenar de tres formas diferentes: por calor sensible, calor latente y reacciones químicas [7, 8], siendo las reacciones químicas las que tiene mayor capacidad de almacenamiento.

En este trabajo se realizó el diseño, modelado y simulación de un acumulador térmico combinado (una parte sensible y otra termoquímica) que puede almacenar más energía térmica de forma eficiente y compacta. La parte termoquímica consta de un acumulador basado en reacciones químicas reversibles de hidratación-deshidratación, el cual estará inmerso en un tanque de agua (parte sensible). La energía almacenada será empleada para uso en agua sanitaria de uso doméstico. Este es el primer estudio realizado de un acumulador combinado sensible-termoquímico de forma integrada.

A partir del diseño del acumulador se desarrolló un modelo para evaluar su eficiencia, a través de un análisis de energía y exergía considerando la capacidad de almacenamiento térmico por unidad de volumen. La simulación se realizó para comparar la eficiencia del acumulador combinado con otras formas de almacenamiento térmico. El acumulador diseñado se comparó con un acumulador empacado con PCM encapsulado (calor latente) y con un tanque de agua (calor sensible). Además, se realizó el análisis de costos y el retorno de inversión del acumulador diseñado.

El acumulador térmico que se estudió permite un mejor aprovechamiento del recurso solar disponible. Por lo tanto, con el mejor aprovechamiento de la energía solar se reduce la dependencia de la energía procedente de fuentes fósiles y las emisiones de CO₂ al medio ambiente, las cuales son muy contaminantes.

El acumulador térmico combinado puede usarse en almacenamiento a corto y largo plazo. La energía sensible que almacena el agua puede utilizarse de forma instantánea, la cual a su vez recoge la energía liberada durante la reacción de hidratación. También puede usarse a largo plazo, debido a que los productos de la reacción pueden ser almacenados indefinidamente a temperatura ambiente.

2. – Antecedentes.

2.1. – Almacenamiento térmico.

La EST es utilizada en los hogares para: el calentamiento de agua, climatización de habitáculos, cocción, preservación de alimentos, entre otras aplicaciones [7]. Todos estos procesos ocurren durante el día e incluso en ausencia del sol, si se puede tener apoyo de la energía almacenada en un acumulador térmico.

Los acumuladores térmicos deben de cumplir con al menos 3 etapas durante su operación: carga, almacenamiento y descarga (Figura 1) [8].

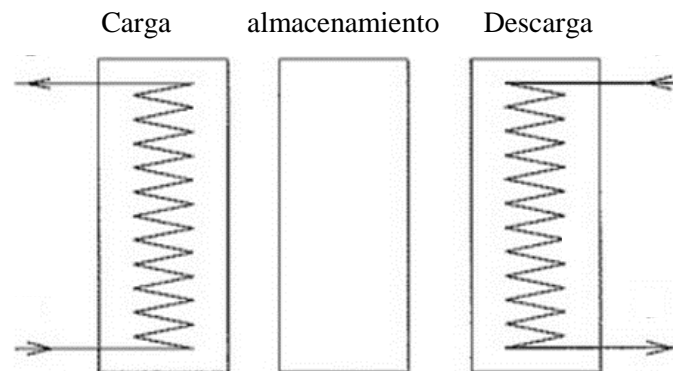


Figura 1.- Etapas de almacenamiento térmico [8].

Durante el proceso de carga, los acumuladores térmicos reciben energía a partir de una fuente externa hasta alcanzar su máxima capacidad. Después, el acumulador permanece cargado, es cuando el acumulador está en la etapa de almacenamiento. Finalmente, el acumulador libera la energía almacenada durante el proceso de descarga.

El almacenamiento térmico se clasifica en procesos físicos y químicos (Figura 2). Dentro de los procesos físicos se encuentran el almacenamiento por calor sensible y el almacenamiento por calor latente. En los procesos químicos de almacenamiento térmico se encuentran la sorción (utilizada comúnmente en climatización) y las reacciones químicas [6-8].

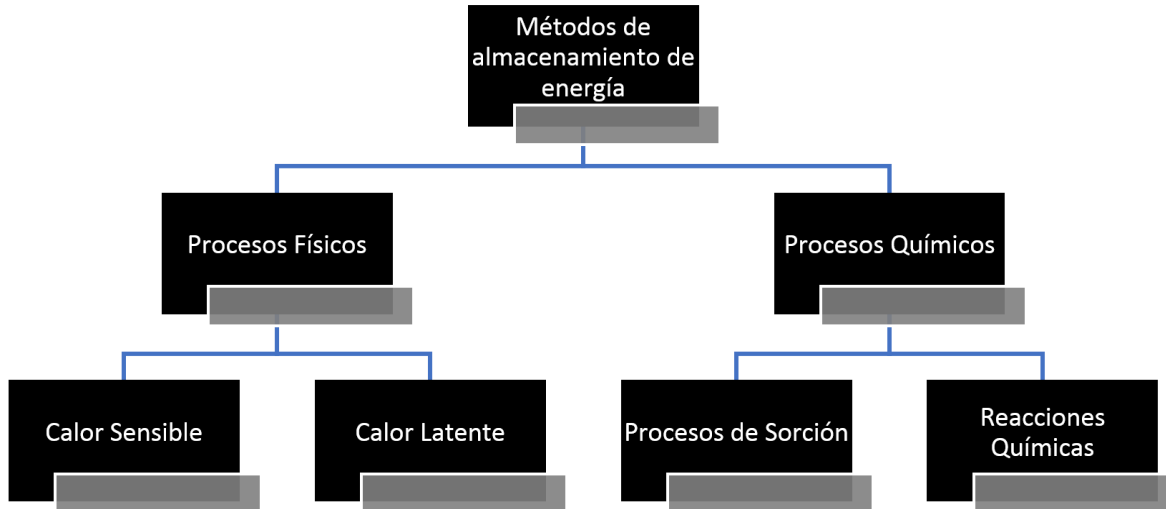


Figura 2.- Formas de almacenamiento térmico [8].

La forma más utilizada para el almacenamiento térmico es por medio del calor sensible, la cual consiste en calentar un cuerpo sólido o líquido. Un ejemplo común de un acumulador térmico es el tanque de almacenamiento de agua caliente para uso doméstico [9]. El agua tiene una capacidad de almacenamiento térmico de aproximadamente 244.8 MJ/m^3 , para un aumento de temperatura de 23 a 83 °C [10]. Este es el material más utilizado para almacenar energía térmica, debido a que puede utilizarse directamente en actividades cotidianas. Además, el agua es de bajo costo, disponible, tiene alto calor específico, no es tóxico y su ciclo térmico de carga-descarga de calor sensible es un proceso simple. Sin embargo, con esta forma de almacenamiento se obtiene una baja densidad de energía almacenada por unidad de volumen [11] y requieren de aislamiento térmico para evitar la pérdida de calor al medio ambiente, por lo que su almacenamiento se considera de corto plazo.

Nuevas formas de almacenamiento térmico han despertado el interés de muchos centros de investigación, como lo son el almacenamiento térmico por calor sensible y el almacenamiento por medio de reacciones químicas reversibles. En dichos centros se han desarrollado prototipos de estos acumuladores térmicos, cuya finalidad es impulsar el desarrollo tecnológico en esta área. La Figura 3 muestra un cuadro en el que se indican las actividades de investigación y desarrollo que se llevan a cabo en diferentes instituciones, en relación con el almacenamiento térmico [12].

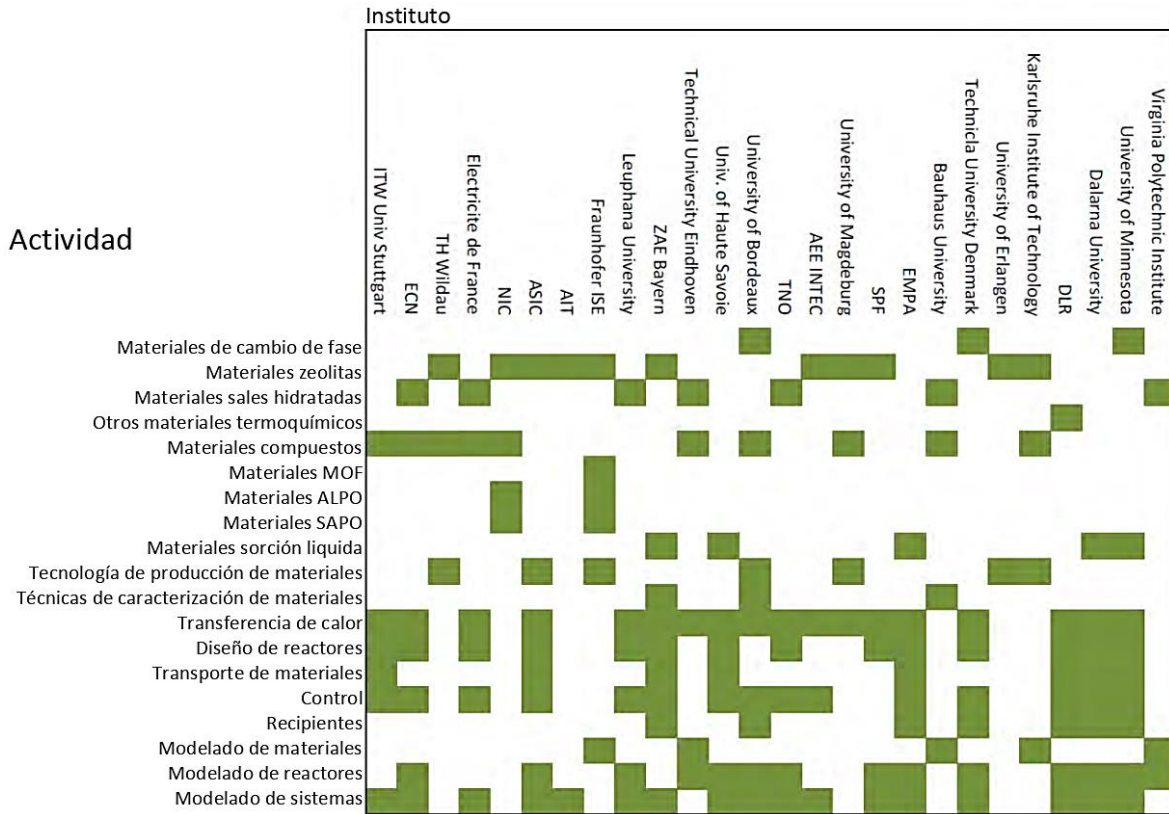


Figura 3.- Actividades de los principales institutos europeos que desarrollan investigación en almacenamiento térmico.

El continente europeo concentra veintiuno de las veintiséis instituciones que realizan investigación en el área de almacenamiento térmico. Del total europeo, Alemania es el país con mayor interés en esta área, ya que cuenta con siete instituciones, seguido de Holanda, Francia y Austria con 3 instituciones cada uno, Suiza con dos instituciones, mientras que Eslovenia, Dinamarca y Suecia cuentan con una institución. Por otra parte, en Estados Unidos se encuentran dos de estas instituciones y las tres restantes son internacionales [12]. En la NASA y en la Universidad de Ontario se encuentran los centros más destacados de América del Norte.

El almacenamiento térmico por calor latente ha sido muy investigado recientemente; debido a que esta forma permite almacenar una mayor densidad de energía térmica, con respecto a los sistemas basados en calor sensible. Los acumuladores basados en calor latente utilizan materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés), los cuales absorben o liberan energía a temperatura constante durante su cambio de estado físico. Para evitar pérdidas de



energía, los acumuladores de calor latente también requieren de aislamiento térmico, por lo que también son utilizados en almacenamiento térmico a corto plazo [11].

Los materiales empleados en almacenamiento de calor latente se dividen básicamente en orgánicos e inorgánicos (Figura 4). Los PCM orgánicos no son corrosivos, pero tienen menor capacidad de almacenamiento térmico con respecto a los PCM inorgánicos.

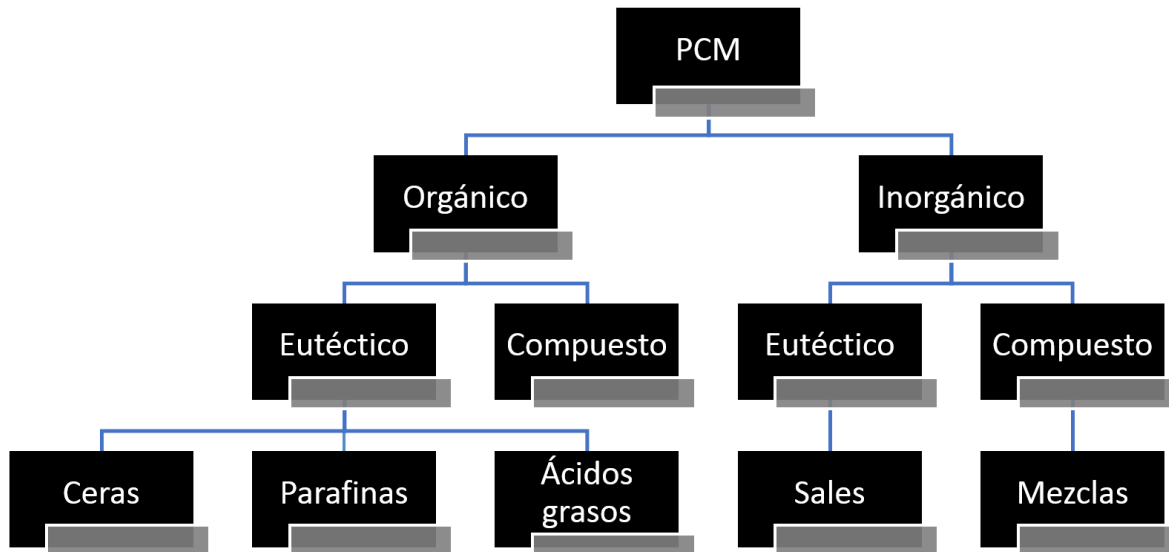


Figura 4.- Clasificación de los PCM [7].

Existen diversos diseños de acumuladores térmicos que usan PCM, sin embargo, su desarrollo se encuentra a nivel laboratorio-piloto. ZAE Bayern desarrolló un prototipo de acumulador con PCM tipo intercambiador, el cual cuenta con aletas para mejorar la eficiencia de transferencia de calor hacia y desde el PCM. Este centro también desarrolló un prototipo de contacto directo, donde se utilizó $CaCl_2 \cdot 6H_2O$. En este caso un aceite especial fue utilizado como fluido de transferencia de calor [13].

La Universidad de Ljubljana estudia los acumuladores de camas empacadas con cápsulas de PCM, y su aplicación está orientada a la ventilación de edificios con aire como fluido acarreador de calor [13].

Los sistemas que almacenan calor por medio de reacciones químicas se encuentran en una etapa muy temprana de desarrollo. En muchos de los centros de investigación se estudia este tipo de acumuladores térmicos, debido a que pueden almacenar mayor densidad de energía



comparado con las otras formas de almacenamiento térmico. En este caso, los productos de una reacción se almacenan en recipientes separados a temperatura ambiente, por lo tanto, no se pierde energía térmica. Por ello es por lo que el almacenamiento de calor se puede dar por periodos de tiempo más prolongados (almacenamiento de largo plazo). Estos acumuladores emplean materiales termoquímicos (TCM, por sus siglas en inglés).

Una clasificación para este tipo de acumuladores térmicos se muestra en la Figura 5.

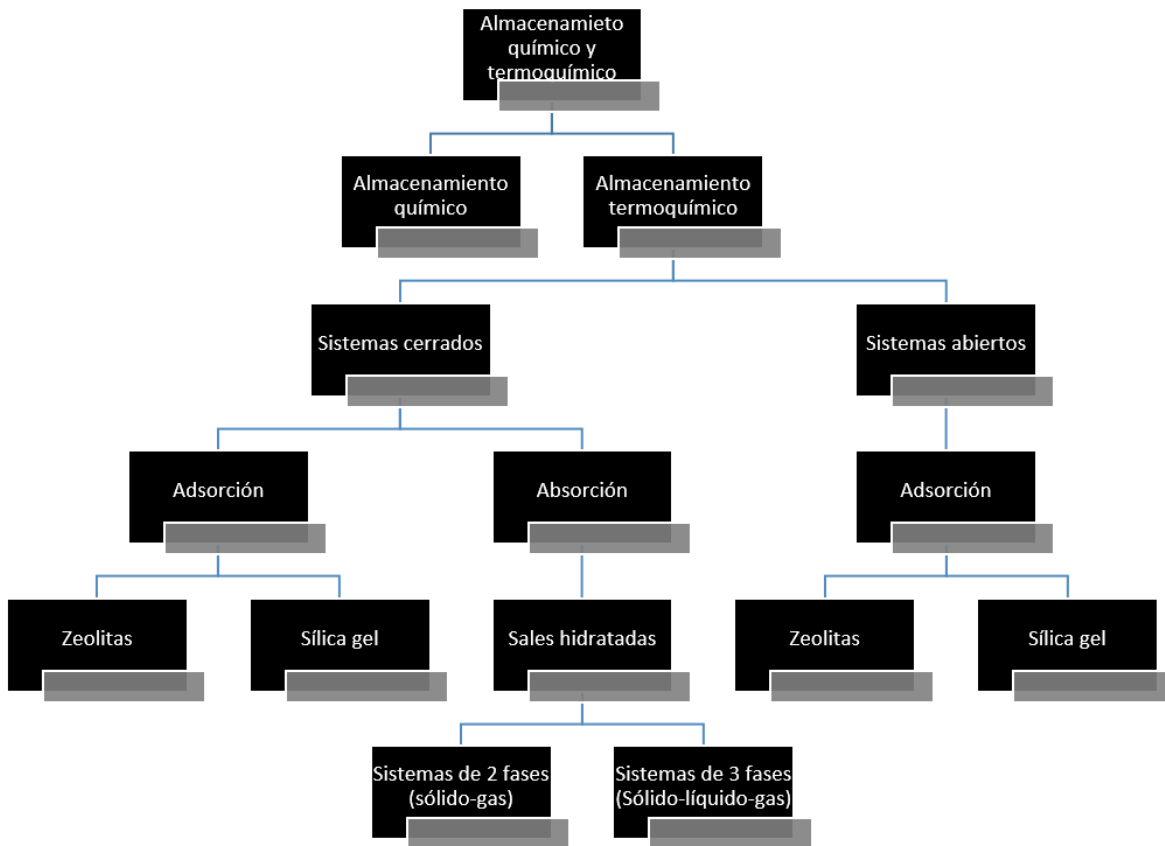


Figura 5.- Clasificación de los procesos químicos y termoquímicos para aplicaciones de almacenamiento de calor [14].

Los acumuladores de ciclo abierto se caracterizan porque uno de los materiales que participan en la reacción es liberado y recogido del ambiente, a diferencia de los acumuladores de ciclo cerrado que utilizan el mismo material de forma cíclica, para que se lleve a cabo la reacción.

Los sistemas de adsorción-desorción han sido investigados para aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía térmica. La capacidad de almacenamiento de estos sistemas



suele estar relacionada con el volumen o la masa del sorbente seco. Se han probado una gran cantidad de materiales de sorción con relación a su posible capacidad de almacenamiento; de los cuales, las zeolitas resultaron ser un adsorbente sólido capaz de almacenar casi el doble de energía térmica que los geles de sílice [15]. Una investigación realizada por el SPF (Solartechnik Prüfung Forschung) determinó que tanto las zeolitas como el gel de sílice, son más apropiados para refrigeración que para almacenamiento térmico a largo plazo [14].

En el ECN (Centro de Investigación de Energía de los Países Bajos) se estudiaron en el año 2004 cerca de noventa materiales con potencial para almacenamiento térmico; donde encontraron que el sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) y el hidróxido de hierro ($Fe(OH)_2$), resultaron ser en teoría los materiales más prometedores para almacenamiento termoquímico debido a que su capacidad de almacenamiento es de 2.8 y 2.2 GJ/m^3 , respectivamente [16, 17]. En dicho estudio, el ECN señaló que las sales hidratadas son materiales apropiados para el almacenamiento térmico, debido a su gran potencial. Basado en lo anterior, se consideraron algunas sales hidratadas para estudiarlas y determinar cuál de ellas utilizar en el análisis del acumulador diseñado.

Los reactores para el almacenamiento térmico basados en reacciones de hidratación-deshidratación de sales pueden ser de dos tipos: separado (de 3 recipientes) e integrado (de 2 recipientes) como se observa en la Figura 6. En el reactor separado, la reacción se lleva a cabo en un recipiente diferente; la sal y el agua se almacenan en otros dos recipientes por separado. Por otra parte, en el reactor integrado la reacción y el almacenamiento de la sal se llevan a cabo en el mismo recipiente y el agua se almacena en el segundo recipiente [18, 19].

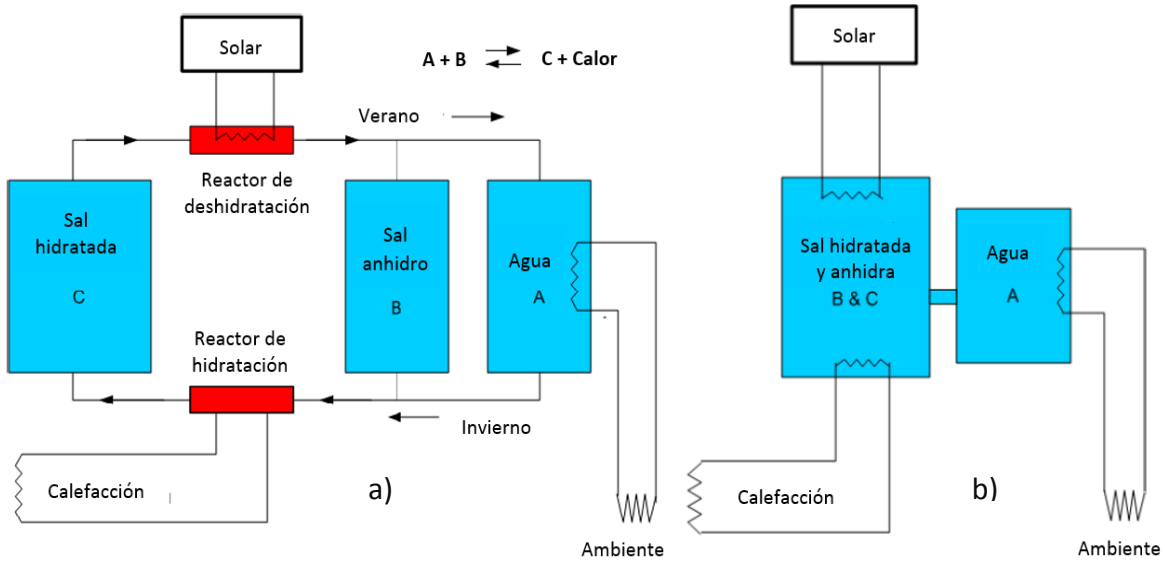


Figura 6.- Tipos de reactores basados en hidratación-deshidratación de sales, a) separado y b) el integrado [18].

En el ECN se estudiaron reactores separados con potencial para usarse en reacciones de hidratación-deshidratación de sales, los cuales se muestran en la Figura 7.

Los reactores separados requieren de energía eléctrica adicional para accionar el tornillo que transporta la sal del depósito de reacción al depósito de almacenamiento y para el bombeo del fluido caliente que evapora el agua durante el proceso de descarga. Los reactores integrados utilizan energía eléctrica solamente para el bombeo del fluido evaporador del agua durante la descarga de energía térmica.

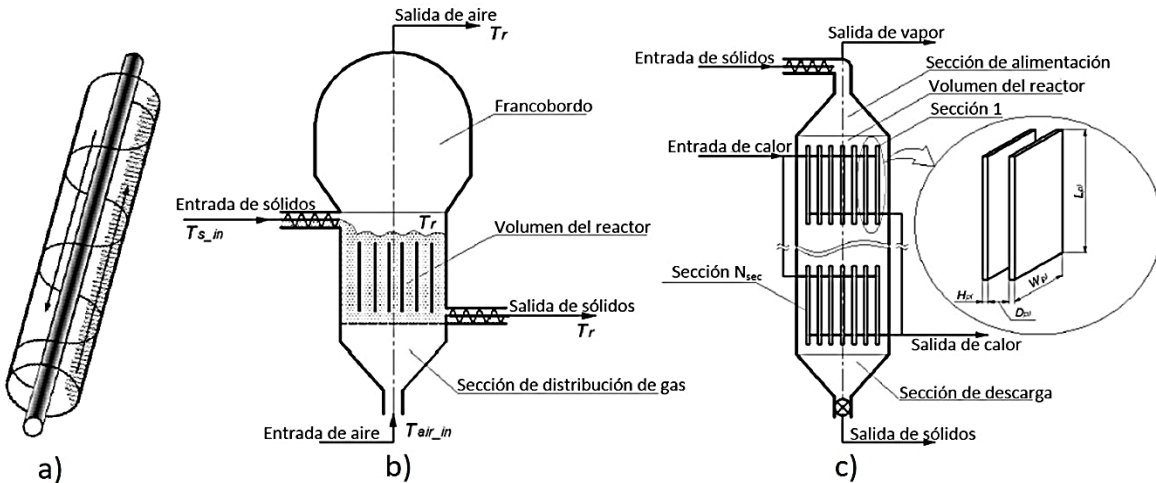


Figura 7.- Reactores separados. a) reactor helicoidal o de tornillo, b) reactor de lecho fluidizado y c) reactor de flujo a granel asistido por gravedad [19].



De dichos reactores, solamente se han realizado prototipos a nivel laboratorio del reactor de lecho fluidizado; el cual se muestra en la Figura 8. Un análisis de energía realizado al reactor de tornillo indicó que es prometedor, según lo demostró un experimento preliminar, debido a que la transferencia de calor del material mejora significativamente con la agitación activa. [20].

En el ECN se estudió el almacenamiento de calor en un reactor de lecho fluidizado con CaCl_2 CaCl_2 en polvo y en el TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research), se desarrolló un prototipo de reactor de lecho fluidizado, en el cual utilizaron CaCl_2 en suspensión como material de hidratación-deshidratación (Figura 8).

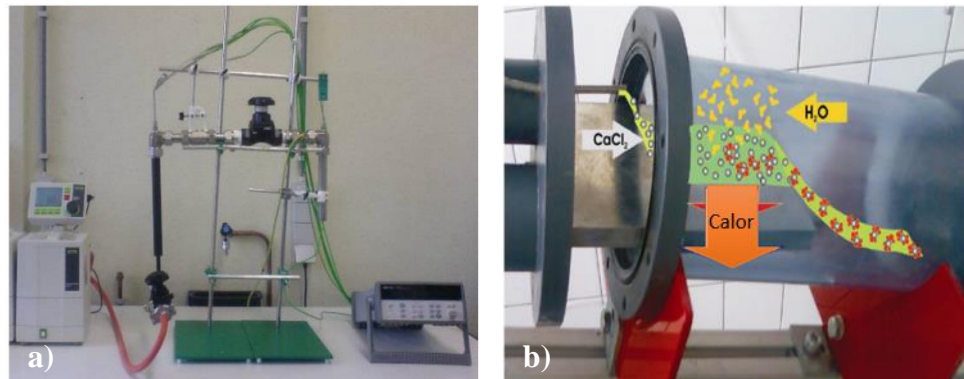


Figura 8.- a) Montaje experimental de almacenamiento térmico para reactores de lecho fluidizado, con CaCl_2 en polvo y b) prototipo de reactor de lecho fluidizado, con CaCl_2 en suspensión [21].

Se concluyó que ambas formas de almacenamiento térmico pueden ser utilizadas. En el montaje experimental que utilizó polvos, la transferencia de calor no fue tan rápida; sin embargo, se puede optimizar mediante agitación y realizando la hidratación de forma más rápida en un reactor compacto. El problema que presentó este prototipo es que el material se puede sedimentar [21].

El ECN desarrolló un sistema abierto para almacenamiento térmico compacto como parte del proyecto E-hub. El prototipo de reactor de lecho fluidizado basado en reacciones reversibles de hidratación-deshidratación de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ fue diseñado para calentamiento de aire y agua para uso sanitario (Figura 9). Durante el verano, la sal es deshidratada por medio de aire caliente obtenido de un colector solar. En el invierno, la sal es hidratada con aire húmedo del



medio ambiente. Para aumentar el rendimiento, la presión del aire entrante se incrementa a 12 mbar por medio de un evaporador de agua.



Figura 9.- Prototipo de laboratorio.

Una empresa sueca dedicada a los sistemas de climatización llamada Climatewell, desarrolló un reactor de almacenamiento térmico integrado como se observa en la Figura 10, a base del par de trabajo de cloruro de litio y agua ($LiCl/H_2O$); el cual está comercialmente disponible para climatización de viviendas. Con dicho par de trabajo se puede almacenar hasta $910.8 MJ/m^3$, pero su mayor limitante es su elevado costo ($\approx 3600 \text{ €/m}^3$) [6, 22].



Figura 10.- Máquina de climatización ClimateWell [23].

Quinnell, Davidson y Burch de la Universidad de Minnesota, publicaron un trabajo con un concepto nuevo de acumulador térmico de un solo recipiente (Figura 11). El sistema de almacenamiento utiliza un intercambiador de calor interno con la finalidad de agregar y descargar la energía térmica; así mismo requiere de un estratificador (sirve para seccionar en

estratos o capas) para estratificar térmicamente la solución de $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$. El concepto combina la absorción y almacenamiento de energía sensible. La viabilidad del concepto propuesto se demostró a través de un estudio computacional de dinámica de fluidos, transferencia de masa y calor del sistema [10].

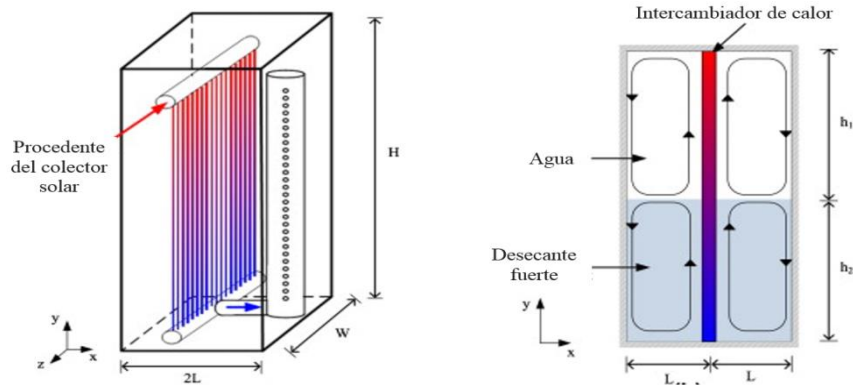


Figura 11.- Diseño de acumulador térmico de un recipiente [10].

N.T Soukpoé, Pierres y Lou, desarrollaron un prototipo de acumulador térmico en Locie-CNRS de Francia. El prototipo consta de un reactor y dos recipientes para almacenamiento (Figura 12). El prototipo fue probado satisfactoriamente obteniendo almacenamiento de calor de hasta 46.8 MJ. Sin embargo, en el proceso de descarga se encontró una falla debido a un mal diseño del absorbedor [20]. Este tipo de acumulador termoquímico ocupa más volumen que el integrado, ya que requiere de tres recipientes y componentes de medición, lo que encarece al prototipo. Debido a lo anterior, se consideró el diseño de un acumulador térmico integrado, ya que puede ser más compacto y de menor costo.

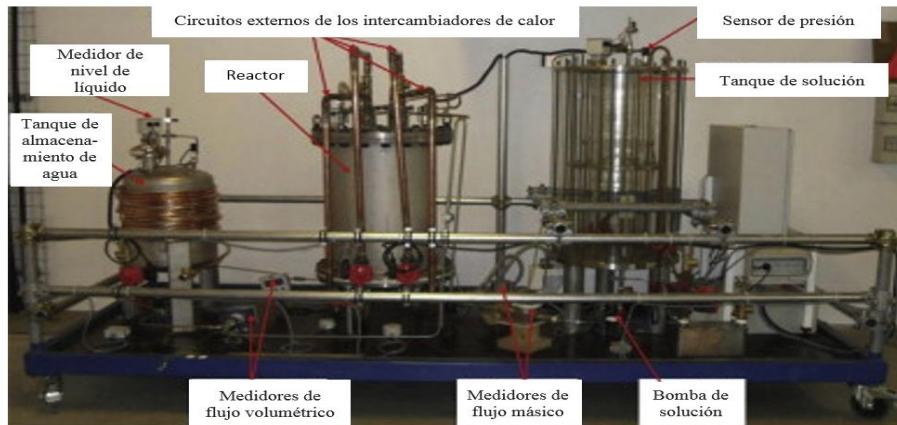


Figura 12.- Prototipo de acumulador térmico separado [20].



Los acumuladores térmicos basados en reacciones químicas, se clasifican también en abiertos y cerrados. Los acumuladores abiertos son ideales para usarse en refrigeración de habitáculos, porque pueden enfriar directamente el aire. Las zeolitas son los materiales apropiados para este tipo de almacenamiento.

Los acumuladores de ciclo cerrado pueden ser de un solo recipiente, integrado o separado. Los acumuladores de dos recipientes son un concepto nuevo que ha logrado salir al mercado. Sin embargo, su costo es muy elevado, como es el caso del acumulador desarrollado por la empresa sueca ClimateWell, el cual es usado como acumulador de energía térmica y climatizador de habitáculos. Los acumuladores integrados pueden ser más compactos, requieren de menos material y menor energía externa. Los prototipos de este tipo de acumuladores que existen a escala laboratorio, no han mostrado el rendimiento esperado debido a que la transferencia de calor y las reacciones no se dan como lo predicen los resultados teóricos.

En los acumuladores separados se pueden tener mejor control de las reacciones, ya que se puede controlar la cantidad de materiales reactantes y el reactor puede ser reducido. Este tipo de acumulador requiere de mayor energía externa para mover los materiales de un recipiente a otro y su mecanismo es complejo técnicamente. Los prototipos de este tipo de acumuladores tampoco han alcanzado el rendimiento teórico.

La sal de $CaCl_2$ es un material prometedor para acumuladores térmicos de vida útil prolongada, debido a que este material presenta alta densidad de almacenamiento, tiene bajo costo, no es corrosivo y sus procesos de hidratación-deshidratación son a baja temperatura. En la Tabla 1 se muestran las sales hidratadas que han sido reportadas con mayor potencial para el almacenamiento térmico [24, 25], por medio de reacciones de hidratación-deshidratación.



Tabla 1.- Sales hidratadas con mayor potencial de almacenamiento térmico

Material	Densidad kg/m^3	Capacidad de almacenamiento $kJ/$ kg	Capacidad de almacenamiento GJ/m^3
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O$	1710	1082	1.85
$MgCl_2 \cdot 6 H_2O$	1569	2001	3.14
$Na_2S \cdot 5 H_2O$	1580	1857	2.93
$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$	1680	1671	2.81
$Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$	1464	1749	2.56
$SrBr_2 \cdot 6 H_2O$	2386	814	2.02

El desarrollo de materiales compuestos es la nueva línea de investigación que está surgiendo en el campo de los materiales termoquímicos. Esta línea de investigación tiene como objetivo atacar las desventajas que presentan algunas sales hidratadas como: pérdida de la capacidad de aglomeramiento, ciclabilidad de almacenamiento y la lenta cinética de reacción. Se busca combinar sales o soportarlas en otros materiales para resolver dichos problemas [26].

2.2. - Análisis de energía y exergía de los acumuladores térmicos.

El tanque de agua es el acumulador térmico tradicionalmente usado en los colectores solares. Su análisis de energía y exergía ha sido reportado por diferentes autores [27-29].

En el caso de los acumuladores térmicos basados en calor latente, se ha reportado el análisis de energía para un sistema de calefacción con acumuladores que involucran un PCM, dicho análisis indicó que el uso de materiales de cambio de fase en sistemas de calefacción resulta económico y eficiente [30]. También, el análisis de energía y exergía de un acumulador de tubo y coraza fue reportado, diseñado, construido y probado en la universidad Dokuz Eylul, en Turquía. En este acumulador, la eficiencia se evaluó en función del material, el diámetro y el espesor de los tubos utilizados [31].

Aydin *et al.* [32] analizaron energética y exergéticamente el proceso de carga del acumulador térmico de calor latente instalado en el sistema de calefacción del edificio de energías renovables de la Universidad Técnica de Yildiz, en Estambul Turquía. El acumulador térmico utiliza parafinas como material de cambio de fase. Por lo tanto, la eficiencia energética y exergética que reportaron para dicho proceso fue de 74 y 37 % respectivamente.



Xu *et al.* [33] desarrollaron un modelo matemático para calcular la eficiencia energética y exergética de un acumulador térmico de calor latente, el cual utiliza tres diferentes materiales de cambio de fase. El modelo considera el efecto de las temperaturas de entrada, el número de unidades de transferencia de calor y la temperatura de fusión de los materiales de cambio de fase.

Kousksou *et al.* [34] desarrollaron un modelo para el análisis exergético de un acumulador térmico empacado con PCM encapsulado, acoplado a un colector solar de calentamiento de aire. El modelo describe el comportamiento del acumulador considerando un fluido de aire caliente laminar y newtoniano.

Por otra parte, el análisis energético y exergético de acumuladores termoquímicos han sido reportados [35-37]. Dicho análisis fue realizado para un acumulador integrado, cuya energía es transferida al acumulador termoquímico a través de un serpentín o intercambiador de calor. En este caso, la eficiencia que mostraron los análisis de energía y exergía fueron de 50 y 9 % respectivamente durante el proceso global. La Figura 13 muestra el esquema del acumulador analizado.

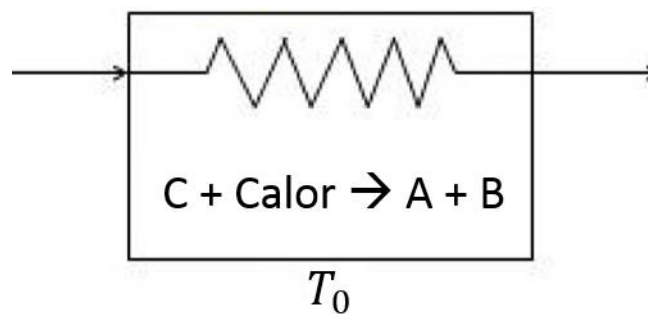


Figura 13.- Esquema de un acumulador termoquímico.

El esquema representa un acumulador termoquímico que es atravesado por un serpentín, a través del cual circula un fluido caliente que transfiere su energía hacia el acumulador durante el proceso de carga. Posteriormente, durante el proceso de descarga, el fluido que circula a través del serpentín recoge la energía liberada en el acumulador para su uso.

Un análisis de energía y exergía para un sistema de refrigeración por absorción fue reportado por Jemaa *et al.* [38], el cual utiliza amoníaco y agua como par de trabajo. En este trabajo se



concluyó que el absorbente exhibe la mayor fuente de pérdida de exergía, seguida por el intercambiador de calor. El análisis se realizó en base a la degradación del coeficiente de rendimiento (COP).

Caliskan *et al.* [39] llevaron a cabo el análisis energético y exergético de un acumulador térmico que combina almacenamiento sensible y termoquímico, para uso en climatización de edificios. El sistema de almacenamiento térmico consiste en un acumulador termoquímico combinado con acuífero subterráneo de agua caliente. En este caso, el análisis se realizó mediante la variación de la temperatura ambiente, para estudiar cómo cambia la eficiencia del sistema. Se concluyó que la eficiencia del sistema es mayor a medida que la temperatura del ambiente es menor.

Caliskan *et al.* [39] concluyeron que la eficiencia de un acumulador combinado es más alto que la eficiencia que cada acumulador muestra de forma individual.

Los antecedentes de análisis de energía y exergía se han realizado para acumuladores térmicos que involucran una sola forma de almacenamiento térmico (sensible, latente o termoquímico), dado que no se han desarrollado propuestas de acumuladores térmicos que combinen el almacenamiento térmico de dos formas distintas y de forma integrada. Es por esto que en este trabajo se propuso el diseño de un acumulador térmico, que combina el almacenamiento sensible y termoquímico de forma integrada. Además, se realizara un modelo matemático para analizar energética y exergéticamente al acumulador diseñado, en base a los antecedentes de los modelos realizados.

En este trabajo se propuso el diseño de un acumulador térmico que combina el almacenamiento termoquímico y de calor sensible, debido a que el termoquímico puede almacenar más energía térmica por unidad de volumen, pero el almacenamiento basado en calor sensible es más eficiente exergéticamente. Por lo tanto, al combinar dichos factores es posible obtener una configuración con mayor capacidad de almacenamiento térmico y más eficiente. Además, en la literatura se carece de trabajos relacionados con acumuladores térmicos combinados para su uso en agua sanitaria de viviendas.



3. – Objetivos.

3.1. – General.

Diseñar un acumulador térmico combinado (calor sensible-reacción química) y evaluar la eficiencia térmica, el beneficio económico y ambiental, a partir del modelado termodinámico del sistema, del análisis de energía y exergía, del análisis de retorno de inversión y del análisis de ahorro de combustible, para comparar la eficiencia con otras formas de almacenamiento térmico, determinar el ahorro económico y estimar la reducción de emisiones de CO₂ al ambiente.

3.2. – Específicos.

- Evaluar el potencial de almacenamiento térmico de diferentes sales hidratadas, mediante técnicas de análisis térmico, para seleccionar el material más prometedor para usarse en acumuladores termoquímicos.
- Diseñar un acumulador termoquímico combinado con calor sensible, utilizando el software AutoCAD, para dimensionar y tener una perspectiva realista del acumulador.
- Simular el comportamiento térmico de los diferentes acumuladores, durante los procesos de carga, almacenamiento y descarga, para evaluar la eficiencia de los acumuladores en cada etapa.
- Comparar la eficiencia de un acumulador combinado con respecto a los de calor latente de cama empacada y a los de calor sensible, mediante el análisis de energía y exergía, tomando como referencia una misma capacidad de almacenamiento.
- Evaluar la reducción de CO₂ emitido al medio ambiente, debido al uso de la energía solar almacenada en un acumulador combinado.
- Realizar un estudio de costos del acumulador combinado para determinar si realmente se justifica el mayor costo de un acumulador termoquímico, combinado con almacenamiento por calor sensible, en un ámbito doméstico.



4. – Metodología.

La metodología general empleada para realiza este trabajo siguió los pasos que se muestran en la Figura 14.

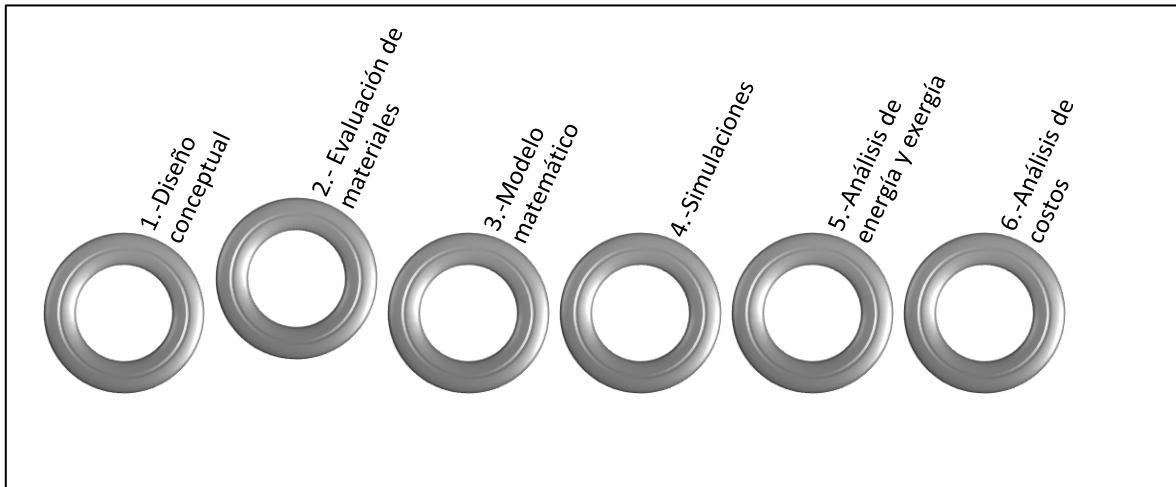


Figura 14.- Metodología general del trabajo.

4.1.- Diseño conceptual.

El acumulador termoquímico que fue diseñado es de tipo integrado y ciclo cerrado. La característica distintiva de este tipo de acumulador térmico es que solo necesita dos recipientes, uno para llevar a cabo las reacciones del TCM y otro para almacenamiento de uno de los productos de la reacción. Este acumulador está diseñado para operar sumergido en un tanque de agua, el cual sirve como depósito de energía para impulsar los procesos de hidratación y deshidratación del TCM.

Los procesos de transferencia de calor durante los procesos de carga y descarga de energía se llevan a cabo a través de los canales que atraviesan al acumulador termoquímico de un extremo al otro. En dichos canales circula el agua del tanque en el que está inmerso el acumulador termoquímico. El agua recibe o aporta energía durante dichos procesos.

El diseño conceptual del acumulador térmico se realizó en 2 y 3 dimensiones, utilizando el software AutoCAD.



4.1.1. - Aspectos a considerar.

Los acumuladores térmicos de calor sensible utilizan agua porque tiene alto calor específico y bajo costo. Los acumuladores pueden ser de dos tipos: estratificado o mezclado. Los acumuladores estratificados aumentan la disponibilidad de la energía almacenada, pero también se maximiza la proliferación de bacterias patógenas como la Legionella, por lo cual, el agua es insalubre.

La Legionella se multiplica en el agua a temperaturas entre 25 y 49 °C (en este intervalo de temperatura se favorece su reproducción). El agua queda estéril a temperaturas por encima de 49 °C. Por tal motivo, la temperatura del agua caliente almacenada debe estar por encima de los 60 °C ya que la Legionella no sobrevive a esa temperatura [40, 41].

Por otra parte, los acumuladores térmicos mezclados mantienen una temperatura homogénea para evitar la proliferación de bacterias [4].

Para el dimensionamiento de acumuladores térmicos se recomienda que la relación base-altura del acumulador sea la mayor posible, en otras palabras, que el acumulador sea horizontal para que no se favorezca la estratificación. Así mismo, la relación del volumen del acumulador térmico con el área del colector solar debe ser de $50 \leq V/A \leq 180$, según el “boletín oficial del estado para el ahorro de energía en España” [42].

Para los acumuladores basados en calor sensible, el aislante térmico es de suma importancia, debido a que de él depende que la energía se almacene o se pierda. En particular, el poliuretano es el mejor aislante térmico debido a su baja conductividad térmica, seguido por la fibra de vidrio. Por otro lado, para los acumuladores termoquímicos es de suma importancia que los recipientes no sufran corrosión, durante las reacciones que en él se generan. Es por ello que el acero inoxidable es el material que se recomienda para la construcción de acumuladores termoquímicos, según Sole y col. [43, 44], ya que mostró mayor resistencia a la corrosión bajo condiciones de reacción con sales.

Por lo anterior, el tanque de agua se consideró completamente mezclado de tipo horizontal, con aislante térmico de fibra de vidrio porque es menos tóxico. Para el acumulador termoquímico se consideró acero inoxidable por su resistencia a la corrosión.



4.1.2. – Evaporador.

El evaporador es una pieza importante dentro del acumulador termoquímico. De este depende que la energía almacenada termoquímicamente se libere durante el proceso de descarga. La cantidad de vapor de agua generado para rehidratar el TCM, dependerá en gran medida de la temperatura del fluido de trabajo. El evaporador es un intercambiador de calor estacionario.

En este caso, el flujo de vapor generado se determinó a partir de un balance de energía y con éste se calculó la energía liberada durante la rehidratación de la sal anhidra, ya que está en función de la cantidad de vapor generado.

El tamaño del serpentín se calculó utilizando el método basado en el “número de unidades transferidas” de calor (NTU, por sus siglas en inglés). Una vez que se conoce la temperatura del fluido caliente y la del agua saturada (que se evapora), podemos realizar el dimensionamiento.

En primer lugar, el diferencial de temperatura máxima que se produce durante el intercambio de calor es identificado, el cual es la diferencia entre el fluido caliente y el fluido frío (T_C y T_F respectivamente). La temperatura del fluido caliente no puede bajar más de la temperatura del fluido frío y este último no puede incrementar su temperatura más que la del fluido caliente, siendo estas las condiciones límites. Por lo tanto, la ecuación para determinar la diferencia de la temperatura máxima se expresa de la siguiente forma.

$$\Delta T_{max} = T_C - T_F \quad (1)$$

De acuerdo con las condiciones límites, la transferencia de calor en los intercambiadores de calor alcanza su valor máximo cuando se cumple una o las dos condiciones límites. Las dos condiciones se alcanzan simultáneamente cuando la capacidad calorífica de los fluidos intercambiadores de calor es igual, es decir, cuando se tienen en ambos fluidos el mismo flujo másico y calor específico. La capacidad calorífica del fluido se obtiene del producto entre el flujo másico y el calor específico (\dot{m}_a y $c_{p,a}$, respectivamente). El fluido con menor capacidad calorífica (C_{min}) experimentará un mayor cambio en su temperatura, por lo que será el primero en alcanzar la temperatura límite y la transferencia de calor se suspenderá. Por lo tanto, el flujo máximo de transferencia de calor en el evaporador se puede calcular con la ecuación 2.



$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot (\Delta T_{max}) \quad (2)$$

Donde

$$C_{min} = \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \quad (3)$$

Una vez que se sabe la cantidad de vapor que se desea generar, la efectividad de transferencia de calor del intercambiador (ε) se calcula utilizando la ecuación 4.

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_a \cdot h_{fg}}{\dot{Q}_{max}} \quad (4)$$

Donde \dot{m}_a es el flujo másico de agua que se evapora y h_{fg} es la entalpia de evaporación del agua.

Se han desarrollado relaciones de efectividad para un gran número de intercambiadores de calor, considerando que la relación de capacidades entre los fluidos es igual a cero para los condensadores, evaporadores y calderas. La relación de capacidades es cero cuando la diferencia de temperatura durante el intercambio de calor tiende al infinito; esto ocurre durante un proceso de cambio de fase. En este caso, la efectividad se calcula a partir de la ecuación 5, la cual se obtuvo de tablas termodinámicas [45].

$$\varepsilon = 1 - e^{(NTU)} \quad (5)$$

Obtenida también de tablas termodinámicas [45], para calcular el valor de NTU se utiliza la ecuación 6, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$NTU = -\ln(1 - \varepsilon) \quad (6)$$

Generalmente, la relación de efectividad de los intercambiadores de calor incluye el grupo adimensional UA_s/C_{min} [45]. Una vez conocido el valor de NTU se puede calcular el área de transferencia de calor y la longitud del tubo despejando la ecuación 7.

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{min}} \quad (7)$$

En la ecuación 7, U representa el coeficiente global de transferencia de calor y A_s es el área superficial del intercambiador. Los evaporadores se caracterizan por tener altos coeficientes de transferencia de calor. Considerando que un evaporador es lo opuesto a un condensador,



de tablas se obtiene el valor del coeficiente, las cuales indican un coeficiente de entre 1,000 y 6,000 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ [45].

4.1.3. – Condensador.

El condensador es también un intercambiador de calor, el cual es utilizado para retirar el calor del vapor y almacenar el condensado en un volumen más pequeño. El tamaño del serpentín se puede calcular a partir del método basado en NTU.

El vapor de agua producido en la reacción de deshidratación debe ser condensado y almacenado en estado líquido. El vapor es condensado con la ayuda de un serpentín (intercambiador de calor), a través del cual fluye un líquido (fluido de trabajo de condensación) a menor temperatura, que en este caso será agua.

El vapor de agua debe perder calor para pasar del estado gaseoso al líquido, dicho calor se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_v \cdot h_{fg}) + (\dot{m}_v \cdot c_p \cdot \Delta T) \quad (8)$$

En donde, \dot{Q} es el flujo de calor que se debe intercambiar al agua, \dot{m}_v es el flujo másico del vapor de deshidratación, h_{fg} es el calor latente de vaporización, c_p es el calor específico del vapor y ΔT es el diferencial de temperatura del vapor sobrecalentado.

Debido a que los intercambiadores de calor son dispositivos estacionarios, los balances de masa y energía se expresan de la siguiente forma:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (9)$$

$$\dot{E}_e = \dot{E}_s \quad (10)$$

El balance de energía se puede expresar como flujo de energía, quedando como se muestra a continuación.

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (11)$$

donde \dot{m} representa el flujo másico y h la entalpia, los subíndices 1 y 3 representan la entrada del fluido caliente y frío, respectivamente, mientras que los subíndices 2 y 4 la salida del fluido caliente y frío, respectivamente.



Sabiendo que tanto el flujo de vapor como el flujo de trabajo de condensación son estacionarios, el balance de energía se simplifica a:

$$\dot{m}_v \cdot h_{fg} = \dot{m}_a \cdot (h_4 - h_3) \quad (12)$$

Donde, el producto de \dot{m}_v y h_{fg} representan el flujo de calor necesario para condensar el vapor generado. Por otro parte, el producto de \dot{m}_a y $(h_4 - h_3)$ representa el calor que el fluido condensador recibe. Por lo tanto, la ecuación 12 se reescribe como:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \cdot (T_4 - T_3) \quad (13)$$

donde T_3 y T_4 son las temperaturas del fluido a la entrada y salida del condensador.

A partir de la ecuación 13 es posible calcular la temperatura de salida del fluido de trabajo en el condensador.

Una vez conocidas las temperaturas de entrada y salida en el intercambiador de calor, se determina la efectividad del intercambiador de calor a partir del método basado en NTU. En dicho método, se toma la capacidad de almacenamiento del flujo de trabajo en el condensador como la mínima. Esto se debe a que la capacidad de almacenamiento del vapor tiende al infinito, porque la diferencia de temperatura durante el cambio de fase de vapor a líquido tiende a cero. Por lo tanto, la expresión para determinar la efectividad del intercambiador es:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_a \cdot h_{fg}}{\dot{Q}_{max}}$$

donde

$$\Delta T_{max} = T_C - T_F$$

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot (\Delta T_{max})$$

$$C_{min} = \dot{m}_a \cdot c_{p_a}$$

Cuando la relación de capacidades de almacenamiento tiende a cero, como lo es en el caso de los condensadores, el valor de NTU se obtiene a partir de:

$$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$$



Ya que se conoce el valor de NTU y el coeficiente global de transferencia de calor se obtiene de tablas termodinámicas [45], se puede calcular el área de transferencia de calor y el tamaño de los tubos del serpentín; la ecuación 7 se utiliza con este fin.

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{min}}$$

4.2. – Evaluación de materiales para el almacenamiento térmico.

Dos materiales fueron considerados para el almacenamiento térmico del acumulador combinado. Para la parte sensible se consideró agua como material de almacenamiento térmico y en la parte termoquímica se consideró la sal hidratada que mostró mayor potencial, según la metodología de la Figura 15:

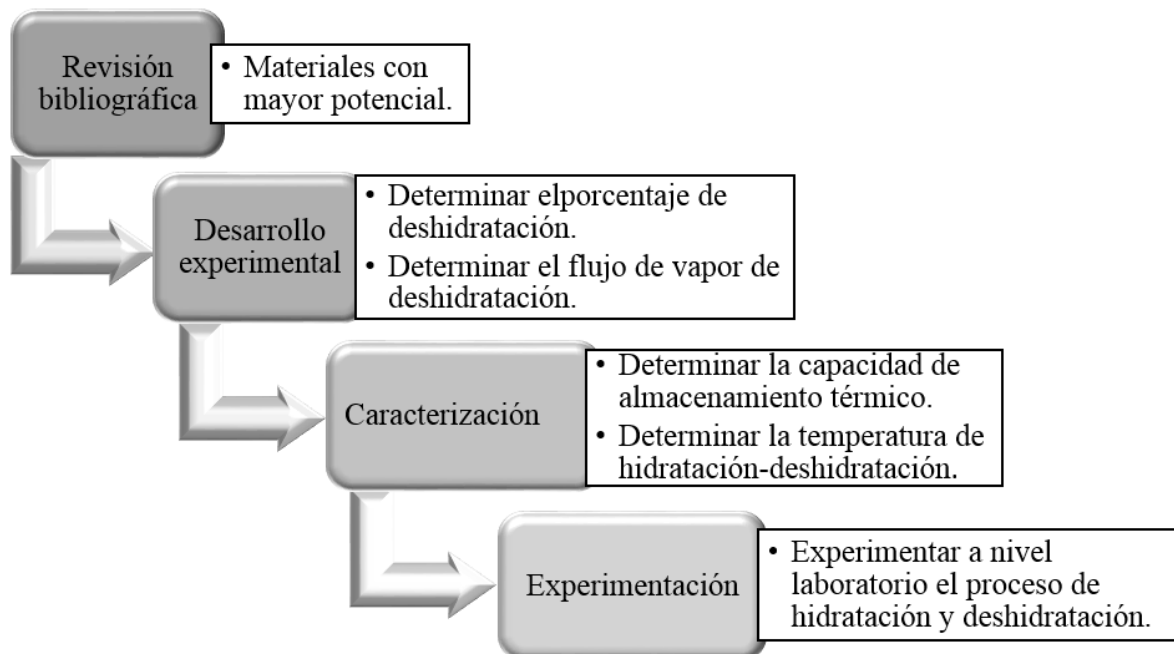


Figura 15.- Metodología para la evaluación de los materiales.

4.2.1. – Desarrollo experimental.

Durante el desarrollo experimental, las sales se sometieron a un proceso de deshidratación en un horno de secado, con rampa de calentamiento de 1°C/min desde temperatura ambiente hasta los 80 °C. La rampa de calentamiento se consideró lenta, para evitar la fusión del material [46]. La prueba se llevó a cabo por triplicado, a diferentes tiempos. Los tiempos



considerados fueron 10, 20, 40 y 80 minutos, con ellos se determinó el flujo de vapor de la deshidratación y el porcentaje de deshidratación de la sal, mediante la diferencia de peso al inicio y al final de la deshidratación. Los primeros dos tiempos se consideraron con intervalos cortos de 10 minutos, porque la deshidratación de las sales es más rápida al inicio del proceso, se duplicaron en los siguientes tiempos porque la deshidratación es menor. El valor final de la deshidratación se utilizó para el cálculo del volumen del recipiente del acumulador termoquímico.

Cuando el material se sometió a deshidratación, el número de moles de agua perdidos por cada mol de sal hidratada se calculó con la ecuación 14 [47].

$$D = \frac{m_a \cdot PM_{TCM}}{m_{TCM,anh} \cdot PM_a} \quad (14)$$

donde D representa los moles de agua perdidos durante la deshidratación, m_a es la masa de agua perdida, PM_{TCM} es el peso molecular de la sal anhidra, $m_{TCM,anh}$ es la masa de sal anhidra y PM_a es el peso molecular del agua.

También se calculó el máximo flujo de vapor de deshidratación entre dichos intervalos de tiempo, el cual se utilizó para el cálculo del condensador. Los tiempos considerados fueron tomados sobre la base de que la deshidratación de las sales es más rápida en los primeros minutos (después de haber alcanzado la temperatura de deshidratación), y se calculó un promedio del flujo de vapor en cada intervalo de tiempo. En la Figura 16 se muestra el proceso experimental de deshidratación de la sal.

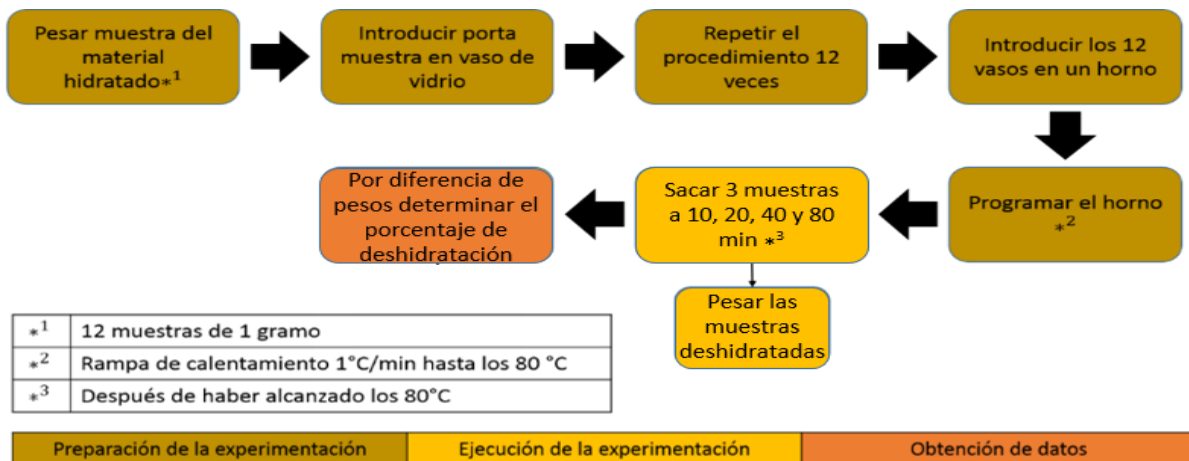


Figura 16.- Desarrollo experimental para obtener las curvas de hidratación.



La metodología anterior es similar a la que se utilizó en el proceso de hidratación de la sal. Sin embargo, la diferencia es que el agua se agrega en los vasos para generar vapor durante el calentamiento para rehidratar la sal.

4.2.2. – Caracterización.

Los materiales que mostraron buenos resultados durante las etapas anteriores fueron caracterizados para determinar su capacidad de almacenamiento térmico, así como la temperatura en la cual se hidrata y deshidrata el material. La técnica de análisis térmico fue el método utilizado para la caracterización de los materiales termoquímicos. La capacidad de almacenamiento térmico de las sales hidratadas se determinó a partir de las técnicas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y de termogravimetría (TG). A partir del termograma de flujo de calor en función de la temperatura, obtenido mediante el DSC, se integró el área bajo la curva del proceso endotérmico y se obtuvo la capacidad de almacenamiento térmico del material.

La temperatura de hidratación-deshidratación fue indispensable para definir el intervalo de temperatura, en el cual, el acumulador térmico puede operar. El valor de la temperatura de hidratación-deshidratación se obtuvo a partir del análisis térmico DSC, tomando el pico del proceso endotérmico en el termograma DSC.

4.2.3. – Experimentación a nivel laboratorio.

La experimentación a nivel laboratorio se realizó con el montaje experimental que se muestra en la Figura 17.

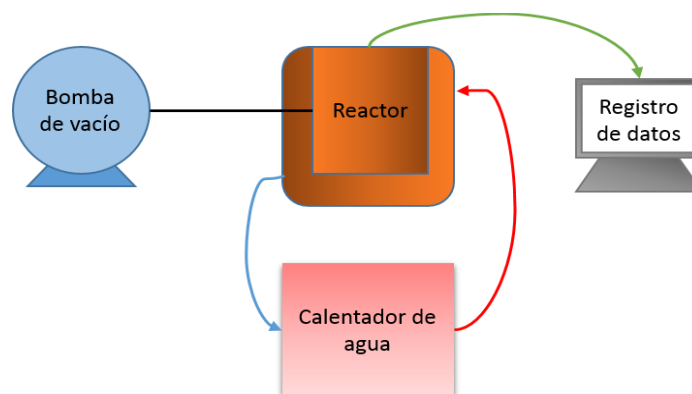


Figura 17.- Esquema del montaje experimental.



En dicho montaje, la bomba de vacío extrae el vapor del reactor durante el proceso de deshidratación; además, el vacío en el reactor se realizó para que el vapor de agua se genere a baja temperatura durante el proceso de hidratación. Por otra parte, el calentador de agua recirculó un flujo de agua caliente entre 80 y 85 °C a través de la cámara de enfriamiento del reactor, el cual transfiere energía a la sal durante la deshidratación de la misma. Los datos son registrados a través de una tarjeta de adquisición de datos y dos termopares, los cuales miden en tiempo real la temperatura de la muestra y de la cámara de reacción como referencia.

4.3. – Modelo matemático del acumulador combinado de calor sensible-termoquímico.

El acumulador térmico combinado consta de una sección de almacenamiento térmico sensible (utilizando agua) y otra sección de almacenamiento termoquímico. El acumulador termoquímico está inmerso en el tanque de agua. La Figura 18 muestra el esquema del acumulador combinado que se evaluó.

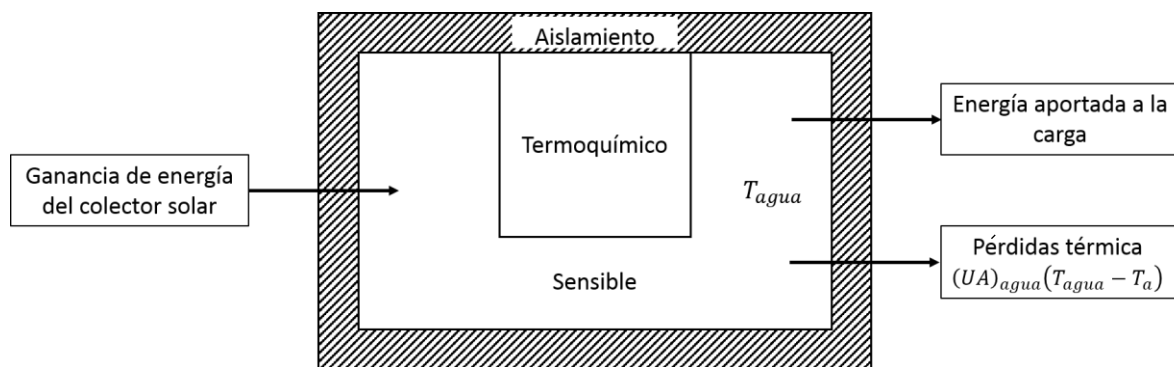


Figura 18.- Esquema del almacenamiento térmico sensible-termoquímico.

El esquema del acumulador empacado con PCM encapsulado puede ser representado de la misma forma que el acumulador combinado, debido a que la frontera del sistema es la misma en ambos casos y la transferencia de calor entre el agua y el PCM o TCM ocurre internamente en el tanque de agua. Por lo tanto, la energía que el agua le sede al PCM o al TCM durante el proceso de carga es recuperada nuevamente por el agua durante el proceso de descarga. En base a lo anterior, el análisis de energía y exergía de dicho acumulador térmico se realizó con las ecuaciones obtenidas del análisis para el acumulador combinado sensible-termoquímico.



4.4.- Simulación.

Para las simulaciones y la evaluación energética y exergética del acumulador térmico se utilizó la aplicación de Excel, en la cual se introdujeron las ecuaciones del modelo que describe su comportamiento. Ver anexo II.

4.4.1. – Evaluación.

La irradiancia es la magnitud que mide la radiación solar que emite el sol sobre la superficie de la Tierra por unidad de tiempo y área. Su unidad es el W/m^2 . La irradiancia solar no llega con la misma intensidad en todas las partes del planeta. La irradiancia es más intensa en el ecuador, mientras que en los polos es mucho más débil.

La norma mexicana *NMX-ES-001-NORMEX-2005* establece valores de irradiancia solar promedio para evaluar sistemas solares térmicos en los tres climas prevalecientes que se consideran en el país, durante el verano y el invierno. La Tabla 2 muestra los valores de irradiancia según esta norma.

Tabla 2.- Irradiancia solar promedio en México.

Horario	Irradiancia [W/m^2]					
	Tropical		Templado		Semidesértico	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
7-8	225	87.5	137.5	100	325	50
8-9	412.5	212.5	287.5	250	537.5	125
9-10	625	375	500	437.5	725	250
10-11	825	562.5	712.5	600	875	437.5
11-12	962.5	725	900	712.5	962.5	612.5
12-13	962.5	725	900	712.5	962.5	612.5
13-14	825	562.5	712.5	600	875	437.5
14-15	625	375	500	437.5	725	250
15-16	412.5	212.5	287.5	250	537.5	125
16-17	225	87.5	137.5	100	325	50
17-18	87.5	12.5	50	12.5	137.5	0



Las temperaturas del agua consideradas fueron de 15, 22.5 y 26 °C para el clima tropical, templado y semidesértico respectivamente, según la norma. Cada clima tiene temperatura ambiente característica, que para este análisis se consideró de 20, 22 y 24 °C como temperatura ambiente promedio anual para los climas templado, semidesértico y tropical respectivamente, según *CONAGUA* [48].

El calor útil generado en un colector solar se calculó con la ecuación 15 [49].

$$Q_u = A_{col} \cdot G \cdot \left[\eta_0 - \left(\frac{a_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_m - T_a)^2}{G} \right) \right] \quad (15)$$

Donde Q_u es el calor útil generado en el colector, T_a es la temperatura del ambiente y G es la irradiancia solar. Mientras que, el resto de las variables son datos característicos de cada colector solar. La variable A representa el área de captación de la energía solar, η_0 es la eficiencia óptica del colector, T_m es la temperatura media del agua en el colector, a_1 y a_2 son coeficientes de pérdida térmica.

Se consideró que el acumulador térmico se encuentra a una temperatura uniforme. La temperatura del agua en el tanque se determinó a partir de la ecuación 16, la cual se muestra a continuación.

$$T_{n+1} = T_n + \frac{\Delta t}{\dot{m}_a \cdot c_p} (\dot{Q}_u - \dot{Q}_p - \dot{Q}_{TCM} - \dot{L}) \quad (16)$$

Donde \dot{Q}_u , \dot{Q}_p , \dot{Q}_{TCM} y \dot{L} representan el flujo de calor útil (asociado al agua calentada por el colector solar), el flujo de calor perdido al ambiente, el flujo de calor transferido al TCM y el flujo de calor de carga (demandado) respectivamente. Por su parte T_{n+1} es la temperatura del agua después de haber transcurrido un intervalo de tiempo Δt .

La carga del acumulador se evaluó en función de la temperatura del tanque de agua. La evaluación se realizó mediante simulaciones de los periodos de verano e invierno, para los tres climas considerados en México. El resultado de las simulaciones se muestra en el punto 5.3.

4.4.2. – Consideraciones.

Dado que el material aislante representa la mayor parte del flujo de calor transferido al ambiente, las resistencias térmicas por convección dentro y fuera del tanque se despreciaron.



En este caso se consideró un material aislante de fibra de vidrio, con espesor de 5 cm y conductividad térmica de $0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y temperatura ambiente de 20°C . El tanque tiene forma cilíndrica. Por lo que la pérdida de calor al ambiente se determinó a partir de la ecuación 17.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{paredes} + \dot{Q}_{tapas} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{paredes} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{ais} \cdot L \cdot \Delta T}{\ln(D_e/D_i)} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{tapas} = 2 \cdot k_{ais} \frac{\pi \cdot D_i^2}{4 \cdot x_{ais}} \Delta T \quad (19)$$

Donde k_{ais} y x_{ais} son la conductividad térmica y el espesor del material aislante, L es la altura del acumulador, D_i y D_e son el diámetro interno y externo del acumulador térmico y ΔT es el diferencial de temperatura entre el interior del tanque y el ambiente [50].

Por otra parte, el acumulador termoquímico es de acero inoxidable. La conductividad térmica considerada del acero fue de $14.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Los datos que se utilizaron para este análisis son de un colector solar de alto rendimiento TopSon F3-1 [51], los cuales están disponibles en la red. La Tabla 3 muestra los datos del colector que fue utilizado en la evaluación del acumulador.

Tabla 3.- Datos del colector de placa plana TopSon F3-1.

Variable	Valor
Coefficiente de transmisión de calor a_1 [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]	3.235
Coefficiente de transmisión de calor a_2 [$\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]	0.0117
Eficiencia [%]	80.4
Tamaño [m]	2.099 x 1.099

4.5. – Análisis de energía y exergía.

4.5.1.- Acumulador combinado.

El análisis de energía fue utilizado para evaluar los acumuladores térmicos y determinar la eficiencia, el cual solamente indica la fracción de energía que es recuperada después de un proceso.



En este análisis se considera un fluido de trabajo y el material termoquímico como medio de almacenamiento térmico. En dicho sistema, el fluido de trabajo es el encargado de otorgar la energía durante el proceso de carga (deshidratación), o bien, recibir la energía de la parte termoquímica durante el proceso de descarga (hidratación).

Las consideraciones para este caso, fueron:

- El sistema es isobárico
- El sistema está en equilibrio, por lo tanto, la energía cinética del agua que entra y sale es la misma.
- Durante el proceso de carga, la temperatura inicial del material termoquímico es igual a la del ambiente.
- No hay pérdidas de energía termoquímica durante el periodo de almacenamiento térmico.

Mediante el balance de energía se determinó la eficiencia térmica de los procesos de carga, almacenamiento y descarga del acumulador combinado.

Por otra parte, el análisis de exergía toma en cuenta la cantidad y calidad de la energía, para dar una mejor idea de la eficiencia que un acumulador térmico puede desempeñar.

El análisis de exergía se realizó usando balances de exergía, a partir del cual se determinó la eficiencia de los procesos de carga, almacenamiento y descarga del acumulador combinado.

4.5.2. - Tanque de agua

El análisis de energía y exergía para un tanque de agua se puede realizar utilizando las ecuaciones que se muestran en la Tabla 4, reportadas por Dincer [29].



Tabla 4.- Ecuaciones para el análisis de energía y exergía para un tanque de agua.

Descripción	Energía	Exergía
Balance general	$Q_c - (Q_d + Q_r) = \Delta Q$	$X_c - (X_d + X_r) = \Delta X$
Proceso de carga	$Q_c - Q_{r_1} = \Delta Q_1$	$X_c - X_{r_1} = \Delta X_1$
Proceso de almacenamiento	$-Q_{r_2} = \Delta Q_2$	$-X_{r_2} = \Delta X_2$
Proceso de descarga	$-(Q_d + Q_{r_3}) = \Delta Q_3$	$-(X_d + X_{r_3}) = \Delta X_3$
Eficiencia de carga	$\eta_1 = \Delta Q_1 / Q_c$	$\eta_1 = \Delta X_1 / Q_c$
Eficiencia de almacenamiento	$\eta_2 = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 / \Delta Q_1$	$\eta_2 = \Delta X_1 + \Delta X_2 / \Delta X_1$
Eficiencia de descarga	$\eta_3 = \Delta Q_d / \Delta Q_1 + \Delta Q_2$	$\eta_3 = \Delta X_d / \Delta X_1 + \Delta X_2$
Eficiencia global	$\eta_g = Q_d / Q_c$	$\eta_g = X_d / X_c$
Significado de variables: Q=Calor, X=Exergía		Significado de subíndices: c=cargada, d=descargada, r=perdida

Estas ecuaciones son utilizadas para la evaluación de acumuladores térmicos basados en calor sensible o tanque de agua. En este caso se tomaron las siguientes consideraciones:

- El agua es incompresible
- El calor específico es constante

4.6. - Análisis de costos.

Se realizó un análisis de costos para el acumulador térmico diseñado. El costo del acumulador termoquímico se estimó en función de la cantidad de material necesario para su construcción, dicha cantidad se estimó en función de su tamaño. En el caso del tanque de agua, el costo aproximado fue estimado en función del precio de los tanques de agua existentes en el mercado. La suma de los dos costos se consideró como el costo total del acumulador combinado, más el 30 % considerado como utilidad de venta al público. El precio de los materiales se obtuvo de catálogos de tiendas distribuidoras de materiales.

La diferencia de los precios entre un sistema de calentamiento solar que integra un acumulador térmico combinado con respecto otro que integra un tanque de agua, radica en el costo del acumulador termoquímico. Por lo tanto, se analizó el retorno de la inversión del acumulador termoquímico y del sistema de calentamiento solar en general, de acuerdo con el ahorro económico debido al aprovechamiento solar.



El colector solar analizado en el punto 4.4.2 se consideró para el análisis de costos y del retorno de la inversión.

5. – Resultados.

5.1. – Diseño.

El acumulador termoquímico ocupa un volumen de 21.25 dm^3 , el cual está inmerso en un tanque que contiene 40 litros de agua. Este acumulador permite seguir almacenando energía térmica cuando el agua del tanque alcanza la temperatura máxima de almacenamiento, debido a que el agua le transfiere la energía para deshidratar la sal.

El acumulador termoquímico cuenta con dos depósitos, uno para las reacciones de hidratación-deshidratación y el segundo para condensar, almacenar y evaporar el agua. El condensador de vapor se ubica en la parte superior del acumulador, por su parte, el evaporador se ubica en la parte inferior del reactor. La capacidad en el reactor para el TCM es de 12.75 kg aproximadamente. A través del reactor cruzan canales por los cuales circulará el agua caliente para deshidratar al TCM (proceso de carga) o agua a menor temperatura que recibirá el calor producto de la reacción (proceso de descarga). En la Figura 19 se muestra el diseño del acumulador térmico combinado en dos dimensiones.

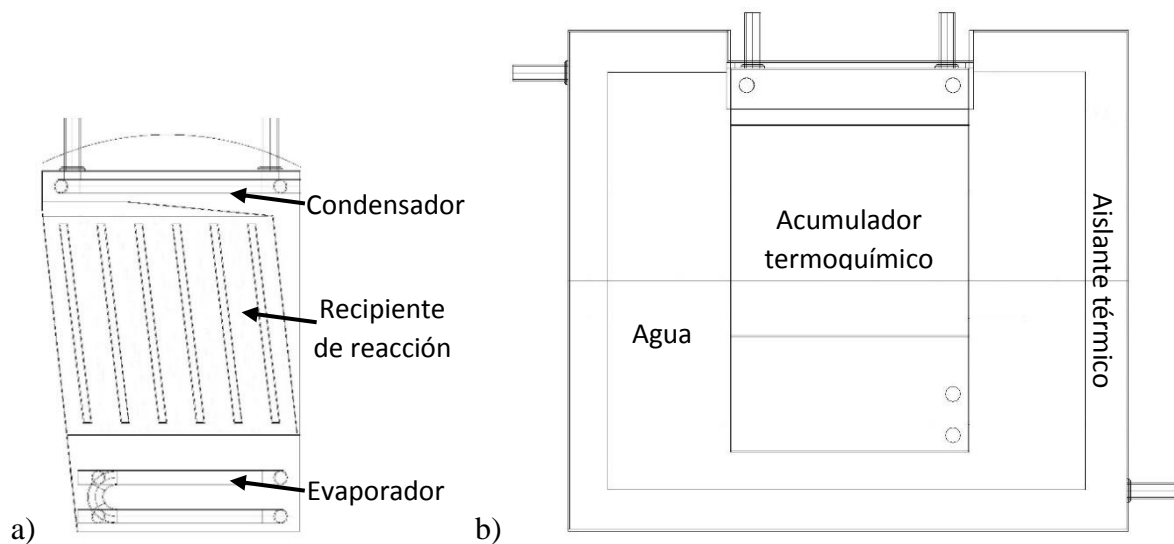


Figura 19.- Diseño en dos dimensiones. a) acumulador termoquímico. b) acumulador térmico combinado.

El acumulador termoquímico mide 31 cm de alto, 26 cm de fondo, 26.5 cm de ancho en la parte superior. La inclinación de los módulos del TCM en el reactor es para que durante el



ascenso el vapor no pase de largo sin interactuar con el TCM; el ángulo de inclinación es de 5.71° . El ángulo se consideró para retener ligeramente al vapor en la zona de reacción.

Una vista realista del acumulador en tres dimensiones se muestra en la Figura 20a y 20b. La Figura 20b tiene un corte transversal para visualizar internamente el acumulador térmico combinado.

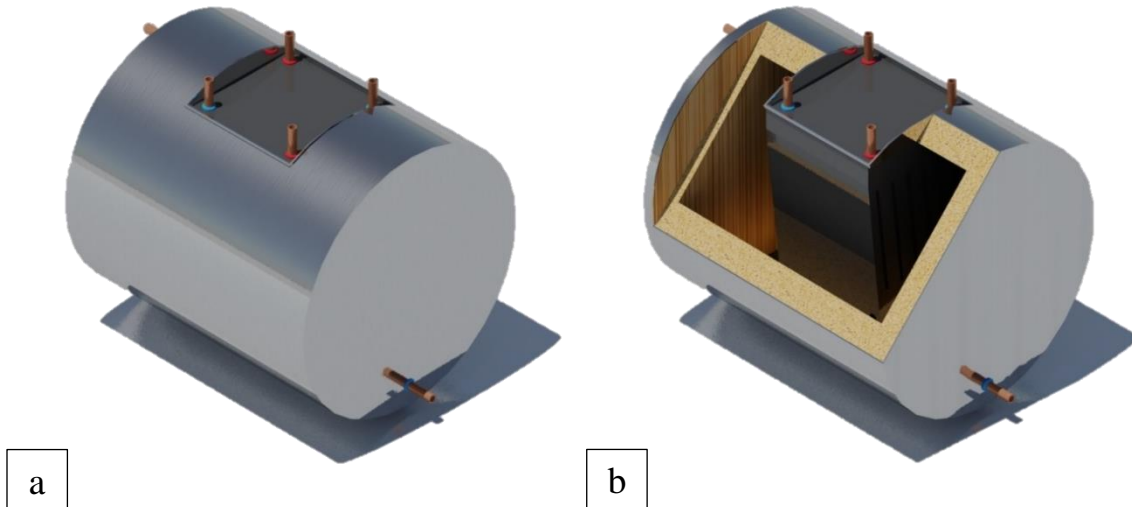


Figura 20.- Diseño del acumulador térmico combinado en 3 dimensiones. Fuente: Elaboración propia con el software AutoCAD.

El acumulador termoquímico se incorpora en la parte superior del tanque de agua. En la superficie superior se encuentran las entradas y salidas del agua para el evaporador y condensador el vapor. La Figura 21 muestra una vista realista en tres dimensiones del acumulador termoquímico.



Figura 21.- Diseño del acumulador termoquímico en tres dimensiones. Fuente: Elaboración propia con el software AutoCAD.

La Figura 22 muestra el esquema de tres diferentes acumuladores térmicos. El primero (de izquierda a derecha) es el de un tanque de agua, el segundo es el de un acumulador empacado con PCM encapsulado y el tercero es el esquema del acumulador térmico propuesto en este trabajo.



Figura 22.- Esquema de los tipos de acumuladores térmicos analizados y comparados. Fuente: Adaptación propia.

El tanque de agua y el acumulador empacado con PCM encapsulado ya han sido estudiados, por lo tanto, en este trabajo se analizaron con el propósito de comparar su capacidad de almacenamiento térmico y su eficiencia con la del acumulador propuesto.



5.2. - Materiales para el almacenamiento térmico.

De acuerdo con lo reportado en la literatura, cinco materiales se eligieron como posibles candidatos para utilizarse como TCM en el acumulador construido a nivel laboratorio. Los materiales tienen alta capacidad térmica y son de bajo costo (grado industrial). A continuación, se enumeran los materiales considerados.

1. Cloruro de calcio
2. Sulfato de magnesio
3. Sulfato de aluminio
4. Sulfato de sodio
5. Acetato de sodio

De estos materiales, el cloruro de calcio, el sulfato de aluminio y el sulfato de sodio fueron descartados al realizar las pruebas de laboratorio, debido a que la hidratación del material no se dio de forma homogénea. Se formaron grumos en la parte del material expuesta al ambiente. Por otra parte, las perlas de cloruro de calcio se deformaron al rehidratarse, ocasionando que el material se compactara y los huecos se redujeran, limitando el paso del vapor. Las perlas del cloruro de calcio se erosionaron cuando la sal fue deshidratada, produciéndose polvo del material.

5.2.1. - Desarrollo experimental.

La velocidad de deshidratación del material depende de la temperatura del agua en el tanque. La curva de la velocidad de deshidratación que se muestra en la Figura 23, se realizó asumiendo una temperatura del flujo de trabajo de 80 °C, ya que esta temperatura puede ser alcanzada por un colector solar de placa plana. Analizando la curva, se observa que la deshidratación del material es parcial. Ahora bien, el valor máximo de deshidratación del material se utilizó para dimensionar el volumen del tanque de almacenamiento de agua de deshidratación.

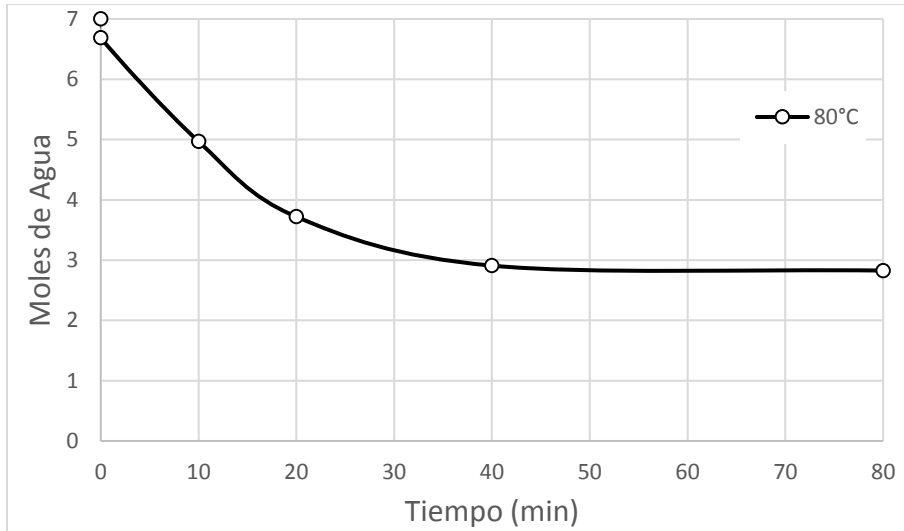
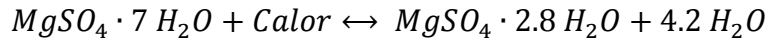


Figura 23.- Curva de deshidratación del sulfato de magnesio heptahidratado.

En este caso, el sulfato de magnesio pasó de estar hidratado con 7 moles de agua a 2.8 moles de agua, en este caso el material se deshidrató en un 60 %. La estequiometría de la reacción queda de la siguiente forma.



El flujo de vapor de deshidratación del sulfato de magnesio se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.- Flujo de vapor generado durante la deshidratación.

Periodo [min]	Rampa	0-10	10-20	20-40	40-80
Deshidratación [mol_{agua}]	0.3	1.7	1.2	0.85	0.15
Porcentaje [%]	4.28	28.57	54.28	57.85	60
Flujo de vapor [g/s]	0.009	0.051	0.018	0.012	0.002

El máximo flujo de vapor generado a consecuencia de la deshidratación es de 5.1×10^5 kg/s, por mol de sulfato de magnesio heptahidratado. Dicho valor se utilizó para calcular el tamaño del condensador.

Por otro lado, la velocidad de hidratación del material depende en gran medida del vapor generado durante el proceso de descarga de energía. El material deshidratado es muy higroscópico, lo que le permite rehidratarse rápidamente. En este caso no se generó una curva de hidratación, debido a que en las pruebas de laboratorio el material se rehidrató durante el periodo del incremento de temperatura de 25 a 80°C.



Por otra parte, los granos de acetato de sodio se deforman durante el proceso de deshidratación, ya que sufre un cambio de fase a una temperatura inferior a 80 °C. En la literatura se han reportado cambios de fase a los 58.4 °C [52].

5.2.2. - Capacidad de almacenamiento.

El sulfato de magnesio y el acetato de sodio resultaron ser los materiales más apropiados por lo que se realizó su caracterización con mayor detalle. A los materiales se les hizo un análisis simultáneo DSC y TG (Figura 24), para determinar si durante el proceso endotérmico existe pérdida de peso en el material. La pérdida de peso se atribuye a la deshidratación de la muestra. A continuación, se muestra el resultado del análisis térmico de los materiales.

- Sulfato de magnesio heptahidratado.

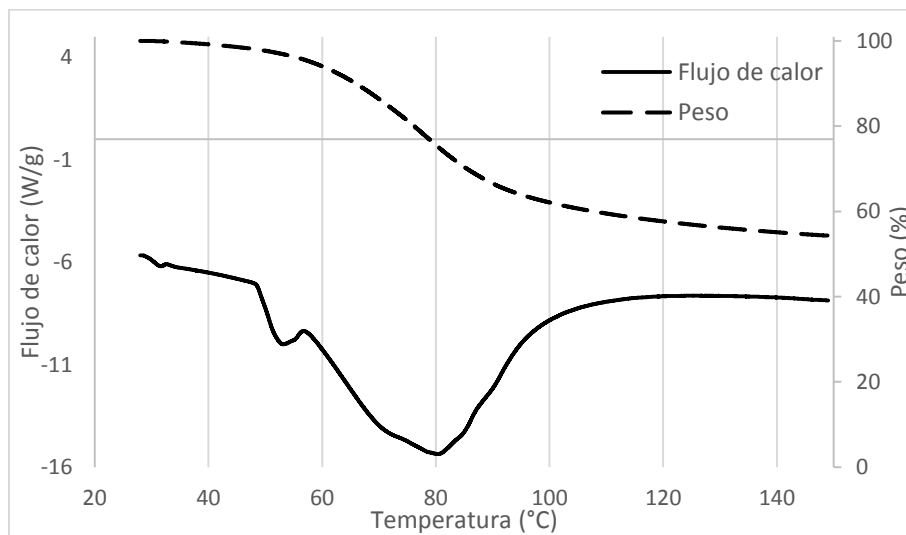


Figura 24.- Termograma del sulfato de magnesio heptahidratado.

A partir del termograma de porcentaje de pérdida de peso contra temperatura obtenido por TG, se pudo comprobar que el pico del proceso endotérmico es atribuible a la deshidratación del material, debido a que los procesos se dan en el mismo intervalo de tiempo y temperatura. Por tal motivo, el área bajo la curva obtenida mediante el DSC representa la entalpía de la reacción de deshidratación, en otras palabras, la capacidad de almacenamiento térmico del material evaluado.



La capacidad de almacenamiento térmico del sulfato de magnesio heptahidratado es de $1,269 J/g$, la cual se calcula considerando el área de los picos endotérmicos, expresado como un pico negativo en el termograma. Dicho valor es muy cercano al reportado en la literatura para el mismo material en grado analítico. La deshidratación del sulfato de magnesio ocurre en dos etapas. Durante la primera etapa, la deshidratación del material ocurre entre los 50 y 60 °C, implicando la pérdida de una molécula de agua. En la segunda etapa la deshidratación del material es mayor, en esta etapa se almacena mayor cantidad de energía térmica. El termograma de flujo de calor concuerda con lo reportado por Essen y col. [46, 53].

Se toma la temperatura del pico endotérmico mayor durante la deshidratación del material, debido a que se requiere más calor para deshidratar la sal, representando una mayor capacidad de almacenamiento térmico. En este caso, el valor de la temperatura de deshidratación es de 80 °C, lo cual significa que puede utilizarse incluso un colector solar de placa plana para la deshidratación del material.

- Acetato de sodio trihidratado.

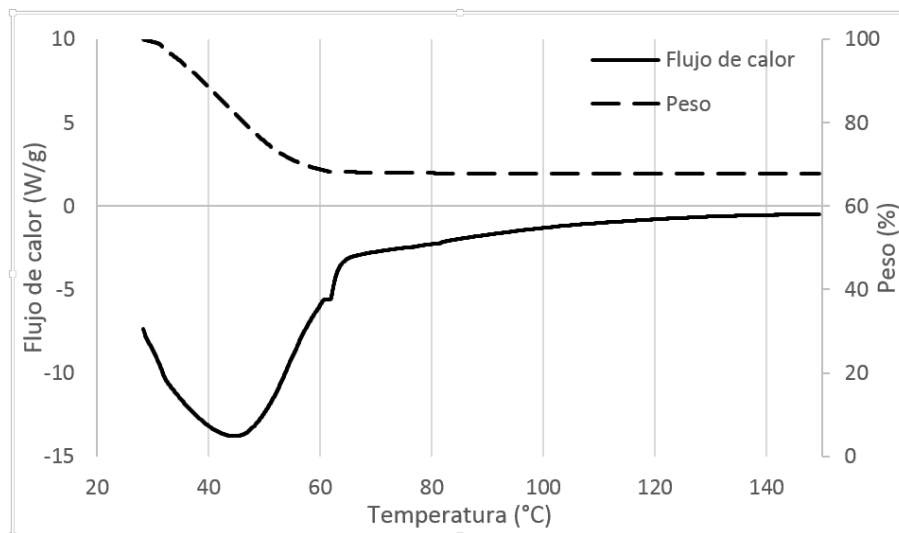


Figura 25.- Termograma del acetato de sodio trihidratado.

El área bajo la curva del proceso endotérmico en el termograma del acetato de sodio indica que el material almacenó $1,060 J/g$, debido a la deshidratación y la fusión del material. En la Figura 25 se observa el proceso exotérmico que el flujo de calor se estabiliza a los 60 °C, el cual se atribuye la temperatura de fusión del material, como lo reporta la literatura [52]. Por esta razón, el acetato de sodio también fue descartado.



Por lo tanto, el sulfato de magnesio es el material que presentó mejores resultados, por tal motivo, éste se tomó como referencia para el diseño, dimensionamiento y cálculos del acumulador térmico combinado.

5.2.3. - Experimentación a escala laboratorio.

En el anexo I se muestra el montaje experimental que fue realizado en el laboratorio.

El ensayo del proceso de deshidratación de la sal se llevó a cabo durante casi 2 horas, tiempo que tardó en deshidratarse la muestra. La temperatura de la muestra y la cámara de reacción fueron registradas durante dicho proceso. La temperatura de la cámara de reacción se tomó como referencia. El flujo de agua que se hizo circular a través de la cámara de enfriamiento del reactor se programó a los 85 °C. El resultado se muestra en la Figura 26, la cual se presenta a continuación.

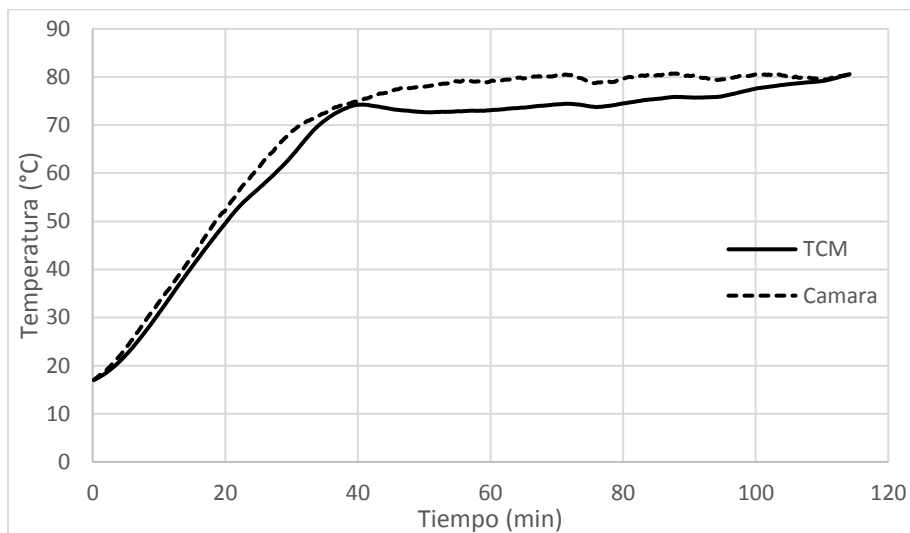


Figura 26.- Curva de deshidratación del sulfato de magnesio heptahidratado.

La deshidratación de la muestra de sulfato de magnesio inició después de haber alcanzado los 50 °C, la cual concuerda con la Figura 24. La segunda etapa de deshidratación del material inició alrededor de los 75 °C, en la cual, la sal mantiene su temperatura debido a que la energía que recibió la utilizó para deshidratarse. Por otro lado, la temperatura ambiente de la cámara de reacción no siguió incrementando debido a que transfirió energía a la sal durante la deshidratación de la misma. Una vez que la sal se deshidrató, las temperaturas del material y de la cámara de reacción incrementaron nuevamente.



El ensayo del proceso de hidratación de la sal tuvo un tiempo aproximado al ensayo de deshidratación por lo cual se hicieron las mismas consideraciones. El resultado del ensayo se muestra en la Figura 27.

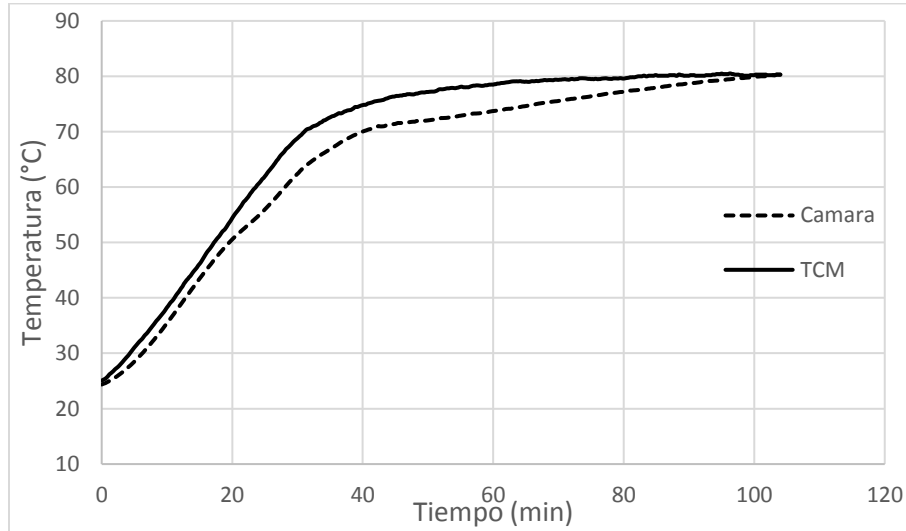


Figura 27.- Curva de hidratación del sulfato de magnesio heptahidratado.

En este caso, la temperatura de la muestra se mantuvo por encima de la temperatura de referencia. Esto es debido a que la sal genera calor cuando se rehidrata, por lo que su temperatura es mayor a la de su alrededor. En este caso, la sal transfiere calor hacia el ambiente que la rodea. La transferencia de calor termina cuando la sal se rehidrata nuevamente y alcanza una temperatura de equilibrio con la cámara de reacción.

5.3. – Modelo matemático.

El análisis de energía fue utilizado para evaluar los acumuladores térmicos y determinar la eficiencia, el cual solamente indica la fracción de energía que es recuperada después de un proceso energético. Por otra parte, el análisis de exergía toma en cuenta la cantidad y calidad de la energía, para dar una mejor idea de la eficiencia útil que un acumulador térmico puede desempeñar.



5.3.1. - Análisis de energía de un acumulador térmico combinado sensible-termoquímico.

El acumulador térmico diseñado implica almacenamiento térmico sensible (agua) y almacenamiento termoquímico (reacción de deshidratación) ya que el acumulador termoquímico está inmerso en el tanque de agua.

Con base al esquema de la Figura 18, el balance de energía para este tipo de acumulador se expresa de la siguiente forma.

$$Q_e - Q_s - Q_p = \Delta Q_S + \Delta Q_T \quad (20)$$

donde Q_e , Q_s y Q_p son las energías de entrada, salida y la que se pierde en el sistema, respectivamente, ΔQ_S y ΔQ_T representan la energía almacenada sensible y la termoquímica, respectivamente.

El calor que entra al acumulador (Q_e) se calcula a partir de la ecuación 21.

$$Q_e = m \cdot c_p \cdot (\Delta T) \quad (21)$$

En este caso m representa la masa del fluido transportador de la energía (FAE) que entra al acumulador, c_p es el calor específico del FAE y ΔT es la diferencia de temperatura del FAE a la entrada y salida del tanque de agua.

La fórmula anterior también puede utilizarse para calcular Q_s y ΔQ_S . En este caso, la evaluación se hace en función de la temperatura del agua que sale para consumo y la temperatura del agua fría que entra al acumulador.

La energía almacenada en el acumulador termoquímico se determina despejando ΔQ_T del balance de energía. En ΔQ_T está asociado el almacenamiento de calor sensible del material termoquímico (TCM), el cual se puede calcular a partir de la ecuación 22.

$$Q_{T_sensible} = m_{TCM} \cdot c_{p_TCM} \cdot (\Delta T)_{TCM} \quad (22)$$

donde m_{TCM} y c_{p_TCM} son la masa y el calor específico del material termoquímico, mientras que $(\Delta T)_{TCM}$ es la diferencia de temperatura del mismo material.



Para el caso del acumulador combinado, dicha pérdida no se considera debido a que la energía de precalentamiento se asume como almacenamiento de calor sensible del material termoquímico. La energía sensible del material termoquímico se puede recuperar, ya que el acumulador está inmerso en el tanque de agua. Se considera que el almacenamiento termoquímico no tiene pérdidas de energía durante el periodo de almacenamiento.

Los balances de energía para los periodos de carga (1), almacenamiento (2) y descarga (3) se expresan de la siguiente manera.

Carga

$$Q_e - Q_{p_1} = \Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1} \quad (23)$$

Almacenamiento

$$-Q_{p_2} = \Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2} \quad (24)$$

Descarga

$$-Q_s - Q_{p_3} = \Delta Q_{S_3} + \Delta Q_{T_3} \quad (25)$$

La eficiencia energética de los procesos de carga, almacenamiento y descarga se determinan a partir de las siguientes ecuaciones.

Eficiencia del proceso de carga.

$$\eta_{en_C} = \frac{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}}{Q_e} \quad (26)$$

Eficiencia del proceso de almacenamiento.

$$\eta_{en_A} = \frac{(\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}) + (\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})}{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}} = 1 + \frac{(\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})}{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}} \quad (27)$$

Eficiencia del proceso de descarga.

$$\eta_{en_D} = \frac{Q_s}{(\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}) + (\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})} \quad (28)$$

La eficiencia global se obtiene de:

$$\eta_{en_glo} = \frac{Q_s}{Q_e} \quad (29)$$



5.3.2. - Análisis de exergía de un acumulador combinado de calor sensible-termoquímico.

El balance de exergía para este acumulador térmico se escribe como:

$$X_e - X_s - X_p - X_{des} = \Delta X_S + \Delta X_T \quad (30)$$

En este caso, la variable X_{des} representa la exergía destruida debido a la entropía generada en el acumulador.

La exergía que entra al sistema se determina a partir de la ecuación 31.

$$X_e = m((h_e - h_s) - T_a(S_e - S_s)) \quad (31)$$

En este caso m , h_e , h_s , S_e y S_s representan la masa, las entalpías y las entropías a la entrada y salida del FAE, T_a es la temperatura del ambiente. La ecuación anterior se puede utilizar para calcular X_s y ΔX_S .

La exergía almacenada por el acumulador termoquímico se calcula a partir de:

$$\Delta X_{rea} = X_{productos} - X_{reactivos} \quad (32)$$

Donde

$$X_{productos} = (X_{Qui})_{productos} - (X_{Fi})_{productos} \quad (33)$$

$$X_{reactivos} = (X_{Qui})_{reactivos} - (X_{Fi})_{reactivos} \quad (34)$$

donde ΔX_{rea} , ΔX_{Qui} y ΔX_{Fi} son los cambios de exergía de la reacción, química y física, respectivamente.

En el cual, los cambio de exergía física de los componentes de la reacción a menudo se desprecian con relación a los cambios de exergía química. En este análisis se desprecian el cambio de exergía física, porque es pequeño comparado con el cambio de exergía química.

La exergía química estándar se puede determinar a partir de la ecuación 35.

$$X_{Qui_est} = \Delta G_f + \sum_e n_e \cdot X_{Qui_e} \quad (35)$$

Donde ΔG_f representa la energía libre de Gibbs del compuesto, n_e el número de moléculas de cada elemento del compuesto (en este caso del sulfato de magnesio); y X_{Qui_e} la exergía



química de cada uno de estos elementos. La energía libre de Gibbs representa la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de una reacción, la cual se utiliza para determinar la energía potencial del compuesto.

Por su parte, los balances de exergía para el periodo de carga (1), almacenamiento (2) y descarga (3) se expresan de la siguiente manera.

Carga

$$X_e - X_p - X_{des} = \Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1} \quad (36)$$

Almacenamiento

$$-X_p - X_{des} = \Delta X_{S_2} + \Delta X_{T_2} \quad (37)$$

Descarga

$$-X_s - X_p - X_{des} = \Delta X_{S_3} + \Delta X_{T_3} \quad (38)$$

Las eficiencias de exergía para los procesos de carga, almacenamiento y descarga se obtienen a partir de:

Eficiencia del proceso de carga.

$$\eta_{ex_C} = \frac{\Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1}}{X_e} \quad (39)$$

Eficiencia del proceso de almacenamiento.

$$\eta_{ex_A} = \frac{(\Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1}) + (\Delta X_{S_2} + \Delta X_{T_2})}{\Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1}} \quad (40)$$

Eficiencia del proceso de descarga.

$$\eta_{ex_D} = \frac{X_s}{(\Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1}) + (\Delta X_{S_2} + \Delta X_{T_2})} \quad (41)$$

En base al cociente entre la exergía que sale y que entra del sistema se puede calcular la eficiencia exergética global, como se expresa en la ecuación 42.

$$\eta_{es_glo} = \frac{X_s}{X_e} \quad (42)$$

5.4. – Simulación.

Para las simulaciones inicialmente se consideró un acumulador termoquímico de 0.03 m^3 que está inmerso en un tanque de agua con 100 litros de agua (para un volumen total de 0.130 m^3). El tanque de agua se consideró inicialmente de 130 litros, debido a que es el volumen



promedio de los acumuladores térmicos de los colectores solares. Por otra parte, al acumulador termoquímico se consideró incorporarle una cantidad importante de TCM, para que la capacidad de almacenamiento térmico del acumulador combinado aumentara significativamente, además del condensador y evaporado. Por lo tanto, el diseño del acumulador termoquímico se limitó a ocupar dicho volumen. Durante el proceso de carga no se consideró demanda de energía térmica.

El material que se consideró para la evaluación fue el sulfato de magnesio por haber mostrado mejores resultados en las pruebas hechas a escala laboratorio; en las cuales se observó que el material se deshidrata a partir de los 80 °C. El proceso de deshidratación se mantiene a esta temperatura. El calor específico es de $1.55 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (se consideró un valor intermedio entre los reportados por Grevel y col. [54, 55]).

El acumulador termoquímico tiene capacidad para almacenar 18 kg de material. Dicho valor se determinó considerando que la densidad del material es de 1700 kg/m^3 , que el TCM tiene forma esférica y su distribución en el recipiente de reacción tiene un factor de empaquetamiento de 0.7. La pared del acumulador (canales) a través de la cual se lleva a cabo la transferencia de calor tiene un espesor de 1 mm y una superficie de 1 m^2 .

5.4.1. - Almacenamiento térmico en verano.

En esta simulación se consideraron los valores de irradiancia y temperatura ambiente de la época de verano mencionados en los puntos 4.4.1 y que el acumulador térmico está acoplado al colector solar de placa plana del punto 4.4.2.

El proceso de carga del acumulador térmico (acoplado a un colector de placa plana) que se estudió se lleva a cabo en dos etapas. Durante la primera etapa, la energía térmica es almacenada por el agua y el material termoquímico de forma sensible. La segunda etapa inicia cuando el material termoquímico alcanza la temperatura de deshidratación, donde la energía se almacena de forma termoquímica.

La Figura 28 muestra el cambio de temperatura del agua en el tanque, como función de la irradiancia y la temperatura ambiente promedio que tiene cada clima en un día. En las simulaciones se consideraron condiciones de flujo estacionario, a presión y volumen constante en acumulador.

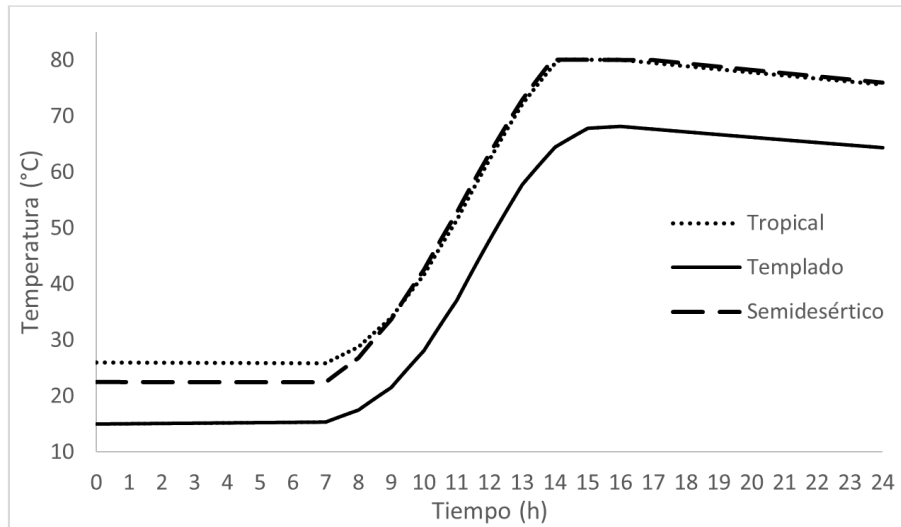


Figura 28.- Simulación del proceso de carga del acumulador en verano, en función del cambio de temperatura del agua.

El proceso de carga en el clima semidesértico es más rápido y se almacena mayor cantidad de calor. La transferencia de calor para la deshidratación de la sal ocurre alrededor de las 14 horas (el eje x representa las horas del día). El proceso de carga en el clima tropical ocurre muy similar al del clima semidesértico, pero en estas condiciones se almacena menor cantidad de energía, debido a que la irradiancia solar es menor. Por otra parte, en el clima templado no se alcanza la temperatura de deshidratación de la sal. Para el caso de colectores solares de tubos al vacío se presentan más adelante.

La transferencia de calor del agua hacia el TCM ocurre en todo momento, por la diferencia de temperatura cuando se calienta el agua. Cuando el TCM alcanza la temperatura de deshidratación, llega un momento en el que la temperatura del agua se mantiene constante porque la cantidad de energía que recibe y a su vez transfiere al TCM es igual. En la Figura 28 se observa que hay transferencia de calor hacia el acumulador termoquímico para deshidratar la sal en el clima semidesértico y tropical, por tal motivo, se evaluó la tasa de transferencia de calor, la cual se muestra en la Figura 29.

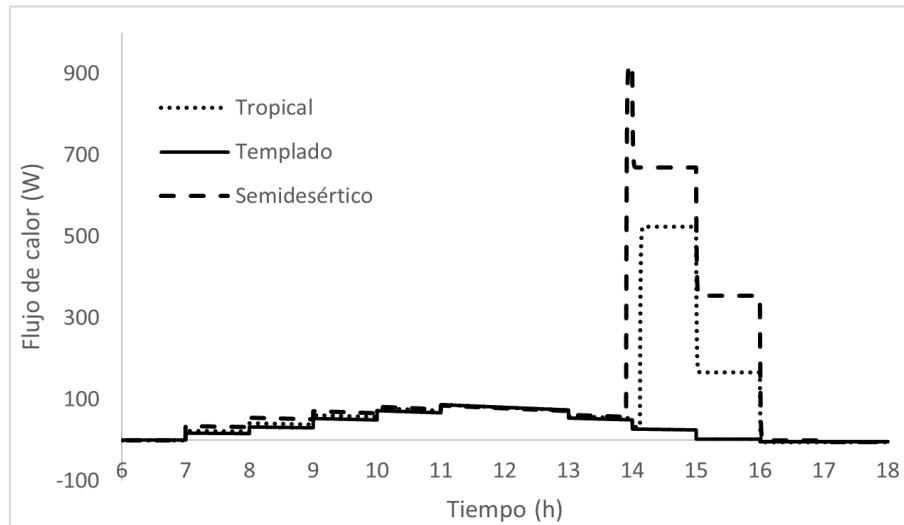


Figura 29.- Simulación del flujo de transferencia de calor del acumulador de calor sensible para deshidratar la sal (termoquímico).

El flujo de calor transferido al acumulador termoquímico es diferente en cada clima. El calor transferido al acumulador termoquímico es mayor en el clima semidesértico y menor en el clima templado, debido a que la temperatura que alcanza el agua es mayor en el clima semidesértico. El área bajo la curva representa la cantidad de calor que se transfirió hacia la sal. La energía transferida durante el proceso de deshidratación se observa en la Figura 29. A partir de que se da el incremento repentino del flujo de calor transferido, el área bajo la curva que se observa antes del incremento repentino del flujo de calor representa la energía que almacena la sal por calor sensible.

En este caso, el acumulador termoquímico se carga en 9.88% en el clima tropical y 17.55 % en el clima semidesértico. En el clima templado, la energía se almacena únicamente de forma sensible. En ninguno de los climas se aprovechó la capacidad de almacenamiento termoquímico de forma óptima, porque el colector solar no genera el calor suficiente para que se deshidrate completamente el material termoquímico.

5.4.2. - Almacenamiento térmico en invierno.

En esta simulación se consideraron los valores de irradiancia y temperatura ambiente de la época de invierno mencionados en los puntos 4.4.1 y que el acumulador térmico está acoplado al colector solar de placa plana del punto 4.4.2.



La Figura 30 presenta el resultado de la evaluación, en la cual se observó que la carga de calor es inferior para los tres climas en comparación con la época de invierno, esto se debe a que en invierno hay menos intensidad de irradiancia solar.

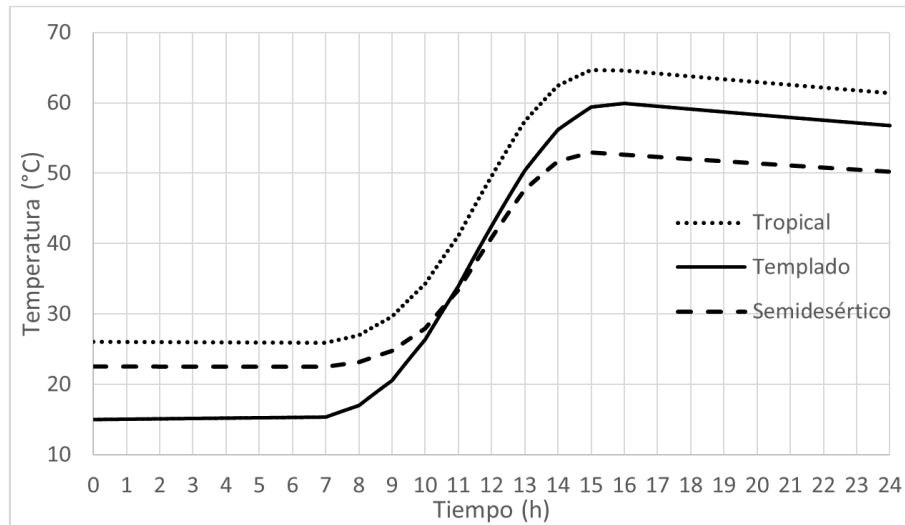


Figura 30.- Simulación del proceso de carga del acumulador en invierno, en función del cambio de temperatura del agua.

En el invierno, ninguno de los climas alcanza la temperatura de 80 °C (para que la sal se deshidrate) durante el proceso de carga. La energía se almacena solamente por calor sensible. Contrariamente al verano, el proceso de carga para el clima semidesértico es el menos rentable, debido a que apenas supera la temperatura mínima (de 50 °C) para evitar la reproducción de la Legionella. Por su parte, en el clima templado y tropical alcanzan una temperatura de 60 y 64 °C respectivamente, pero no es suficiente en ninguno de los casos para iniciar el proceso de carga del acumulador termoquímico.

En base a que en los resultados anteriores no se alcanzó la temperatura apropiada para que la sal se pueda deshidratar, una nueva simulación fue realizada. En este caso, el volumen del tanque de agua se varió entre 40 y 90 litros para realizar la simulación en tanques más pequeños. Lo anterior se debe a que no es factible integrar un acumulador termoquímico si no se aprovecha su capacidad de almacenamiento térmico. El acumulador termoquímico se cargó parcialmente en verano y en invierno no cargó energía, por lo tanto, se analizó la carga de energía del acumulador termoquímico en función de dicha variable.



5.4.3. - Almacenamiento térmico en función del volumen del tanque de agua, empleando un colector solar de placa plana.

5.4.3.1.- Clima semidesértico.

De los tres climas prevalecientes en México, el clima semidesértico recibe mayor cantidad de irradiación solar en un día promedio, por tal motivo, en este clima se puede generar mayor cantidad de calor. Los resultados de la simulación se presentan en las Figuras 31 y 32.

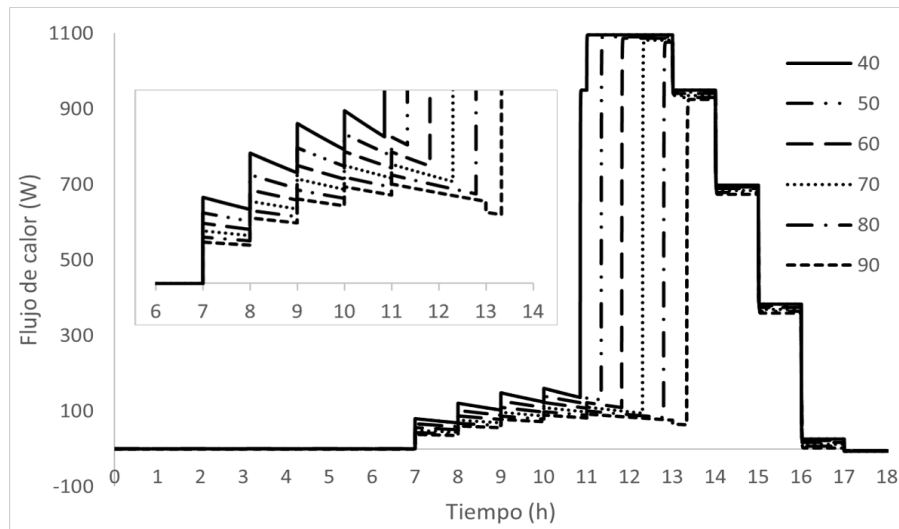


Figura 31.- Simulación del flujo de calor transferido al acumulador termoquímico en clima semidesértico.

En la Figura 31 se muestran los resultados de la simulación, donde se varió el volumen del tanque de agua desde 40 a 90 litros. En esta figura se observa que a medida que el volumen del tanque de agua es menor, la energía transferida y almacenada por el acumulador termoquímico es mayor. Basado en la Figura 31, el área que representa el flujo de calor transferido del tanque de 40 litros al acumulador termoquímico es mayor, comparado con el área de los demás casos. Lo anterior es debido a que en un volumen pequeño de agua se requiere menor cantidad de energía para incrementar más rápidamente la temperatura del agua. Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el agua y el material termoquímico es mayor, lo que significa que la transferencia de calor hacia el material termoquímico también es mayor y el proceso de deshidratación se da más rápido.

Por otra parte, la Figura 32 muestra la variación de la capacidad de almacenamiento térmico del acumulador combinado, en función del volumen del tanque de agua. El volumen del



acumulador termoquímico es de 18 kg de material termoquímico (sulfato de magnesio). En este caso se observó que conforme el volumen del tanque de agua es más pequeño, la cantidad de energía térmica que el agua puede almacenar disminuye, por lo tanto, el material termoquímico puede almacenar mayor cantidad de energía térmica.

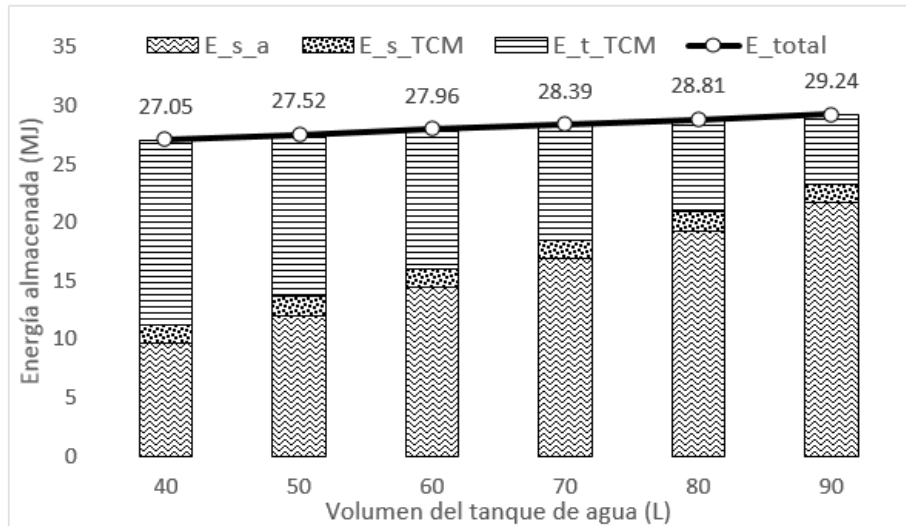


Figura 32.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima semidesértico.

Donde E_{s_a} es la energía almacenada por el agua de forma sensible, E_{s_TCM} es la energía almacenada por el TCM de forma sensible, E_{t_TCM} es la energía almacenada por el TCM de forma termoquímica y E_{total} es la energía total almacenada. Se utilizó la misma notación en las figuras de este tipo.

La capacidad de almacenamiento térmico del acumulador combinado es mayor cuando el volumen del tanque de agua es más grande, ya que el calor útil generado en el colector solar está en función de la temperatura media del fluido en el colector. A medida que la temperatura media en el colector es mayor, el calor útil generado disminuye porque la pérdida de energía hacia al medio ambiente es mayor, además de que la eficiencia del colector solar disminuye. En el caso del colector con tanque de agua más pequeño, la temperatura media del colector incrementa más rápidamente, por lo que se obtiene menos calor útil. A diferencia del colector en donde el tanque de agua es mayor, la temperatura media del colector incrementa a un ritmo más lento, por tal motivo se producen menos pérdidas en el colector.



En todos los casos, el acumulador termoquímico queda parcialmente cargado. La Tabla 6 muestra el porcentaje de carga del acumulador termoquímico.

Tabla 6.- Porcentaje de carga del acumulador termoquímico en variación del volumen del tanque de agua.

Volumen (litros)	40	50	60	70	80	90
Carga (%)	69.23	60.72	52.11	43.45	34.78	26.11

La capacidad de almacenamiento del acumulador termoquímico se aprovecha más a medida que el tanque de agua es más pequeño.

Si bien, cuando se utiliza un tanque de agua de volumen grande se puede almacenar más energía de forma sensible; la desventaja es que se desaprovecha la capacidad de almacenamiento termoquímico. El acumulador termoquímico tiene mayor capacidad de almacenamiento térmico por unidad de volumen. Por tal motivo, en este tipo de acumulador térmico se debe buscar la forma para que la parte termoquímica se cargue completamente, y de esta forma el volumen del acumulador combinado pueda ser más compacto, además de que la pérdida de energía hacia el ambiente se reduce.

Para conseguir que el acumulador termoquímico se cargue completamente, el tamaño del acumulador termoquímico debe reducirse, hasta encontrar un punto en el que el agua en el tanque transfiera la energía suficiente para deshidratar completamente una determinada cantidad de TCM.

5.4.3.2. - Clima tropical.

El clima tropical es el segundo mejor favorecido por la irradiancia del sol. Debido a que en este clima tampoco se aprovecha la capacidad de almacenamiento térmico del acumulador termoquímico evaluado anteriormente, se simuló el proceso de carga del acumulador combinado de la misma manera que el clima semidesértico. El resultado se muestra en la Figura 33 y 34.

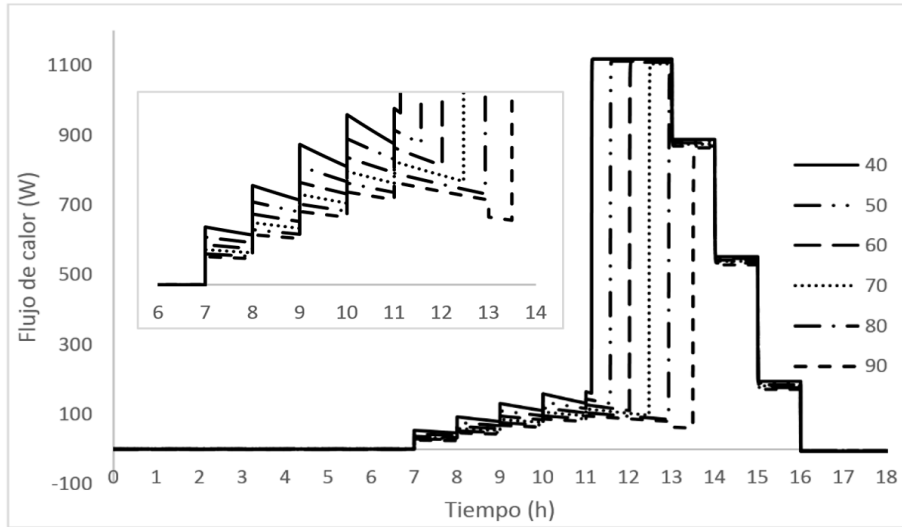


Figura 33.- Simulación del flujo de calor transferido al acumulador termoquímico en clima tropical.

De igual forma se observa que la transferencia de calor para deshidratar la sal es más rápido conforme el volumen del tanque de agua es más pequeño. Por lo tanto, la energía transferida y almacenada por el acumulador termoquímico es en mayor proporción, tal como se observa en la Figura 33, si se compara el área debajo de la curva.

Se evaluó la cantidad de energía que pueden almacenar los diferentes acumuladores térmicos combinados, bajo las condiciones de un clima tropical. En la Figura 34 se observa dicha evaluación.

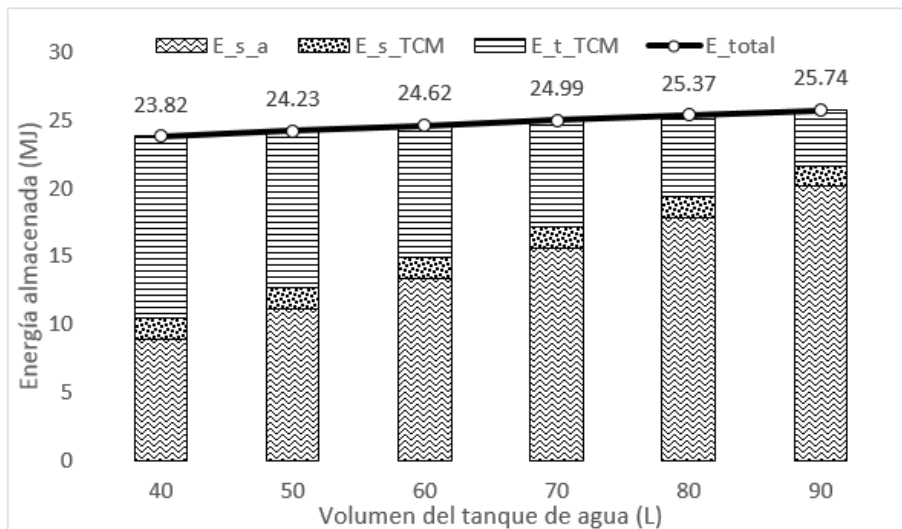


Figura 34.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima tropical.



En el clima tropical también se observa que la capacidad de almacenamiento térmico del acumulador combinado es menor a medida que disminuye el volumen del tanque de agua. En este clima, se almacena menor cantidad de energía que en el clima semidesértico por que el potencial del sol es menor. La carga del acumulador termoquímico no alcanza el 60 % en el mejor de los casos. La Tabla 7 muestra el porcentaje de carga del acumulador termoquímico.

Tabla 7.- Porcentaje de carga del acumulador termoquímico en variación del volumen del tanque de agua.

Volumen (litros)	40	50	60	70	80	90
Carga (%)	58.66	50.64	42.52	34.34	26.14	17.97

En este caso, la carga del acumulador termoquímica es de 58.66 % en el mejor caso y es menor que en el clima semidesértico debido a que el potencial de irradiación solar es menor en este tipo de clima. En la tabla 7 también se observa que el acumulador combinado tiene mayor capacidad de almacenamiento térmico, a medida que el tanque de agua es más grande. Pero si comparamos la densidad de almacenamiento térmico, dividiendo la cantidad de energía almacenada entre el volumen total del acumulador combinado, la densidad de almacenamiento térmico es mayor a medida que el tanque de agua es más pequeño.

5.4.3.3. - Clima templado

En el clima templado se presenta menor irradiación solar, por lo cual, es menor la cantidad de energía que se puede almacenar. La Figura 35 muestra la cantidad de energía que puede ser almacenada en función del volumen del tanque de agua.

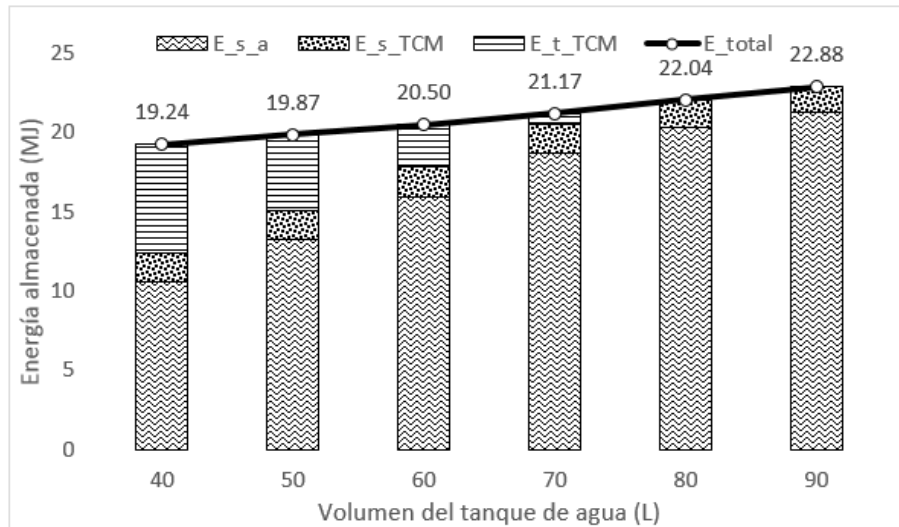


Figura 35.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de placa plana, en un clima templado.

En este tipo de clima se observa la misma tendencia que en los anteriores, donde el acumulador termoquímico se carga al 29.89 % en el mejor de los casos.

Los resultados previos indicaron que el acumulador térmico evaluado inicialmente estaba sobredimensionado si se acoplaba a un colector solar de placa plana, ya que en ninguno de los casos se deshidrató la sal hasta alcanzar su máxima capacidad de almacenamiento. Por lo tanto, se calculó la cantidad de sal que se puede deshidratar para cada volumen del tanque de agua, considerando en cada caso la cantidad de energía transferida al TCM y la cantidad de sal que se puede deshidratar con dicha energía. Para fines de este estudio, el tamaño del acumulador termoquímico cambia proporcionalmente conforme la cantidad de material que se va a deshidratar también lo hace. El resultado del cálculo se indica en la Tabla 8.

Tabla 8.- Cantidad de material que se puede deshidratar en verano.

VTA ♡	Semidesértico			Tropical			Templado		
	KMT ♦	VAT ♣	EA ▲	KMT ♦	VAT ♣	EA ▲	KMT ♦	VAT ♣	EA ▲
40	12.75	21.25	26.99	10.95	18.25	23.76	6.10	10.16	19.05
50	11.30	18.83	27.44	9.60	16.00	24.17	4.60	7.66	19.66
60	9.85	16.41	27.88	8.20	13.66	24.54	3.08	5.15	20.25
70	8.40	14.00	28.30	6.80	11.33	24.91	1.55	2.58	20.85
80	6.95	11.58	28.71	5.45	9.08	25.27			
90	5.45	9.08	29.12	4.05	6.75	25.62			
100	4.00	6.66	29.53	2.65	4.41	25.99			

♡Volumen del tanque de agua ♦ Kilogramos de TCM ♣ Volumen del acumulador termoquímico ▲Energía total almacenada



Un acumulador combinado con tanque de agua de 40 litros puede transferir la energía suficiente para deshidratar 12.75 kg de TCM en un clima semidesértico, 10.95 kg en el clima tropical y 6.1 kg en el clima templado. Si se trata de deshidrata una cantidad de TCM mayor, el material no se deshidratará completamente, en otras palabras, la parte termoquímica no se carga al 100 %. En caso de emplear una menor cantidad de TCM, el material se deshidratará completamente, pero se almacena menos energía térmica debido a que se utiliza menos material termoquímico. La pérdida de energía hacia al medio ambiente y en el colector es más grande. La pérdida de energía es mayor porque el agua incrementa su temperatura después de que el material se deshidrata completamente.

Los resultados de la Tabla 8 se utilizan para determinar la cantidad de energía que se puede almacenar con la máxima eficiencia (100% de deshidratación de la sal). De la misma manera al considerar el tamaño del acumulador combinado se obtiene la densidad de energía. Dicho valor de densidad máximo se obtiene dividiendo el valor de la energía total almacenada entre el volumen total del acumulador combinado. La ecuación se muestra a continuación.

$$E = \frac{EA}{VTA+VAT} \tag{43}$$

La Figura 36 muestra el resultado para los tres climas predominantes en México.

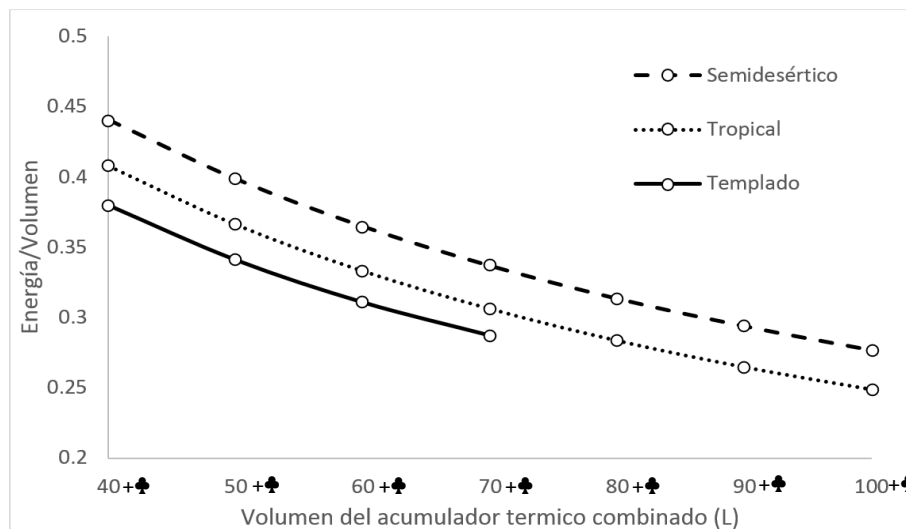


Figura 36.- Energía almacenada / volumen del acumulador combinado, acoplado a un colector de placa plana. ♣ es el volumen del acumulador termoquímico.



La Figura 36 muestra que medida que el tanque de agua es más pequeño, el almacenamiento térmico de un acumulador combinado es más compacto. Es decir, se almacena más energía por unidad de volumen. Esto se debe a que la temperatura del agua en un tanque pequeño incrementa más rápido y se transfiere más energía al acumulador termoquímico, por lo cual, se puede utilizar más cantidad de TCM como medio de almacenamiento térmico. La desventaja es que se pierde más energía hacia el medio ambiente en el colector durante el periodo de carga.

En la Tabla 8 se observa que para que un acumulador combinado tenga un rendimiento óptimo, las dimensiones deben ser diferentes para cada uno de los climas predominantes en México. Por tal motivo, el acumulador combinado con capacidad para 40 litros de agua y 12.75 *kg* de sulfato de magnesio es el más compacto, el cual se diseñó y se evaluó en el clima semidesértico.

El diseño del acumulador puede ser de tipo modular, debido a que durante la temporada de invierno no se dispone de la suficiente energía para que el acumulador combinado se cargue completamente. El acumulador puede operar en forma combinada en verano y en forma sencilla (usando el calor sensible del agua) en invierno.

El acumulador se evaluó también acoplado a un colector solar de tubos al vacío. A continuación, se muestran los resultados.

5.4.4. - Almacenamiento térmico en función del volumen del tanque de agua, empleando un colector solar de tubos al vacío.

La tecnología de tubos al vacío es actualmente la más eficaz en los colectores solares térmicos. Estos colectores son más eficientes que los de placa plana, ya que pierden menos energía por conducción y convección debido al vacío que tienen los tubos. Las pérdidas de energía en un colector de tubos al vacío ocurren principalmente por radiación.

El colector de tubos al vacío que fue considerado en este análisis es un Wolf-CRK de alto rendimiento, especial para la producción de agua caliente sanitaria. Los datos técnicos del acumulador se muestran en la Tabla 9 [51].



Tabla 9.- Datos técnicos del colector de tubos al vacío Wolf-CRK.

Variable	Valor
Coefficiente de transmisión de calor a_1 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	0.885
Coefficiente de transmisión de calor a_2 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	0.001
Eficiencia [%]	95
Tamaño [m]	1.64 x 1.39

La evaluación del acumulador combinado se realizó de igual forma que para el colector de placa plana. El acumulador combinado fue evaluado también para los tres climas predominantes en México. Los resultados de la evaluación en el clima semidesértico, tropical y templado se muestran a continuación, en las Figuras 37, 38 y 39 respectivamente.

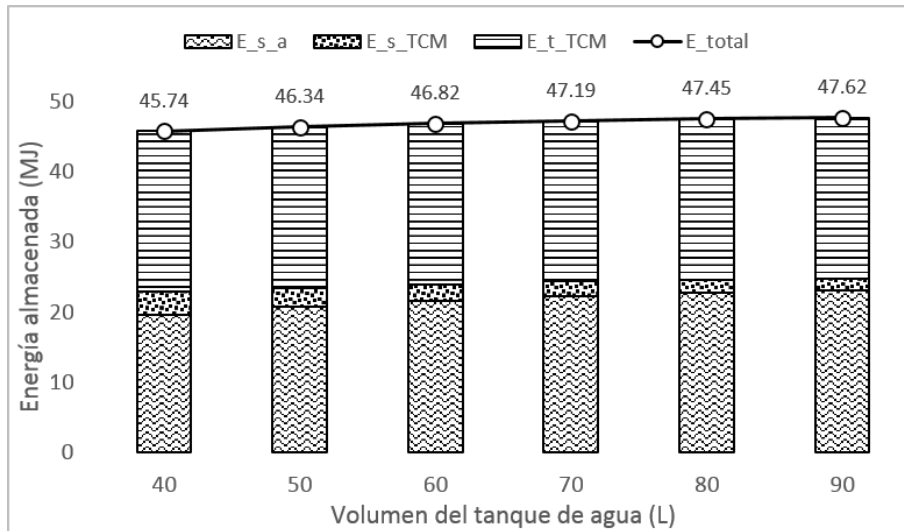


Figura 37.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima semidesértico.

En el clima semidesértico, la parte termoquímica del acumulador combinado se carga completamente en todos los casos. En este clima, la cantidad de energía almacenada en el acumulador combinado es ligeramente favorable a medida que el volumen del tanque de agua es mayor. En este caso, el acumulador térmico con volumen de 90 L almacena más energía de forma sensible porque tiene mayor masa de agua para dicho propósito. A diferencia, los acumuladores de menor volumen pueden almacenar una cantidad de energía ligeramente menor; debido a que la temperatura del agua aumenta más en un tanque pequeño que en uno de mayores dimensiones.



La Figura 37 muestra que en los acumuladores termoquímicos inmersos en tanques de agua pequeños, la energía sensible almacenada por parte del TCM es mayor. Esto se debe a que la temperatura que el agua y del TCM alcanzan es más alta. Es por ello que la cantidad de energía almacenada en el tanque de agua pequeño es cercana a la del tanque más grande, a pesar de la diferencia de volumen en los tanques.

En cuanto a la evaluación en el clima tropical, la parte termoquímica del acumulador combinado se carga parcialmente en acumuladores con tanques de agua mayores de 80 litros.

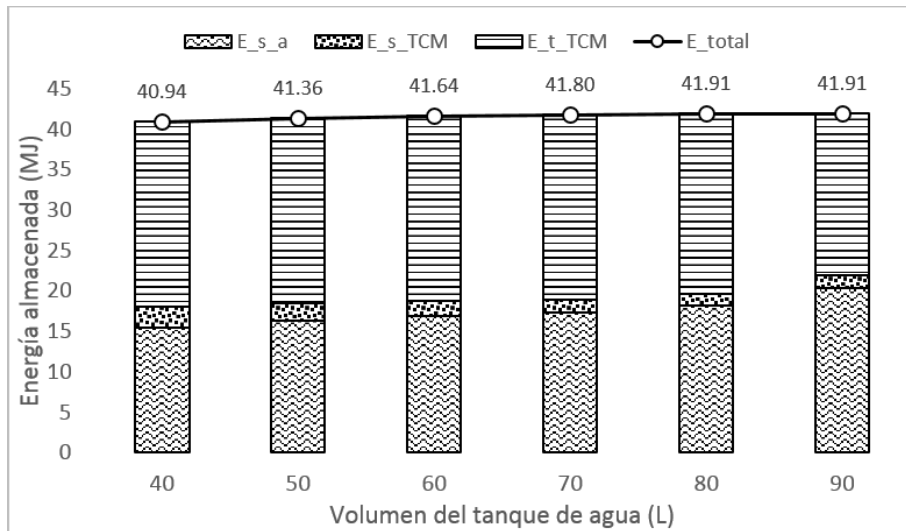


Figura 38.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima tropical.

El porcentaje de carga del acumulador termoquímico es de 97.5 para el tanque de agua de 80 litros y de 87.56 % para el tanque de 90 litros. De igual forma se observa que un acumulador combinado puede almacenar más energía a medida que el tanque de agua es mayor.

Finalmente, en el clima templado, la parte termoquímica del acumulador combinado no se carga completamente en todos los casos. Esto se debe a que el potencial de irradiación solar es insuficiente en este tipo de clima, por lo tanto, un acumulador de este tipo no se puede cargar completamente de energía térmica.

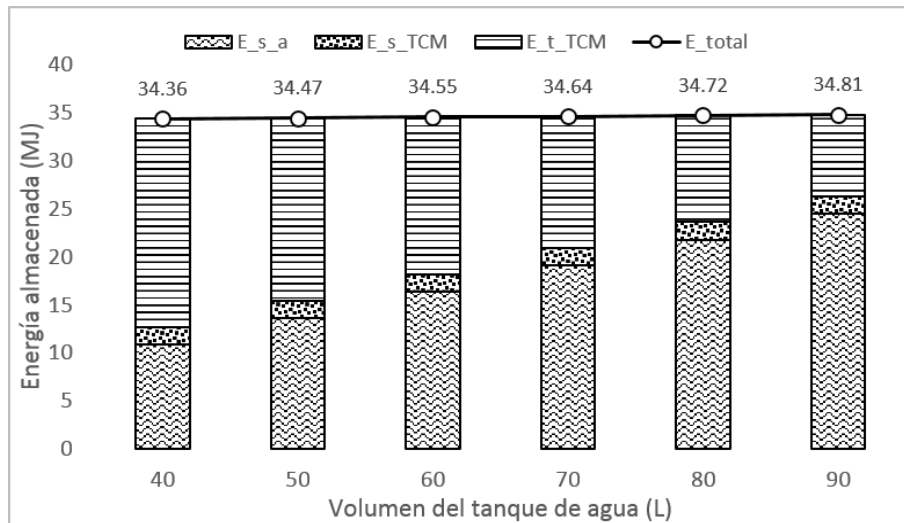


Figura 39.- Capacidad de almacenamiento del acumulador combinado acoplado a un colector de tubos al vacío, en un clima templado.

A continuación, se muestran en la Tabla 10 los porcentajes de carga del acumulador termoquímico inmerso en un tanque de agua de diferente volumen.

Tabla 10.- Porcentajes de carga del acumulador termoquímico en función del volumen del tanque de agua.

Volumen (litros)	40	50	60	70	80	90
Carga (%)	94.79	83.26	71.70	60.14	48.59	37.06

En la Tabla 10 se puede observar que el acumulador termoquímico está sobredimensionado para el potencial de irradiación solar del clima templado. Por lo tanto, el tamaño del acumulador termoquímico debe ser reducido, para que este quede completamente cargado y pueda funcionar adecuadamente. Se puede ver que la reducción del tamaño del acumulador termoquímico puede ser pequeña, ya que el porcentaje de carga de este en un tanque de agua de 40 litros es de 94.79 %.

Por otra parte, la densidad de energía se calculó para determinar la forma más compacta con la que se puede almacenar energía. En este caso, el VAT es constante, equivalente a 30 litros de agua.

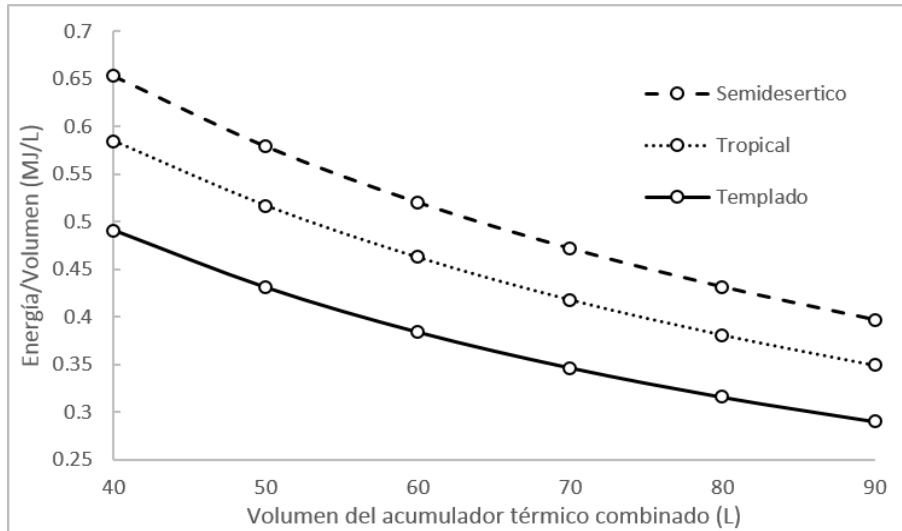


Figura 40.- Energía almacenada / volumen del acumulador combinado, acoplado a un colector de tubos al vacío.

De acuerdo con la Figura 40, se reconfirma que a medida que el tanque de agua es más pequeño, la densidad de energía es mayor. Dicho de otra manera, se almacena más energía por unidad de volumen. Por lo tanto, el volumen del acumulador combinado es más compacto. Por lo tanto, el tanque de agua de 40 litros y el acumulador termoquímico con capacidad para 12.75 kg TCM (cuyo volumen es de 21.25 litros, como se muestra en la Tabla 8) fue elegido para realizar la comparación, debido a que dicha combinación puede ser utilizada en más contextos, como se muestra en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 11.- Contexto en el que el acumulador térmico puede utilizarse.

Acoplamiento	Semidesértico	Tropical	Templado
Colector de placa plana	√	X	X
Colector de tubos al vacío	√	√	√

Dicho acumulador térmico combinado (con un volumen total de 61.25 litros) puede ser acoplado en un colector solar de tubos al vacío y utilizado en los tres climas predominantes en México, además, puede utilizarse acoplado a un colector de placa plana en un clima semidesértico. Sin embargo, en el clima tropical y templado es necesario un acumulador de menores dimensiones para un óptimo funcionamiento.



5.4.5. – Comparación.

Los acumuladores térmicos basados en reacciones químicas reversibles son los que teóricamente tienen mayor capacidad de almacenamiento térmico (densidad de almacenamiento). En este caso, el acumulador es combinado (calor sensible-termoquímico). Con el fin de incrementar la eficiencia de almacenamiento térmico, se realizó otro análisis en donde la parte de calor sensible (agua del tanque) se sustituyó por un acumulador con materiales de cambio de fase (PCMs) tipo cama empacada. De aquí en adelante, el tanque de agua, el acumulador de PCM y el acumulador combinado sensible-termoquímico o de reacción química reversible se abrevian como TA, CE y RQ respectivamente.

Para este análisis se hicieron las siguientes consideraciones:

- Los acumuladores tienen el mismo volumen total (61.25 litros).
- Son evaluados bajo las mismas condiciones climáticas.
- La temperatura máxima del agua es de 90 °C durante el proceso de carga.

La comparación realizada se hizo en función de la capacidad de almacenamiento térmico de los tres acumuladores. La Figura 41 muestra la capacidad de almacenamiento térmico de los acumuladores comparados. En el cálculo de la energía almacenada por calor sensible se considera tanto la del agua como la de los materiales considerados en cada caso (PCM o TCM).

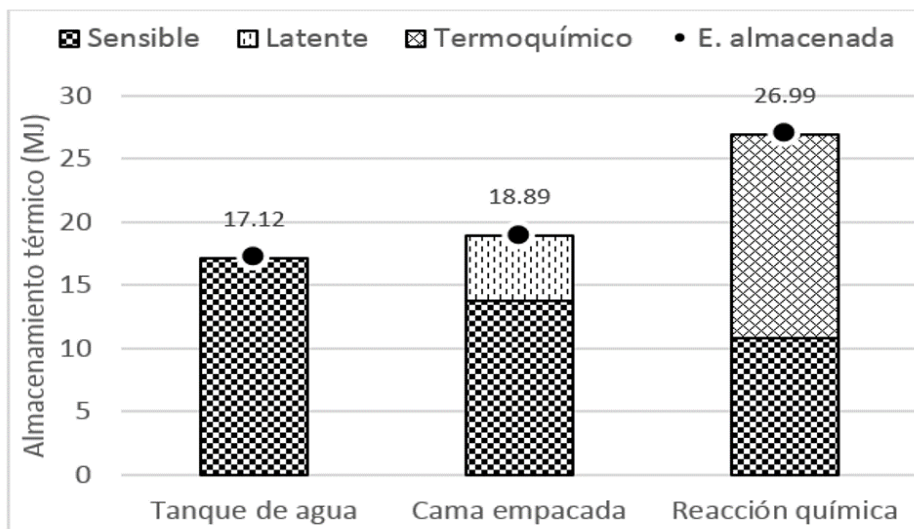


Figura 41.- Capacidad de almacenamiento térmico de los acumuladores.



El acumulador RQ (combinado de calor sensible-reacción de sales hidratadas) almacena mayor cantidad de energía térmica con respecto al TA y al acumulador de CE. El acumulador RQ almacena 57 % más energía que el TA y 42 % más energía que el acumulador de CE. Los acumuladores TA y CE desaprovechan la irradiancia cuando se alcanza la temperatura máxima de almacenamiento, debido a que la temperatura del agua alcanza su límite de carga.

Considerando que una persona promedio consume aproximadamente 3.45 MJ por día (equivalente a consumir 30 litros de agua a 50 °C). De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 41, el acumulador RQ puede proveer energía para 7.8 personas, mientras que el de CE provee energía para 5.5 personas y el tanque de agua puede suministrar energía a 4.9 personas.

Los tres acumuladores también fueron comparados durante el proceso de descarga. En el cual, los acumuladores se sometieron a una descarga completa de energía. En este caso se consideró lo siguiente.

- El agua se provee a 50°C.
- La descarga inicia al mismo tiempo.
- El periodo de almacenamiento térmico es el mismo en los tres casos.

En la Figura 42 se muestra el resultado de la comparación de los acumuladores térmicos durante el proceso de descarga de energía.

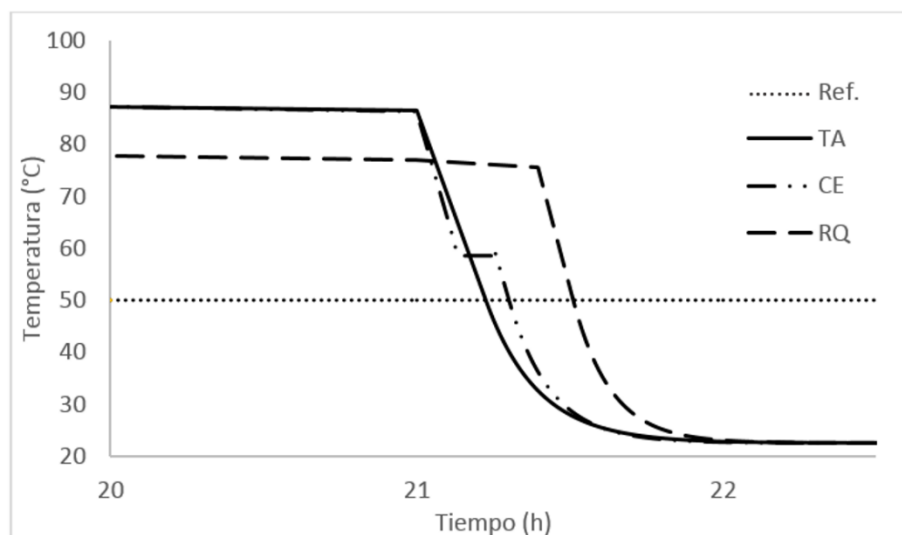


Figura 42.- Proceso de descarga de energía de los acumuladores térmicos.



En la Figura 42 se observa que la temperatura del agua en el RQ se mantiene por encima de los 50 °C durante un tiempo mayor, con respecto a los otros acumuladores térmicos. El acumulador RQ provee agua a 50 °C durante 29 minutos, por otra parte, el TA y el acumulador de CE lo hacen durante 13.5 y 17.9 minutos respectivamente. Los tiempos anteriormente mencionados se determinaron superponiendo una línea vertical, que corta el eje del tiempo y la intersección entre la línea de referencia y la línea de la temperatura del agua, esto para cada caso. El acumulador RQ almacena 57 % más energía que el TA, pero puede entregar agua a 50 °C durante más del doble de tiempo. Lo anterior es debido a que la energía almacenada termoquímicamente se descarga al agua y mantiene su temperatura, por lo tanto, el acumulador RQ entrega agua a 50°C durante un tiempo más prolongado. Lo mismo ocurre con el acumulador de CE, debido a que la energía almacenada por el PCM se descarga, durante el cambio de estado, al agua ayudando a mantener la temperatura del agua para proveerla por más tiempo a 50 °C.

A pesar de que la parte de almacenamiento por calor sensible del acumulador RQ se considera completamente mezclado, el comportamiento del acumulador RQ durante el periodo de descarga es similar al de un tanque de agua estratificado. Lo dicho anteriormente es de acuerdo con la comparación entre un tanque de agua completamente mezclado y un tanque de agua estratificado, reportado por Armstrong *et al.* [4].

Por otra parte, el TA requiere un volumen de aproximadamente 96.5 litros para almacenar la misma cantidad de energía que el acumulador RQ, mientras que el acumulador de CE requiere 86.5 litros. Por lo tanto, los acumuladores TA y CE son más grandes que el acumulador RQ, 57.6 y 41.2 % respectivamente. A pesar de que los tres acumuladores térmicos tienen la misma capacidad de almacenamiento, el TA entrega agua a 50 °C durante 21.4 minutos y el acumulador de CE lo hace por 4.5 minutos más que el TA, tal como se observa en la Figura 43. Sin embargo, el acumulador térmico RQ entrega más agua a 50 °C que el TA y el CE durante 9.2 y 4.7 minutos respectivamente.

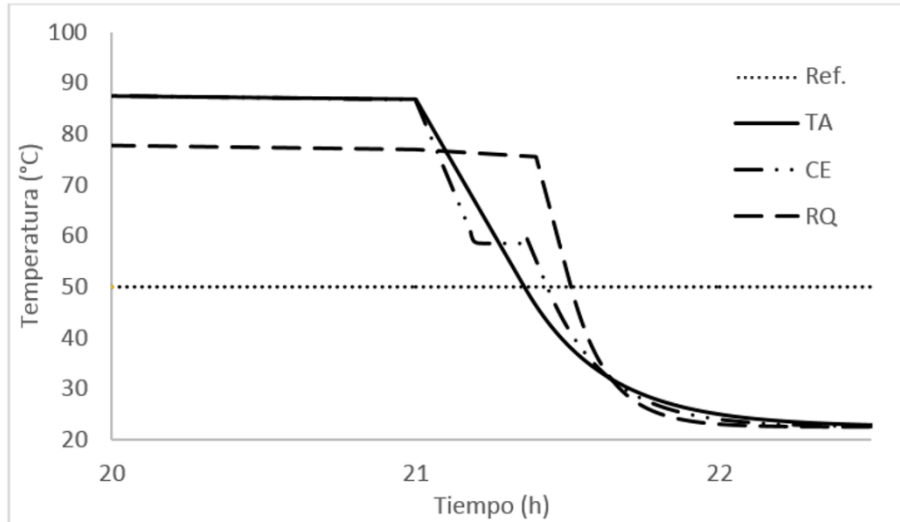


Figura 43.- Descarga de energía con acumuladores de la misma capacidad de almacenamiento térmico y diferente volumen.

En la Figura 43 se observa que a pesar que TA y CE aumentan su volumen para almacenar la misma cantidad de energía que RQ, la temperatura del agua en RQ se mantiene por encima de los 50 °C durante un tiempo mayor. Por lo tanto, RQ suministra agua a 50 °C por un tiempo más prolongado. Si se incrementa el volumen del TA aún más, el acumulador entregará agua a 50 °C por un tiempo aún más reducido. Esto ocurre porque la energía que el agua almacena por encima de los 50 °C disminuye a medida que se incrementa el volumen del tanque. Por tal motivo, el TA no puede tener el mismo desempeño que el acumulador RQ, aun cuando el volumen del tanque crece.

5.4.5.1. - Comparación del consumo energético con respecto al uso de otras fuentes de energía.

La comparación se hizo a manera de ejemplo, en la cual se consideraron los siguientes puntos:

- Tres viviendas, A, B y C con el mismo consumo de energía.
- Las viviendas demandan 26.99 MJ de energía por día.
- La vivienda A utiliza el acumulador RQ (combinado de calor sensible-reacción química).
- La vivienda B utiliza el acumulador CE.
- La vivienda C utiliza el acumulador TA.
- El volumen de los acumuladores es el mismo.



- El sistema de calentamiento solar utiliza un colector de placa plana TopSon F3-1.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 41, la vivienda B y la vivienda C no almacenan la suficiente energía para abastecer su demanda energética. Por esta razón las viviendas necesitan una fuente externa para dicho cometido. La Tabla 12 muestra las fuentes de energía disponibles para generar la energía faltante [56].

Tabla 12.- Energía potencial de los combustibles.

Tipo de combustible	Unidad de medida	Energía equivalente		Eficiencia de los aparatos [%]
		[BTU]	[MJ]	
Gasolina	Galón	138,800	146.44	75-83
Gas LP	Galón	91,300	96.32	79
Electricidad	Kilo Watt hora	3,414	3.601	98
Madera dura	Cuerda	20 000,000	21101.01	50-79

En las viviendas B y C se tiene que generar mediante otras fuentes de energía 8.1 y 9.87 MJ de energía respectivamente, para cubrir la demanda de energía diaria. La cantidad de energía adicional necesaria para satisfacer la demanda, se determina utilizando la ecuación 44 para cada caso.

$$C_x = \frac{E_{fal} \cdot U_{med}}{E_{eq} \cdot \eta} \quad (44)$$

En donde C_x es la cantidad de energía adicional requerida, E_{fal} es la energía faltante para cubrir la demanda diaria, η es la eficiencia por los aparatos al consumir el combustible, U_{med} es la unidad de medición de la energía faltante y E_{eq} es la energía equivalente a la unidad de energía adicional [56]. La energía equivalente es la que puede generarse por unidad de combustible.

Para generar la energía faltante en las viviendas B y C se requieren las cantidades mostradas en la Tabla 13.



Tabla 13.- Energía adicional necesaria para cubrir la demanda de energía en las viviendas B y C.

	Vivienda	
	B	C
Energía faltante [MJ]	8.1	9.87
Gasolina [L]	0.276	0.337
Gas L.P. [kg]	0.217	0.265
Electricidad [kWh]	2.26	2.76
Madera [Cuerda]	58.89×10^{-5}	71.76×10^{-5}

Considerando los precios de los combustibles en México [56- 59], los cuales se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14.- Precio de los combustibles.

Gasolina	Gas L.P.	Electricidad	Madera
\$ 13.0	\$ 14.45	\$ 0.8	\$ 4,000.0

El gasto económico utilizando las diferentes fuentes de energía (para cubrir la demanda diaria de energía) se muestra en la Figura 44.

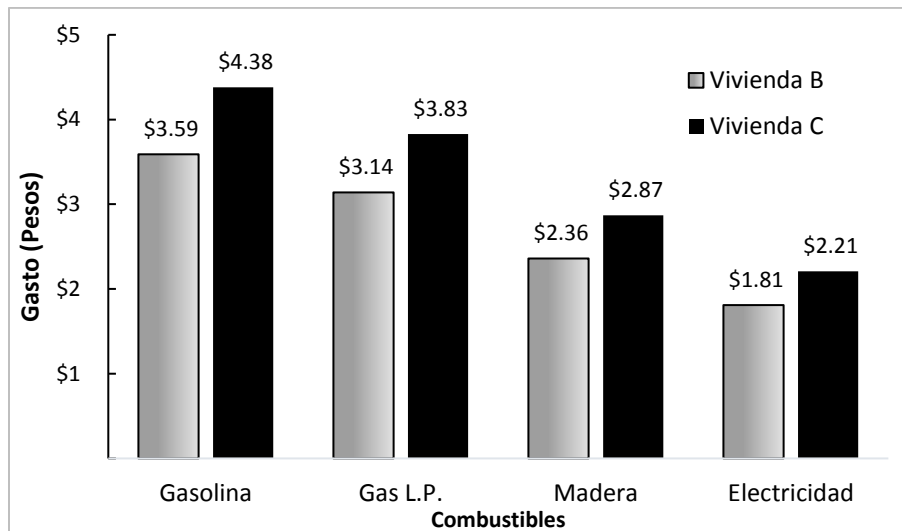


Figura 44.- Gasto diario para cubrir la demanda de energía en las viviendas B y C.



En los hogares comúnmente se utiliza gas para el calentamiento de agua, en este caso, el gas L.P. es una de las alternativas más costosas para que las viviendas B y C puedan cubrir la demanda diaria de energía térmica. En comparación con la vivienda C, la vivienda A estaría ahorrando \$1,397.9 pesos anualmente debido al consumo de gas L.P. si se considera como la fuente de energía más usado para calentamiento del agua.

Ahora bien, considerando que la vivienda A utiliza 100 % de energía solar para cubrir los 26.99 MJ de energía demandados diariamente, se calculó el ahorro económico y de energía considerando las diferentes fuentes energéticas. La Tabla 15 muestra el resultado.

Tabla 15.- Ahorro energético y económico diario de la vivienda que utiliza 100 % energía solar.

	Vivienda A	
	Combustible	Gasto económico
Gasolina	0.921 [L]	\$11.98
Gas L.P	0.724 [kg]	\$10.47
Electricidad	7.547 [kWh]	\$ 6.04
Madera	19.62x10 ⁻⁴ [Cuerda]	\$ 7.85

La Tabla 15 indica que la vivienda A ahorra casi \$12 pesos al día, comparado con una vivienda que utiliza gasolina para cubrir la misma demanda de energía. La gasolina es el combustible que representa mayor costo y la electricidad es el más barato.

5.4.6. – Emisiones de CO₂.

El ahorro de gas por el uso de energía solar genera un beneficio ambiental, dicho beneficio es por la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. En este caso, se calculó la cantidad de CO₂ no emitidos al medio ambiente debido al uso del acumulador combinado, considerando lo siguiente:

- La energía solar sustituye al gas L.P.
- 2.7 kg de CO₂ se emiten al medio ambiente por cada kilogramo de gas L.P. consumido [60].
- El ahorro de gas L.P. es de 0.724 kg/día



Por lo tanto, la cantidad de CO₂ no emitido al medio ambiente es de 713.5 kg en un año. Además del beneficio ambiental que representa la reducción de emisiones de CO₂ se obtiene un beneficio por la venta de los bonos de carbono.

Se denominan bonos de carbono a las reducciones certificadas de emisiones de gases efecto invernadero o CERs, por sus siglas en inglés de Certified Emission Reductions. El CER es la unidad equivalente a una tonelada de dióxido de carbono equivalente.

Considerando que el precio del CER es de \$113.3 pesos (5.67 euros) [61], en un año se obtienen un beneficio de \$80.76 pesos por la reducción de emisiones de CO₂ al ambiente.

5.5. – Análisis de energía y exergía.

El cálculo de la eficiencia energética en un acumulador se utiliza para medir la cantidad de energía que puede ser almacenada del total disponible. Por otra parte, el cálculo de la eficiencia exergética otorga un dato más sensato de la eficiencia del sistema, ya que considera la cantidad y la calidad de la energía. En un acumulador térmico se puede determinar la eficiencia del proceso de carga, almacenamiento y descarga, así como del proceso global.

La eficiencia puede variar de acuerdo con las condiciones de cada clima, por tal motivo, se hizo la evaluación para el clima semidesértico durante la temporada de verano, ya que este tiene el mayor potencial.

El análisis se realizó considerando:

- La irradiancia solar del clima semidesértico.
- El colector solar TopSon F3-1 del tipo de placa plana.

5.5.1. – Acumulador combinado sensible-termoquímico.

El cálculo de la eficiencia energética y exergética que se muestra a continuación, se desarrolló para comprobar que el diseño del acumulador combinado puede mostrar mejor desempeño, comparado con otros medios de almacenamiento térmico.

5.5.1.1. – Resultado del cálculo de la eficiencia energética del acumulador combinado.

El balance de energía para el proceso de carga se expresa de la siguiente forma.

$$Q_e - Q_p = \Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1} \quad (23)$$



En base al balance de energía, la eficiencia del proceso de carga se puede evaluar utilizando la siguiente ecuación.

$$\eta_{en_c} = \frac{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}}{Q_e} \quad (26)$$

Esta ecuación considera:

- El tanque de agua es de 40 litros.
- El acumulador termoquímico almacena 12.75 kg de sulfato de magnesio.

La energía útil que entra al acumulador térmico en un día promedio es de 28.24 *MJ* en el clima semidesértico. Por lo tanto, el valor de la eficiencia energética para este clima es de 95.57 %.

Los acumuladores térmicos pierden energía con el ambiente (de forma sensible) durante la etapa de almacenamiento. La etapa de almacenamiento térmico inicia a partir de que el colector solar deja de suministrar energía al acumulador (etapas de carga). En este caso se evaluó la eficiencia de la etapa de almacenamiento, a partir de que termina la etapa de carga y hasta la media noche.

Durante el periodo de almacenamiento térmico, el balance de energía se expresa de la siguiente forma:

$$-Q_p = \Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2} \quad (24)$$

En este caso, la eficiencia durante el periodo de almacenamiento se puede expresar como el cociente de la cantidad de energía almacenada, después de sufrir pérdidas con el medio ambiente, entre la cantidad de energía almacenada al inicio de dicha etapa.

$$\eta_{en_A} = \frac{(\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}) + (\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})}{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}} = 1 + \frac{(\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})}{\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}} \quad (27)$$

Durante la etapa de almacenamiento térmico se considera que:

- Hay pérdidas de energía del agua con el ambiente.
- El acumulador termoquímico no pierde energía.
- El aislante térmico es de fibra de vidrio, la conductividad térmica es de 0.04 *W/m · K*.

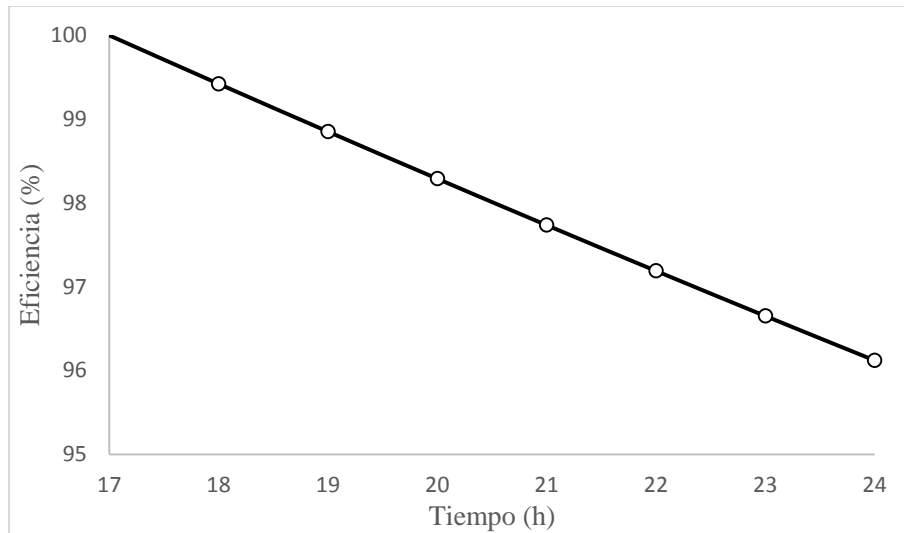


Figura 45.- Eficiencia energética de la etapa de almacenamiento.

En la Figura 45 se muestran los resultados de la simulación del proceso de almacenamiento, donde se observa que la eficiencia energética desciende con el tiempo de forma lineal a consecuencia de las pérdidas de energía hacia el medio ambiente. En este clima, la eficiencia energética es de 96.1 %, después de haber transcurrido un periodo de 7 horas (a las 24 horas del día). Si se considera la misma tendencia, la eficiencia energética será de 92.2 % a las 7 de la mañana del siguiente día. La eficiencia energética depende directamente de la conductividad térmica del material aislante utilizado.

Para evaluar el proceso de descarga del acumulador se consideró el gasto de agua que indica la Norma Oficial Mexicana *NOM-008-CONAGUA-1998*. Las regaderas deben proporcionar un gasto de 4 a 10 litros por minuto. En este caso se considera un gasto de 6 litros por minuto.

El proceso de descarga se evaluó sometiendo el acumulador a una descarga completa, después de haber transcurrido el proceso de almacenamiento por un lapso de 4 horas. La demanda de energía en los hogares tiene un pico entre las 7:00 A.M. y las 11:00 P.M., según el perfil de consumo de la norma ASHRAE 90.2. La Figura 46 muestra el resultado del proceso de descarga.

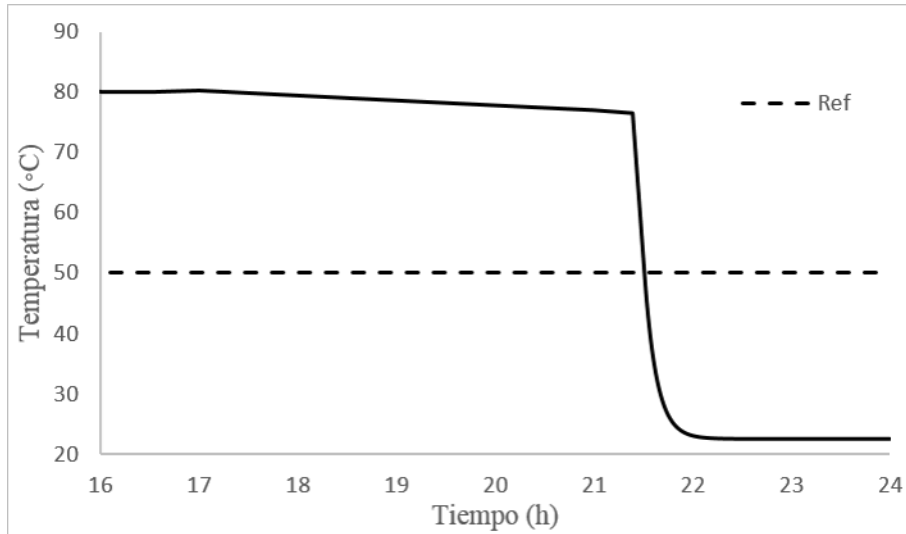


Figura 46.- Proceso de descarga de la energía.

Durante el proceso de descarga, el acumulador térmico combinado entrega agua a 50 °C durante un periodo de 29 min. Si consideramos que la organización mundial de la salud (OMS) recomienda que la ducha debería limitarse a 5 min para un uso sustentable del agua y la energía [62], el acumulador térmico combinado proveerá energía para una familia de 6 integrantes. El resto de la energía puede ser utilizado en otras actividades domésticas.

El balance de energía para el proceso de descarga es el siguiente.

$$-Q_s - Q_p = \Delta Q_{S_3} + \Delta Q_{T_3} \quad (25)$$

La eficiencia energética se calcula a partir de la ecuación 28, la cual se presenta a continuación.

Después de que el acumulador se sometió a una descarga completa, el acumulador entrega 24.63 MJ de energía. La temperatura del agua es de 76.9 °C cuando se inicia el proceso de descarga. La eficiencia energética fue del 93 %, la cual se calculó a partir de la ecuación 28, la cual se muestra a continuación.

$$\eta_{en_D} = \frac{Q_s}{(\Delta Q_{S_1} + \Delta Q_{T_1}) + (\Delta Q_{S_2} + \Delta Q_{T_2})} \quad (28)$$

La eficiencia térmica del proceso global se calcula a partir de la ecuación 29. Este factor es el resultado de dividir la energía que entrega el acumulador entre la energía que entra al mismo. En este caso el resultado de la eficiencia energética global fue de 87.2 %.



La eficiencia energética es elevada, debido a que las pérdidas de energía durante el periodo de almacenamiento es poca. Este valor es dependiente del tiempo que dura el proceso de almacenamiento térmico.

5.5.1.2. – Resultado del cálculo de la eficiencia exergética del acumulador combinado.

El balance de exergía para el proceso de carga de un acumulador térmico sensible-termoquímico se expresa de la siguiente forma:

$$X_e - X_l - X_{des} = X_a + X_{rea} \tag{36}$$

La eficiencia exergética se calcula utilizando la ecuación 39.

$$\eta_{ex_c} = \frac{\Delta X_{S_1} + \Delta X_{T_1}}{X_e} \tag{39}$$

Para calcular la exergía almacenada por el acumulador termoquímico se construyó la Tabla 16, en la cual se calcula la exergía química de reacción utilizando la ecuación 35.

Tabla 16.- Exergía química estándar de los compuestos.

Compuesto	G_f (kJ/mol) [63]	n_e			X_{Qui_e} (kJ/mol) [64]			X_{Qui_st} (kJ/mol)
$MgSO_4$	-1167.34	1 (Mg)	1 (S)	2 (O ₂)	626.9	609.3	3.92	76.7
H_2O gas	-228.6	1 (H ₂)	0.5 (O ₂)		236.12	3.92		9.48
H_2O liq	-237.19	1 (H ₂)	0.5 (O ₂)		236.12	3.92		0.89

Una vez que es conocido el porcentaje de deshidratación del material y el peso del material que se utilizará en el acumulador termoquímico, se construyó la Tabla 17 para determinar la exergía química estándar de los productos de la reacción.

Tabla 17.- Exergía química estándar de los productos y el reactivo.

Compuesto	P.M. (g)	Masa (kg)	Nº. moles	X_{Qui_st}
$MgSO_4 \cdot 2.8H_2O$	170.8	8.84	51.73	79.19
H_2O	18.01	3.91	217.27	9.48
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246.47	12.75	51.73	82.93



La exergía química de la reacción se calculó en base a la Tabla anterior, utilizando la ecuación 32. En este caso se despreció la exergía física, donde la exergía de la reacción fue de 1,866.25 kJ

Por otra parte, la exergía que almacenó el agua y la exergía que entró al acumulador se calcularon a partir de la ecuación 31, donde la exergía del agua fue de 851.83 kJ.

La exergía que entró al acumulador térmico combinado fue de 4,410.89 kJ.

Por lo tanto, la eficiencia exergética de acuerdo a la ecuación 39 durante el periodo de carga es de 61.6 %.

La exergía del acumulador combinado se ve afectada durante la etapa de almacenamiento térmico, a consecuencia de la pérdida de energía del agua con el medio ambiente. De acuerdo con la consideración hecha para el almacenamiento termoquímico, no se pierde exergía de forma química. El resultado de la eficiencia exergética del proceso de almacenamiento se muestra en la Figura 47.

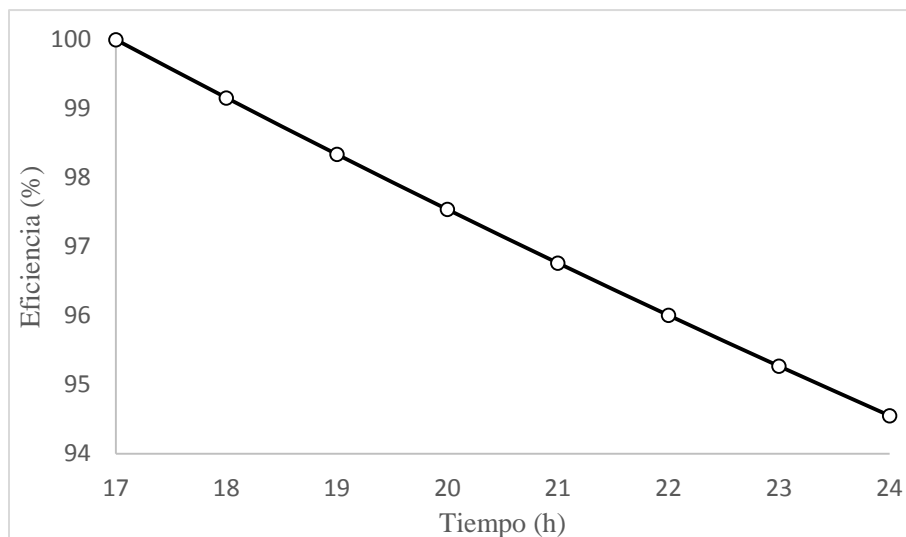


Figura 47.- Exergía durante la etapa de almacenamiento térmico.

Después de un periodo de 7 horas, la exergía almacenada disminuye a consecuencia de la reducción de la temperatura del agua. El acumulador combinado pierde el 5.45 % de exergía en dicho periodo de tiempo.



Este tipo de acumuladores térmicos pierden energía térmica solamente de forma sensible durante el proceso de almacenamiento, mientras que la energía almacenada termoquímicamente permanece por tiempo indefinido. A medida que pasa el tiempo, la eficiencia del proceso de almacenamiento es cada vez menor, hasta que se pierde toda la energía almacenada de forma sensible.

El sulfato de magnesio se rehidrata durante el proceso de descarga de energía. La eficiencia exergética del proceso de descarga se evalúa utilizando la ecuación 41. En este caso, la exergía a la salida del acumulador se calcula utilizando la ecuación 30, haciendo la sumatoria de la exergía a la salida del acumulador durante el proceso de descarga. Por lo tanto, la eficiencia exergética durante el periodo de descarga es de 75.2 %.

La eficiencia exergética del proceso global del acumulador térmico combinado se puede calcular a partir de la ecuación 42, como la relación de la exergía que sale del acumulador entre la exergía que entró al mismo. El resultado de la eficiencia es de 45.1 %.

El valor de la eficiencia exergética global del acumulador combinado es menor que la eficiencia energética debido a que la exergía involucra también la calidad de la energía. Este valor es muy superior al 9 % de eficiencia del acumulador termoquímico reportado en [35]. Por lo tanto, se puede decir que el tanque de agua ayuda a mantener una eficiencia mayor.

5.5.2. - Acumulador empacado con PCM encapsulado.

El esquema del acumulador combinado se utilizó para evaluar el acumulador térmico empacado con PCM encapsulado, debido a que siguen el mismo principio operativo. Por lo tanto, el modelo desarrollado para calcular la eficiencia energética y exergética del acumulador combinado fue utilizado también para este acumulador térmico.

En este caso se utilizó la ecuación 45 para calcular la energía almacenada por el material de cambio de fase.

$$Q_{PCM} = m_{PCM} \cdot c_{p-PCM} \cdot (T_{f-PCM} - T_{0-PCM}) + m_{PCM} \cdot h_{fg-PCM} \quad (45)$$

donde m_{PCM} y c_{p-PCM} son la masa y el calor específico del PCM, T_{f-PCM} y T_{0-PCM} son las temperaturas que alcanza el PCM al inicio y al final de proceso de carga y h_{fg-PCM} es la entalpia de cambio de fase del material.



Por otra parte, la ecuación 46 se utilizó para calcular la exergía almacenada por el material de cambio de fase.

$$X_{PCM} = m_{PCM} \cdot c_{p-PCM} \cdot \left[(T_{f-PCM} - T_{0-PCM}) - T_a \cdot \ln \left(\frac{T_{f-PCM}}{T_{0-PCM}} \right) \right] + m_{PCM} \cdot h_{fg-PCM} \cdot \left(1 - \left(\frac{T_{0-PCM}}{T_{fu-PCM}} \right) \right) \quad (46)$$

La variable T_{fu-PCM} representa la temperatura de cambio de fase del material [65].

5.5.2.1. – Resultado del cálculo de la eficiencia energética del acumulador empacado con PCM encapsulado.

La eficiencia energética para el proceso de carga se calculó a partir de la ecuación 26, donde se obtuvo una eficiencia de 61.8 %.

En este caso, Q_e se obtuvo integrando el calor útil generado en el colector solar durante el proceso de carga.

Para el cálculo de la eficiencia durante el proceso de almacenamiento se utilizó la ecuación 27, de la cual se obtuvo una eficiencia de 96 %.

Por otra parte, la eficiencia del proceso de descarga se calculó a partir de la ecuación 28, obteniendo una eficiencia de 99.6 %.

Q_s se calculó integrando la cantidad de energía que liberó el acumulador térmico para su consumo, durante el periodo de descarga. Una vez que se conoce la energía que entra al acumulador y la energía que libera el acumulador, la eficiencia del proceso global se calculó utilizando la ecuación 29. En este caso se obtuvo una eficiencia de 59.2 %.

El acumulador empacado con PCM encapsulado tiene una eficiencia energética global de 59.2 %, la cual es menor que la de un tanque de agua del mismo volumen. Sin embargo, este acumulador térmico puede almacenar más energía que el tanque de agua.

6.5.2.2. – Resultado del cálculo de la eficiencia exergética del acumulador empacado con PCM encapsulado.

La eficiencia exergética durante el proceso de carga se calculó a partir de la ecuación 39, obteniendo una eficiencia de 40.79 %.



De la misma forma que en el análisis de energía, X_e se obtuvo integrando la exergía que entra al acumulador durante el proceso de carga.

Ahora bien, la eficiencia exergética durante el proceso de almacenamiento se calculó utilizando la ecuación 40, de la cual se obtuvo que la eficiencia es de 93.4 %.

La eficiencia exergética durante el proceso de almacenamiento térmico es de 93.4 %, para el acumulador empacado con PCM encapsulado.

Por su parte, la eficiencia del proceso de descarga se calculó a partir de la ecuación 41. En este caso la eficiencia del proceso de descarga es del 79.55 %. El valor de X_e se obtuvo al integrar la exergía que el acumulador térmico liberó durante dicho proceso.

A partir de los valores de X_e y X_s se calculó la eficiencia exergética del proceso global, utilizando la ecuación 42. Por lo tanto, el proceso global del acumulador empacado con PCM encapsulado es 30.31 % eficiente. El cual es más eficiente que el tanque de agua, porque entrega agua a la temperatura útil para uso sanitario durante más tiempo.

5.5.3. - Tanque de agua.

Para calcular la eficiencia energética y exergética de un tanque de agua se utilizó el modelo que se presenta en la sección 4.5.2.

5.5.3.1. – Resultado del cálculo de la eficiencia energética del tanque de agua.

La ecuación para calcular la eficiencia energética durante el proceso de carga se describe como la energía almacenada en dicho proceso, entre la energía total que entra al sistema. Por lo tanto, el tanque de agua es 63.2 % de eficiente durante el proceso de carga.

Como el cálculo de la eficiencia energética durante el proceso de almacenamiento térmico depende del material aislante, por su relación con las pérdidas de energía hacia el medio ambiente. En este caso, La eficiencia del proceso de almacenamiento es del 94.8 %, debido a que el tanque de agua utiliza un buen aislante térmico y el periodo de almacenamiento térmico no fue corto.

Por otra parte, la ecuación para calcular la eficiencia del proceso de descarga se describe como el producto de la energía liberada durante la descarga, entre la energía almacenada al



inicio del proceso. En este caso el proceso de descarga mostró una eficiencia de 99.7 %, debido a que el acumulador térmico se sometió a un proceso rápido de descarga profunda, por lo cual, la energía que se pierde es mínima.

Finalmente, la eficiencia del proceso global se describe como la energía que descarga el acumulador térmico, entre la energía que entra a él. Por lo tanto, la eficiencia energética global del tanque de agua es de 59.8 %, dicha eficiencia disminuye a medida que el ciclo de carga, almacenamiento y descarga dura más tiempo.

5.5.3.2. – Resultado del cálculo de la eficiencia exergética del tanque de agua.

La ecuación de la eficiencia exergética durante el proceso de carga se describe como la exergía que es almacenada en el acumulador térmico, entre la exergía que entra a él. Por lo tanto, la eficiencia exergética durante el proceso de carga es de 41.5 %.

Para el proceso de almacenamiento, la ecuación de la eficiencia exergética se describe como la exergía almacenada al final del proceso de almacenamiento, entre la exergía almacenada inicialmente. Por lo que la eficiencia exergética durante el proceso de almacenamiento es de 90.6 %.

Durante el proceso de descarga, la ecuación de la eficiencia exergética se describe como la exergía liberada, entre la exergía almacenada en el acumulador térmico. Por lo tanto, la eficiencia es 69.97 %.

La eficiencia del proceso global se describe como la exergía que libera el acumulador térmico, entre la exergía que entra al acumulador térmico. Por lo tanto, la eficiencia en el proceso global es de 26.3 %.

Se puede observar que la eficiencia exergética es menor que la energética en cada uno de los procesos.

5.5.4. - Resumen de resultados de los análisis energéticos y exergéticos de cada acumulador térmico.

La Tabla 18 resume el resultado de las evaluaciones energéticas y exergéticas realizadas para cada uno de los acumuladores térmicos (combinado, empacado con PCM encapsulado y tanque de agua).



Tabla 18.- Resumen de evaluación de eficiencia.

Proceso	Energética [%]			Exergética [%]		
	A	B	C	A	B	C
Carga	95.5	61.8	63.2	61.6	40.79	41.5
Almacenamiento	97.7	96	94.8	96.7	93.4	90.6
Descarga	93.0	99.6	99.7	75.2	79.55	69.9
Global	87.2	59.2	59.8	45.1	30.31	26.3

Los resultados indican que el acumulador combinado puede ser más eficiente que el acumulador empacado con PCM encapsulado y que el tanque de agua. En el ámbito exergético, el acumulador combinado es 14.79 % más eficiente que el acumulador empacado con PCM y es 18.8 % más eficiente que el tanque de agua. Considerando el escenario donde los acumuladores almacenan la energía a largo plazo, el acumulador combinado seguirá siendo más eficiente, debido a que la parte termoquímica del acumulador tiene pérdidas de energía insignificantes y puede almacenar la energía a temperatura ambiente, mientras que el acumulador empacado con PCM encapsulado y el tanque de agua no pueden almacenar energía térmica a largo plazo por la constante pérdida al ambiente.

La eficiencia de los acumuladores basados en calor sensible y latente depende del tamaño, del espesor y tipo de material aislante, así como del tiempo. Por otra parte, la eficiencia de los acumuladores termoquímicos depende de la velocidad de la reacción y la potencia de la transferencia de calor para que el agua alcance una temperatura alta. Los acumuladores de calor sensible y de calor latente han mostrado una eficiencia alrededor de 37 %, mientras que los termoquímicos han mostrado eficiencia de 9 %. El acumulador combinado puede ser más eficiente que los antes mencionados, porque la energía almacenada termoquímicamente puede ser utilizada para mantener elevada la temperatura del agua y entregarla con alta exergía.



5.6. - Análisis de costos.

El costo del tanque de agua se considera un aproximado al ofrecido por la marca IUSA [66]. En este caso se considera que el tanque de 60 L cuesta \$2,000 pesos.

5.6.2. – Costo del acumulador termoquímico.

El costo del acumulador termoquímico se estimó de acuerdo al tamaño del dispositivo, al tipo y el precio de los materiales necesarios para su construcción, los cuales están disponibles en [67, 68].

Los materiales considerados para la construcción del acumulador termoquímico y algunas características se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19.- Materiales para la construcción del acumulador termoquímico.

Materiales	Espesor	Área transversal
Acero inoxidable	1 mm	N/A
Tubo de cobre	1 mm	3/4 ft

Para construir el acumulador termoquímico se requiere aproximadamente de 1.1 m^2 de lámina de acero inoxidable y 5.3 m de tubo de cobre. Se considera que el acumulador se construye durante 15 días y ocupa a una persona que cobra de mano de obra \$300 pesos diarios. Además, se considera un costo adicional de \$500 pesos por soldadura y otros. Por lo tanto, el desglose del costo del acumulador se muestra en la Tabla 20.



Tabla 20- Desglose de costo del acumulador térmico combinado.

Descripción	Cantidad requerida	Precio unitario [MXN]	Monto [MXN]	Total [MXN]
Tanque de agua	1	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00	\$ 2,000.00
Acero inoxidable [m ²]	1.1	\$ 1,450.00	\$ 1,595.00	\$ 1,595.00
Tubería de cobre [m]	5.3	\$ 76.50	\$ 406.00	\$ 406.00
Mano de obra	12	\$ 300.00	\$ 3,600.00	\$ 3,600.00
Soldadura y otros	1	\$ 500.00	\$ 500.00	\$ 500.00
			SUBTOTAL	\$ 8,101.00
			+ 30 %	\$ 2,430.00
			TOTAL	\$ 10,531.00

El acumulador termoquímico tiene un costo aproximado de \$8,531 pesos. Por esta razón, un sistema de calentamiento de agua solar que utiliza un acumulador combinado sería más caro que un sistema tradicional, por el equivalente al precio del acumulador termoquímico.

5.6.3. - Retorno de la inversión.

El acumulador combinado puede almacenar más energía térmica debido a que el acumulador termoquímico se encuentra integrado en el tanque de agua, siendo esto lo que encarece al acumulador. En base a lo anterior, se determinó el retorno de la inversión debido a la integración de un acumulador termoquímico en un tanque de agua, en función del ahorro de gas que se genera por dicha integración. El resultado se muestra en la Tabla 21. En este caso se consideró una inflación del 3 % en el precio del gas L.P. El costo por mantenimiento y remplazar del sulfato de magnesio es de \$200 pesos, tres veces por año. El costo incrementa 10 % cada año.



Tabla 21.- Retorno de la inversión del acumulador termoquímico.

Año	Inversión inicial	Consumo de gas	Mantenimiento	Ahorro debido al aprovechamiento del sol	Total
0	-\$8,531.00	\$0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	-\$8,531.00
1		\$0.00	\$1,020.75	\$1,397.68	-\$8,154.07
2		\$0.00	\$1,093.37	\$1,439.61	-\$7,807.84
3		\$0.00	\$1,106.37	\$1,482.79	-\$7,431.42
4		\$0.00	\$1,119.76	\$1,527.28	-\$7,023.90
5		\$0.00	\$1,133.56	\$1,573.10	-\$6,584.37
6		\$0.00	\$1,147.76	\$1,620.29	-\$6,111.84
7		\$0.00	\$1,162.40	\$1,668.90	-\$5,605.34
8		\$0.00	\$1,177.47	\$1,718.97	-\$5,063.84
9		\$0.00	\$1,192.99	\$1,770.53	-\$4,486.30
10		\$0.00	\$1,208.98	\$1,823.65	-\$3,871.64
11		\$0.00	\$1,225.45	\$1,878.36	-\$3,218.73
12		\$0.00	\$1,242.42	\$1,934.71	-\$2,526.43
13		\$0.00	\$1,259.89	\$1,992.75	-\$1,793.57
14		\$0.00	\$1,277.89	\$2,052.53	-\$1,018.92
15		\$0.00	\$1,296.42	\$2,114.11	-\$201.23
16		\$0.00	\$1,315.51	\$2,177.53	\$660.79
---	---	---	---	---	---
20		\$0.00	\$1,397.79	\$2,450.83	\$4,579.37

Por lo tanto, la inversión del acumulador termoquímico se recupera durante el decimosexto año de uso, después de haberse integrado al tanque de agua. El retorno de la inversión es lento, debido a que el costo de mantenimiento del acumulador representa el 66 % en promedio del ahorro por el aprovechamiento de la energía. Después de 20 años de uso, el beneficio económico es de \$4,579 pesos.



Por otra parte, se determinó el retorno de inversión de un sistema solar de calentamiento de agua que integra un acumulador termoquímico, suponiendo que el sistema solar cubre la demanda diaria de energía. La Tabla 22 muestra el costo total del sistema solar, considerando el precio del colector del punto 4.4.2 y un gasto adicional por tubería y otros accesorios.

Tabla 22.- Costo de los sistemas solares de calentamiento de agua.

Descripción	Precio
Colector solar	\$ 11,561.00
Acumulador combinado	\$ 10,531.00
Tubería	\$ 306.00
Accesorios, otros	\$ 200.00
Total	\$ 22,598.00

Considerando Gas L.P., el ahorro debido al aprovechamiento de la energía solar es de 0.724 kg/día y 264.26 kg/año. El ahorro se determinó de acuerdo con la Tabla 8, utilizando la ecuación 44.

En la Tabla 23 se muestra el resultado de análisis de retorno de la inversión del sistema solar que integra el acumulador combinado. Se consideró que el sulfato de magnesio es reemplazado tres veces por año y una inflación anual del 3 % en el precio del gas y del sulfato de magnesio. El costo por mantenimiento y reemplazar del sulfato de magnesio es de \$200 pesos, tres veces por año. El costo incrementa 10 % cada año.



Tabla 23.- Retorno de inversión del sistema que integra un acumulador térmico combinado

Año	Inversión inicial	Consumo de gas	Mantenimiento	Ahorro debido al aprovechamiento del sol	Total
0	-\$24,598.00	\$0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	-\$24,598.00
1		\$0.00	\$1,020.75	\$3,818.56	-\$21,800.19
2		\$0.00	\$1,093.37	\$3,933.11	-\$18,960.45
3		\$0.00	\$1,106.37	\$4,051.11	-\$16,015.72
4		\$0.00	\$1,119.76	\$4,172.64	-\$12,962.84
5		\$0.00	\$1,133.56	\$4,297.82	-\$9,798.58
6		\$0.00	\$1,147.76	\$4,426.75	-\$6,519.59
7		\$0.00	\$1,162.40	\$4,559.56	-\$3,122.43
8		\$0.00	\$1,177.47	\$4,696.34	\$396.44
---	---	---	---	---	---
20		\$0.00	\$1,397.79	\$6,695.86	\$53,562.35

En dicha tabla se observa que la inversión se recupera durante el octavo año. El retorno de inversión es rápido, debido a que el aprovechamiento de la energía solar es mayor con respecto a un sistema que utiliza un tanque de agua como medio de almacenamiento térmico.

Después de 20 años de vida útil del acumulador, el ahorro económico que puede obtenerse es de \$53,562 pesos. Dicho beneficio representa el costo de dos sistemas del mismo tipo.



6. – Conclusiones.

Simulaciones

Las dimensiones de un acumulador combinado como el que se diseñó deben ser específicas para cada tipo de clima y cada material termoquímico utilizado. Esto es debido a que el potencial de irradiación solar es diferente en cada zona y en algunos climas puede ser insuficiente para que la reacción se produzca adecuadamente en el acumulador termoquímico. Además, las sales se deshidratan unas más que otras, por lo tanto, algunas sales necesitan recipientes de mayor tamaño para almacenar los reactivos de la reacción. La densidad de almacenamiento térmico del acumulador combinado es mayor que las otras formas de almacenamiento térmico, por lo tanto, el acumulador combinado tiende a ser más compacto y puede entregar agua caliente por más tiempo.

Eficiencia

El acumulador térmico combinado es más eficiente para utilizarse en el corto y largo plazo. En el corto plazo, el acumulador combinado es 14.79 % más eficiente que el acumulador empacado con PCM y es 18.8 % más eficiente el tanque de agua, debido a que se comporta de forma similar a los acumuladores estratificados, los cuales entregan agua a temperatura con alta exergía. Por otra parte, en el largo plazo las eficiencias de los acumuladores basados en calor sensible y calor latente tienden a cero, debido las pérdidas de energía constantes con el ambiente. Mientras tanto, la parte termoquímica del acumulador combinado almacena la energía como reactivos a temperatura ambiente.

Comparación

El acumulador combinado es capaz de almacenar 57 % más energía que el tanque de agua y 42 % más energía que el acumulador empacado con PCM encapsulado. Por lo tanto, el acumulador combinado puede proveer agua caliente (a 50 °C) para uso sanitario 2.14 veces más que un acumulador térmico tradicional (tanque de agua). Por esta razón, el acumulador combinado tiene mejor rendimiento.



Impacto ambiental

Los 26.99 MJ de energía que el acumulador combinado puede almacenar diariamente es equivalente a la energía que se produce por el consumo de 0.724 kg de gas L.P. Por lo tanto, en un año se puede prevenir el consumo de 264 kg de gas L.P., del cual se generarían 713.5 kg de CO₂. Con dicha reducción de emisiones de CO₂ se puede obtener un beneficio económico de \$80.76 pesos al año, por la venta de los bonos de carbón. Puesto que el acumulador combinado representa una opción para el mayor aprovechamiento de la energía solar, el uso de éste acumulador puede influir en una mayor reducción de las emisiones de CO₂.

Análisis de costos

A pesar de que el costo del sistema de calentamiento solar es de \$24,598 pesos, el retorno de la inversión se efectúa durante el octavo año, debido a que el acumulador térmico almacena 26.99 MJ de energía solar, lo cual es equivalente a un ahorro económico superior a \$2,797 pesos por año. Por lo tanto, el acumulador puede ser considerado como una alternativa prometedora para almacenamiento térmico en sistemas solares para viviendas unifamiliares.



7. - Trabajos futuros

A continuación, se proponen algunos temas para futuras investigaciones de estudiantes, que pueden complementar el estudio de los acumuladores térmicos combinados.

- Estudiar el mecanismo de intercambio de masa en el acumulador termoquímico, para controlar los procesos de hidratación y deshidratación de las sales.
- Diseño de un acumulador co-generativo termoeléctrico, para optimizar el aprovechamiento del recurso solar.
- Automatización de los procesos de hidratación y deshidratación, mediante la integración de un dispositivo PLC.
- Construir el acumulador combinado y evaluarlo en condiciones de uso real.
- Analizar el acumulador térmico combinado termo-económicamente.



8. - Bibliografía

- [1] P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, M. C. S. Roug a y P. Cognet. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 32 (2014) 591–610.
- [2] L. C. Lau, K. T. Lee y A. R. Mohamed. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 16 (2012) 5280–5284.
- [3] I. M. Freitas, E. Dantas y M. Iizuka. The Kyoto mechanisms and the diffusion of renewable energy technologies in the BRICS. *Energ. Policy.* 42 (2012) 118–128.
- [4] P. Armstrong, D. Ager, I. y M. McCulloch. Domestic hot water storage: Balancing thermal and sanitary performance. *Energ. Policy.* 68 (2014) 334-339.
- [5] C. ONU. La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI,» Naciones Unidas. [En línea]. Disponible: <https://unchronicle.un.org/es/article/la-promesa-de-la-energ-solar-estrategia-energ-tica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en>. [ ltimo acceso: Jul. 16].
- [6] K. E. N’Tsoukpoe, H. Liu, N. L. Pierr s y L. Luo. A review on long-term sorption solar energy storage. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13 (2009) 2385-2396.
- [7] P. Pinel, C. A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison y A. Wills. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 42 (2011) 3341–3359.
- [8] L. F. Cabeza, A. Gutierrez, C. Barreneche, S. Ushak,  . G. Fernández, A. I. Fernández y M. Gr geda. Lithium in thermal energy storage: A state-of-the-art review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 42 (2015) 1106–1112.
- [9] A. O. Ramírez. PCM integration in gypsum boards reinforced with polypropylene fibers. [En línea]. Disponible: http://oa.upm.es/2910/1/ALICIA_OLIVER_RAMIREZ.pdf. . [ ltimo acceso: Dic. 15].
- [10] J. A. Quinnell, J. H. Davidson y J. Burch. Liquid Calcium Chloride Solar Storage: Concept and Analysis. *J Sol Energ-T Asme.* 133 (2011) 8.
- [11] A. Oliver, F. J. Neila y A. Garcia-Santos. PCM choosing and classification according to their characteristics for their application for thermal energy storage systems. *Mater. Construcc.* 63 (2012) 131-140.



- [12] C. S. A. International. City of peckering. [En línea]. Disponible: <https://www.pickering.ca/en/living/resources/CompactThermalEnergyStorageStudy.pdf>. [Último acceso: Dic. 15].
- [13] H. Mehling y L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Berlin: Springer, 2008.
- [14] C. Bales. Final report of Subtask B "Chemical and Sorption Storage" The overview. Solar heating and cooling programme. Paris. 2008.
- [15] M. Selvidge y I. N. Miaoulis. Evaluation of reversible hydration reactions for use in thermal energy storage. *Sol Energy*. 44 (1990) 173–178.
- [16] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell y L. F. Cabeza. Corrosion of metals and salt hydrates used for thermochemical energy storage. *Renew Energ*. 75 (2015) 519-523.
- [17] K. Visscher y J. Veldhuis. Comparison of candidate materials for seasonal storage of solar heat through dynamic simulation of boulding and renewable energy system. *The Ninth International Building Performance Simulation Association*. Montreal. Canada. 2005.
- [18] H. Zondag, A. Kalbasenka y M. v. Essen. First studies in reactor concepts for Thermochemical Storage. Energy Research Centre of the Netherlands. Apeldoorn. 2011.
- [19] H. Zondag, V. Essen, R. Schuitema, L. Bleijendaal, A. Kalbasenka, W. v. Helden y M. Bakker. Engineering assessment of reactor designs for thermochemical storage of solar heat. Energy Research Centre of the Netherlands. Apeldoorn. 2011.
- [20] N. Yu, R. Z. Wang y L. W. Wang. Sorption thermal storage for solar energy. *Prog Energ Combust*. 39 (2013) 489–514.
- [21] H. Zondag, V. E. Martijn, L. Bleijendaal, J. Cot y R. Schitema. Comparison of reactor concepts for thermochemical storage of solar heat. Energy Research Centre of the Netherlands. Apeldoorn. 2013.
- [22] D. Dicaire y F. H. Tezel. Use of adsorbents for thermal energy storage of solar or excess heat: improvement of energy density. *Int J Energ Res*. 37 (2012) 1059–1068.
- [23] M. H. Moreno. Estado del Arte de la Producción de Frío a partir de Energía Solar. [En línea]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70166/fichero/Bibliograf%EDa.pdf>. [Último acceso: Jul. 15].



- [24] F. Trausel, A. Jong y R. Cuypers. A review on the properties of salt hydrates for thermochemical storage. *Energ. Proc.* 48 (2014) 447-452.
- [25] U. Rammelberg, M. Myrau, T. Schmidt y W. Ruck. An optimization of salt hydrates for thermochemical heat storage. *International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems*. Fukuoka. 2013.
- [26] M. Druske, A. Fopah-Lele, K. Korhammer y H. U. Rammelberg. Developed materials for thermal energy storage: synthesis and characterization. *Energ. Proc.* 61 (2014) 96 - 99.
- [27] M. Rosen y I. Dincer. Exergy methods for assessing and comparing thermal storage systems. *Int. J. Energy Res.* 27 (2003) 415–430.
- [28] I. Dincer y Yunus. A. Cengel. Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. *Entropy*. 3 (2001) 116-149.
- [29] I. Dincer. On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energ. Build.* 34 (2002) 377–388.
- [30] S. U., A. Burkeljca y B. V. Federation of European Heating, Entilation and Air Conditioning Associations. 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/01-2012/02-2012/phase-change-materials.pdf>. [Último acceso: May. 16].
- [31] M. A. Ezan, M. Ozdogan, H. Gunerhan, A. Ereğ y A. Hepbasli. Energetic and exergetic analysis and assessment of a thermal energy storage (TES) unit for building applications. *Energ. Build.* 42 (2010) 1896–1901.
- [32] D. Aydin, Z. Utlu y O. Kincay. Thermal performance analysis of a solar energy sourced latent heat storage. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 50 (2015) 1213–1225.
- [33] Y. Xu, Y. L. He, Y. Q. Li y H. Song. Exergy analysis and optimization of charging–discharging processes of latent heat thermal energy storage system with three phase change materials. *Sol Energy*. 123 (2016) 206–216.
- [34] T. Kousksou, F. Strub, J. C. Lasvignottes, A. Jamil y J. Bédécarrats. Second law analysis of latent thermal storage for solar system. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* (2007) 1275–1281.
- [35] A. H. Abedin y M. A. Rosen. Assessment of a closed thermochemical energy storage using energy and exergy methods. *Appl. Energy* (2012) 18–23.
- [36] A. H. Abedin y M. A. Rosen. Closed and open thermochemical energy storage: Energy- and exergy-based comparisons. *Energy*. (2012) 83-92.



- [37] A. H. Abedin. University of Ontario. 2010. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10155/119>. [Último acceso: Dic. 15].
- [38] R. B. Jemaa, R. Mansouri, I. Boukholda y A. Bellagi. Experimental investigation and exergy analysis of a triple fluid vapor absorption refrigerator. *Energ. Convers. Manage.* 124 (2016) 84-91.
- [39] H. Caliskan, I. Dincer y A. Hepbasli. Energy and exergy analyses of combined thermochemical and sensible thermal energy storage systems for building heating applications. *Energ. Build.* (2012) 103–111.
- [40] A. Adams. knight property management. [En línea]. Disponible: <http://www.knightpropertymanagement.co.uk/pdf/legionnaires-disease-hse-acop.pdf>. [Último acceso: Feb. 16].
- [41] P. Armstrong, M. Uapipatanakul, I. Thompson, D. Ager y M. McCulloch. Thermal and sanitary performance of domestic hot water cylinders: Conflicting requirements. *Appl Energy.* 131 (2014) 171-179.
- [42] M. Rodríguez-Hidalgo, P. Rodríguez-Aumente, A. Lecuona, M. Legrand and R. Ventas. Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank. *Appl. Energy.* 97 (2012) 897–906.
- [43] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell y L. F. Cabeza. Corrosion test of salt hydrates and vessel metals for thermochemical energy storage. *Energ. Procedia.* (2014) 431 – 435.
- [44] A. Sole, L. Miro, C. Barreneche, I. Martorell y L. F. Cabeza. Corrosion of metals and salt hydrates used for thermochemical energy storage. *Renew. Energ.* (2015) 519-523.
- [45] C. Yunus A y A. J. Ghajar. Transferencia de calor y masa. Distrito Federal. McGraw-Hill. 2011.
- [46] V. v. Essen, H. A. Zondag, R. Schuitema, W. v. Helden y C. Rindt. Materials for thermochemical storage: characterization of magnesium. 15. [En línea]. Disponible: <https://drive.google.com/drive/folders/0B5DpG82vqvkweIzVU29KX2xkRUk>. [Último acceso: Nov. 15].
- [47] C. Barreneche, A. I. Fernández, L. F. Cabeza y R. Cuypers. Thermophysical characterization and thermal cycling stability of two TCM: CaCl₂ and zeolite. *Appl. Energy.* 137. (2015) 726-730.



- [48] S. M. Nacional. Comisión Nacional del Agua. [En línea]. Disponible: http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80. [Último acceso: Mar. 16].
- [49] P. Kovacs. European solar thermal industry federation. 2016. [En línea]. Disponible: http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/projects/QAiST/QAiST_results/QAiST%20D2.3%20Guide%20to%20EN%2012975.pdf. [Último acceso: Feb. 16].
- [50] J. A. Manrique. Energía solar. México: Harla. 1984.
- [51] M. A. TEILEN. Wolf - Sistemas para el ahorro de energía. [En línea]. Disponible: http://www.wolfiberica.es/fileadmin/content/ESP/Download_Center/Tarifas/TARIFA_DOMESTICA_10-2015.pdf. [Último acceso: Mar. 16].
- [52] T. Wada y R. Yamamoto. Studies on salt hydrate for latent heat storage. I. Crystal nucleation of sodium acetate trihydrate catalized by tetrasodium pyrophosphate decahydrate. *Chem. Soc. Jpn.* 55 (1982) 3603-3606.
- [53] V. v. Essen, M. Bakker y W. v. Helden. Materials for thermochemical storage: characterization of salt hydrates. 15. [En línea]. Disponible: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2009/m09103.pdf>. [Último acceso: Nov. 15].
- [54] K. D. Grevel y J. Majzlan. Internally consistent thermodynamic data for magnesium sulfate hydrates. *Geochim. Cosmochim. Ac.* 73 (2009) 6805-6815.
- [55] V. M. Gurevich, O. L. Kuskov, K. S. Gavrichev y A. V. Tyurin. Heat Capacity and Thermodynamic Functions of Epsomite. *Geochem. Int.* 2 (2007) 237-240.
- [56] R. H. Plante, Solar energy, photovoltaics and domestic hot water, San Diego. Elsevier, 2014.
- [57] AMEXGAS. Amexgas. 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.amexgas.com.mx/precioglp.php#top>. [Último acceso: Mar. 16].
- [58] P. Mexicanos. Pemex. 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/Precios/Paginas/GLP.aspx>. [Último acceso: Mar. 16].
- [59] INAI. Comisión Federal de Electricidad. 2016. [En línea]. Disponible: INAI, Comisión Federal de Electricidad, <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>. [Último acceso: Mar. 16].
- [60] J. O. R. Torres, "ptolomeo," [En línea]. Disponible: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/61112/Tesina.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Oct. 16].



- [61] F. M. Ltd, "Investing.com," 2007. [En línea]. Disponible: <http://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. [Último acceso: Oct. 16].
- [62] D. Coello, "ethic," 2011. [En línea]. Disponible: <http://ethic.es/2014/03/cuanto-tiempo-dedicas-a-ducharte/>. [Último acceso: Abr. 16].
- [63] M. S.A. Monografias. 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/entalpia-energia-libre-compuestos-inorganicos/entalpia-energia-libre-compuestos-inorganicos.pdf>. [Último acceso: Dic. 16].
- [64] R. Rivero y M. Garfias. Standard chemical exergy of elements updated. *Energy*. (2006) 3310–3326.
- [65] S. Jegadheeswaran, S. Pohekar y T. Kousksou. Exergy based performance evaluation of latent heat thermal storage system: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14 (2010) 2580–2595.
- [66] Grupo IUSA. IUSA. 2016. [En línea]. Disponible: <http://ws.iusa.com.mx/>. [Último acceso: Mar. 16].
- [67] D. Metalica. DM. [En línea]. Disponible: <http://www.metalica.com.mx/>. [Último acceso: Mar. 16].
- [68] H. TLC. The home depot. [En línea]. Disponible: <http://www.homedepot.com.mx/>. [Último acceso: Mar. 16].

Anexos

I. – Montaje experimental.

En la Figura 48 se muestran los elementos del montaje experimental, el cual se construyó para el estudio de los procesos de hidratación y deshidratación de las sales hidratadas. Este se compone de 5 elementos fundamentalmente: reactor, bomba de vacío, calentador de agua, tarjeta de adquisición de datos y dispositivos de medición.

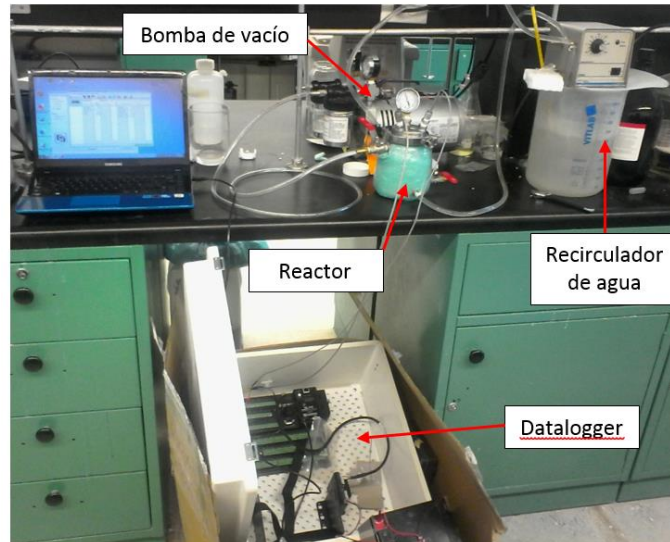


Figura 48.-Montaje experimental para las pruebas de hidratación-deshidratación de los TCM.

La Figura 49 muestra más claramente los elementos de medición en el reactor y las conexiones.

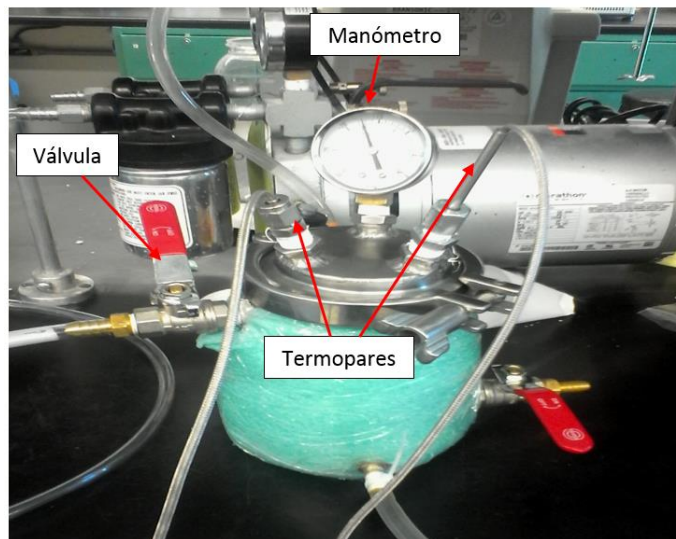


Figura 49.- Reactor y elementos de medición.



II. – Diagramas de flujo para las simulaciones.

El diagrama de flujo para simular el proceso de carga, almacenamiento y descarga en función de la temperatura del agua en el acumulador sensible se muestra en la Figura 50. Se hicieron las siguientes consideraciones.

- El tanque tiene forma cilíndrica.
- Utiliza aislante térmico de fibra de vidrio.
- El espesor del aislamiento es de 5 cm.

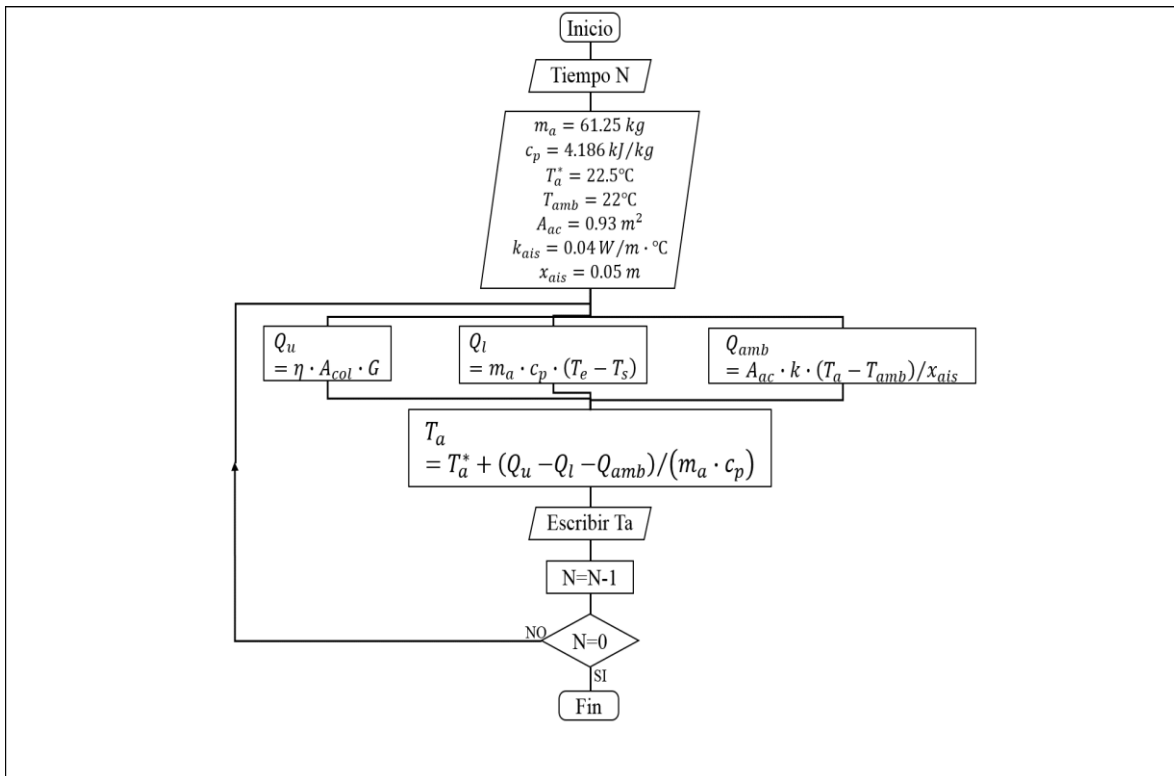


Figura 50.- Diagramada flujo para calcular la temperatura del agua en el tanque.

En la Figura 51 se muestra el diagrama de flujo para simular el proceso de carga, almacenamiento y descarga del acumulador empacado con PCM encapsulado, en función de la temperatura del agua. En este caso se hicieron las siguientes consideraciones.

- El tanque tiene forma rectangular.
- Se utiliza poli-etilenglicol como PCM.
- La entalpia de cambio de fase es de 161 J/gr.
- El calor específico del material es de 2.4085 kJ/kg · °C.



- Densidad de 1.13 kg/m^3 .
- Que el PCM mantiene la temperatura durante el cambio de fase.
- El calentamiento del material es homogéneo.

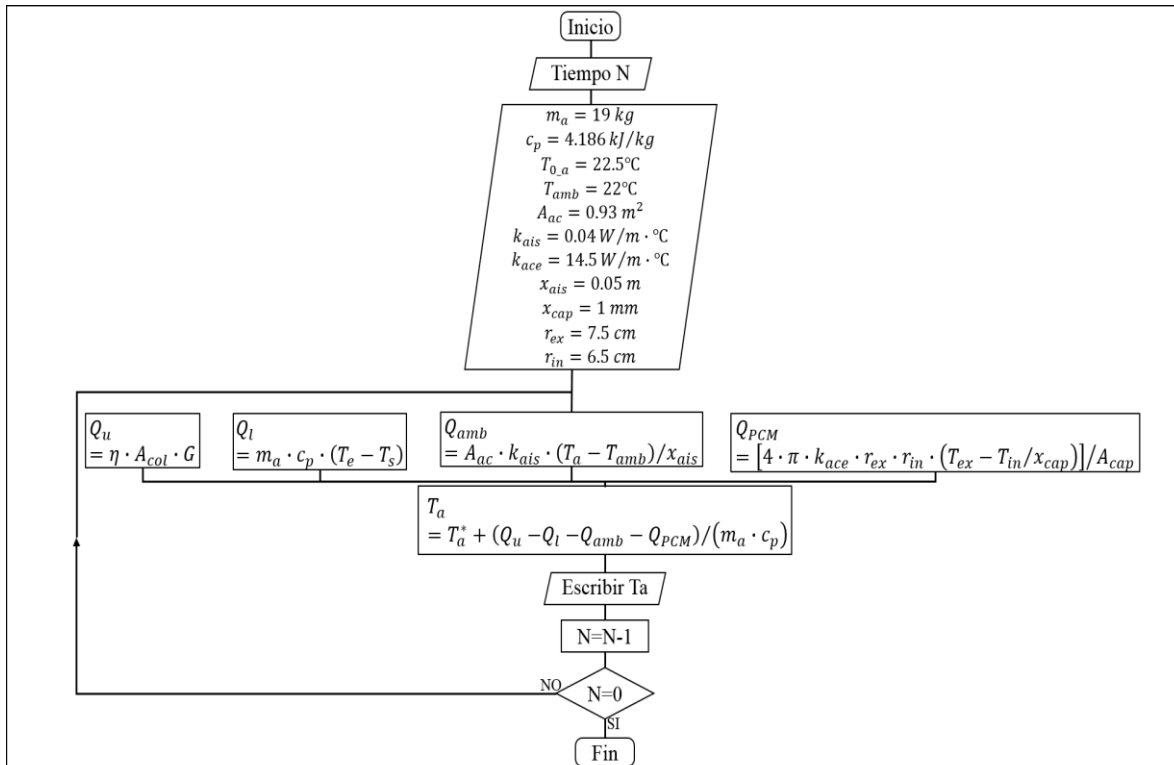


Figura 512.- Diagrama de flujo para calcular la temperatura del agua en acumulador empacado con PCM encapsulado

Para calcular el área de transferencia de calor entre el agua y el PCM se estimó el número de esferas que pueden caber en el acumulador, considerando lo siguiente.

- Las esferas se ordenan de igual manera que una estructura cubica centrada en las caras.
- El tamaño es homogéneo.

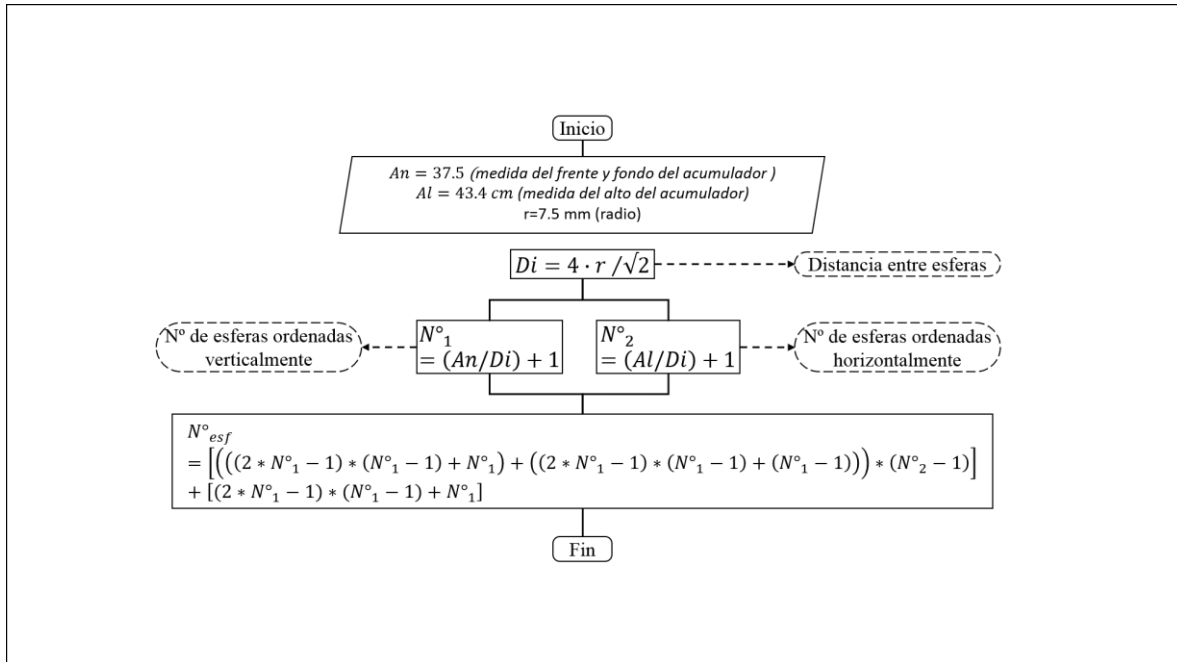


Figura 52.- Diagrama de flujo para calcular el número de esferas.

La Figura 52 muestra el diagrama de flujo para calcular el número de esferas que el acumulador empacado puede contener.

En la Figura 53 se muestra el diagrama de flujo para simular los procesos de carga almacenamiento y descarga de energía en un acumulador combinado. En este caso se consideró lo siguiente.

- Se utiliza Sulfato de magnesio como TCM.
- El calentamiento del material es homogéneo.
- El acumulador termoquímico está inmerso en un tanque de agua tiene forma cilíndrica.

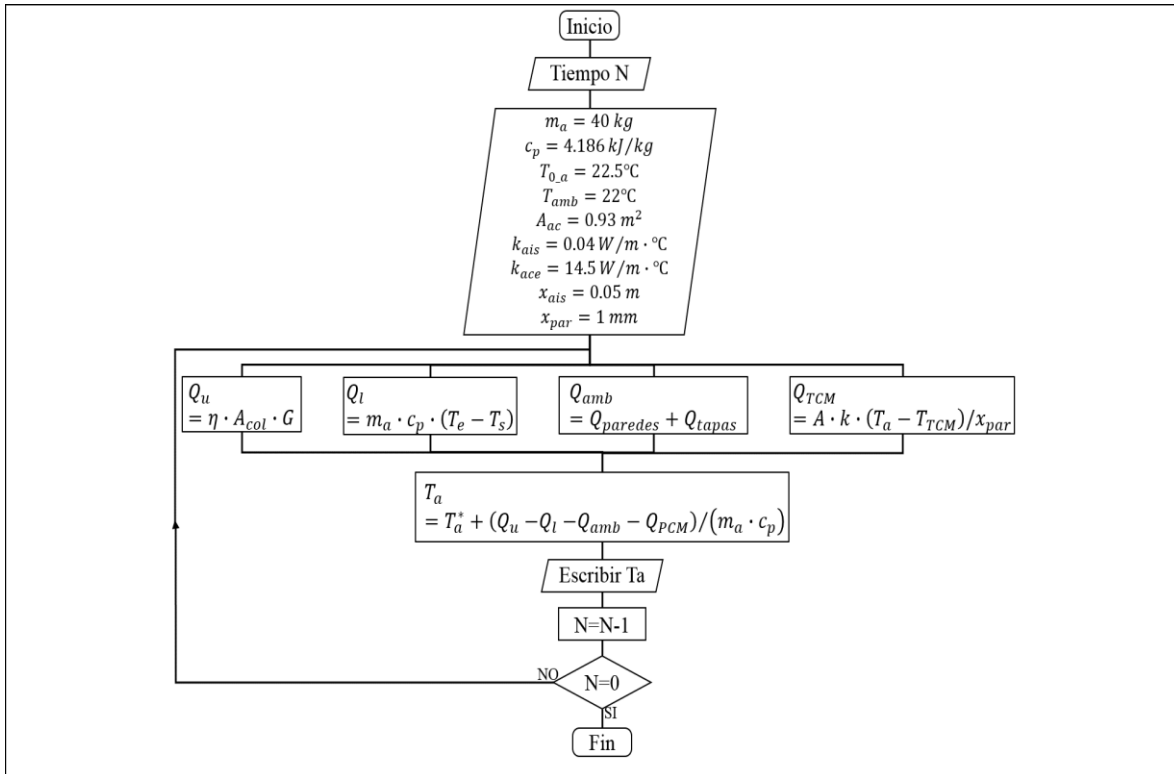


Figura 53.- Diagrama de flujo para calcular la temperatura del agua en el acumulador combinado.



Hojas de Excel

A continuación, en las figuras 54, 55 y 56 se muestran las capturas de pantalla de las hojas de datos para simular el comportamiento del tanque de agua, el acumulador empacado con PCM encapsulado y el acumulador combinado.

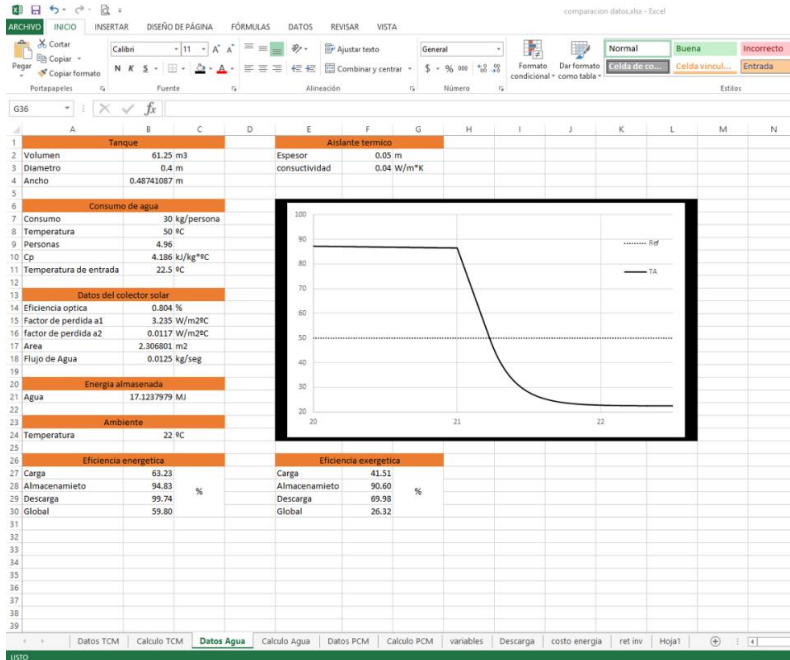


Figura 54.- Hoja de datos para simular el comportamiento del tanque de agua.

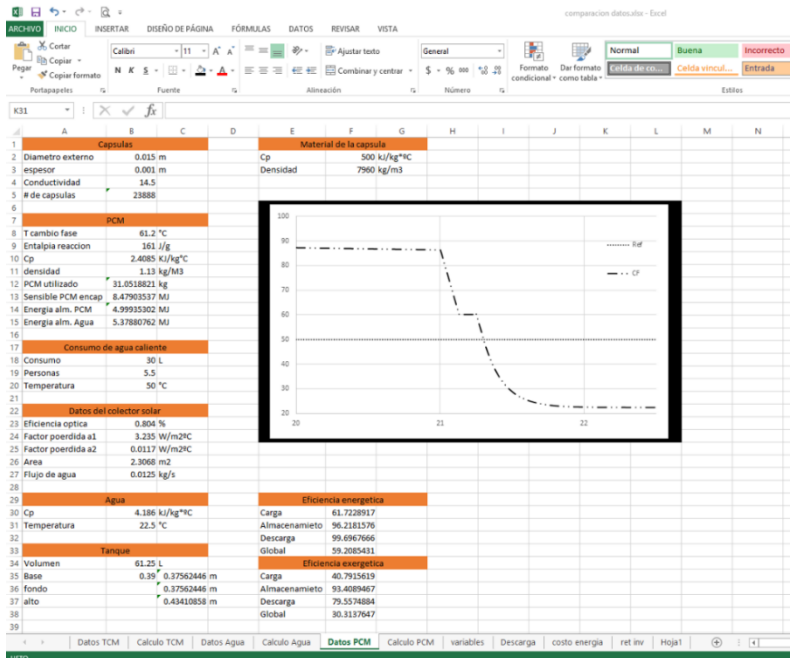


Figura 55.- Hoja de datos para simular el comportamiento del acumulador empacado con PCM encapsulado.

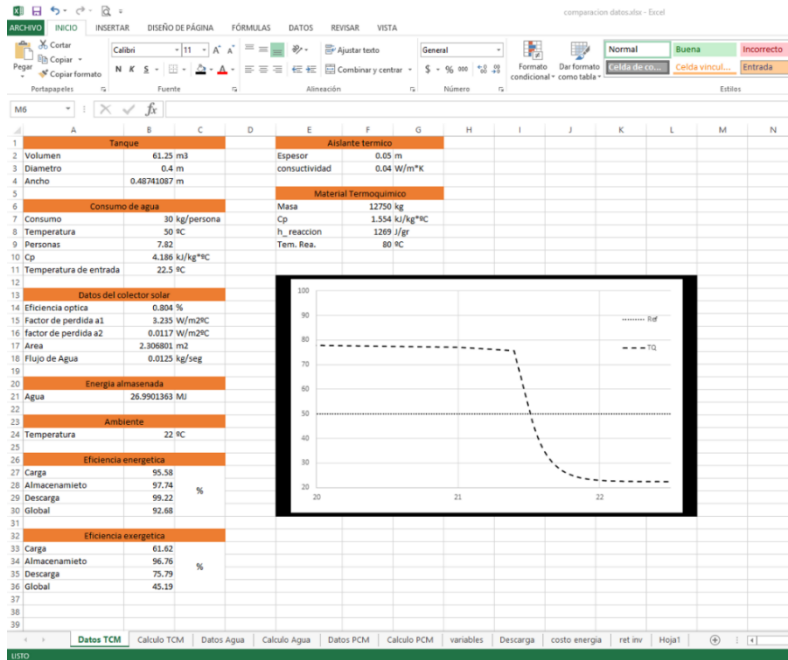


Figura 56.- Hoja de datos para simular el comportamiento del acumulador combinado.