



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA: INGENIERIA EN MECANICA NAVAL.

TEMA

DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN DIDÁCTICO ACTIVADO POR CALOR, EN LA CARRERA DE INGENIERIA EN MECÁNICA NAVAL DURANTE EL PERÍODO 2013 – 2014.

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de

INGENIERO MECÁNICO NAVAL

Autores:

RIVERA ZAMBRANO CRISTÓBAL COLÓN

HERNEN JAIRO ZAVALA VINCES

Director:

ING. LUIS ARAGUNDI CUADROS

MANTA, ECUADOR

2013

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Grado sobre el tema:

“Diseño, cálculo y construcción de un sistema de refrigeración por adsorción didáctico activado por calor, en la Carrera de ingeniería en Mecánica Naval durante el período 2013 – 2014”, de los estudiantes: **Rivera Zambrano Cristóbal Colón y Hernen Jairo Zavala Vincés**, alumnos de la Carrera de ingeniería en Mecánica Naval, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del jurado examinador que el H. Consejo Directivo designe.

Manta, Enero 22 del 2014

Atentamente

Ing. Luis Aragundi Cuadros.

DECLARATORIA EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Trabajo, nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí”

Rivera Zambrano Cristóbal Colón

Hernen Jairo Zavala Vinces

UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban (con mención honorífica y/o recomendación para su publicación) el Trabajo de Graduación, sobre el tema: **“Diseño, cálculo y construcción de un sistema de refrigeración por adsorción didáctico activado por calor, en la Carrera de Ingeniería en Mecánica Naval durante el período 2013 – 2014”**, de los estudiantes: **Rivera Zambrano Cristóbal Colón y Hernen Jairo Zavala Vinces**, alumnos de la Carrera de Ingeniería en Mecánica Naval.

Manta, Enero 22 del 2013

Para constancia firman

DEDICATORIA

A mi familia, compañeros, profesores y al personal administrativo de la Facultad, cada uno de ellos ha contribuido de una u otra manera a la conclusión de este trabajo y con la carrera de Ingeniería Mecánica Naval.

Cristóbal Rivera

DEDICATORIA

Dedicados a las personas que estuvieron conmigo en los momentos más duros, a los que se quedaron y me ayudaron a seguir adelante para llegar a este sueño.

Jairo Zavala Vinces

INDICE DE CONTENIDOS

Aprobación del Tutor	I
Declaración expresa	II
Autoría del Trabajo de graduación	III
Aprobación del Tribunal	IV
Dedicatorias	V
Índice de contenidos	VII
Índice de ilustraciones	XI
Resumen	XIV
Abstract	XV
Introducción	XVI
Justificación	XVII
Objetivos	XVIII
Alcance del trabajo	XX
CAPITULO I.- REFRIGERACIÓN	
1.- Refrigeración por adsorción.	1
1.1.- Fundamentos de la refrigeración por adsorción.	1
1.2.- Fenómenos de sorción	2
1.3.- Ciclo de refrigeración por sorción	2
1.4.- Definición de adsorción.	5
1.4.1.- Características generales de la adsorción	6

1.5.- Isótera y ciclo de adsorción.	6
1.5.1.- Calentamiento isostérico A-B.	10
1.5.2.- Desorción B-C.	10
1.5.3.- Enfriamiento isostérico C-D.	11
1.5.4.- Adsorción y producción de frío D-A.	11
1.6.- Pares de adsorción	14
1.7.- Coeficiente de desempeño COP.	18
1.8.- Calentamiento sensible A-B.	19
1.9.- Calentamiento sensible B-C.	20
1.10.- Enfriamiento producido.	21
1.11.- Descripción de los componentes del sistema.	21
1.11.1.- Adsorbedor/reactor	23
1.11.2.- Condensador.	23
1.11.3.- Evaporador.	26
1.11.3.1.- Disminución de la temperatura del agua hasta 10°C (QEV).	26
1.11.4.- Cámara fría y aislamientos.	28
1.11.4.1.- Carga por transmisión de calor.	28
1.11.4.2.- Carga debida al producto.	29
CAPÍTULO II.- COMPONENTES DEL SISTEMA	
2.- Diseño y cálculo de los componentes del sistema.	31

2.1.- Cálculo del COP	32
2.1.1.- Calentamiento sensible 3-4 (Q_{3-4})	32
2.1.2.- Proceso de generación 4-1 (Desorción Q_{4-1})	33
2.1.3.- Enfriamiento producido.	36
2.2.- Dimensionamiento de los componentes del enfriador.	37
2.2.1.- Adsorbedor/Reactor	37
2.2.2.- Condensador.	41
2.2.3.- Evaporador	43
CAPÍTULO III.- CONSTRUCCIÓN	
3.- Construcción de los componentes del sistema	47
3.1.- Generalidades sobre la construcción.	47
3.2.- Selección de materiales.	47
3.2.1.- Listado de materiales y descripción.	48
3.3.- Soldadura.	48
3.4.- Adsorbedor	48
3.5.- Condensador y Acumulador	51
3.6.- Evaporador.	53
3.7.- Armazón principal.	54
3.8.- Válvulas de paso de cierre manual.	55
3.9.- Pruebas de presión.	56

3.10.- Vacío del sistema.	57
3.11.- Instalación de resistencia.	58
3.12.- Funcionamiento del sistema	60
3.12.1.- Procedimiento de operación.	60
3.12.2.- Mantenimiento.	63
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
GLOSARIO DE TÉRMINOS	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	68

INDICE DE ILUSTRACIONES

Tabla 1.- Presión de saturación del agua en función de la temperatur	1
Tabla 2.- Las ventajas de la adsorción sobre los sistemas de refrigeración por absorción.	2
Tabla 3.- Características de los pares de adsorción comúnmente usados	15
Tabla 4.- Evaluación de los pares de adsorción comúnmente usados	16
Tabla 5.- Propiedades del Sílica gel	17
Tabla 6.- Datos de la Isóster. (Ciclo ideal	32
Tabla 7.- Listado de materiales usados en la construcción	49
Figura 1.- Ciclo termodinámico de sorción	3
Figura 2.- Diagrama de sorción.	5
Figura 3.- Diagrama P-T-W	7
Figura 4.- Esquema del refrigerador solar con adsorción intermitente: (a) fase de adsorción (refrigeración); (b) fase de desorción.	8
Figura 5.- Ciclo de adsorción / desorción.	9
Figura 6.- Calentamiento isostérico A-B.	10
Figura 7.- Desorción B-C.	11
Figura 8.- Enfriamiento isostérico C-D.	12
Figura 9.- Adsorción y producción de frio D-A.	12

Figura 10.- Calor cedido o ganado en el adsorbedor/ colector solar.	13
Figura 11.- Descripción del sistema	22
Figura 12.- Esquema del refrigerador intermitente por adsorción.	22
Figura 13.- Esquema del adsorbedor/reactor multitubular	23
Figura 14.- Esquema del condensador.	26
Figura 15.- Diagrama de Presión-Temperatura-Concentración para el par de adsorción Sílica-Gel Agua con ciclo ideal sobrepuesto.	31
Figura 16.- Variación de la temperatura del evaporador con respecto al tiempo.	62
Fotografía 1 y 2: Construcción de distribuidores	47
Fotografías 3 y 4: Tubos del adsorbedor con el distribuidor.	50
Fotografías 5 y 6: Colector y tapones posteriores del adsorbedor	50
Fotografía 7.- Adsorbedor/colector armado.	51
Fotografía 8.-Construcción del condensador multitubular	51
Fotografía 9.- Condensador multitubular con su respectiva brida.	52
Fotografía 10.- Acumulador de líquido condensado y válvula de control.	53
Fotografía 11.- Construcción del evaporador multitubular.	53
Fotografía 12.- Evaporador terminado.	54
Fotografía 13 y 14. Construcción de armazón principal	55
Fotografía 15 y 16: Armazón principal y poliuretano expandido en el evaporador.	55

Fotografía 17.- Válvulas Hansen con sus respectivas bridas.	56
Fotografía 18.- Pruebas de fugas presión del sistema	57
Fotografía 19 y 20.- Conexión de las bombas de vacío y manómetro	58
Fotografía 21 y 22.- Instalación de la resistencia eléctrica en la parte superior del adsorbedor.	59
Fotografía 23.-Válvulas de cierre manual	61
Fotografía 24 y 25.- Termómetro y manómetro.	61

UNIVERSIDAD ELOY ALFARO DE MANABI

DISEÑO, CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ADSORCIÓN DIDÁCTICO ACTIVADO POR CALOR, EN LA FACULTAD DE MECÁNICA NAVAL.

Autores: Cristóbal Colon Rivera Zambrano.

Hernén Jairo Zavala Vines.

Tutor: Ing. Luis Guillermo Aragundi Cuadros.

Fecha: Enero de 2014

RESUMEN

Con el presente trabajo se demostró que existen otras alternativas para desarrollar sistemas de refrigeración alternativos que cuiden el medio ambiente, que no funcionen con partes móviles y aprovechen fuentes de calor de desechos o bien la energía solar para el funcionamiento de estos sistemas. El principio de funcionamiento del equipo de refrigeración por adsorción se basa en la utilización de fluido de trabajo (refrigerante) el agua destilada desmineralizada y como par adsorbente se utilizó dióxido de silicio (sílica gel) ,y el enfriamiento se produce cuando se realiza vacío a un recipiente hermético que contiene agua al cual se le extrae el aire y se lo presuriza por debajo de 1.7057 kpa, con esta presión se consigue que el agua se comience a evaporar en un rango comprendido entre 12 °C a 15°C de temperatura, la cual fue el objetivo específico de este proyecto y con lo cual se enfrió una carga térmica de 2 kg de agua. El equipo de refrigeración está compuesto de: Un Adsorbedor (colector), este componente contiene en su interior los gránulos de dióxido de silicio (sílica gel) el cual es el encargado de adsorber el vapor de agua producido por el evaporador, para fines demostrativos y didácticos de este equipo se instaló una resistencia eléctrica de 1000W que generara calor, la cual estará montada dentro de un contenedor de aluminio sobre el adsorbedor, el Condensador es el encargado de transformar el vapor de agua en líquido, depósito de agua, y el Evaporador donde el agua se satura y se vuelve vapor comenzando de esta manera a absorber el calor de la carga térmica (agua). El costo estimado para la realización de este proyecto es de aproximadamente 1800 dólares americanos. Usándose tuberías inoxidables y válvulas de fácil adquisición en el mercado local.

Palabras clave: Adsorción, Refrigerante, Sílica gel, Adsorbedor, Evaporador.

ABSTRACT

In the present work it was shown that there are other alternatives to develop alternative refrigeration systems that care for the environment, not work with moving parts and utilize waste heat or solar power for the operation of these systems. The operating principle of adsorption refrigeration equipment is based on the use of the working fluid (refrigerant) distilled deionized water adsorbent pair and as silicon dioxide (silica gel) was used, and the cooling occurs when performing vacuum an airtight container for containing water which is drawn air and pressurizes below 1.7057 kPa. , this pressure ensures that the water starts to evaporate within a range from 12 ° C to 15 ° C temperature, which was the specific objective of this project and thus a heat load of water with a mass of 2kg, refrigeration equipment consists of cooled : An adsorber (collector) , this component contains within dioxide pellets silicon (silica gel) which is responsible for adsorbing water vapor produced by the evaporator, for demonstration and instructional purposes of this equipment an electrical resistance of 1000W to generate heat , which will be mounted within a container was installed aluminum on the adsorber, the capacitor is responsible for transforming the water vapor into liquid water tank , and the evaporator where the water becomes saturated steam and thus starting to absorb heat from the heat load (water) . Estimated cost for this project is approximately U.S. \$ 1800. Stainless steel pipes and valves in use readily available in the local market.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay una creciente búsqueda de nuevas tecnologías que sean amigables con el medio ambiente, es decir que su impacto negativo sea mínimo. Dentro de las necesidades de la humanidad existe la refrigeración, y los sistemas más usados actualmente son los de compresión que tienen un impacto negativo en nuestro planeta por el uso de refrigerantes que afectan la capa de ozono. Una alternativa viable son los sistemas de adsorción, los cuales usan refrigerantes que no contaminan, uno de ellos es el agua que puede ser usada como refrigerante ya que variando la presión a la que se encuentre, se puede variar también la temperatura de saturación.

Es decir que en el presente proyecto se usará la propiedad que tiene el agua para hervir a bajas temperaturas modificando la presión a la que se encuentra normalmente para que pueda intercambiar calor con otro cuerpo que se quiera refrigerar. Los vapores generados en este proceso son captados por un adsorbente sólido altamente poroso más conocido como sílica gel, que tiene la propiedad de adsorber vapores de agua. Luego de los ciclos de evaporación y adsorción le siguen otros de desorción y condensación, que no es más que el “secado” de la sílica gel mediante calor y este vapor resultante es condensado para poder volver a repetir el ciclo. La investigación y experimentación de estos sistemas no se ha desarrollado mucho en nuestro país, es nuestra intención como estudiantes de ingeniería empezar a desarrollarlos, construirlos y darlos a conocer para crear interés en los mismos y contribuir en algo a la conservación de nuestro medio ambiente.

Para el presente trabajo se construirá un sistema didáctico que describa el funcionamiento del refrigerador adsorptivo usando el par dióxido de silicio-agua, y como fuente de calor se usará una resistencia eléctrica. Por lo expuesto se ha ideado diseñar, calcular y construir en el taller de la Escuela de Mecánica Naval un sistema de refrigeración por adsorción didáctico que use agua destilada como refrigerante, y con ello dar a conocer a los estudiantes los beneficios que tiene este tipo de sistemas que solamente necesitan una fuente de calor para funcionar y producir enfriamiento.

JUSTIFICACIÓN

La refrigeración es un aspecto especial de la transferencia de calor y comprende la producción y utilización de temperaturas por debajo de la atmosférica mediante varios procesos prácticos. Las sustancias se enfrían cuando se transfiere su calor, por una caída de temperatura, hacia medios sólidos, líquidos o gaseosos que están natural o artificialmente más fríos, originándose su temperatura más baja a partir de la radiación, efectos físicos de calor sensible o latente, o por efectos químicos endotérmicos, termoeléctricos o incluso magnéticos. Se incluyen efectos como corrientes frías, la fusión del hielo o la sublimación del dióxido de carbono sólido.

Las máquinas de refrigeración por absorción son plantas de compresión de vapor en las que se ha sustituido el compresor mecánico por un aparato activado térmicamente. En la actualidad, este tipo de ciclos de producción de frío está viendo incrementada de forma notable su cuota de mercado por las posibilidades que ofrece para trabajar alimentado por fuentes de energías renovables, como la cogeneración y la energía solar.

El principio de funcionamiento de la adsorción se basa en la afinidad que presenta ciertas sustancias entre sí. Una de las sustancias, la más volátil, actúa como refrigerante, y la otra sustancia actúa como absorbente. La construcción de un sistema de adsorción didáctico demostrará a los estudiantes de refrigeración y transferencia de calor que utilización de equipos de adsorción o adsorción activados por calor presenta grandes ventajas, entre las que pueden destacarse las siguientes:

Economía de funcionamiento

Al utilizar cualquier fuente térmica como la solar, en lugar de la energía eléctrica, se reducen los costos. Es posible emplear el calor residual procedente de procesos industriales. La utilización de equipos de adsorción por gas natural permite la

reducción de los pagos de la energía eléctrica, provocando reducción de costos y una gran simplicidad en el diseño de la instalación.

Nivel sonoro muy bajo.

Los sistemas de absorción son más silenciosos que los sistemas de compresión, puesto que apenas incorporan partes móviles (no llevan ni motor ni compresor)

Fiabilidad en el funcionamiento

Estos sistemas fallan muy poco.

Protección del medio ambiente

Las máquinas de adsorción no producen CFC. Además, si están alimentadas por cualquier fuente de calor, se consigue una reducción muy importante en el consumo de energía eléctrica. Al emplear agua como refrigerante, no depende de refrigerantes como los clorofluorocarbonos tradicionales, con un potencial de reducción de la capa de ozono nulo.

OBJETIVOS

Objetivo general

- a. Diseñar, calcular y construir un sistema de refrigeración por adsorción didáctico activado por calor.

Objetivos específicos

- a. Construir un refrigerador por adsorción didáctico que use agua destilada como refrigerante.
- b. Que dicho sistema pueda enfriar a un rango de temperatura de 15 grados Celsius.
- c. Que el sistema sea construido de manera didáctica y de fácil comprensión.
- d. Comprobar los parámetros como son la temperatura y presión
- e. Elaborar una guía de operación y mantenimiento del sistema.

ALCANCE DE TRABAJO.

Se construirá una refrigeradora didáctica libre de elementos mecánicos móviles (únicamente la válvulas de cierre manual), para su funcionamiento se basa únicamente en los procesos térmicos de adsorción/desorción del elemento refrigerante (agua) un medio sólido poroso (sílica) con una temperatura de operación de alrededor de 80 °C, produciéndose ciclos de trabajo de 6 horas. El sistema de refrigeración podrá funcionar con un mínimo de mantenimiento, teniendo como fuente de calor la energía de una resistencia eléctrica con fines didácticos.

CAPITULO I

1.- Refrigeración por adsorción.

1.1.- Fundamentos de la refrigeración por adsorción.

La parte principal en la que se basa este tipo de refrigeración es en la evaporación del agua, la cual en condiciones atmosféricas (1003.5 mbar) se evapora a 100 grados Celsius, pero si se baja o sube esta presión; se obtiene que la temperatura de evaporación también baja o alta en función de la presión.

Líquido - Vapor					
	T (°C)	P (mbar)		T (°C)	P (mbar)
1	100	1003.5	12	45	95.9
2	95	845.5	13	40	73.8
3	90	701.3	14	35	56.2
4	85	578.3	15	30	42.4
5	80	473.9	16	25	31.1
6	75	385.7	17	20	23.3
7	70	311.8	18	15	17.0
8	65	250.3	19	10	12.2
9	60	199.4	20	5	8.72
10	55	157.5	21	0	6.11
11	50	123.5			

Fuente: M. Ramos; M. Horn; R. Espinoza. 2012. Actividades de Investigación y Desarrollo en el Área de Enfriamiento Solar (CER-UNI)

Tabla 1.- Presión de saturación del agua en función de la temperatura

Para evaporar el agua a 10 grados Celsius necesitamos que el interior del sistema cerrado esté a una presión de por lo menos 12 milibares, con esto se logra que el evaporador se enfríe con respecto a la temperatura ambiente y se aprovecha esta propiedad para refrigerar cualquier producto. La presión de evaporación o de saturación del agua en función de la temperatura esta descrita en la tabla 1.

1.2.- Fenómenos de sorción

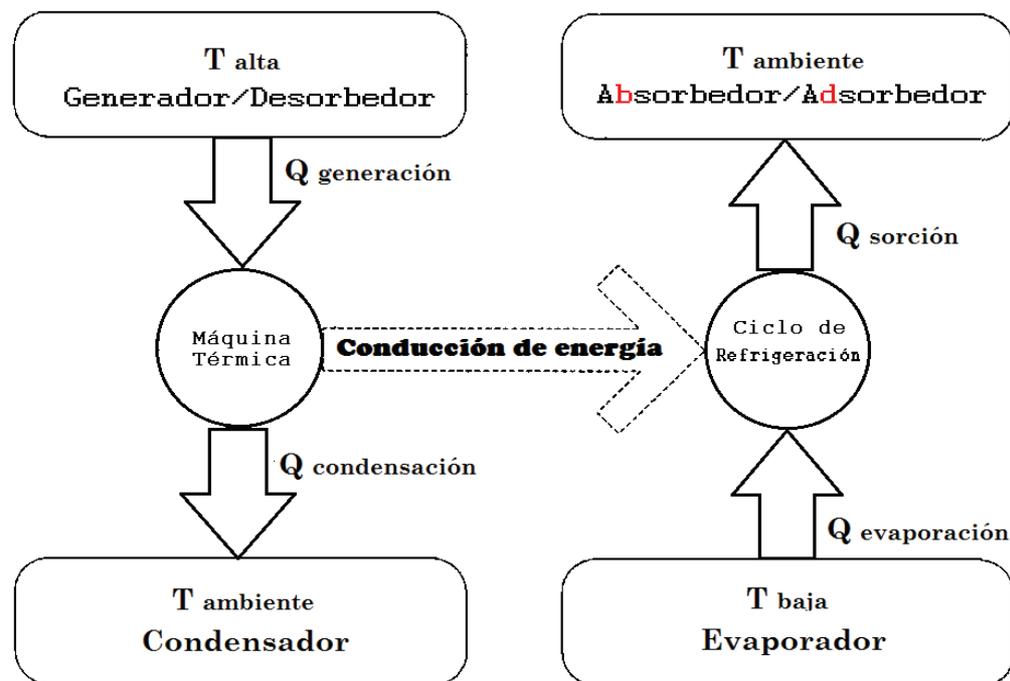
Los fenómenos de sorción son la absorción y la adsorción, donde la absorción es la incorporación de una sustancia en un estado en otro de diferente estado por disolución de las moléculas dentro de una fase. La adsorción es un fenómeno de superficie basado en la adhesión física de las moléculas sobre la superficie de otra fase. La sorción describe la transferencia periódica de energía en dos subprocesos (adsorción y desorción), en los cuales un medio sólido adsorbente bajo transferencia de energía adsorbe y desorbe una materia en estado gaseoso (ver anexo 1). El sistema de refrigeración se identifica por el fenómeno de adsorción, donde se produce el efecto de enfriamiento de dicho sistema, cuando el lecho adsorbente bombea todo el fluido gaseoso que sale del evaporador, haciendo la equivalencia del compresor en un sistema de compresión de vapor; de ahí que sea comúnmente llamado sistema de refrigeración por adsorción.¹

1.3.- Ciclo de refrigeración por sorción

El ciclo de refrigeración de adsorción es un ciclo termodinámico con dos fuentes y dos sumideros, que opera usando tres niveles de temperatura. Dos de ellos se utilizan para conducir el compresor térmico "Reactor" que sustituye el compresor mecánico en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor (Figura 1).

¹ J. G. Trujeque. 2010. Diseño de Refrigerador Solar por Adsorción para Clima Cálido Húmedo. Tesis, Maestría en Tec. Avda. Querétaro, Instituto Politécnico Nacional México. 37-41 p.

El ciclo de refrigeración de sorción opera entre dos presiones y dos niveles de concentración de refrigerante / sorbente como se muestra en la figura 2. Los sistemas de adsorción se clasifican en la adsorción y el sistema de absorción, en la tabla 2 hace una comparación entre ellos. Debido a las características favorables de la refrigeración por adsorción sobre del sistema de refrigeración por absorción, hacen que el sistema anterior sea más preferible.²



Fuente: A. Masoud. 2012 Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 7 p.

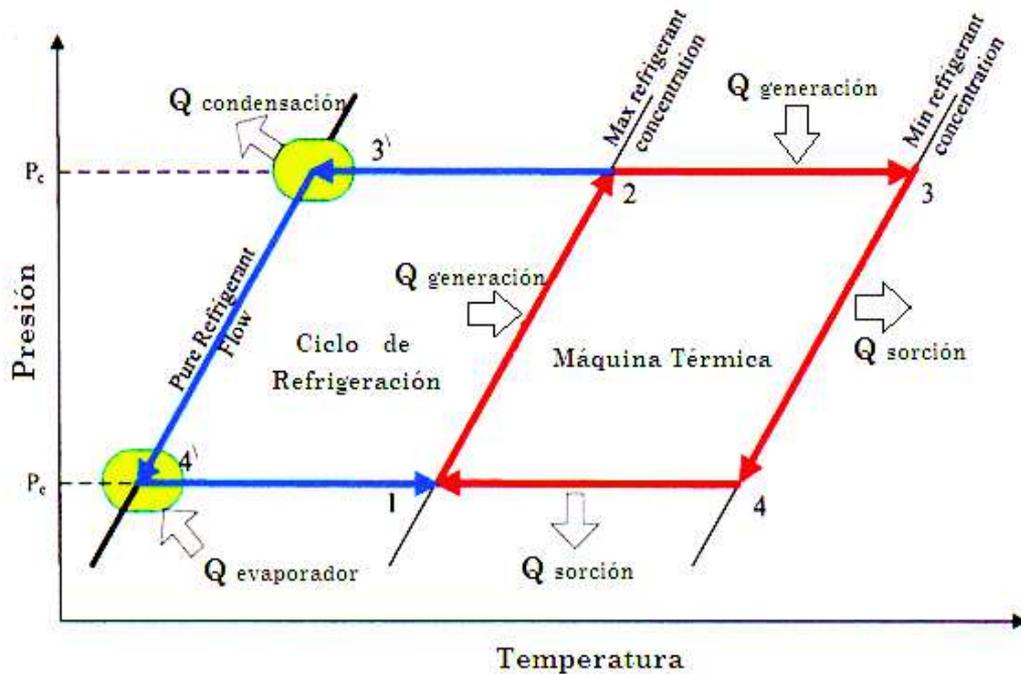
Figura 1.- Ciclo termodinámico de sorción

² A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144-156 p.

Tabla 2.- Las ventajas de la adsorción sobre los sistemas de refrigeración por absorción

Atributos	Adsorción	Absorción
Fuente de calor	<ul style="list-style-type: none"> -Está alimentado por fuentes de amplio rango de temperaturas. -Temperatura tan baja como 50 grados Celsius se pueden utilizar como fuente de calor, mientras que las fuentes de calor con la temperatura cerca de 500 grados Celsius se pueden utilizar directamente sin producir ningún tipo de problema de la corrosión. -No hay ninguna limitación para el depósito de baja temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> -Muy sensible a la temperatura de la fuente y la variación debe ser controlada estrechamente entre 82 y 100 grados Celsius. -La fuente de calor debe ser mayor que 70 ° C para evitar el problema de cristalización, incluso en dos ciclos de fase. -Corrosión severa empezaría a ocurrir por temperaturas superiores a 200 C. Depósito de baja temperatura debe ser 18 a 29 grados Celsius.
Condiciones de operación	<ul style="list-style-type: none"> -Se utilizan sorbentes sólidos y por lo tanto es adecuado para condiciones de aplicación con las vibraciones graves, tales como en barcos de pesca y las locomotoras. -Es un sistema casi sin ruido, donde casi no hay partes móviles. -Posibilidad Operación de más de 8.000 horas anuales. 	<ul style="list-style-type: none"> -Se utiliza por sorbente un líquido y por lo tanto es adecuado para unidades fijas solamente, donde el flujo de absorbente es desfavorable desde el generador /absorbedor hacia el evaporador/condensador. -Parada diaria debido a la dilución de la solución absorbente.
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - No hay requisitos especiales para el mantenimiento, utiliza pocas partes móviles (bomba de vacío). -Una limpieza anual es necesaria en los tubos del condensador. Se requiere un sistema de control simple. 	<ul style="list-style-type: none"> Se necesita un seguimiento regular y el mantenimiento de: -Análisis de Bombas y líquidos -El sistema de control -Fugas de aire -Reemplazo de intercambiador de calor, debido a la corrosión por la presencia de sal.
Tiempo de operación	Tiene relativamente larga vida útil y no hay requisitos especiales de eliminación.	El tiempo de vida máximo es 7 - 9 años, debido al problema de la corrosión de la sal.

Fuente: A. Masoud. 2012 Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 8 p.



Fuente: A. Masoud. 2012 Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 7 p.

Figura 2. - Diagrama de sorción.

1.4.- Definición de adsorción.

Es la propiedad que poseen algunos sólidos de alta área superficial y porosidad de adsorber grandes cantidades de un vapor determinado y de restituir dicho vapor cuando se calientan. Hay muchas sustancias con esa capacidad, pero las más utilizadas en la práctica son el carbón vegetal activado, las zeolitas, sílica gel y otras. El refrigerante en forma de vapor es adsorbido sobre la superficie (principalmente la superficie interna) de un gránulo, perla o cristal de material adsorbente. El material adsorbido es retenido físicamente sin demasiada fuerza y puede ser liberado (desorbido) de modo relativamente fácil, ya sea por calor o al vacío.

1.4.1.- Características generales de la adsorción

La adsorción es un proceso exotérmico (libera energía), mientras que la desorción es un proceso endotérmico. Es un fenómeno reversible en la mayor parte de los casos. No trae consigo cambios de volumen en el sólido adsorbente. El equilibrio de la adsorción entre la fase adsorbida y la fase gaseosa de un adsorbato (asumiendo que no hay otras especies presentes) requiere de dos variables de estado, la presión y la temperatura usualmente, para definir el estado del sistema. Por regla general, a igual presión, la cantidad de gas adsorbido sobre un lecho de sólido adsorbente decrece al aumentar la temperatura, mientras que a igual temperatura, incrementos de presión conducen a incrementos en la masa adsorbida.

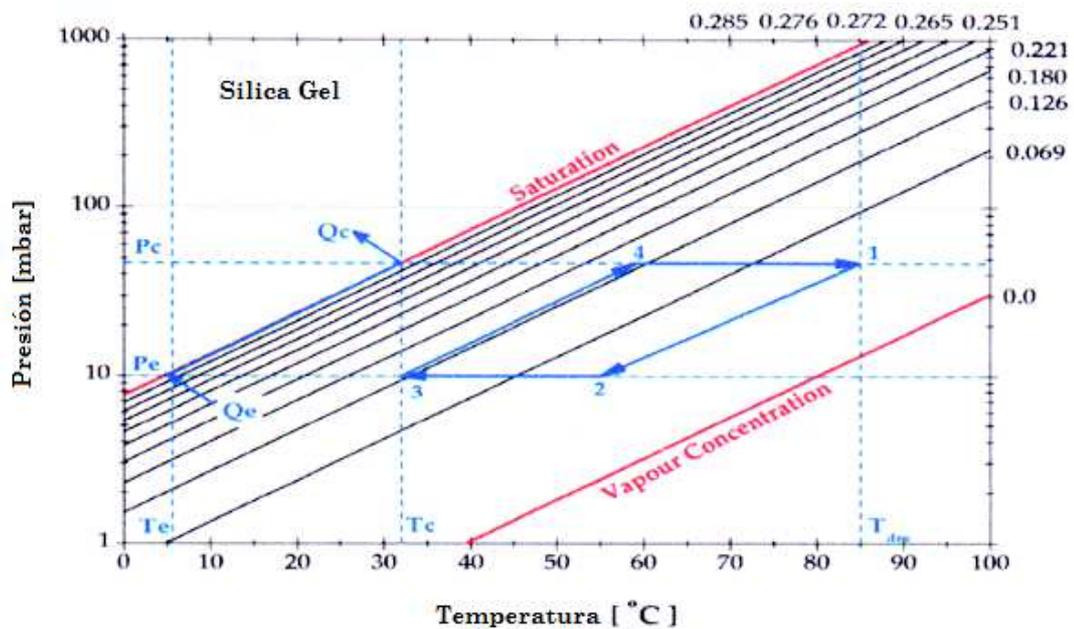
La adsorción es muy rápida. Sin embargo, la velocidad de adsorción depende del grado de saturación del adsorbente; es más rápida cuando solamente una pequeña fracción del adsorbente está saturada. La extensión de la adsorción depende de la temperatura. Mientras mayor sea la temperatura sobre la temperatura crítica del gas, menos será este adsorbido. Depende también de la superficie del adsorbente, de aquí que, permaneciendo los otros factores constantes, mientras más poroso sea el adsorbente, mayor será su poder de adsorción. La extensión de la adsorción por unidad de peso de adsorbente, depende de la presión parcial del gas adsorbido. Sin embargo, el sólido al fin y al cabo se satura y, naturalmente, una vez que se haya alcanzado esta condición, un aumento en la presión no tendrá ningún efecto en la cantidad adsorbida.

1.5.- Isósteras y ciclo de adsorción.

La relación termodinámica entre las presiones, temperaturas de adsorción y los niveles de concentración vapor de agua es representada por el diagrama de P-T-W (Presión-Temperatura-Concentración) donde la concentración se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa de adsorbente seco.

La Figura 3 presenta el diagrama de P-T-W para Gel de sílice, sobreponiendo el ciclo de enfriamiento de adsorción ideal. El ciclo de enfriamiento de adsorción ideal se compone de adsorción y condensación a 32 ° C, desorción a 85 ° C y evaporación a 5 ° C tal como se utiliza típicamente en sistemas de enfriamiento de agua. Los resultados muestran que los valores de la concentración de vapor de agua al final de desorción - adsorción, son 0,06-0,13 Kg agua/ Kg adsorbente para gel de sílice. ^[2]

Un sistema de adsorción de refrigeración basado en un ciclo intermitente que incluye un solo adsorbedor sin la recuperación de calor, presenta características como su simplicidad mecánica y fiabilidad dando como resultado buenos niveles de rendimiento. Este ciclo consiste en dos fases típicas. ³



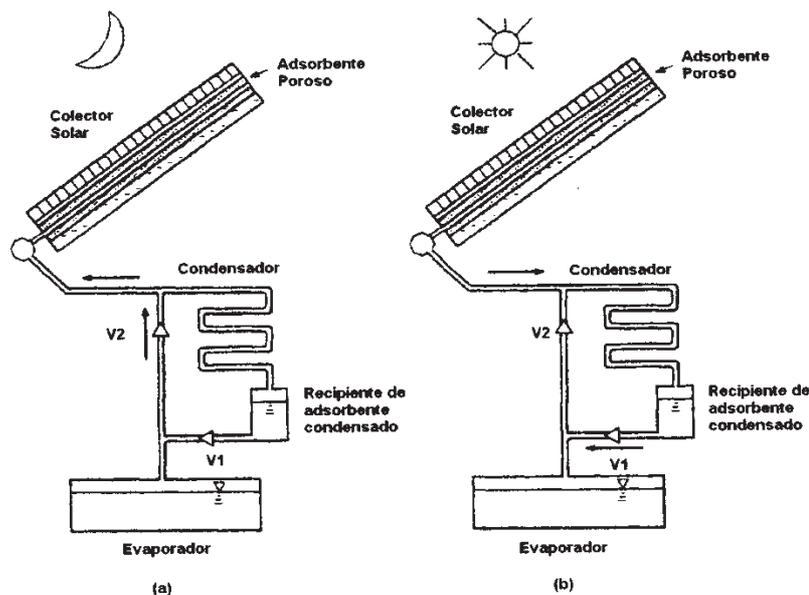
Fuente: A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 147 p.

Figura 3.- Diagrama P-T-W

³ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2. 66-96 p.

1. El primero se caracteriza por el proceso de adsorción, cuando tiene lugar la evaporación del fluido activo (adsorbato) y luego,
2. Ocurre la desorción por la acción de la energía solar o por otra fuente de energía (en nuestro caso el sistema usara una resistencia eléctrica) en el medio sólido (adsorbente), cuando el adsorbato es comprimido.

La figura 4 muestra una refrigeradora adsorbtiva solar típica compuesta de un evaporador, un condensador y un colector solar acoplado al adsorbedor lleno con adsorbente. Se usan las válvulas V1 y V2 para mover el fluido activo al evaporador o al condensador, según cada una de las fases del ciclo y un recipiente en donde se acumula el adsorbato condensado.⁴



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga. 89 p.

Figura 4: Esquema del refrigerador solar con adsorción intermitente: (a) fase de adsorción (refrigeración); (b) fase de desorción.

⁴ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2. 66-96 p.

Tanto el proceso de adsorción como el de desorción se representan en una curva característica llamada Isótera, mostrada en la figura 5, este es un ciclo *termodinámico ideal*, en donde:

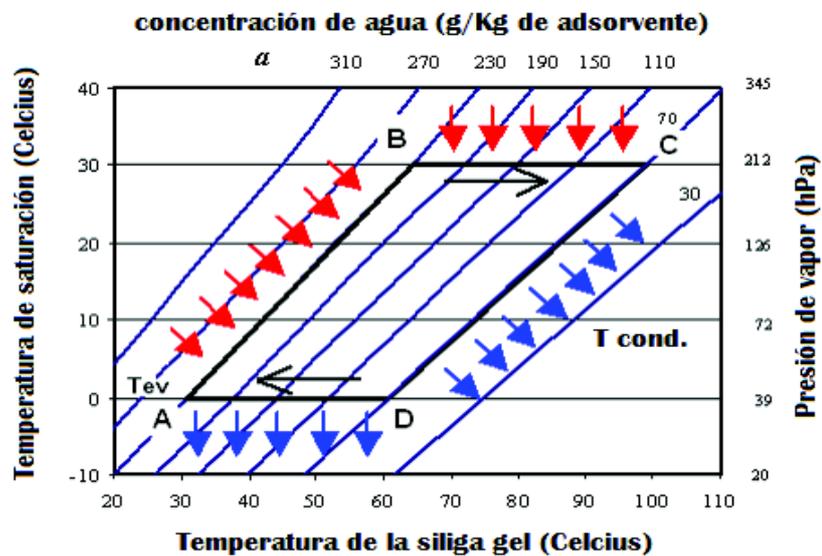
El proceso de adsorción está representado por la isobara D-A.

El proceso de desorción está representado por la isobara B-C.

La Isótera A-B representa el calentamiento sensible del adsorbente debido a la acción del calor.

La Isótera C-D representa el enfriamiento sensible del adsorbato (condensación).

Tanto el proceso de calentamiento A-B como el de enfriamiento sensible C-D se producen con una concentración constante, que es la cantidad de adsorbato (agua), contenido o adsorbido en el adsorbente (sílica gel), mientras que los procesos de adsorción D-A y desorción B-C se representan por las isobaras (presión constante).^[3]

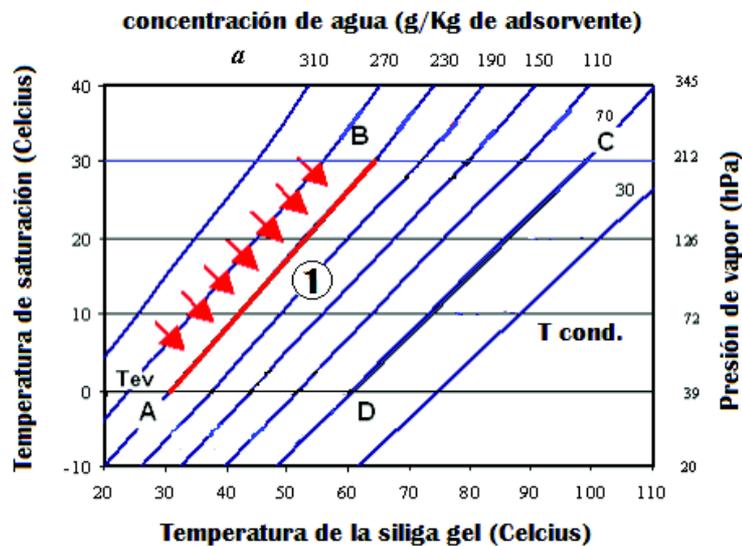


Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga. 88 p.

Figura 5: Ciclo de adsorción / desorción.

1.5.1.- Calentamiento isostérico A-B.

El ciclo empieza en el punto A, con las válvulas V1 y V2 cerradas, donde se muestra al adsorbente a concentración máxima, temperatura y presión baja (Figura 6). El adsorbente es primero calentado isostéricamente, de A hacia B, por acción de la radiación solar (en este caso, este efecto de calentamiento es producido por una resistencia eléctrica). La temperatura y presión aumentan hasta que llegue al punto de desorción (punto B).⁵



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga. 89 p.

Figura 6: Calentamiento isostérico A-B.

1.5.2.- Desorción B-C.

En el punto B empieza la desorción, la concentración disminuye, el adsorbato se dirige hacia el condensador hasta que la presión de este sea igual o mayor a la del reactor o colector solar (punto C). Cuando la presión de saturación que corresponde a

⁵ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2. 66-96 p.

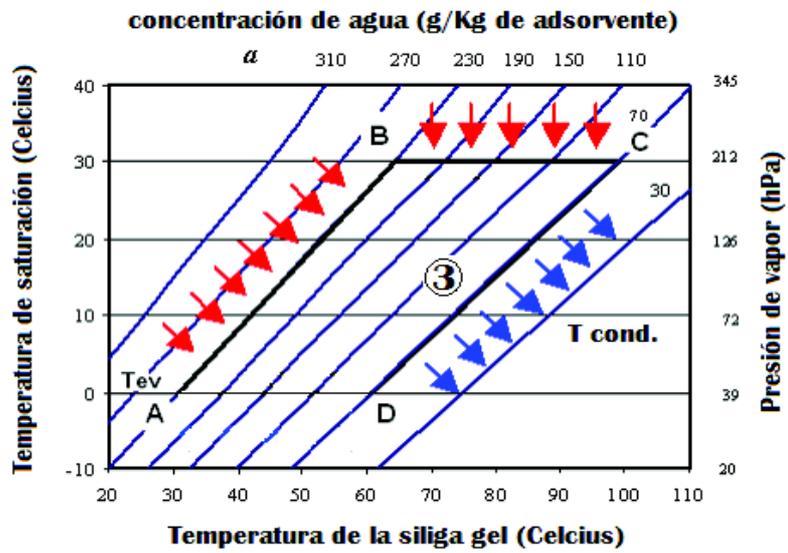
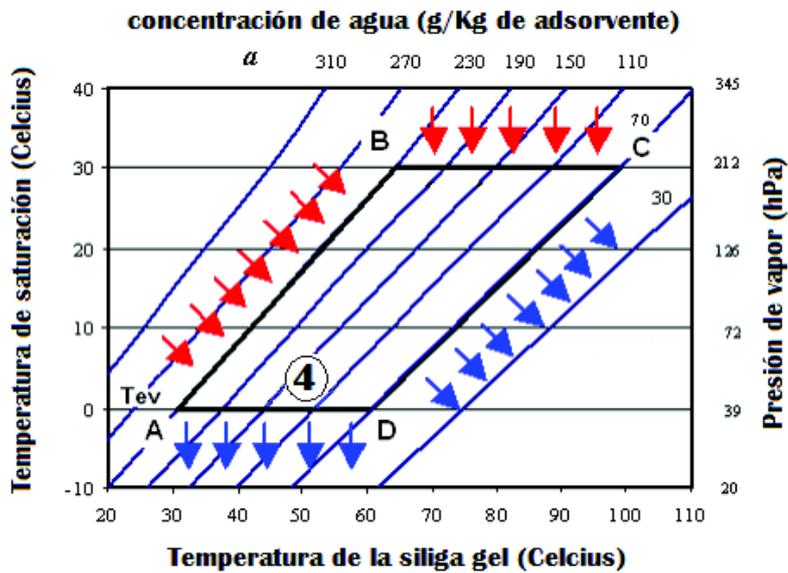


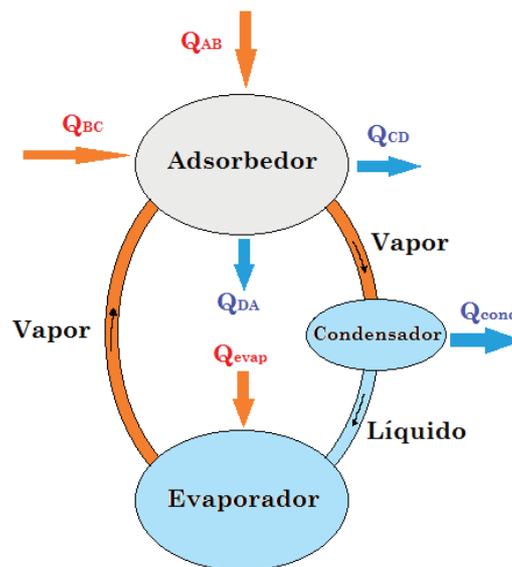
Figura 8: Enfriamiento isostérico C-D.



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga. 90 p.

Figura 9: Adsorción y producción de frío D-A.

En la figura 10 se muestra un diagrama esquemático de la refrigeradora solar, donde se representa fases por las que atraviesa el agua (líquido y gaseoso) durante el ciclo de adsorción, además del calor cedido al ambiente (Q_{DA} , Q_{CD}) o que ingresa al adsorbedor/colector solar, (Q_{AB} , Q_{BC}), así como del calor cedido en el condensador Q_{cond} y absorbido en el evaporador Q_{evap} .



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, Diseño, 2008. Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga, 98 p.

Figura 10: Calor cedido o ganado en el adsorbedor/ colector solar.

Los datos de la isótera tanto para la adsorción como la desorción y que son de gran importancia para el dimensionamiento se detallan a continuación:

T_s : Temperatura de Saturación (°C).

T_{agua} : Temperatura del Agua (°C).

X_{max} : Concentración máxima (Kg agua / Kg sílica gel).

X_{min} : Concentración mínima (Kg agua / Kg sílica gel).

P: Presión (*hPa*: =hectopascales).

Con los datos de la Isótera podemos aplicar la ecuación 1.1 para determinar la cantidad de agua que se desorberá del adsorbedor/reactor por la acción del calor.

$$m_{agua\ des} = m_{agua} (X_{max} - X_{min}) \quad 6$$

Al usar la concentración máxima, podemos determinar la cantidad de agua total necesaria para el sistema mediante la siguiente ecuación:

$$m_{agua} = (m_{silica\ gel})(X_{max}) \quad 7$$

1.6.- Pares de adsorción

No es suficiente la evaluación del adsorbente y adsorbato (refrigerante) de forma independiente, porque las características de adsorción varían en función de pares de adsorción. Tabla 3 presenta las características de los pares de adsorción más utilizadas, basadas en la práctica cíclica y en las condiciones de trabajo.

El mejor par de adsorción es el que satisface los requisitos importantes, que difiere dependiendo de la aplicación. En la tabla 4, se ha hecho la comparación con respecto

⁶ Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

⁷ Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

al uso de los pares de adsorción aplicados generalmente basados en 16 criterios.⁸ Para cada criterio de la mejor par de adsorción está marcado por 5 y lo peor está marcado por 1. La misma valoración se utiliza para cada criterio, por su misma importancia.

Tabla 3.- Características de los pares de adsorción comúnmente usados

Refrigerante		AC, ACF / Amoniaco	AC, ACF/ Metanol	AC, ACF/ Etanol	AC, ACF/ 134a	Sílica gel/ Agua	Zeolita/ Agua
Características							
Presión de operación		+	Vacío	Vacío	+	Vacío	Vacío
Temperatura de generación °C		80 – 200	80 - 100	80-120	80-100	50-100	250-300
Capacidad de adsorción Kg_{ref}/Kg_{ads}		0.29	0.45	0.19	0.36	0.30	0.17
Punto de ebullición del refrigerante °C		-34	65	79	-48	100	100
Calor latente de vaporización del refrigerante Kj/Kg		1368	1102	842	217	2258	2258
Calor de Adsorción Kj/Kg		1800-2000	1800-2000	1200-1400	1830-2300	2500-2800	3200-4200
Densidad de enfriamiento	Poder de enfriamiento	2000 W/Kg	140-500 W/Kg	---	---	190 W/Kg	90-150 W/Kg
	Efecto de enfriamiento	----	----	188-159 Kj/Kg	57 Kj/kg	---	---

Fuente: A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 32-34 p.

Por ejemplo, las técnicas fabricación compleja influyen en el coste de capital y por lo tanto, la comercialización del sistema. Por otra parte, la temperatura y la cantidad de energía requerida para la adsorción influyen en el ahorro de energía y la gama de

⁸ A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144-156 p.

industrias que pueden beneficiarse de este tipo de sistemas, por lo tanto deben ser igualmente ponderados.⁹

Tabla 4.- Evaluación de los pares de adsorción comúnmente usados

Criterio	AC, ACF / Amoniaco	AC, ACF/ Metanol	AC, ACF/ Etanol	AC, ACF/ 134a	Silica gel/ Agua	Zeolita/ Agua
Velocidad de adsorción	2.7	5	3.3	3.7	2.9	1
Calor de adsorción	4	4	5	3.8	2.8	1
Temperatura de desorción	2.4	4	5	4.4	5	1
Maxima temperatura recuperada	5	1	2.4	4.7	3.2	3.2
Calor latente de vaporización	3.3	2.7	2.2	1	5	5
Complejidad de fabricación	5	2.9	1.6	4.8	1	1
Estabilidad térmica	5	1	5	5	5	5
Potencial de agotamiento de Ozono	5	5	5	5	5	5
Potencial de calentamiento global	5	5	5	1	5	5
No toxico	1	4	4	5	5	5
No inflamable	1	1	1	5	5	5
No explosivo	2.2	1	1	1.9	5	5
Compatibilidad	1	4	4	5	4	4
Solidificación	4.1	5	2.6	4.8	1	1
Promedio entre COP y la energía específica de enfriamiento	1	3.9	4.4	1.2	5	4
Costo	3	3	3	3	5	4
Suma Total	50.7	52.5	53.5	59.3	62.7	56.2

Fuente: A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Universidad de Birmingham, Inglaterra. 32-34 p.

⁹ A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144-156 p.

Tabla 5. Propiedades del Sílica gel

Sílice (Sílica gel) otros nombres:	Gel de sílice, Sílice precipitada, Dióxido de silicio, Anhídrido silícico	Formula: $O_2 Si$
Propiedades físicas/ Químicas	Estado físico, aspecto, olor: polvo blanco amorfo en forma de gránulos Punto de fusión (°C): > 1600. Punto de ebullición (°C): 2230 Solubilidad en agua: insoluble	
Peligros/ estabilidad	No está descrita como sustancia peligrosa, pero la sílice cristalina (cuarzo o cristobalita) helada es carcinogénica en humanos y la sílice amorfa debe ser tratada como si tuviera los mismos riesgos que en la forma cristalina. Materiales que deben evitarse (estabilidad química): Agentes oxidantes fuertes. Insoluble en todos los ácidos excepto HF. Soluble en disoluciones básicas en caliente	
Riesgos para La salud Manipulación	Puede ser nocivo si se inhala (irritación en el tracto respiratorio), si se ingiere o si es absorbido por la piel (irritación). Puede provocar una irritación en los ojos. Evite la formación de polvo. General: No comer, ni beber, ni fumar. Lavarse las manos.	
Protección	Usar gafas. Usar Guantes	
Almacenar Eliminar	Conservación: almacenar herméticamente cerrado en un lugar fresco, seco y bien ventilado. Derrames: recogerlo con material absorbente adecuado. Eliminación: No se requieren precauciones especiales medioambientales	
Incendio	Extinción: Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono. Productos de descomposición peligrosos: Óxidos de silicio	
Primeros Auxilios	General: En todos los casos consultar a un médico Ojos: Lávese a fondo con agua abundante durante 15 minutos por lo menos. Piel: Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante. Ingestión: Enjuagar la boca con agua. No provocar el vómito.	
Origen/ Obtención	Industria: Se prepara acidificando silicato sódico. El gel se seca y lava para eliminar iones solubles. El producto comercial contiene cantidades variables de agua (hasta un 16%)	
Uso	Desecante, adsorbente y catalizador. Como adsorbente en cromatografía Fuente de sílice reactiva.	

Fuente: B. García, 2012. Propiedades de la sílica gel. Lab. Química I (Química) Curso 2011-2012
Disponible en:(http://www.uv.es/fqlabo/QUIMICOS/GRADO/LQI/FICHAS_PRODUCTOS/PDF/LQI%20SiO2.) Consultado el: 8 de Sep. del 2013.

Con los resultados de esta evaluación se puede ver que el par sílica gel – agua es el más conveniente y amigable con el medio ambiente de todos. En la tabla 5 se describen las propiedades de la sílica gel.

1.7.- Coeficiente de desempeño COP.

La eficiencia térmica del refrigerador por adsorción se expresa en términos del coeficiente de desempeño (COP) por sus siglas en inglés, definido como:

$$COP_R = \frac{\text{Enfriamiento producido en el evaporador}}{\text{Energía usada en la desorción}} = \frac{Q_f}{Q_{reg}} \quad 10$$

El COP de una máquina de cuatro temperaturas representa la eficacia termodinámica ideal, correspondiendo a las cuatro temperaturas (T_{evp} , T_{ads} , T_{cond} y T_{reg}) del ciclo. Indica el rendimiento máximo de una máquina que opera en un ciclo continuo con una recuperación de calor sensible ideal.

Entonces, COP se puede expresar como:

$$COP = \frac{Q_f}{Q_{A-B} + Q_{B-C}} \quad 11$$

De donde:

COP: Coeficiente de desempeño.

¹⁰ Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

¹¹ Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

Q_f : Enfriamiento producido [KJ/Kg].

Q_{reg} : Energía de desorción total [KJ/Kg].

Q_{A-B} : Calentamiento sensible desde el punto A al B de la isótera [KJ/Kg].

Q_{B-C} : Energía usada proceso de desorción [KJ/Kg].

1.8.- Calentamiento sensible A-B.

De acuerdo a la figura 5 el punto A representa la máxima concentración de agua adsorbida en el Sílica gel (X_{max}) a la temperatura T1. Cuando el adsorbedor/reactor empieza a recibir la energía para su calentamiento, la temperatura del sílica gel empieza a subir, lo que se representa en el punto B a la temperatura T2 y presión P2 (presión del condensador), pero en este punto todavía no se produce la desorción, es decir en el proceso A-B se realizó a una calentamiento constante del agua adsorbida, este calentamiento sensible A-B se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$Q_{A-b} = [Cp_{agua} + (CP_{silica\ gel} * X_{max})](T_{2\ silica\ gel} - T_{1\ silica\ gel})$$

En donde:

Q_{A-b} : Calentamiento sensible en la isótera A-B a concentración constante.

Cp_{agua} : Calor específico del adsorbente (carbón activado).

$CP_{silica\ gel}$: Calor específico del adsorbato (metanol).

X_{max} : Concentración máxima de agua adsorbida en el sílica gel.

$T_{1\ silica\ gel}$: Temperatura del adsorbente en el punto A.

$T_{2 \text{ sílica gel}}$: Temperatura del adsorbente en el punto B. Una vez que el sílica gel llega a la temperatura T2 y la presión P2, este se encuentra listo para iniciar el proceso de desorción del agua, el cual se representa por la isobara B-C en la figura 2.4.

1.9.- Calentamiento sensible B-C.

Este proceso comienza en el punto B a la temperatura T2 y P2 a una concentración máxima X_{max} a presión constante, el mismo continúa hasta que el adsorbedor/reactor alcance su máxima temperatura, lo cual se representa en el punto C, donde se puede determinar T3, P3 y X_{min} . El calor suministrado en el transcurso de este proceso consiste en:

- a. Calor sensible del adsorbente desde T2 hasta T3.
- b. Calor sensible del adsorbato desde T2 hasta T3.
- c. Calor de desorción.

Esto lo podemos expresar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{B-C} = \left[Cp_{sil \text{ gel}} + Cp_{agua} * \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{2} \right) \right] (T_{3 \text{ sílica gel}} - T_{2 \text{ sílica gel}}) + (X_{max} - X_{min}) H_{des}$$

De donde el término H_{des} representa el valor medio del calor de adsorción/desorción, lo cual lo podemos calcular usando la ecuación dada por *Caussius Clapeyron*, como sigue:¹²

¹² Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

$$H_{des} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{M} \right) \ln \left(\frac{P2}{P1} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{T1_{sil\ gel}} - \frac{1}{T2_{sil\ gel}}} + \frac{1}{\frac{1}{T4_{sil\ gel}} - \frac{1}{T3_{sil\ gel}}} \right) \quad 13$$

Donde:

R: Constante universal de los gases.

M: Peso molecular del adsorbato.

1.10.- Enfriamiento producido.

El refrigerante, en este caso el agua, se condensa desde la temperatura T3 representada en la figura 1.3, hasta la temperatura del evaporador T_{ev} o T4, para luego evaporarse, se puede expresar el enfriamiento producido mediante la siguiente ecuación:

$$Q_f = (X_{max} - X_{min})(L_{ev} - Cp_{sil\ gel})(T1_{sil\ gel} - T_{ev}) \quad 14$$

En donde el calor latente de evaporación L es constante y tiene un valor de $L_{ev} = 2257$ KJ/Kg, que es una característica del agua.

1.11.- Descripción de los componentes del sistema.

El refrigerador está compuesto principalmente de un evaporador, un condensador, (que está sumergido en agua) y un adsorbedor o reactor el cual se encuentra lleno con adsorbente y que está en contacto con una resistencia eléctrica la cual le sirve para su calentamiento. El adsorbedor, condensador y evaporador, son multitubulares y hechos de acero inoxidable. (Figuras 11 y 12)

¹³ Erico Frigerico. 1998. Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

¹⁴ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar por pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2 66-96 p.

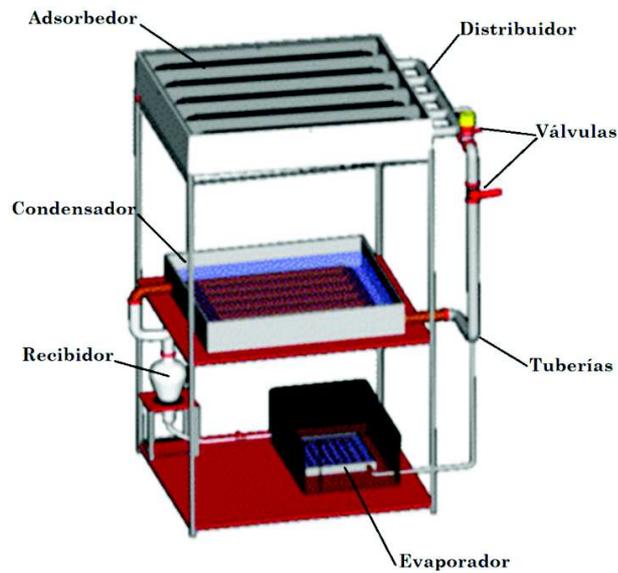
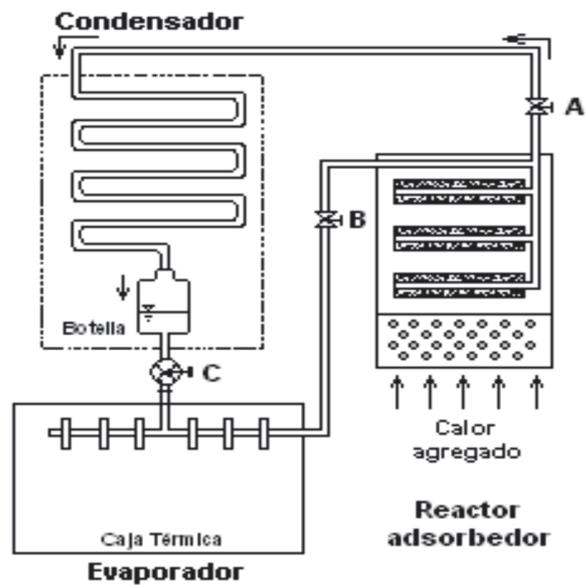


Figura 11.- Descripción del sistema

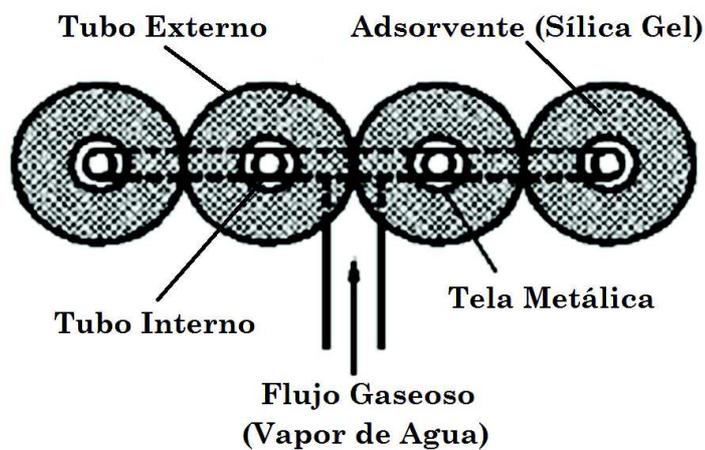


Fuente: M. Ramos; M. Horn; R. Espinoza. 2012. Actividades de Investigación y Desarrollo en el Área de Enfriamiento Solar (CER-UNI) 3 p.

Figura 12.- Esquema del refrigerador intermitente por adsorción.

1.11.1.- Adsorbedor/reactor

En la figura 2.13 se representa el conjunto adsorbedor/reactor, en donde para calentar utiliza resistencias eléctricas. El lecho adsorbente se encuentra formado por una serie de tubos, donde el adsorbente (sílica gel) ocupa el espacio anular concéntrico comprendido entre la superficie exterior del tubo y una malla metálica, por donde fluye el adsorbato.



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga. 86 p.

Figura 13.- Esquema del adsorbedor/reactor multitubular

1.11.2.- Condensador.

El condensador consiste de una serie de tubos ubicado en la base de un recipiente que contiene agua las paredes del recipiente no tienen aislamiento con su cara superior abierta. Los tubos forman un ángulo con respecto a la horizontal, para permitir un flujo máximo del agua líquida hacia el evaporador. El dimensionamiento se hará teniendo en cuenta la potencia térmica disipada en el agua durante el cambio de fase gas-líquido del adsorbato, que se expresa como:

$$Q_{cond} = \frac{m_{agua\ des} * \Delta H_{cond}}{t_{cond}} \quad 15$$

Donde:

Q_{cond} : Potencia térmica del condensador [W].

$m_{agua\ des}$: Masa de agua desorbida [Kg].

ΔH_{cond} : Calor latente de condensación, del agua y es igual a H=2257 KJ/Kg.

t_{cond} : Duración del proceso de condensación [horas].

Para determinar el área de transferencia necesaria para el condensador se usará la siguiente ecuación:

$$Q_{cond} = U_{cond} A_{cond} \Delta t_{cond} \quad 16$$

Despejando:

$$A_{cond} = \frac{Q_{cond}}{(U_{cond})(\Delta t_{cond})}$$

Donde:

A_{cond} : Área de transferencia [m^2].

U_{cond} : Coeficiente de transferencia. Se asume $U_{cond} = 170 \text{ W}/m^2\text{°C}$

¹⁵ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar por pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2 66-96 p.

¹⁶ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

Δt_{cond} : Diferencia de la temperatura agua en el tanque/agua interior igual a 2 °C

Tomando en cuenta el valor de área de transferencia para el condensador, y además que el condensador utiliza toda el área útil de los tubos, determinamos el número total de tubos de la siguiente manera:

$$\# \text{ Tubos} = \frac{A_{cond}}{(2)(\phi_{tubo})(L_{tubo})}$$

Donde:

ϕ_{tubo} : Diámetro de la tubería a utilizar [m].

L_{tubo} : Longitud de la tubería [m].

Se piensa utilizar un condensador inmerso en agua para mejorar la condensación

Entonces la cantidad de agua necesaria sería:

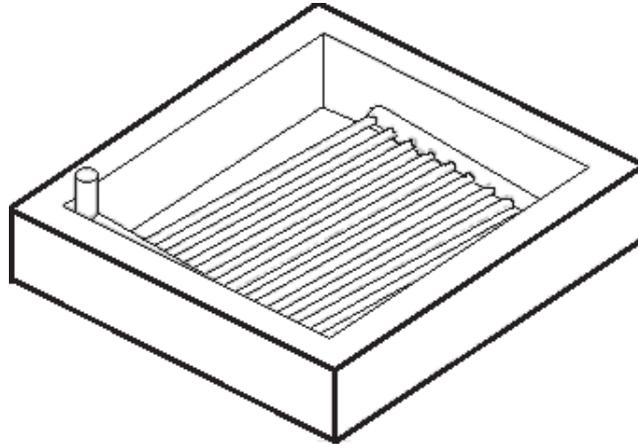
$$m_{agua} = \frac{(m_{agua\ des})(\Delta H_{cond})}{(Cp_{agua})(\Delta t_{agua})}$$

Donde:

Cp_{agua} : Calor específico del agua [$Cp = 4.1868 \text{ KJ/ Kg } ^\circ\text{C}$].

Δt_{agua} : Variación de temperatura en el agua igual a 1.5 °C.

$m_{agua\ des}$: Masa de agua desorbida [Kg].



Fuente: A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Politécnica del Ejército, Latacunga.

Figura 14.- Esquema del condensador.

1.11.3.- Evaporador.

Al igual que el condensador el evaporador está constituido por tubos ubicados paralelamente, interconectados en su extremidad posterior, para garantizar una igual distribución del agua en cada uno de ellos. Para dimensionar el evaporador se ha considerado la cantidad de energía que sería utilizada en la disminución de la temperatura al interior de evaporador hasta 10 °C.

1.11.3.1.- Disminución de la temperatura del agua hasta 10 °C (QEV).

El agua condensada pasa hacia el evaporador, en el cual el proceso de producción de frío empieza. El agua baja su temperatura desde la temperatura ambiente hasta los 10°C, para lo cual aplicamos la siguiente fórmula:

$$Q_{ev} = m_{agua} C p_{agua} \Delta t_a \quad 17$$

Q_{ev} : Calor necesario para bajar la temperatura a 10 °C [KJ].

m_{agua} : Masa de agua a enfriar [Kg].

Δt_a : Cambio de Temperatura

Siendo la potencia necesaria para este proceso la que se expresa en la formula siguiente.

$$\dot{Q}_{evl} = \frac{Q_{evl}}{t_{evl}} \quad 18$$

Donde:

\dot{Q}_{ev} : Potencia térmica

t_{ev} : Tiempo de evaporación, etapa de enfriamiento.

Para este proceso podemos determinar la cantidad de agua necesaria utilizando la siguiente ecuación:

$$m_{agua-ev} = \frac{\dot{Q}_{ev} t_{ev}}{L_{ev}}$$

Donde:

$m_{agua-ev}$: Masa de agua necesaria para el proceso de enfriamiento. [Kg_{agua}]

L_{ev} : Calor latente de evaporación del agua. 2257 kJ/Kg

Siendo el área necesaria para este proceso:

$$A_{ev} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{h_{ev} \Delta t_{ev}} \quad 19$$

¹⁷ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

¹⁸ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

¹⁹ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

Donde:

A_{ev} : Área del evaporador [m²]

h_{ev} : Coeficiente de transferencia de calor [355 W/m²K]

Δt_{ev} : Diferencia de temperatura en la tapa de enfriamiento.

Una vez que se determina el área necesaria para el proceso de enfriamiento, se calcula el número de tubos necesarios para el evaporador.

$$\#Tubos = \frac{A_{ev}}{(\phi_{evap})(L_{tubo})}$$

Donde:

ϕ_{evap} : Diámetro de la tubería

L_{tubo} : Longitud de tubería.

1.11.4.- Cámara fría y aislamientos.

1.11.4.1.- Carga por transmisión de calor.

En la cámara fría el calor se transmite por conducción y convección a través de las paredes, piso y techo, esta ganancia de calor varía de acuerdo al tipo de construcción de la cámara fría, tipo y espesor del aislamiento usado, del área y la diferencia de temperatura existente entre la cámara interna y el medio ambiente. Para determinar su valor usamos la siguiente ecuación:

$$Q = \mu * A * \Delta t \quad 20$$

En donde:

Q: Transferencia de calor

²⁰ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

μ : Coeficiente de transferencia de calor.

A: Área

Δt : Diferencia de temperatura entre el interior de la cámara interna y al medio ambiente.

El coeficiente de transmisión de calor μ depende del tipo y espesor de aislante térmico utilizado, lo cual se expresa en las siguientes ecuaciones.

$$\mu = \frac{1}{R_T} \quad 21$$

$$R_T = R_1 * x_1 + R_2 * x_2 + \dots + R_n * x_n$$

En donde:

R: Coeficiente que depende del tipo de aislante térmico utilizado.

X: Expresa el espesor del material aislante.

1.11.4.2.- Carga debida al producto.

La carga debida al producto, es la cantidad de calor que hay que extraerle al producto para bajar su temperatura hasta la temperatura de la cámara fría, esta carga se produce por colocar un producto a una temperatura mayor que la de la cámara. La carga total de producto será la suma de los diversos tipos de carga que existan. Para nuestro caso particular la carga que vamos a considerar será agua, la cual debe someterse a un proceso de bajar su temperatura a 10°C. Para determinar el calor removido para bajar la temperatura desde la temperatura ambiente a la temperatura de la cámara fría utilizamos la siguiente ecuación:

²¹ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

$$Q_a = m_{agua} * C_{agua} * \Delta t \quad 22$$

En donde:

Q_a : Calor removido desde la temperatura ambiente hasta 10°C

m_{agua} : Masa de agua

C_{agua} : Calor específico del agua a presión y volumen constante.

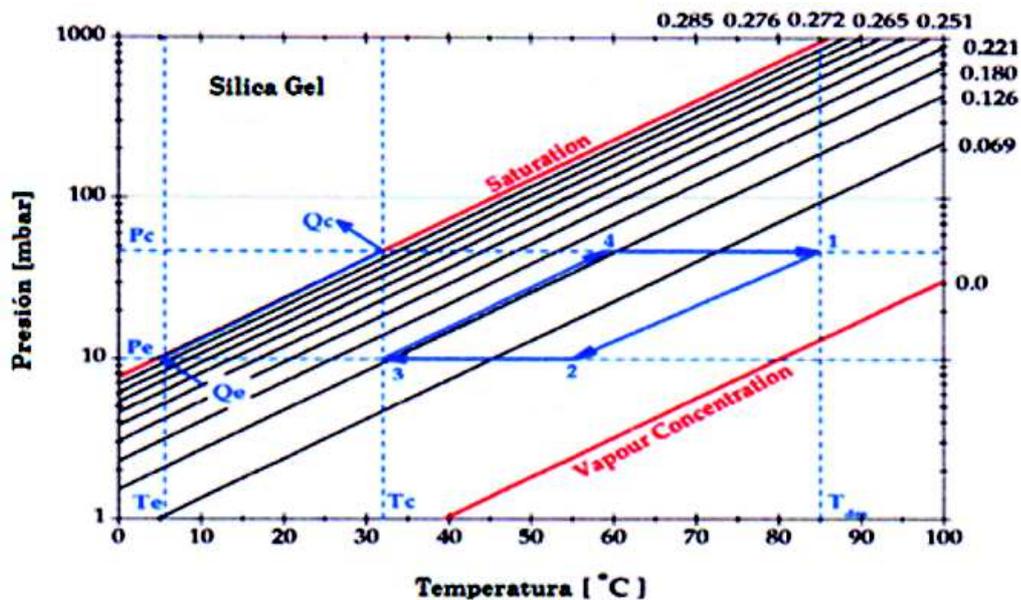
Δt : Diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente hasta 10 °C.

²² Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13: 669-700 p

CAPÍTULO II

2.- Diseño y cálculo de los componentes del sistema.

Para poder diseñar el sistema, se toma en cuenta la isótera del par Sílica Gel – Agua, (figura 15), la cual muestra un diagrama Presión-Temperatura-Concentración con el ciclo de enfriamiento de adsorción ideal sobrepuesto. El ciclo de enfriamiento de adsorción ideal se compone de adsorción y condensación a 32°C, desorción 85°C y evaporación a 5°C tal como se utiliza típicamente en sistemas de enfriamiento de agua.²³



Fuente: Resk, Ahmed Masoud. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. School of Mechanical Engineering College of Engineering and Physical Science The University of Birmingham July – 2012 (147-148)

Figura 15.- Diagrama de Presión-Temperatura-Concentración para el par de adsorción Sílica-Gel Agua con ciclo ideal sobrepuesto.

²³ A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144 – 156 p.

Los puntos de la recta 1, 2, 3 y 4 representan el estado de la sílica gel. Los puntos Q_e y Q_c representan el calor de evaporación y desorción respectivamente. Los puntos P_e y P_c representan la presión de evaporación y desorción que son 10 y 45 mbar. Las rectas de la gráfica de color rojo (Saturación y Concentración de Vapor) representan la concentración máxima y mínima de agua en la sílica gel, estos valores están dados en kilogramos de agua/kilogramos de sílica gel. Los resultados del laboratorio muestran que los valores de la concentración de vapor de agua al final de la desorción – adsorción son 0.06 - 0,13 Kg_w/Kg_{sil} respectivamente.²⁴

A partir de los datos de la figura 15, se comienza con los cálculos y se elabora la siguiente tabla:

Tabla 6.- Datos de la Isótera. (Ciclo ideal)

	Temperatura de Saturación en °C (T_{sat})	Temperatura del Sílica Gel en °C (T_{sil})	Concentración Kg Agua/Kg.Ad		Presión (mbar)
			Max	Min	
Punto 1	32 °C	85 °C	-	0.06	45
Punto 2	5 °C	55 °C	-	0.06	10
Punto 3	5 °C	32 °C	0.13	-	10
Punto 4	32 °C	60 °C	0.13	-	45

Fuente: Elaboración propia de los autores.

2.1.- Cálculo del COP

2.1.1.- Calentamiento sensible 3-4 (Q_{3-4})

Este proceso comienza en el punto 3 donde el sílica gel adsorbe la máxima cantidad de agua X_{max} a la temperatura T_1 . Representa el calentamiento necesario

²⁴ A. Masoud. 2012. Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144 – 156 p.

que deben aplicar las resistencias eléctricas al Sílica Gel para que empiece la desorción. Este calentamiento se puede calcular usando la ecuación:

$$Q_{3-4} = (Cp_{sil} + Cp_{agua} * X_{max})(T_4 - T_3) \quad 25$$

Los calores específicos (Cp) de la sílica gel y del agua lo tomamos de las tablas de las propiedades de cada uno de ellos. Las temperaturas de la sílica gel al comienzo y al final del calentamiento los tomamos de la tabla 6 que se elabora a partir de la figura 1.1.

$$Cp_{sil\ gel} = 0.9 \frac{Kj}{Kg\ ^\circ C} \quad T_3 = 32\ ^\circ C$$

$$Cp_{agua} = 4.18 \frac{Kj}{Kg\ ^\circ C} \quad T_4 = 60\ ^\circ C$$

$$Q_{3-4} = \left(0.9 \frac{Kj}{Kg\ ^\circ K} + 4.18 \frac{Kj}{Kg\ ^\circ K} * 0.13 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{sil}} \right) (333^\circ K - 305^\circ K)$$

$$Q_{3-4} = 40.4152 \frac{Kj}{Kg}$$

2.1.2.- Proceso de generación 4-1 (Desorción Q_{4-1})

El proceso de desorción comienza en el punto 4 a presión constante ^[3] y continúa hasta que la temperatura alcanza su valor máximo. Las resistencias eléctricas que están en contacto con el reactor presentan su máximo calentamiento y

²⁵ Erico Frigerico. 1998. Sistema de Refrigeración por adsorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

el agua se separa del sílica gel en forma de vapor y la presión del sistema sube a los 45 milibares (45 hecto Pascales)

Se calcula usando la siguiente ecuación:

$$Q_{4-1} = \left[C_{p_{silica\ gel}} + C_{p_{agua}} * \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{2} \right) \right] (T_{1\ sil} - T_{4\ sil}) (X_{max} - X_{min}) * H_{des} \quad ^{26}$$

Dónde:

X_{min} = razón de concentración mínima

$T_{1\ sil}$ = Temperatura de la sílica gel al terminar la desorción

$T_{4\ sil}$ = Temperatura de la sílica gel al comenzar la desorción

H_{des} = Valor medio del calor de adsorción – desorción.

Para calcular H_{des} se usa la ecuación de Caussius Clapeyron.

$$H_{des} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{M} \right) \ln \left(\frac{P_4}{P_3} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{T_{3\ sil\ gel}} - \frac{1}{T_{4\ sil\ gel}}} + \frac{1}{\frac{1}{T_{2\ sil\ gel}} - \frac{1}{T_{1\ sil\ gel}}} \right)$$

R = Constante universal de los gases $R = 8.31447 \frac{KJ}{Kmol \cdot ^\circ K}$

M = Masa molar del adsorbato (agua). $M = 18.015 \frac{Kg}{kmol}$

²⁶ A. Córdova, O. Ruiz, 2008. Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis. Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2. 66-96 p

Presión de vapor en el punto 4 = 45 hecto Pascales

Presión de vapor en el punto 1 = 10 hecto Pascales

Temperatura del silica gel en el punto 1 = 85 °C

Temperatura del silica gel en el punto 2 = 55 °C

$$H_{des} = \frac{1}{2} \left(\frac{8.31447 \frac{Kj}{kmol \cdot ^\circ K}}{18.015 \frac{kg}{k.mol}} \right) \ln \left(\frac{45 hPa}{10 hPa} \right) \left(\frac{1}{305^\circ K} - \frac{1}{333^\circ K} + \frac{1}{328^\circ K} - \frac{1}{358^\circ K} \right)$$

$$H_{des} = 0.23076 \frac{Kj}{Kg \cdot ^\circ K} (11342.924 \cdot ^\circ K)$$

$$H_{des} = 2617,552 \frac{Kj}{Kg}$$

Siendo el calor total necesario para el proceso de desorción el siguiente:

$$Q_{4-1} = \left[C_{p_{silica\ gel}} + C_{p_{agua}} * \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{2} \right) \right] (T_{1\ sil} - T_{4\ sil}) + (X_{max} - X_{min}) * H_{des}$$

$$Q_{4-1} = \left[0.9 \frac{Kj}{Kg \cdot ^\circ K} + 4.18 \frac{Kj}{Kg \cdot ^\circ K} * \left(\frac{0.16 + 0.06 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{sil}}}{2} \right) \right] (358 \cdot ^\circ K - 333 \cdot ^\circ K) + \left(0.16 - 0.06 \frac{Kg_{agua}}{Kg_{sil}} \right) * 2617.55 \frac{Kj}{Kg_{agua}}$$

$$Q_{4-1} = 295.75 \frac{Kj}{Kg_{sil}}$$

2.1.3.- Enfriamiento producido.

El refrigerante (agua) se enfría primero desde T_1 hasta T_{ev} , luego se evapora y el calor latente L es constante, el enfriamiento logrado será:

$$Q_f = (X_{max} - X_{min})[L - Cp_{agua} * (T_{3\ sil} - T_{ev})] \quad 27$$

Dónde:

$Q_f =$ Enfriamiento

$T_{ev} =$ Temperatura del evaporador (5°C)

$L =$ Calor latente de evaporacion del agua ($2257 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}_{agua}}$)

$T_3 =$ Temperatura en el punto 3 (32°C)

$$X_{max} = 0.13 \frac{\text{Kg}_{agua}}{\text{Kg}_{sil}}$$

$$X_{min} = 0.06 \frac{\text{Kg}_{agua}}{\text{Kg}_{sil}}$$

$$Q_f = \left(0.13 - 0.06 \frac{\text{Kg}_{agua}}{\text{Kg}_{sil}}\right) \left[2257 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}_{agua}} - 4.18 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}_{agua} \cdot ^\circ\text{K}} (358^\circ\text{K} - 283^\circ\text{K})\right]$$

$$Q_f = 136.045 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}_{sil}}$$

²⁷ Erico Frigerico. 1998. Sistema de Refrigeración por adsorción. Publicación. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

Con los datos obtenidos se calcula el coeficiente de performance, el cual es: ²⁸

$$COP = \frac{Q_f}{Q_{3-4} + Q_{4-1}}$$

$$COP = \frac{136.045 \frac{Kj}{Kg_{sil}}}{40.4152 \frac{Kj}{Kg_{sil}} + 295.75 \frac{Kj}{Kg_{sil}}}$$

$$COP = 0.404$$

Para comenzar con el diseño de los componentes tomamos como referencia el tamaño y el estilo que tendrá el enfriador, el cual será didáctico y en base a la bibliografía consultada se decide empezar con el cálculo del reactor-adsorbedor ya que en base a sus dimensiones y capacidad de poder contener el sílica gel en su interior podemos, calcular las dimensiones del resto de componentes del sistema.

2.2.- Dimensionamiento de los componentes del enfriador.

2.2.1.- Adsorbedor/Reactor

Las características del reactor y sus tuberías se han asumido en base a lo existente comercialmente en el mercado y su longitud se asume en base a una construcción didáctica. Se colocaran 9 tubos de 540 mm de largo con un diámetro externo de 42 mm los cuales tendrán en su interior tubos de 22 mm de diámetro que

²⁸ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13; 669-700 p.

sirven para contener el sílica gel. Para saber la cantidad de sílica gel que se usará el proceso de refrigeración, se calcula el volumen útil total del reactor de acuerdo al diseño propuesto.

Diámetro interior de los tubos externos: 37 mm

Diámetro de los tubos internos: 22 mm

Longitud del reactor: 540 mm

Volumen útil es a igual a:

$$V_{util} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)L$$

$$V_{util} = \frac{\pi}{4}[(37 * 10^{-3}m)^2 - (22 * 10^{-3}m)^2]0.54 m$$

$$V_{util} = 3,7 * 10^{-4}m^3$$

Luego el volumen útil total del adsorbedor será:

$$V_{util total} = (3,7 * 10^{-4}m^3)9$$

$$V_{util total} = (3,3 * 10^{-3}m^3)$$

Para calcular la cantidad necesaria de sílica gel en el adsorbedor multiplicamos la densidad por el volumen. El valor de la densidad de la Sílica gel 750 Kg/m³, que lo tomamos de las tablas de las propiedades (anexos)

$$Cantidad de Sílica Gel (masa) = \delta * V$$

$$\text{Cantidad de silica gel} = 750 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 3,3 * 10^{-3} \text{m}^3$$

$$\text{Cantidad de silica gel} = 2.52 \text{ Kg}$$

Teniendo en cuenta los datos proporcionados por la isótera, la concentración máxima es de 0.13, y la mínima de 0.06 kg de agua/kg de sílica gel; si multiplicamos cada valor de concentración por la masa de sílica gel que puede ser contenida en los tubos del reactor, nos dará la cantidad mínima y máxima de agua que estará contenida en el adsorbente.

$$m_{\text{agua max}} = m_{\text{sil gel}} * \text{concentracion}_{\text{max}}$$

$$m_{\text{agua max}} = 2,54 \text{ Kg}_{\text{sil}} * 0.13 \frac{\text{Kg}_{\text{agua}}}{\text{Kg}_{\text{sil}}}$$

$$m_{\text{agua max}} = \mathbf{0.325 \text{ Kg}_{\text{agua}}}$$

$$m_{\text{agua min}} = m_{\text{sil gel}} * \text{concentracion}_{\text{min}}$$

$$m_{\text{agua min}} = 2.5 \text{ Kg}_{\text{sil}} * 0.06 \frac{\text{Kg}_{\text{agua}}}{\text{Kg}_{\text{sil}}}$$

$$m_{\text{agua min}} = \mathbf{0.15 \text{ Kg}_{\text{agua}}}$$

Podemos concluir que la masa de agua mínima es la que siempre estará contenida en la sílica gel del reactor, por lo que la masa de agua que se podrá separar en la etapa de desorción es la resta entre estas dos, o sea 0.18 kg, que es la masa de agua que circulará en el sistema que se va a condensar y a evaporar, aproximadamente 0.2 kg

La densidad del agua es 1 Kg/l por lo que el volumen necesario de agua es:

$$V_{agua} = \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}} \quad 29$$

$$V_{agua} = \frac{0.325 \text{ Kg}}{1 \text{ Kg/l}}$$

$$V_{agua} = 0.325 \text{ l}$$

Por fines didácticos se necesita calentar el reactor con resistencias eléctricas, se calcula la potencia eléctrica necesaria para producir este calentamiento. Se va a calentar 2,5 kg de sílica gel y se asume una temperatura de calentamiento desde los 30 hasta los 90 °C durante un tiempo de 2 horas.

La masa de los tubos del adsorbedor es aproximadamente de 6 kilogramos, la masa de agua es de 1 kg, el calor específico del acero inoxidable es de $0.480 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$ y el calor específico de la sílica gel es $0.9 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}$

$$E_{ent} = (mC\Delta T_{agua}) + (mC\Delta T_{tubos}) + (mC\Delta T_{sil\ gel})$$

$$E_{ent} = \left\{ \left(1 \text{ kg} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}} \right) + \left(5 \text{ kg} * 0.510 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}} \right) + \left(2.5 \text{ kg} * 0.9 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}} \right) \right\} (90 - 30)^\circ\text{C}$$

²⁹ Y. A. Cengel; M. A Boles. 5 ed. 2006. Termodinámica. México. McGraw-Hill. Cap. 1; 3-33 p.

$$E_{ent} = \left\{ \left(\frac{4.18 \text{ kJ}}{^{\circ}\text{K}} \right) + \left(\frac{2.55 \text{ kJ}}{^{\circ}\text{K}} \right) + \left(\frac{2.25 \text{ kJ}}{^{\circ}\text{K}} \right) \right\} (60^{\circ}\text{C})$$

$$E_{ent} = 538.8 \text{ KJ}$$

$$\dot{E}_{ent} = \frac{E_{ent}}{\Delta t}$$

$$\dot{E}_{ent} = \frac{538.8 \text{ kJ}}{7200 \text{ seg}}$$

$$\dot{E}_{ent} = 74.83 \text{ W}$$

Que es la potencia eléctrica que necesita las resistencias para el calentamiento del reactor.

2.2.2.- Condensador.

El condensador que se usará es de tipo multitubular, el dimensionamiento se hace teniendo en cuenta la potencia térmica que se tendrá que disipar durante el cambio de fase de gas – líquido. Dicho calor se disipará hacia el agua en la que estará sumergido el condensador.

Este se expresa como:

$$Q_{cond} = \frac{m_{agua\ des} \Delta H}{t_{cond}}$$

Se han considerado los siguientes datos:

$$\text{Masa de agua a condensar } m_{agua\ des} = 0.2 \text{ Kg}$$

$$\text{Calor latente de condensación del agua: } \Delta H = (2257 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}_{agua}})$$

$$\text{Tiempo asumido para la condensación: } \Delta t_{cond} = 2h$$

$$Q_{cond} = \frac{0.2 \text{ Kg}_{agua} * 2257 \text{ Kj/Kg}_{agua}}{2h * 3600\text{seg}}$$

$$Q_{cond} = 62,95 \text{ W}$$

Luego se determina el área de transferencia necesaria para el condensador y se hace uso de la siguiente ecuación:

$$A_{cond} = \frac{Q_{cond}}{U * \Delta T} \quad 30$$

Dónde:

$$\text{Diferencia de temperatura del agua en el recipiente: } \Delta T = 2^{\circ}\text{C}$$

³⁰ Y. A. Cengel. 2 ed. 2004. Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13; 669-700 p.

Coefficiente de transferencia de calor asumido: $U = 150 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

$$A_{cond} = \frac{62.69 W}{150 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * 2^\circ\text{C}}$$

$$A_{cond} = 0.21 m^2$$

Se usará tubería de 19.05 mm de diámetro con una longitud del tubo de 0.45 metros y con el área encontrada anteriormente se determina el número de tubos necesarios.

$$\# Tubos = \frac{A_{cond}}{\pi * \phi_{tubo} * L_{tubo}}$$

$$\# Tubos = \frac{0.21 m^2}{\pi * 0.022 m * 0.45 m}$$

$$\# Tubos \approx 7$$

2.2.3.- Evaporador

Para el dimensionamiento del evaporador, primeramente consideramos la carga a refrigerar, que para fines didácticos será la contenida en 6 kg de agua, cuya masa se enfriará desde la temperatura ambiente hasta los 10°C en un tiempo de 4 horas y con un coeficiente de transferencia de calor de $255 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ [10]. El calor necesario para dicho enfriamiento será:

$$Q_{evp} = m_{agua \text{ a enfriar}} C_{p_{agua}} \Delta t_{agua}$$

$$Q_{evp} = 6 Kg * 4.18 \frac{Kj}{Kg \text{ } ^\circ\text{C}} (30 - 10)^\circ\text{C}$$

$$Q_{evp} = 501.6 Kj$$

La potencia necesaria para este enfriamiento será:

$$\dot{Q}_{evp} = \frac{Q_{evp}}{t} \qquad \dot{Q}_{evp} = \frac{501.6 \text{ Kj}}{4h * 3600 \text{ Seg/h}}$$

$$\dot{Q}_{evp} = 34.8 \text{ W}$$

La cantidad de agua que se evaporará internamente en el evaporador se calcula según la siguiente ecuación:

$$m_{agua \text{ evp}} = \frac{\dot{Q}_{evp} * t_{evp}}{L_{evp}}$$

$$m_{agua \text{ evp}} = \frac{0.0348 \frac{\text{Kj}}{\text{seg}} * 4h * 3600 \text{seg/h}}{2257 \frac{\text{Kj}}{\text{kg}}}$$

$$m_{agua \text{ evp}} = 0.4 \text{ Kg}$$

Con lo cual se puede comprobar que la masa de agua que es desorbida en el reactor de 0.2 Kg si es suficiente para el proceso de enfriamiento.

El área del evaporador será calculada con la siguiente ecuación:

$$A_{evp} = \frac{\dot{Q}_{evp}}{U * \Delta t_{evp}}$$

$$A_{evp} = \frac{34.8 \text{ W}}{255 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} * (1\text{K})}$$

$$A_{evp} = 0.14 \text{ m}^2$$

Se determina el número de tubos de manera similar que en el condensador, de igual manera se usaran tubos de 19.05 mm de diámetro (3/4") con una longitud de 0.4 metros.

$$\# Tubos = \frac{A_{cond}}{\pi * \phi_{tubo} * L_{tubo}}$$

$$\# Tubos = \frac{0.17m^2}{2 * 0.022 m * 0.4m}$$

$$\# Tubos \approx 6$$

De acuerdo al diseño escogido el evaporador estará sumergido en agua, que a su vez estará contenida en un recipiente de 500 mm de ancho, 390 mm de largo, 100 mm de alto, el mismo que estará aislado térmicamente con una pared de 20 mm con poliestireno expandido de una conductividad térmica k de $0,040 \frac{w}{m \text{ } ^\circ C}$.

Los coeficientes de transferencia de calor h interno y externo se asumen de $355 \frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C}$ y $10 \frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C}$ respectivamente. La resistencia de la plancha de la pared metálica es despreciable, el área interna de las paredes del recipiente del evaporador es de $0.37 m^2$ y las temperaturas interna y externa son de 10 y $30 \text{ } ^\circ C$.

Con estos datos se puede estimar el flujo de calor o la carga térmica que tendrá el evaporador por las paredes del recipiente.

$$R_{ext} = \frac{1}{h_{ext} * A} = \frac{1}{10 \frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C} * 0.37m^2} = 0.268 \text{ } ^\circ C/w$$

$$R_{pared} = \frac{L}{k_{pared} * A} = \frac{0.05m}{0.040 \frac{w}{m \text{ } ^\circ C} * 0.37m^2} = 3,35 \text{ } ^\circ C/w$$

$$R_{int} = \frac{1}{h_{int} * A} = \frac{1}{355 \frac{w}{m^2 \text{ } ^\circ C} * 0.37m^2} = 7.55 * 10^{-3} \text{ } ^\circ C/w$$

$$R_{total} = R_{ext} + R_{pared} + R_{int}$$

$$R_{total} = 3.625^{\circ}\text{C}/\text{w}$$

$$Q_{recipiente} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_t} = \frac{30^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}}{3.625^{\circ}\text{C}/\text{w}}$$

$$Q_{recipiente} = 5.5 \text{ w}$$

Podemos determinar que esta carga de 5.5 w. debida al aislamiento de la pared es suficiente tomando la potencia térmica que tendrá el evaporador

CAPÍTULO III

3.- Construcción de los componentes del sistema

3.1.- Generalidades sobre la construcción.

En el presente capítulo se darán los detalles correspondientes a la construcción de los componentes del sistema de refrigeración por adsorción diseñados en el anterior capítulo, de los cuales el adsorbedor, condensador y evaporador son multitubulares contruidos con acero inoxidable AISI 304, por su elevada resistencia a la oxidación ya que estará al aire libre y es recomendado para este tipo de trabajo, (ver anexo 4). Para empezar la construcción primeramente se maquinaron los distribuidores principales que son de 1 ¼ y de ½ pulgadas de diámetro cédula 40 con la utilización de un taladro de pedestal con brocas de cobalto de 5/8 y ½ pulgadas de diámetro como se ve en las fotografías.



Fotografía 1 y 2: Construcción de distribuidores.

3.2.- Selección de materiales.

El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión ya que tiene aleaciones de cromo, níquel y molibdeno que se caracterizan principalmente por su resistencia a la corrosión, elevada resistencia y ductilidad. Los componentes principales del sistema didáctico de refrigeración por adsorción serán contruidos con acero inoxidable AISI 304 ya que no reacciona con el agua, y su costo asequible en

comparación con otros. A continuación se describen los tipos de materiales empleados en la construcción de los diferentes componentes del sistema. Una de las desventajas de utilizar el acero inoxidable es su baja conductividad térmica razón por lo cual al momento de poner en funcionamiento el equipo se estará monitoreando constantemente y analizando los resultados obtenidos para poder recomendar de la mejor manera el material más apropiado para la construcción de este tipo de equipos de refrigeración. El costo de los materiales es asequible en comparación con otros. A continuación se describen los tipos de materiales empleados en la construcción de los diferentes componentes del sistema.

3.2.1.- Listado de materiales y descripción.

La tabla 7 tiene el listado, descripción y precio de los materiales usados en la construcción del sistema de absorción didáctico.

3.3.- Soldadura.

Los componentes principales del sistema se han fabricado utilizando tubería de acero inoxidable ANSI 304, para lo cual hemos utilizado soldadura eléctrica por arco, la varilla apropiada como material de aporte es el E308L. (Ver anexo 2)

3.4.- Adsorbedor

Para empezar la construcción del sistema primeramente se trabajó en el adsorbedor que de acuerdo con el cálculo tiene 9 secciones que van roscadas en un manifold o colector. Cada una de estas secciones de 540 mm de largo es de tubería de 1 ¼ pulgadas de diámetro cédula 40 de acero inoxidable ANSI 304. En el interior de cada sección y con la ayuda de anillos de 19 mm se soldó una tubería de media pulgada con 80 orificios de 10 mm de diámetro cada uno y luego se instaló internamente de una maya # 30 de acero inoxidable, con el objetivo de conseguir un espacio anular donde se alojarán 2.5 Kg. de sílica gel, como lo muestra la fotografía 3 y 4. Para poder sellar esta parte, poder reemplazar la sílica gel y dar mantenimiento al sistema se soldó un neplo y un tapón roscable de 1 ¼ en cada sección.

Tabla 7.- Listado de materiales usados en la construcción

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (\$)
Tubo redondo de acero inox. Cédula 40 de 1 1/4	6	metros	127,23
Platina de acero inox. 1 1/2 x 1/4	0.8	metros	9,86
Platina de acero inox. 1 1/2 x 1/8	0.9	metros	5,1
Tubo redondo de acero inox. Cédula 40 de 1/2	18	metros	136,61
Tubo redondo de acero inox. Cédula 10 de 1/2	6	metros	38,39
Malla de acero inox. # 40	0.6	m ²	17,41
Brida de acero inox. 1/2 de 150 lbs.	6	unidades	60,54
Plancha galvanizada de 0.9 mm de espesor	0.25	m ²	6,75
Plancha de acero inox. De 1 mm de espesor	0.25	m ²	31,38
Tubo cuadrado de acero inox. 3/4 de 1.5 mm de espesor	24	metros	135,71
Soldadura Esab Ok. acero inox. (3/32) (308L)	2.5	kg.	49,14
Plancha de acero inox. de 0,7 mm de espesor	0.25	m ²	40,60
Codo de acero inox. Cédula 10 (90 grados) 1/2	6	unidades	13,87
Codo de acero inox. Cédula 40 (90 grados) 1/2	1	unidades	2,31
Termómetro de alcohol de -50 a 50 grados Celsius	1	unidades	65,50
Tapón macho acero inox. 1/2	1	unidades	2,3
Bushing Roscable de acero inox. 1/2 x 1/4	1	unidades	2,5
Tapón macho acero inox. 1 1/4	9	unidades	31,68
Unión roscable acero inox. 1 1/4	5	unidades	25,33
Anillo plano acero inox. 3/4	10	unidades	4,57
Unión roscable acero inox. 1/2	6	unidades	13,86
Neplo acero inox. Cedula 40. 1/2 x 3	17	unidades	45,05
Plancha de aluminio de 1 mm (incluido doblés)	0,25	m ²	20,5
Resistencia eléctrica 120 v.	1	unidades	30,5
Interruptor con caja de protección	1	unidades	5,3
Cable # 10 con revestimiento para temperatura	1	metros	8,5
Tee acero inox. 1/2	2	unidades	5,8
Válvula Hansen de 1/2 pulgadas. Roscable	3	unidades	510
Manómetro medidor de vacío.	2	unidades	84
Perno de acero inox. 1/2 x 1	12	unidades	13,5
		Sub-Total	1543,79
		i.v.a	185,26
		Total	1729,05

Fuente: Elaboración propia de los autores.



Fotografías 3 y 4: Tubos del adsorbedor con el distribuidor.

Las 9 secciones del adsorbedor se roscaron a un manifold (colector) que fue construido con 840 mm de tubería de 1 ¼ de diámetro en la cual se soldaron 10 uniones de ½ pulgadas, una unión de 3/8 de pulgada y un neplo roscado de 50 mm de largo. Las 9 uniones de media pulgada fueron soldadas con una separación de 80 mm en las que se roscaron las secciones del adsorbedor, una unión adicional se instaló para la entrada de vapor que viene del evaporador; en la unión de 3/8 de pulgada se roscará un manómetro para medir el vacío del sistema, como lo muestra a fotografía 5 y 6.



Fotografías 5 y 6: Colector y tapones posteriores del adsorbedor.

El neplo de media pulgada se soldó con el fin de roscar una válvula HANSEN de alta presión a 90° que servirá para controlar la salida del vapor al condensador. Todo el adsorbedor tiene una inclinación de 15°, que tiene como objeto de facilitar la entrada de vapor al adsorbedor (Fotografía 7)



Fotografía 7: Adsorbedor/colector armado.

3.5.- Condensador y Acumulador

De acuerdo al cálculo, el condensador necesita una potencia de condensación aproximada de 62 vatios por lo que su área de trabajo debe ser 0.2 m², diseño escogido es multitubular; se cortaron 7 tubos de ½ pulgada de diámetro y 450 mm de longitud como muestra su construcción en la fotografía 8.



Fotografía 8: Construcción del condensador multitubular

Los 7 tubos fueron soldados en sus extremos a dos tubos de las mismas características a los que se les hizo 14 orificios de 12 mm de diámetro con una separación de 60 mm cada uno. En la entrada de vapor se soldaron 2 codos a 90° y una brida de ½ pulgada que sirven para acoplar el condensador con la salida de vapor

del adsorbedor. En la salida se soldó un neplo roscado para unirse con una T de ½ pulgada, la misma que sirve para roscar el acumulador de líquido condensado y una válvula de especial para acoplar la manguera de la bomba de vacío.

El condensador ya montado, tiene un ángulo de inclinación de 10 grados para que el líquido condensado se acumule en la salida del mismo por diferencia de densidad del líquido y el vapor. A la entrada del condensador se soldó dos codos a 90 grados y una brida de ½ pulgadas la cual sirve para acoplarse con la salida del adsorbedor.



Fotografía 9: Condensador multitubular con su respectiva brida.

Además el condensador se encuentra dentro de un recipiente de 100*500*500 mm capaz de contener 24 litros de agua necesarios para el enfriamiento de agua desorbida, el cual se lo construyó con plancha de acero inoxidable 304 de 0.9 mm de espesor, además en uno de sus extremos cuenta con una perforación de 19 mm de diámetro que se utiliza como salida de la tubería agua condensada.

En la construcción del acumulador se utilizaron 200 mm de tubería de 3 pulgadas de acero inoxidable cédula 40, se construyeron dos tapas las cuales se soldaron en sus extremos; se hicieron dos orificios de entrada y salida de 16 mm de diámetro, en los que se soldaron dos neplos para poder roscarlo a la T del condensador y a una válvula Hansen de ½ pulgada de alta presión que se acopla al evaporador para controlar el paso del agua condensada.



Fotografía 10: Acumulador de líquido condensado y válvula de control.

3.6.- Evaporador.

De acuerdo con el cálculo, el evaporador multitubular se constituye por 6 tubos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y 400 mm de longitud, unidos en sus extremos a otra tubería del mismo diámetro de 290 mm de largo, con una separación entre ellos de 50 mm como muestra la fotografía 11. Con esto se logra una superficie de evaporación de 0.15 m^2 y una potencia de enfriamiento de 46 vatios, con la capacidad de evaporar una masa de agua de 0,2 Kg.



Fotografía 11: Construcción del evaporador multitubular.

Con el fin de facilitar el armado y desarmado del evaporador, se soldaron dos bridas una a la entrada y otra a la salida con una T de media pulgada para conectar un

manómetro para medir la presión del evaporador, en la fotografía 12 se muestra el evaporador terminado.

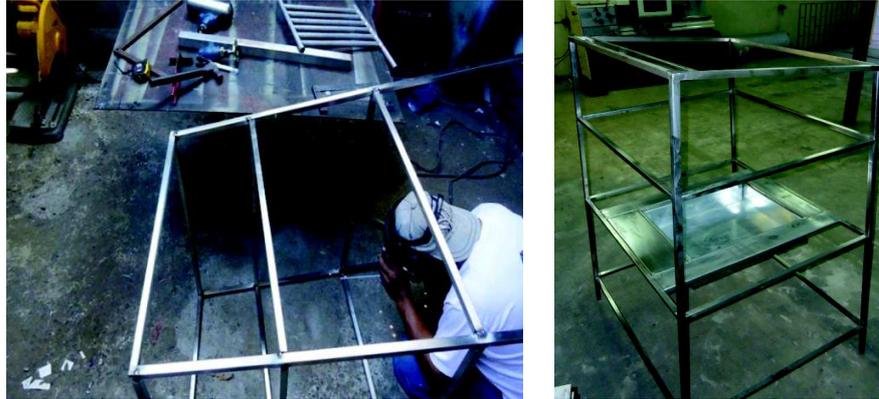
El recipiente en que está sumergido el evaporador se construyó con plancha de acero inoxidable de 0.9 mm en su parte externa, en la parte externa se utilizó plancha galvanizada 1.2 mm de espesor. Entre estas dos partes dejó un espacio de 20 mm en el cual se instaló una capa de poliuretano expandido, las dimensiones internas del recipiente son de 390*500*100 mm que tiene una capacidad de 19 litros.



Fotografía 12. Evaporador terminado.

3.7.- Armazón principal.

Para el montaje de las partes del sistema se construyó una estructura de tubo cuadrado de acero inoxidable de 19 mm y 1.5 mm de espesor. La que se encuentra formada por tres niveles: en el nivel superior se armó el adsorbedor, en el medio el condensador y el receptor de líquido, en el nivel inferior va instalado el evaporador y su recipiente para enfriamiento del agua, como muestra las fotografías 13 y 14. Para mantener mejor la estabilidad y teniendo en cuenta el peso de los componentes, se le dio una forma piramidal con una altura de 1.65 metros y en la parte superior una inclinación de 10° con el fin de mejorar la entrada de vapor hacia las secciones del adsorbedor.



Fotografía 13 y 14. Construcción de armazón principal

En la parte superior se armó un par de platinas paralelas de 800 mm de longitud de 1 ½ de pulgadas de 3 mm de espesor que sirven de soporte para las secciones del adsorbedor. El recipiente en el que está el evaporador es de 500*400*100 mm para contener 20 litros de agua para enfriamiento. Las paredes del mismo están aisladas térmicamente con una capa de poliestireno expandido de 20 mm de espesor como lo muestra las fotografías 15 y 16.



Fotografía 15 y 16: Armazón principal y poliuretano expandido en el evaporador.

3.8.- Válvulas de paso de cierre manual.

Para poder controlar el paso del vapor y del agua condensada a través de los componentes del sistema se eligió armar tres válvulas de la marca Hansen, las cuales

tienen un sello hermético que impide que existan fugas por el vástago de acero inoxidable (ver anexo 3), las mismas que tienen las siguientes características:

Presión de trabajo nominal 27 bares.

Cierre cónico

Asientos de teflón

Estancas, vástago de acero inoxidable

Temperatura de funcionamiento de máxima de 150 °C

Aptas para NH_3 , R134a, Vapor, etc.

Están diseñadas especialmente para funcionar en instalaciones frigoríficas, son de construcción robusta apropiada para líquidos, gases, vapores y aceites. El tamaño de las tres válvulas es de media pulgada, dos de ellas son rectas y la otra en 90 grados como lo muestra la fotografía 17.



Fotografía 17: Válvulas Hansen con sus respectivas bridas.

3.9.- Pruebas de presión.

Una vez armado los componentes el sistema de proceder a realizar la respectiva prueba de presión para comprobar la hermeticidad, esta prueba se realizó con aire

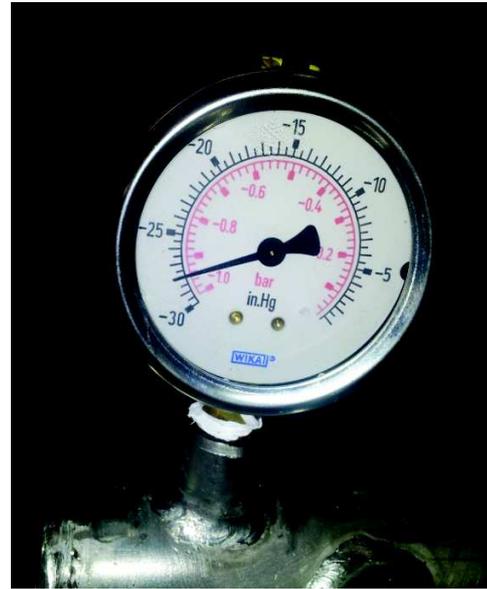
comprimido a una presión de 8 bar. Al momento de realizar la prueba efectivamente se encontraron fugas de aire las cuales son casi imperceptibles especialmente por las uniones soldadas. Para corregir estas fugas se volvió a soldar y luego nuevamente comprobar la hermeticidad, de todo el sistema. También se detectaron fugas por los sellos de las bridas por lo que se desmontaron las tres uniones y se aplicó silicón gris entre ellas para mejorar la hermeticidad por esta parte del sistema.



Fotografía 18.- Pruebas de fugas presión del sistema

3.10.- Vacío del sistema.

El vacío en el sistema es una parte importante para poder alcanzar la temperatura deseada en el evaporador ya que, como se ha hecho referencia en los capítulos anteriores entre mas baja la presión mas baja la temperatura de saturación del agua. En un principio se realizó el vacío con una sola bomba, pero no se alcanzó el vacío requerido. Para poder llegar a las – 29 pulgadas de mercurio se necesitó de dos bombas conectadas en serie (fotografía 19), las mismas que hicieron un vacío en el sistema durante 20 minutos (fotografía 20).



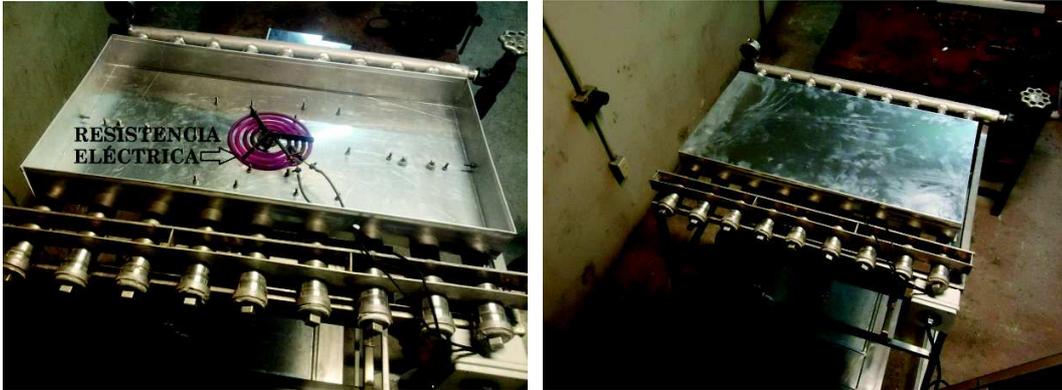
Fotografías 19 y 20.- Conexión de las bombas de vacío y manómetro

3.11.- Instalación de resistencia.

Para poder cumplir con el importante proceso de desorción o separación del agua de la sílica gel es necesario una fuente de calor, la cual para fines demostrativos de instaló una resistencia eléctrica colocada en una cala de aluminio de 1 milímetro de espesor ya que es un buen conductor del calor, el cual se tiene que distribuir a través de todo el adsorbedor. Las resistencia es de una potencia eléctrica de 1000 vatios y estará conectada a una fuente de a limentación de 220 vóltios de corriente alterna.

Para controlar el apagado y encendido de la resistencia se instaló un interruptor de perilla y se usó un conductor eléctrico de un calibre 12 con un revestimiento de asbesto para resistir alta temperatura. (Figura 21 y 22).

Para una mejor referencia de las medidas y las dimensiones del sistema ver el plano que se muestra en el anexo 5.



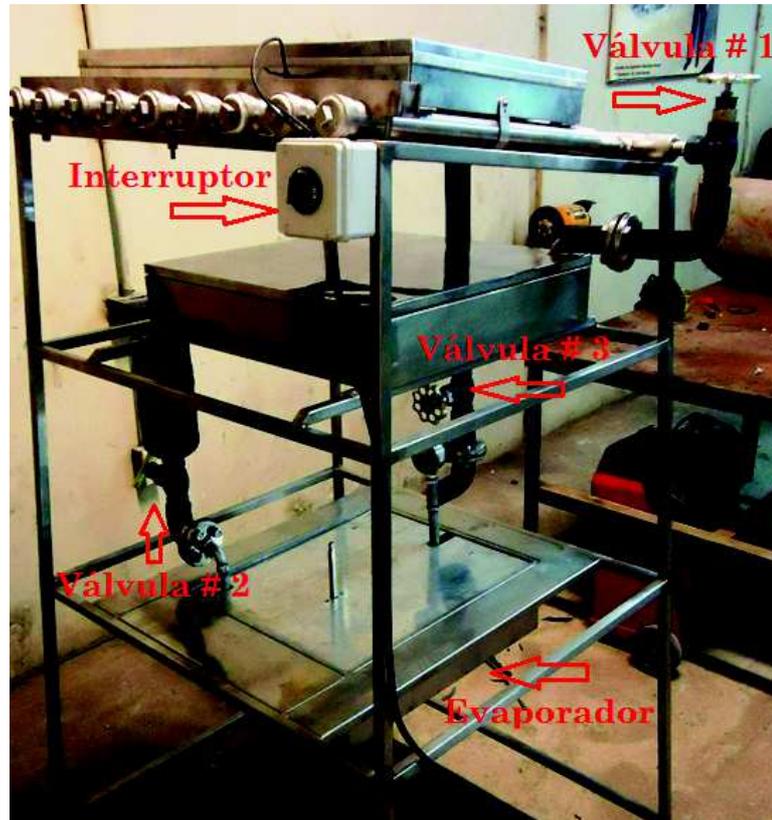
Fotografía 21 y 22.- Instalación de la resistencia eléctrica en la parte superior del adsorbedor.

3.12.- Funcionamiento del sistema

3.12.1.- Procedimiento de operación.

Para la operación y puesta en funcionamiento del refrigerador didáctico, se siguen los siguientes pasos:

- a. Para empezar la operación del equipo de refrigeración intermitente, primeramente se debe asegurar que las tres válvulas manuales estén completamente cerradas. (fotografía 23)
- b. Verificar que la presión en los dos manómetros de vacío se encuentre por alrededor de las -29 pulgadas de mercurio. (Fotografía 24)
- c. Conectar la resistencia eléctrica del adsorbedor a una toma corriente de 120 voltios C. A. y colocar el interruptor en posición de prendido durante una hora. Luego de transcurrido este tiempo, desconecte la resistencia y verifique que la presión se haya elevado a -27 pulgadas de mercurio.
- d. Abra la válvula de salida #1 del adsorbedor durante 10 minutos para permitir que el vapor pase al condensador y luego transcurrido este tiempo déjela cerrada.
- e. Esperar una hora para que el vapor se condense y se almacene en el acumulador de líquido. Luego abrir la válvula #2 del acumulador durante 5 minutos para dejar que el agua condensada baje por gravedad al evaporador. Dejar cerrada la válvula.
- f. Abra la válvula #3 de salida del evaporador durante dos horas para permitir que el vapor pase y suba al adsorbedor, donde la sílica gel lo adsorberá poco a poco. Durante este tiempo se producirá enfriamiento del agua que se encuentra almacenada en el recipiente del evaporador, dicha temperatura se podrá verificar viendo el termómetro que se encuentra instalado en el mismo.
- g. Al terminar el enfriamiento, dejar cerrada la válvula #3



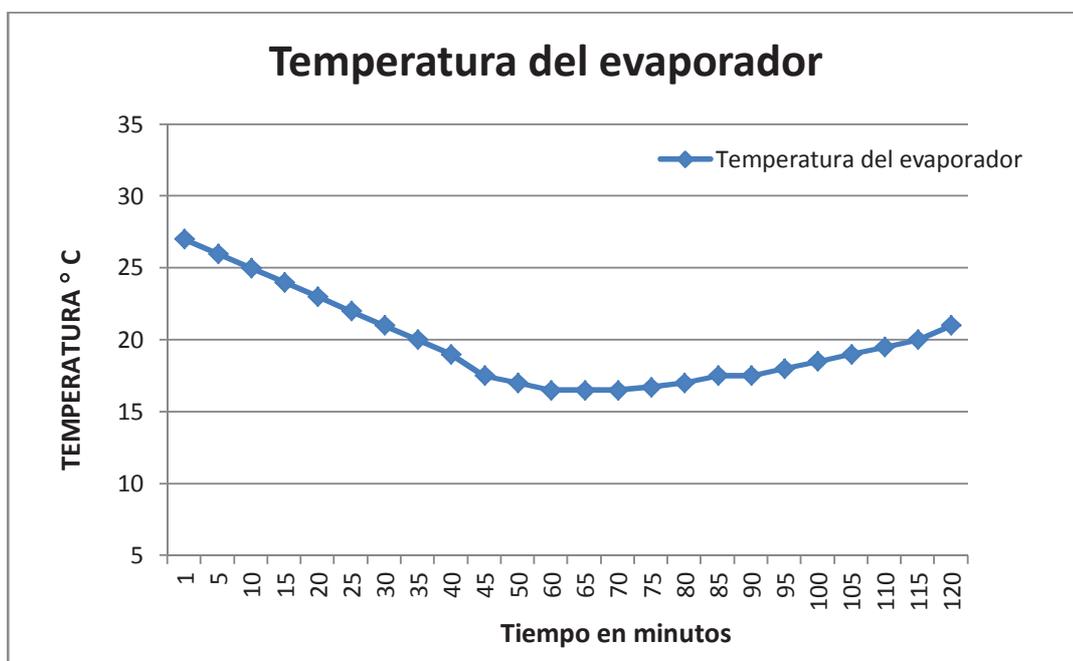
Fotografía 23.- Válvulas de cierre manual



Fotografía 24 y 25.- Termómetro y manómetro.

3.13.2.- Resultados obtenidos durante el funcionamiento.

Para tener un registro de la temperatura del evaporador durante la etapa de enfriamiento se elaboró un gráfico tiempo-temperatura (figura 16), el cual muestra la variación de la temperatura del evaporador con respecto al tiempo. Se tomó la lectura del termómetro del evaporador cada 5 minutos durante un lapso de dos horas y se obtuvo una temperatura mínima de 16,5 grados Celsius durante un tiempo de 70 minutos hasta que la temperatura empezó a subir ya que internamente se terminó de evaporar todo el refrigerante en un tiempo de tres horas, periodo en el cual la capacidad de enfriamiento se terminó.



Fuente: Elaboración propia de los autores

Figura 16.- Variación de la temperatura del evaporador con respecto al tiempo.

Una vez en funcionamiento el equipo de refrigeración, realizando las pruebas necesarias y analizando los valores obtenidos de la temperatura de la masa del agua que está contenida en el evaporador (la cual es la carga frigorífica); la lectura del termómetro fue de 17 grados Celsius, la temperatura a la que se esperaba llegar era de

10 grados. Con estos resultados se realizó una comparación entre los valores calculados y los obtenidos finalmente.

Con las temperaturas obtenidas en el evaporador se calcula la potencia de enfriamiento real del sistema., primeramente recordamos que la carga es una masa de agua de 6 kg, que se enfrió desde la temperatura ambiente (27°C) hasta los 17°C en un tiempo de 3 horas y con un coeficiente de transferencia de calor asumido de $255 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

$$Q_{evp} = m_{agua \text{ a enfriar}} C_{p_{agua}} \Delta t_{agua}$$

$$Q_{evp} = 6 \text{ Kg} * 4.18 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg}^\circ \text{C}} (27 - 17)^\circ \text{C}$$

$$Q_{evp} = 250.8 \text{ Kj}$$

La potencia real de enfriamiento que se obtuvo fue:

$$\dot{Q}_{evp} = \frac{Q_{evp}}{t} \qquad \dot{Q}_{evp} = \frac{250.8 \text{ Kj}}{3h * 3600 \text{ Seg/h}}$$

$$\dot{Q}_{evp} = 23.2 \text{ W}$$

Haciendo la respectiva comparación con los resultados calculados al principio se obtiene que la potencia real de enfriamiento es de 23.2 W, es decir 11.6 W menos ya que en el cálculo hecho se aspiraba obtener 34.8 W. Lo que representa un 33% menos. Esta pérdida en la capacidad de enfriamiento con respecto a lo calculado con lo obtenido en el la pruebas se deben a la poca capacidad para poder realizar un alto vacío en el interior del sistema ya que está directamente relacionado con la evaporación del agua al interior del evaporador.

3.12.3.- Mantenimiento.

La ventaja de este sistema es que el mantenimiento es relativamente sencillo y solo se limita a lo siguiente:

- a. Verificar que la presión de vacío se esté dentro de los límites de trabajo, que durante el proceso de calentamiento del adsorbedor debe estar en -24 pulgadas de mercurio y durante el proceso de enfriamiento debe ser de -29 pulg. Hg.
- b. En caso de que la presión no sea la correcta es necesario conectar la bomba de vacío en la conexión que se encuentra a la salida del condensador durante una hora.
- c. Verificar que las conexiones eléctricas se encuentren en buen estado y no presenten deterioro en su aislamiento.
- d. En caso de que el vacío del sistema sea el correcto pero no se observe un descenso de la temperatura del evaporador a los 10 grados Celsius, será necesario el reemplazo de la sílica gel. Para el reemplazo de la misma es necesario desmontar las secciones del adsorbedor y desenroscar los tapones individualmente para que la sílica gel pueda ser retirada y cambiada.
- e. Tener especial cuidado con la manipulación del termómetro de alcohol ya que es un elemento frágil del sistema.
- f. Realizar limpieza periódica del acero inoxidable para evitar que la suciedad pueda iniciar puntos de corrosión en las tuberías expuestas o en la estructura del mismo.

CONCLUSIONES

Después de llevar a cabo la construcción del sistema de refrigeración nos lleva a sacar las siguientes conclusiones:

- Construir este sistema es un primer paso de gran importancia para la construcción de otros sistemas similares pero basados en el mismo principio de funcionamiento (adsorción). Este trabajo práctico o proyecto nos da la experiencia necesaria para seguir investigando y experimentando con muchas ideas nuevas para ser aplicadas en futuros trabajos, los cuales nacen de los problemas que se tuvieron al momento de la construcción y el armado del sistema completo.
- La aplicación de esta tecnología daría excelentes resultados en el acondicionamiento de aire ya que el evaporador alcanza temperaturas de 17 grados Celsius, además de ser un sistema económico, de baja potencia y amigable con el medio ambiente, por ello es necesario experimentar con nuevos pares de adsorción, especialmente con etanol y sílica gel, ya que con esta combinación se puede alcanzar mejores o más bajas temperaturas en el evaporador de acuerdo a las propiedades del etanol al hervir a más bajas temperaturas.
- Este trabajo es un paso muy importante en el conocimiento de nuevas tecnologías innovadoras y nos abre las puertas para seguir innovando y dando solución a los nuevos problemas que se presenten para crear nuevos y mejores sistemas de refrigeración que no dependan de la electricidad o de partes móviles para funcionar. No cabe duda también que será una herramienta fundamental para la investigación de nuevos sistemas de refrigeración, los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Mecánica Naval de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí podrán continuar con estas investigaciones contando ya con una herramienta física de estos sistemas.
- La desventaja de este sistema radica en que siempre es necesaria una fuente de calor, ya sea esta natural como la luz del sol o energía calorífica proveniente

de calor residual o de desecho, por este punto es que está la superioridad de los sistemas de compresión.

- Después de analizar todos los resultados se llegó a la conclusión de que la conductividad térmica del acero inoxidable no es la más apropiada para este caso ya que el calor se transfiere lentamente y el evaporador pierde eficiencia, pero hay que considerar que si se usa otros materiales para construir el evaporador se disminuye la resistencia a la corrosión.
- Es de gran importancia que la presión de vacío en el interior del sistema sea la más baja posible, una variación mínima de la presión afecta mucho la temperatura de evaporación y por consiguiente la eficiencia del sistema para lograr temperaturas más bajas.

RECOMENDACIONES

- Seguir con la construcción de prototipos que sirvan como punto de partida para seguir innovando y dando a conocer que hay otras fuentes de refrigeración ecológica y amigable con el medio ambiente.
- Construir estos sistemas con materiales más económicos como por ejemplo reemplazar las cañerías de acero inoxidable con cañerías de cobre y cambiando el adsorbedor de secciones de tubos por un adsorbedor de placas plano para aumentar la capacidad de adsorber y desorber agua, lo que incrementaría la capacidad de refrigeración.
- Antes de empezar con la construcción de un nuevo diseño o prototipo recomendamos experimentar en un laboratorio con el par de adsorción a usarse, ya que esta experimentación es un buen inicio para tener datos reales de la capacidad de adsorción de la sílica gel y no solo basarse a la utilización de fórmulas para saber la capacidad de adsorción y desorción como en este caso.
- Para mejorar la eficiencia del equipo, y según los datos de temperatura arrojados por la lectura del termómetro en el evaporador y los comentarios expuestos en la conclusión se recomienda el uso de materiales de mejor conductividad térmica como es el caso del aluminio o el cobre ya que estos materiales también se los encuentran comúnmente en el mercado.
- Para la detección de fugas en el sistema se recomienda usar una presión de aire mayor a 8 bares. En el caso de construir sistemas similares a este, usando acero inoxidable para las cañerías; se recomienda usar soldadura TIC, ya que dará un mejor acabado a la soldadura y evitará que el trabajo de detección de fugas de presión no se haga tan difícil, ya que el uso de soldadura eléctrica por arco convencional deja algunas porosidades.
- El presente sistema de refrigeración depende en gran medida para funcionar del vacío o de la baja presión dentro del mismo, por ello se recomienda hacer el respectivo vacío con dos bombas conectadas en serie.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Absorber.- Penetrar las moléculas de un fluido en un sólido o de un gas en un líquido.
(Absorbente)

Absorción.- Difusión de gases en líquidos y sólidos o de líquidos en sólidos.

Adsorber.- Atraer un cuerpo y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo en estado líquido o gaseoso. (Adsorbente)

Adsorción.- Fijación de gases, y sustancias disueltas en la superficie de cuerpos sólidos.

Adsorbato.- Sustancia que se concentra en la superficie del adsorbente o que se adsorbe.

Desorción.- Separación de un gas o un líquido volátil de una mezcla por evaporación.

Difusión.- Fenómeno mediante el cual las moléculas de varios fluidos situados en un mismo recinto tienden a formar una mezcla homogénea.

Exotérmico.- Todo proceso físico o reacción química que tiene lugar con desprendimiento de calor, es decir, cuando la variación de la entalpía es negativa.

Entalpía.- Función de estado cuya variación mide la cantidad de calor suministrada o cedida por un sistema cuando evoluciona a presión constante.

Isóstera.- Curva para la representación cartográfica de los puntos de la Tierra de igual temperatura. También Isostera.

Isóbara.- Lugar geométrico de los puntos de un sistema que poseen igual presión.

Sorción.- Absorción, por un cuerpo, de gases, vapores o diversas partículas disueltas en el medio circundante).

BIBLIOGRAFÍA

Trujeque, J. G. (2010). Diseño de Refrigerador Solar por Adsorción para Clima Cálido Húmedo. Tesis, Maestría en Tec. Avda. Querétaro, Instituto Politécnico Nacional México. 37- 41 p.

Masoud, A. (2012). Theoretical and Experimental Investigation of Silica Gel/Water Adsorption Refrigeration Systems. Tesis, Dc. Philosophy Universidad de Birmingham, Inglaterra. 144-156 p.

Córdova A. y Ruiz O. (2008). Diseño, Construcción y Optimización de una Refrigeradora Solar Por Pares de Adsorción y Captación Solar. Tesis en Ing. Mecánica, Universidad Politécnica del Ejército, Latacunga. Cap. 2. 66-96 p.

Frigerico E, (1998). Sistema Solar de Refrigeración por adsorción/desorción. (INENCO) Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

Cengel, Y. A. 2 ed. (2004). Transferencia de Calor. México. McGraw-Hill. Cap. 13; 669-700 p.

Ramos, M., Horn, M., Espinoza R. (2012). Actividades de Investigación y Desarrollo en el Área de Enfriamiento Solar (CER-UNI). Lima.

Cengel, Y. A., Boles, M. A., 5 ed. (2006). Termodinámica. México. McGraw-Hill. Cap. 1; 3-33 p.

García, B. 2012. Propiedades de la sílica gel. Lab. Química I (Química) Curso 2011-2012. Disponible en: (http://www.uv.es/fqlabo/QUIMICOS/GRADO/LQI/FICHAS_PRODUTOS/PDF/LQI%20SiO2.)

http://www.eduardocortina.com/archivos/familias/Tubo_y_Acc_Acero_Inoxidable_2010_03_29_13_16_45.pdf

<http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>

http://www.gunt.de/download/absorption_spanish.pdf

<http://www.rycsrl.com/pdf/hansen/ccspanish.pdf>

<http://www.multimet.net/pdf/clasificacionaceros.pdf>

ANEXOS