

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE UN CICLO CERRADO POR ADSORCION
EMPLEANDO ZEOLITA-AGUA Y ENERGIA SOLAR**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castro G., Roberto J.
Escalona H., Eliécer
Para optar al título
De Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN CICLO CERRADO POR ADSORCION EMPLEANDO ZEOLITA-AGUA Y ENERGIA SOLAR

TUTOR ACADEMICO: Ing. Rodolfo Berrios

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castro G., Roberto J.
Escalona H., Eliécer
Para optar al título
De Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2002

Dedicatoria

“Honor a quien honor merece”

Al Dr. Teseo Orfei In Memoriam. Quien aplicó el diseño de un sistema mecánico para transmitir movimiento a captadores solares orientables (1981), y un colector solar plano de cuádruple reflexión (1984), el cual le permitió a su vez, calentar agua sin energía eléctrica (energía solar). Se distinguió por sus dotes de observación, su imaginación creadora, y por su profunda humanidad.

Se honra en dedicar este Trabajo Especial de Grado: **“Diseño de un Ciclo Cerrado por Adsorción Empleando Zeolita-Agua y Energía Solar”**, al Dr. Teseo Orfei, debido a que inspiró que nuevos investigadores, enfoquen su deseo de rediseñar sus descubrimientos y hallazgos, y así poder explorar y conocer nuevos procesos.

Agradecimientos Generales.

Por su gran apoyo y disposición para transmitirnos el conocimiento y por facilitarnos las herramientas físicas y morales para realizar nuestro trabajo de grado, queremos mencionar muy especialmente a las siguientes personas:

Profesores: Julio Segura, Rodolfo Berríos, José Francisco García, Eugenio Sansone, Tibisay Zambrano, Franklyn Baduy, Rafael De Andrea, Orlando Reyes Díaz, a la Lic. María Antonieta Padrón, Al Técnico Mecánico Jesús Armando Martínez y al Técnico Químico Héctor Torres Torres, responsables del Laboratorio de Ing. Química de la facultad de Ingeniería UCV, Al Técnico Metalúrgico Rómulo Millano, y a los responsables del Laboratorio de Ing. Mecánica de la facultad de Ingeniería UCV.

Un especial agradecimiento al Prof. Carlos Rojas, Lic. en Física y al Lic. en Física Antonio Monsalve, de la Facultad de Ciencias, Escuela de Física, del Laboratorio de Superficies, de la UCV, por su gran aporte de conocimientos tanto teóricos como prácticos.

También queremos dar un reconocimiento a:

Marielisa Di Bartolomeo (Grace Davison de Venezuela), United Nations Environment Programme (UNEP).

Y a todos aquellos entes e instituciones que directa o indirectamente abrieron el camino para la realización de este proyecto.

Agradecimientos.

Primero le agradezco a Dios porque me permitió estar aquí para la realización de este trabajo, a mi madre y padre por ser una fuente de apoyo en todas las cosas que hago, mis hermanos Carlos por su apoyo en la presentación de este trabajo, Jorge, Esther y Lorena, a mi cuñado Ygor Alexandre y su familia, por su incondicional apoyo financiero y logístico, a mi esposa Anais Barrios y mi hija Andrea que me han inspirado para salir adelante y tenerme tanta paciencia en los días más difíciles, a Kamal y David por apoyarme y brindarme los materiales teóricos y prácticos con que conté para la realización de este trabajo. Al Técnico Mecánico Jesús Armando Martínez encargado del Laboratorio de Química de la U.C.V y al Técnico Químico Héctor Torres Torres, por brindarme su apoyo y las herramientas con que conté para la elaboración de los equipos, a mi compañero de Tesis Eliécer Escalona y a su novia por trabajar tan duro en este proyecto y tenerme tanta paciencia, a mis amigos Rodolfo, Elías, a mis compadres Luis Núñez y Alexis, a mis tíos, abuelos, vecinos y a todas las personas que de una u otra forma participaron en el desarrollo de este trabajo.

Roberto J. Castro G.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haber sido mi guía y por tener la oportunidad de graduarme con la realización de este trabajo de grado.

Les agradezco a las mujeres más importantes de mi vida, mi madre Cecilia y a mi novia Maria Alejandra, por tenerme tanta paciencia, por haber sido incondicionales a lo largo de mi carrera y por darme tanto amor.

A mi padre Walmore, por su apoyo y enseñanza que me ha dado a lo largo de mi vida.

Un agradecimiento especial a mi tía Amelia y Juvenal, a mi tío Henry y mi tía Ana Cecilia, por todo el apoyo y la ayuda que me prestaron.

A mi abuela Marfisa por todo el cariño que me ha dado.

A mis hermanos Carlos Eduardo, Claudio Alejandro, Andrea Valentina y Carlos Luis, por siempre estar a mi lado.

A mis tíos y primos, por siempre compartir conmigo.

A mi sobrina Karla por entenderme, quererme y siempre desearme lo mejor.

A mi mamá Belkis por toda la fe que puso en mí.

A Ibeth, Luis, Libertad y Valentina por alentarme a luchar para obtener el objetivo trazado.

A Margot y Luisa por el gran cariño que me tienen.

A mis panas Johnny, Alexis y Ricardo, por ser mis grandes amigos.

A mi compañero de tesis Roberto Castro, por el esfuerzo compartido.

A Roberto Castro (Padre) y Carlos Castro por su ayuda en la presentación de este trabajo.

Al Técnico Mecánico Jesús Armando Martínez encargado del Laboratorio de Química de la U.C.V y al Técnico Químico Héctor Torres Torres, por todos los conocimientos y esfuerzos dedicados a este trabajo.

A todos GRACIAS,

Eliécer Escalona Herrera.

RESUMEN

**Castro G., Roberto J.
Escalona H., Eliécer**

**DISEÑO DE UN CICLO CERRADO POR ADSORCION
EMPLEANDO ZEOLITA-AGUA Y ENERGIA SOLAR**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002. 92 Pág.**

Adsorción, Zeolita, Energía Solar, Medicamentos

Se presenta un diseño de un ciclo cerrado por adsorción empleando zeolita-agua y energía solar, el cual consiste en cuatro etapas. La primera etapa, se basa en un proceso de refrigeración y despresurización, en el que el vapor de agua es llevado desde una presión de condensación hasta presión ambiente y luego con la ayuda de una bomba de vacío mecánica se lleva a presiones negativas; la segunda etapa es de refrigeración y adsorción mas evaporación, en este proceso se comienza a evaporar el agua producto de la baja presión, siendo este luego adsorbido por la zeolita, hasta que el agua se congele; la tercera etapa es de calentamiento y presurización, en donde el sistema gana presión hasta llegar a presión ambiente y después con el calentamiento de la energía solar se lleva al sistema hasta una presión de condensación; y por último se tiene la cuarta etapa de calentamiento y desorción mas condensación, en este proceso el sistema, a la presión de condensación, se sigue calentando para que la zeolita desadsorba el vapor de agua, que luego será condensada a través de un intercambiador de calor.

Se diseño un evaporador para refrigerar medicamentos, con el se pueden refrigerar medicinas en lugares donde no se tenga acceso a la energía eléctrica, debido a esto el ciclo tiene una gran importancia en la industria farmacéutica.

En el ciclo se tomaron ocho (8) mediciones, obteniéndose valores satisfactorios. La etapa de refrigeración y despresurización se llevo a cabo desde una presión de 1,9 bar y una temperatura de 120°C hasta llegar a una presión de $0,88 \times 10^{-3}$ bar y una temperatura de 10°C aproximadamente; en la etapa de refrigeración y adsorción mas evaporación, se mantuvo una presión constante de $0,88 \times 10^{-3}$ bar y se logró bajar la temperatura desde los 10°C hasta los 0°C, obteniéndose una masa evaporada promedio de 9,95 gr. y una adsorción promedio de 9,03 gr.; en la etapa de calentamiento y presurización se logró obtener una ganancia de presión de hasta 1,9 bar y una temperatura 100°C aproximadamente; y por último, la etapa de calentamiento y desorción mas condensado, obtuvimos a presión constante de 1,9 bar, una temperatura de 121,6°C, con promedios de masas desadsorbidas y condensadas de 8,65 gr. y 2,63 gr., respectivamente; el COP obtenido fue de 0,4955, lo que corresponde al 49,55%.

Nomenclatura

K = Conductividad térmica.

ε = Emisividad.

q_1 = Flujo de calor entre la pared externa y el ambiente .

Q = Calor promedio de cambio de temperatura del material.

R = Resistencia térmica.

L = Longitud característica.

\bar{h}_o = coeficiente convectivo promedio externo.

\bar{h}_i = coeficiente convectivo promedio interno.

Nu_L = Número de Nusselt.

Ra_L = Numero de Rayleigh.

g = gravedad.

ν = viscosidad cinemática.

α = Difusividad térmica.

T_s = Temperatura de la superficie.

T_∞ = Temperatura del medio convectivo.

β = Coeficiente volumétrico de expansión térmica.

T_m = Temperatura media o de película.

Pr = Número de Prandtl.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann.

A = área de la superficie en contacto con el ambiente.

\bar{h}_r = Coeficiente promedio de transferencia de calor por radiación.

C_p = Calor específico a presión constante.

μ_f = Viscosidad Dinámica.

ρ = Densidad.

E = Error relativo.

PM = Peso molecular.

h = Horas.

s = Segundos.

°C = Grados centígrados.

K = Grados Kelvin.

pa = Pascal.

m = Metros.

W = Vatios.

“ = Pulgadas.

J = Joule.

Btu = British Thermal Units.

Å = Ångstrom.

P = perímetro de la aleta.

A_c = área de la sección transversal de la aleta.

q_f = Calor total transferido por la aleta.

T_b = Temperatura de la base.

θ/θ_b = Distribución de temperatura.

η_f = Eficiencia de la aleta.

L_c = Longitud corregida

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Ciclo cerrado, (a) Prototipo del ciclo, (b) Ciclo termodinámico, *Pág. 8*
- Figura 2.** Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo, *Pág. 9*
- Figura 3.** Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo, *Pág. 10*
- Figura 4.** Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo, *Pág. 11*
- Figura 5.** Adsorción de la Zeolita, *Pág. 14*
- Figura 6.** Desorción de la Zeolita, *Pág. 15*
- Figura 7.** Energía involucrada en el proceso, *Pág. 15*
- Figura 8.** Diseño inicial del prototipo, *Pág. 18*
- Figura 9.** Evaporador, *Pág. 20*
- Figura 10.** Circuito Térmico análogo para pared Plana (superficie Lateral), *Pág. 26*
- Figura 11.** Circuito Térmico análogo para pared Plana (Placa Superior y Placa Inferior), *Pág. 29*
- Figura 12.** Modificaciones del evaporador, *Pág. 34*
- Figura 13.** Zeolita 4A, *Pág. 40*
- Figura 14.** Trampa de Vapor, *Pág. 40*
- Figura 15.** Bomba de Vacío, *Pág. 41*
- Figura 16.** Manguera ¼", *Pág. 41*
- Figura 17.** Vaso Plástico, *Pág. 41*
- Figura 18.** Campana Evaporadora, *Pág. 42*
- Figura 19.** Montaje Experimental, *Pág. 42*
- Figura 20.** Manómetro de vacío. , *Pág. 42*
- Figura. 21** Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba Manual). , *Pág. 44*
- Figura 22.** Concentrador solar, *Pág. 46*
- Figura 23.** Reloj solar. , *Pág. 47*
- Figura 24.** Condensador, *Pág. 47*
- Figura 25.** Recipiente de condensado. , *Pág. 47*

Figura 26. Termómetro digital. , *Pág. 48*

Figura 27. Manómetro de presión y vacío. , *Pág. 48*

Figura 28. Ciclo de desorción. , *Pág. 48*

Figura 29. Bomba Eléctrica 220 Vol., *Pág. 51*

Figura 30. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 1). , *Pág. 52*

Figura 31. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 2). , *Pág. 53.*

Figura 32. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 2), *Pág. 53.*

Figura 33. Diseño final, *Pág. 56*

Figura 34. Diseño definitivo en etapas, *Pág. 62*

Figura 35. Orden en un cristal (a) y desorden en un gas (b). , *Pág. 73*

Figura 36. Estructura de una zeolita faujasita, (a) en el que aparecen los átomos de oxígeno (o) y los de aluminio o silicio (*), (b) representación simplificada del cuboctaedro. Estos cuboctaedros unidos forman a la zeolita faujasita (c). , *Pág. 74*

Figura 37. Zeolita faujasita X observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 m aproximadamente. Las partículas esféricas son de zeolita P., *Pág. 75*

Figura 38. Estructura de una zeolita A., *Pág. 77*

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la superficie lateral del evaporador, *Pág. 28*

Tabla 2. Resultados de la placa superior del evaporador, *Pág. 31*

Tabla 3. Resultados de la placa inferior del evaporador, *Pág. 33*

Tabla 4. Resultados de la superficie extendida (aleta). , *Pág. 37*

Tabla 5. Resultados experimentales, *Pág. 44*

Tabla 6. Pérdidas de vapor, *Pág. 45*

Tabla 7. Resultados experimentales, *Pág. 49*

Tabla 8. Pérdidas de condensado, *Pág. 50*

Tabla 9. Resultados del proceso de Adsorción utilizando Bombas de vacío eléctricas, *Pág. 52*

Tabla 10. Clasificación de algunas zeolitas. , *Pág. 76*

Tabla 11. Forma de conservación de algunas vacunas, *Pág. 81*

INDICE

CAPITULO I

Introducción.....	1
--------------------------	----------

CAPITULO II

Antecedentes del desarrollo de sistemas de refrigeración utilizando Zeolita.....	3
--	---

CAPITULO III

Fundamentos teóricos.....	7
----------------------------------	----------

3.1 Ciclo de refrigeración por adsorción,	7
3.1.1 Refrigeración y despresurización,	7
3.1.2 Refrigeración y adsorción mas evaporación,	8
3.1.3 Calentamiento y presurización,	9
3.1.4 Calentamiento y desorción mas condensación,	11
3.2 Adsorción,	12
3.3 Zeolita,	13
3.4 Procesos de adsorción y desorción de la Zeolita,	14
3.5 Vacuna,	16

CAPITULO IV

Diseño del Prototipo.....	17
----------------------------------	-----------

4.1 Diseño inicial del prototipo,	17
4.2 Parámetros para el diseño del evaporador,	19
4.2.1 Selección de los componentes del evaporador,	19
4.2.2 Cálculo de la Carga Térmica de enfriamiento,	20

4.2.2.1 Cálculo del calor perdido en el evaporador,	21
4.2.2.2 Cálculo de la carga térmica total,	37
4.2.3 Cálculo de la cantidad de Hielo,	37
4.2.4 Cálculo de la cantidad de Vapor de agua,	38
4.3 Parte experimental,	39
4.4 Coeficiente de realización,	53

CAPITULO V

Funcionamiento y Costos.....56

5.1 Diseño final,	56
5.2 Funcionamiento del sistema,	62
5.3 Costos,	64

CAPITULO VI

Conclusiones y Recomendaciones.....67

6.1 Conclusiones,	67
6.2 Recomendaciones,	68

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....70

APÉNDICES

A Características y descripción de la Zeolita,	72
Especificaciones de la zeolita,	77
Regulaciones ambientales para la zeolita,	77
Usos de las Zeolitas,	78
El agua como refrigerante en sistemas de adsorción,	79
Clasificación de las vacunas,	80

Almacenamiento y degradación de las vacunas, *80*

B Tabla de las Propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica, *83*

C Material Data Safety Sheet (Zeolita 4A, 4-8 Mesh), *85*

D Planos, *90*

CAPITULO I

Introducción

En el mundo globalizado hay un interés creciente en refrigeradores solares simples que trabajen independientemente, es decir, que no estén provistos con energía eléctrica, sobre todo para situaciones como la preservación de medicamentos en las áreas rurales, entre otros usos.

En el mercado, existe la disponibilidad de refrigeradores mecánicos impulsados por las células solares, pero son demasiado costosos. En los últimos años, se han desarrollado con éxito refrigeradores de adsorción que usan el agua como el refrigerante y zeolita como el adsorbente.

El objetivo de nuestro proyecto es el de diseñar un ciclo cerrado para refrigerar por adsorción, utilizando agua-zeolita y energía solar. El ciclo en cuestión, consta de cuatro etapas, una de refrigeración y despresurización, otra de refrigeración y adsorción mas evaporación, la siguiente de calentamiento y presurización y la última etapa de calentamiento y desorción mas condensación. Estas etapas, luego se resumirán en solamente dos etapas, a las que llamaremos: adsorción y desorción.

En otros países, tales como Alemania y EEUU, este proceso se ha investigado sistemática y cuantitativamente, con diferentes tipos de zeolita y gel de sílice. Los resultados típicos son: a ciento cincuenta grados centígrados (150°C) de temperatura hay una energía de refrigeración de doscientos cincuenta kilo Joules (250 kJ). por kilogramo (kg.) de zeolita. Estos resultados experimentales constituyen la base para la simulación de un prototipo.

Como un ejemplo podemos decir que a partir de la energía solar generada por un concentrador solar de área tres metros cuadrados (3 m^2), podría refrigerarse un volumen de almacenamiento de ciento veinticinco litros (125 litros). Este refrigerador es absolutamente hecho de vidrio y metal, aparte de eso, sólo contiene componentes "naturales" como agua, zeolita y los materiales utilizados. Por consiguiente podría construirse en forma económica, en cualquier área carente de energía eléctrica y lo

interesante de este sistema es que el producto y poder refrigerante no son contaminantes.

Para realizar el ciclo en cuestión, se tomó como modelo la refrigeración de medicamentos y se diseñó un evaporador que sirviera para almacenar dichos medicamentos de manera confiable, los cuales, en el caso proyectado, necesitaban estar en un rango de temperatura entre dos y ocho grados centígrados (2 y 8°C), con esto en mente, se utilizó una forma de análisis derivado del estudio por transferencia de calor, que sirvió para determinar el dimensionamiento y las pérdidas de calor que se registrarían hacia el ambiente. Con este diseño se obtuvieron resultados satisfactorios ya que se pudo comprobar que se podían almacenar incluso vacunas dentro de las especificaciones requeridas (para esto se obtuvo el asesoramiento de expertos, en el área de farmacia, como lo veremos reflejado en el capítulo III del trabajo en cuestión). Tal y como se explicó anteriormente, el proceso experimental se redujo a dos, una de adsorción y otra de desorción, las cuales en realidad representan las cuatro etapas del ciclo (antes descritas).

CAPITULO II

Antecedentes del desarrollo de sistemas de refrigeración utilizando Zeolita y Energía Solar

Diseño de un sistema compacto de refrigeración por adsorción empleando zeolita y agua. (ALFARO y BISSESAR, Tesis Ing. 2001)

El diseño planteado cuenta con un dispositivo de enfriamiento, además de incluir un mecanismo de calentamiento para realizar la desorción de la zeolita. Para llegar a este diseño se realizaron pruebas en laboratorio sobre el principio de adsorción, obteniendo información útil que combinada con distintos cálculos nos llevo al diseño final, el cual es capaz de producir aproximadamente un kilo de hielo con una cantidad similar de zeolita, para luego enfriar un liquido (agua) durante seis horas, mientras esto sucede el prototipo regenera la zeolita en un periodo de tres horas. Dentro del trabajo se tomo en consideración la opción solar para lograr una mayor autonomía en el diseño.

Diseño, construcción y pruebas de un colector solar plano de cuádruple reflexión. (CARRERO y LEON, Tesis Ing. 1981)

El contenido de la investigación consiste en el diseño, construcción, pruebas y determinación del rendimiento de un colector solar plano de cuádruple reflexión, con el fin de determinar la cantidad de energía que es capaz de aprovechar el colector solar. Se utilizo agua como fluido de trabajo. El calor absorbido por el fluido de trabajo se compara con la radiación incidente sobre el colector, determinando así el rendimiento del mismo.

Sistema mecánico para transmitir movimiento a captadores solares orientables. (PARRA y PICHARDO, Tesis Ing. 1984)

El objetivo principal del trabajo es idear un sistema mecánico para captadores solares planos o parabólicos orientables; con el fin de mejorar el aprovechamiento solar se diseñó un mecanismo capaz de transmitirle movimiento a los captadores solares durante el día para que estos siempre estén en contacto directo con el sol y la energía que este irradia.

Fabricación y Prueba del Modelo de Refrigeración por absorción usando Zeolita / agua. (KOBBOON, et. al., 1995)

El contenido de la investigación fue diseñar, fabricar y probar la refrigeración por adsorción usando Zeolita / Agua como par de fluidos de trabajo en el sistema. La capacidad diseñada del sistema de refrigeración modelado es 12,000 Btu /hr. la cual es hecha para 28 kilogramos de Zeolita por cada cama de Adsorbente. La capacidad de adsorción de esta cantidad de Zeolita se calcula para 6 kilogramos de vapor en cada momento. El coeficiente de performance medido (COP) tiene un rango entre 0.2 a 0.4 que es considerado bastante bajo con respecto al obtenido por sistemas de refrigeración convencionales. De cualquier manera, el lado brillante es el bajo costo de mantenimiento, ya que no hay partes móviles en el sistema. Este diseño garantiza su funcionamiento, pero necesita alguna mejora para incrementar el COP del sistema.

Experimentos en Refrigeración Solar por Adsorción usando Zeolita y Agua. (SIEGFRIED y DETLEF, 2001)

El objetivo de este proyecto es el uso del poder térmico solar para regenerar el adsorbente (zeolita). Primero, se construyó un aparato en el laboratorio. El vapor de agua en el evaporador es adsorbido por la zeolita y el agua se enfría hasta menos de 0° C. La zeolita es localizada en un tubo de vacío del colector solar que puede calentarse hasta 180° C con luz artificial. De esta manera, el agua es desadsorbida, y condensada a temperatura ambiente. Después que el colector baja su temperatura, el proceso de

enfriamiento puede comenzarse nuevamente. Este proceso se investigó sistemáticamente y cuantitativamente con diferentes tipos de zeolita y gel de sílice. Los resultados típicos fueron: A una temperatura de calentamiento de 150° C hay una energía de enfriamiento de 250 kJ por el kg de zeolita. Estos resultados experimentales constituyen la base para la simulación de un prototipo. Un volumen del almacenamiento de 125 litros podría ser enfriado por un colector solar de área 3 m². Tal refrigerador es sencillamente hecho de cristal y metal, y aparte de eso, sólo contiene los materiales “naturales” agua y zeolita. Por consiguiente podría construirse a bajo costo en los países en vías de desarrollo y producir el poder de enfriamiento sin contaminación.

Otras instituciones han desarrollado tecnología de refrigeración por adsorción empleando Zeolita y Agua, entre las más importantes se tienen:

Enfriamiento y calentamiento amistoso-ambiental mediante el uso de la innovadora tecnología de adsorción usando zeolita / agua. La Zeo-tecnología ha desarrollado un nuevo proceso de conversión de energía para la generación eficaz y almacenamiento de calor y/o el poder de enfriamiento. Manejado por una fuente de calor, este proceso es solamente basado en la zeolita y agua, por consiguiente es totalmente compatible con las regulaciones ambientales más severas”. Sus trabajos se basan en la tecnología de zeolita / agua, para calentamiento y enfriamiento, empleando como fuente de energía el sol.

Desarrollo de unidades de adsorción para refrigeración Solar” las cuales emplean Zeolita NaX y agua como par de adsorción. (LIMSI, et. al., 2001)

Zeo-Tech GmbH, Max-Plank Str.3 D-85716 Unterschleissheim/Germany E-Mail: info@zeo-tech.de “Enfriamiento y calentamiento amistoso-ambiental mediante el uso de la innovadora tecnología de adsorción usando zeolita / agua. La Zeo-tecnología ha desarrollado un nuevo proceso de conversión de energía para la generación eficaz y almacenamiento de calor y/o el poder de enfriamiento. Manejado por una fuente de

calor, este proceso es solamente basado en la zeolita y agua, por consiguiente es totalmente compatible con las regulaciones ambientales más severas.

Sus trabajos se basan en la tecnología de zeolita / agua, para calentamiento y enfriamiento, empleando como fuente de energía el sol.

CAPITULO III

Fundamentos Teóricos

3.1 Ciclo de refrigeración por adsorción

Un ciclo de adsorción para refrigeración o calentamiento por bombeo solo utiliza energía calórica. Además, este tipo de ciclo está básicamente dividido en cuatro ciclos de temperatura discontinua.

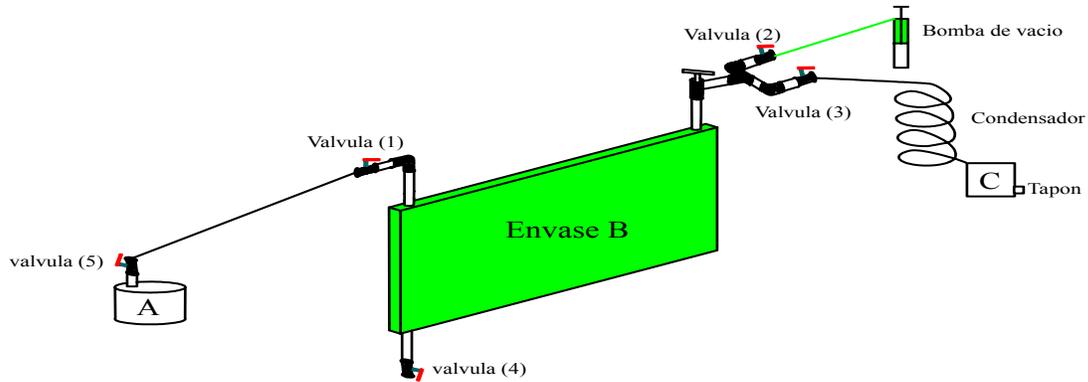
Una unidad de adsorción consiste de uno o varios adsorbentes, (en el caso de este trabajo se utilizó la Zeolita como adsorbente), un condensador, y un evaporador, conectado a una fuente de calor (Sol). (PONS, 2002)

El ciclo consiste de cuatro períodos:

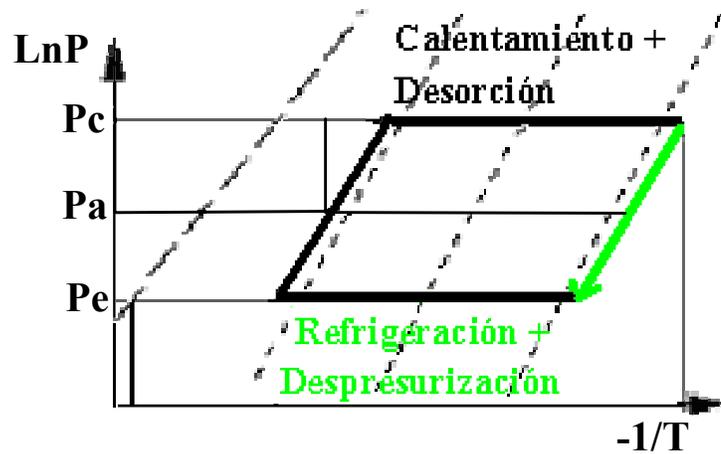
3.1.1 Refrigeración y despresurización

Este período consiste en un proceso en el que el agua se lleva desde una presión de condensación (1,9 bar) hasta una presión ambiente (0.919 bar), esto se logra abriendo el sistema al ambiente para que las presiones se equilibren, luego de ésto, con la ayuda de una bomba manual se baja la presión hasta llegar a la presión de vaporización, durante este proceso el fluido se va enfriando.

Para este periodo, se cierra la válvula tres (3) y se abren las válvulas uno, dos y cinco (1, 2 y 5), se destapa el envase de condensado que baja su presión a la presión ambiente, cero punto novecientos diecinueve bar (0.919 bar), y se vierte el condensado que se encuentra en el envase C al envase A (evaporador o envase refrigerado), a través de la válvula cinco (5). Se reconecta la válvula cinco (5) con la válvula uno (1) y se comienza a generar vacío con la bomba manual. Este decremento de presión (vacío), que se crea en los envases A y B hace que el envase A, llegue a la presión de evaporación de cero punto ochenta y ocho milibar (0.88 milibar). Este periodo es equivalente al de "expansión" en ciclos de compresión. (PONS, 2002)



(a)



(b)

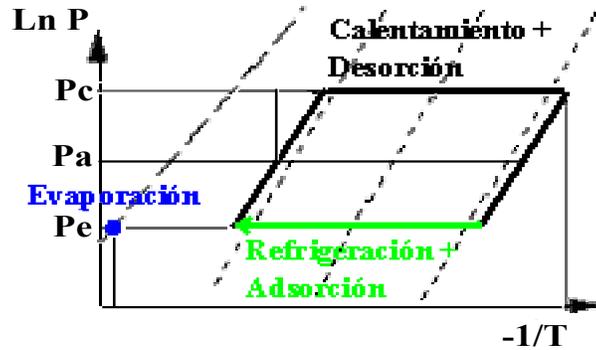
Figura 1. Ciclo cerrado, (a) Prototipo del ciclo, (b) Ciclo termodinámico

3.1.2 Refrigeración y adsorción mas evaporación

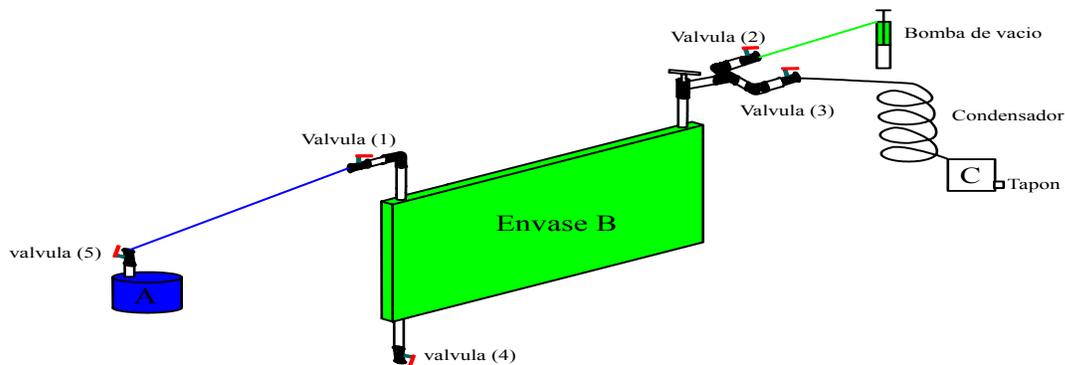
En este período, el proceso ocurre a presión constante y lo que varía es la temperatura del fluido. Durante esta etapa, el vacío generado, cero punto ochenta y ocho milibar (0.88 milibar), induce la adsorción de vapor por parte de la zeolita y a la vaporización del agua que se encuentra en las tuberías internas del envase A (evaporador o envase refrigerado). Este desprendimiento de vapor, produce que el agua experimente un decremento de temperatura que va desde una temperatura de diez grados centígrados (10°C) hasta la temperatura de congelación, que puede variar de cero grados centígrados (0°C) hasta menos once grados centígrados (-11°C), este proceso persiste hasta que la

Zeolita se sature de vapor de agua. Este período es equivalente al de "evaporación" en ciclos de compresión.

Al producirse la saturación de la Zeolita se cierra la válvula cinco (5) y se desconecta la tubería que unen a las válvulas uno (1) y cinco (5), lo que produce que el envase B vuelva a presión ambiente. (PONS, 2002)



(a)



(b)

Figura 2. Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo.

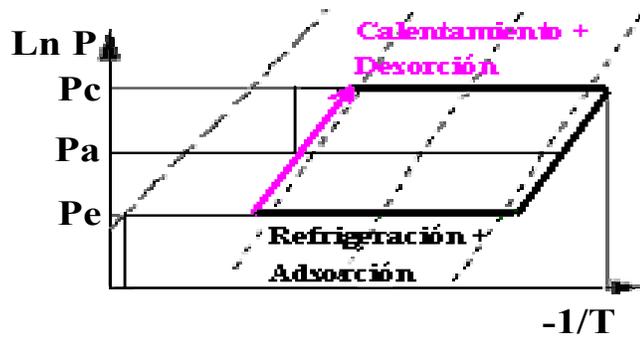
3.1.3 Calentamiento y presurización:

Este período consiste en hacer que el sistema gane presión hasta llegar a la presión ambiente, esto se logra abriendo el sistema al ambiente para que gane presión y

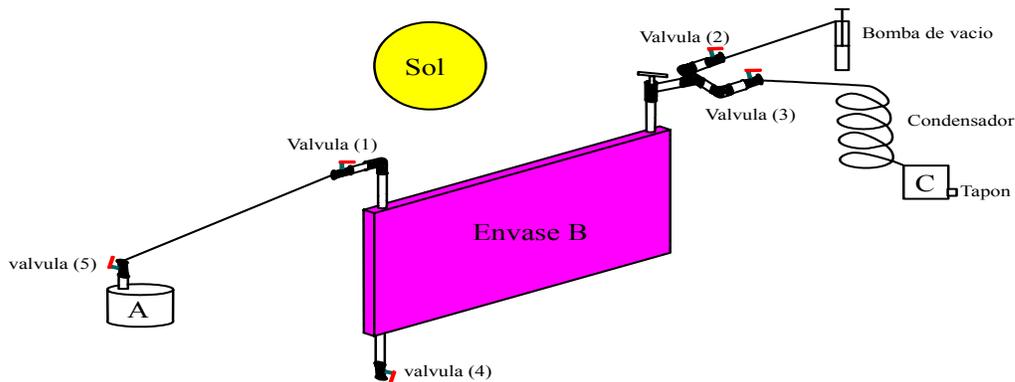
se equilibre con éste, luego con la energía solar se logra calentar al sistema para llevarlo a la presión de condensación.

Para este período, se cierran las válvulas uno y dos (1 y 2) y la Zeolita que se encuentra en el envase B recibe calor del sol, aumentando su temperatura y presión ambiente desde veintidós punto cinco grados centígrados (22.5°C) y cero punto novecientos diecinueve bar (0.919 bar) respectivamente, hasta una temperatura y presión de cien grados centígrados (100°C) y uno punto nueve bar (1.9 bar) aproximadamente. Este aumento de temperatura del adsorbente, induce a un aumento de la presión dentro del envase.

Este período es equivalente al de "compresión" en ciclos de compresión. (PONS, 2002)



(a)



(b)

Figura 3. Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo.

3.1.4 Calentamiento y desorción mas condensación

Durante este período, el adsorbente continúa recibiendo calor del sol mientras está conectado al condensador mediante la válvula tres (3) la cual está cerrada, esto ocurre a la presión de condensación constante (uno punto nueve bar (1.9 bar)) aproximadamente, luego se abre poco a poco la válvula tres (3) sobreponiéndose esta presión con la del envase C (envase de condensado).

Este aumento de temperatura del adsorbente, induce a la desorción de vapor que se encontraba atrapado en la Zeolita. Esta desorción de vapor es licuada en el condensador y es recolectado en el envase C consiguiendo una masa de condensado de ocho gramos (8 gr).

El calor de condensación es soltado al ambiente. Este período es equivalente al de "condensación" en ciclos de compresión. (PONS, 2002)

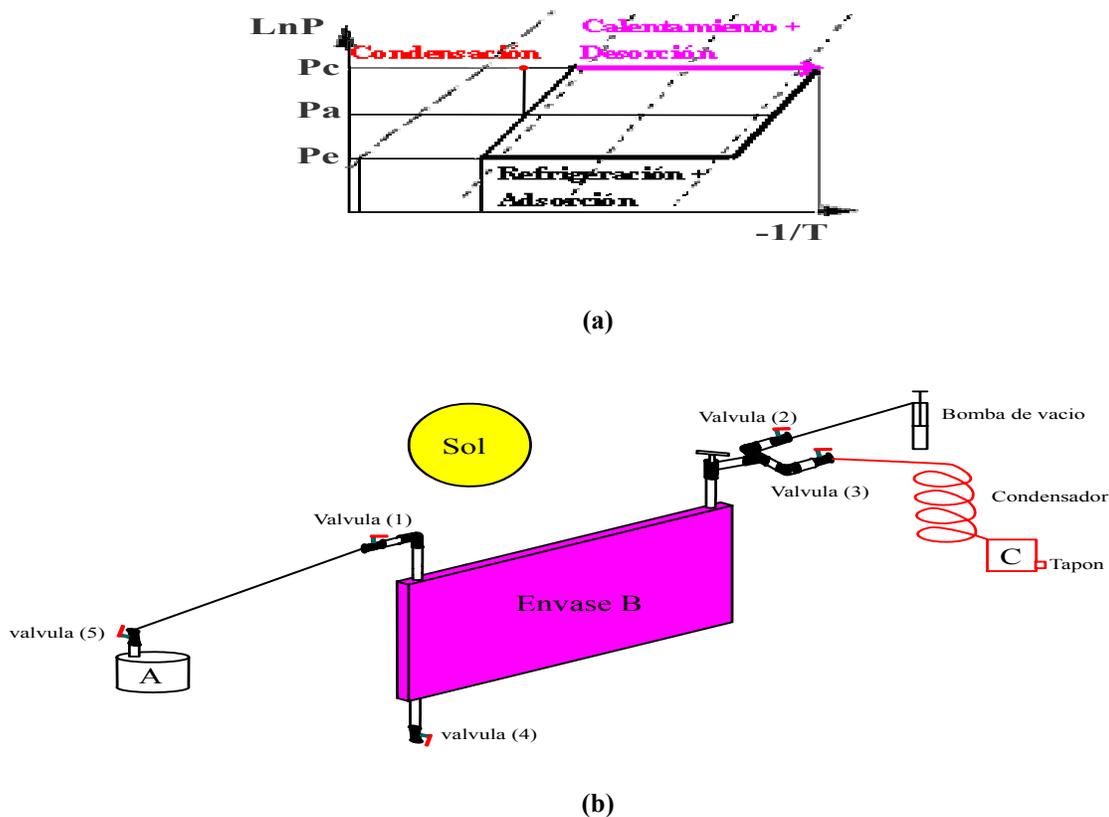


Figura 4. Ciclo cerrado, (a) Ciclo termodinámico, (b) Prototipo del ciclo.

Básicamente, el ciclo es intermitente porque el hielo producido no es continuo: la producción de hielo sólo se logra durante parte del ciclo. Cuando hay dos adsorbentes en la unidad, ellos pueden ser operados fuera de fase y la producción de hielo sería casi-continua. Cuando toda la energía requerida para calentar el adsorbente es suministrada por la fuente de calor, el término del ciclo es **ciclo de efecto simple**. Típicamente, para condiciones de refrigeración doméstica, el coeficiente de performance (COP) oscila alrededor de 0.3-0.4.

Cuando hay dos adsorbentes o más, otros tipos de ciclos pueden ser procesados. En ciclos de doble efecto o en ciclos con regeneración de calor, algo de calor puede ser recuperado internamente entre los adsorbentes, lo que mejora el performance del ciclo. (PONS, 2002)

3.2 Adsorción:

El uso de sólidos para sustraer sustancias tanto de soluciones líquidas como gaseosas ha sido ampliamente usado desde hace mucho tiempo. Este proceso, conocido como adsorción, implica nada más que la partición preferencial de sustancias, desde las fases gaseosas o líquidas sobre un sustrato de superficie sólida. Desde aquellos días donde se usaba la asistencia del hueso para la decoloración de soluciones, de azúcar y otros alimentos, a la implementación de carbono activado para la remoción de gases desde el campo de batalla, hasta las miles de aplicaciones que existen hoy, el fenómeno de adsorción se ha vuelto una herramienta útil para la purificación y la separación.

El fenómeno de Adsorción es más operativo en sistemas naturales físicos, biológicos, y químicos, y las operaciones de adsorción empleando sólidos tales como carbono activado y resinas sintéticas son usadas ampliamente en aplicaciones industriales, para purificación de aguas y aguas residuales.

El proceso de adsorción implica la separación de una sustancia desde una fase, acompañada por su acumulación o concentración en la superficie de otra. La fase de adsorción es el adsorbente, y el material concentrado en la superficie de esa fase es el adsorbido. Adsorción es así diferente de absorción, debido a que en este último proceso el

material transferido desde una fase a otra (Ej. líquido) interpenetra la segunda fase para formar una "solución". El término sorción es una expresión general abarcando ambos procesos.

La adsorción física es causada principalmente por las fuerzas de van der Waals y las fuerzas electrostáticas entre moléculas adsorbidas y los átomos que componen la superficie del adsorbente. Así el adsorbente es caracterizado primero por sus propiedades superficiales tales como área superficial y polaridad.

Un área de superficie específica grande es preferible para proveer una gran capacidad de adsorción, pero para la creación de un área de superficie interna grande en un volumen limitado inevitablemente da cabida a un gran número de pequeños poros entre la superficie de adsorción. El tamaño de los micro poros determina la accesibilidad de las moléculas adsorbidas a las superficies internas de adsorción, así la distribución del tamaño de poro de los micro poros es otra propiedad importante para caracterizar la adsorbibilidad del adsorbente. Especialmente materiales tales como zeolita y tamices de carbono molecular pueden ser específicamente diseñados con una distribución precisa del tamaño del poro y de aquí afinados para una separación particular.

La polaridad superficial corresponde a la afinidad con sustancias polares tales como agua o alcoholes. Los adsorbentes polares son llamados "hydrophilic" y ejemplo de estos adsorbentes son los aluminosilicatos tales como las zeolitas, aluminas porosas, sílica gel o sílica-alumina. Por otra parte, los adsorbentes no polares son generalmente llamados "hydrophobic" ejemplo de estos adsorbentes son los Carbonaceous adsorbentes, polímeros adsorbentes y silicalite. Estos adsorbentes tienen más afinidad con los aceites o hidrocarburos que con el agua. (SLEJKO y DEKKER, 1985)

3.3 Zeolita:

Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos, que al deshidratarse desarrollan en el cristal ideal una estructura porosa con diámetros de poro de 3 a 10 \AA , con una área de la superficie interna de más de

1000 m²/g, campos electrostáticos fuertes en la estructura y con una densidad volumétrica de aproximadamente 0.8 kg/dm³.

También se dice, que una zeolita es un mineral aluminosilicato cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento que permiten el cambio iónico y la deshidratación reversible.

Las zeolitas están compuestas por aluminio, silicio, sodio, hidrógeno, y oxígeno. La estructura cristalina está basada en las tres direcciones de la red con SiO₄ en forma tetraédrica con sus cuatro oxígenos compartidos con los tetraedros adyacentes. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.

Las Zeolitas no son venenosas, ni inflamables, están naturalmente disponibles en abundancia y son por consiguiente compatibles con el ambiente. Más de 40 Zeolitas naturales y 100 Zeolitas sintéticas son conocidas.

La propiedad más importante de algunas Zeolitas es su habilidad para la adsorción reversible de agua. Incluso después de varios miles de ciclos de adsorción / desorción los cambios estructurales de la estructura cristalina son insignificantes si los parámetros del proceso (presión y temperatura) no exceden de ciertos límites. (ALFARO y BISSESAR, Tesis Ing. 2001) (Ver apéndice A)

3.4 Procesos de adsorción y desorción de la zeolita

La Zeolita mineral tiene la propiedad de atraer (adsorber) el vapor de agua y de incorporarlo en el interior de su red cristalina mientras desprende calor.

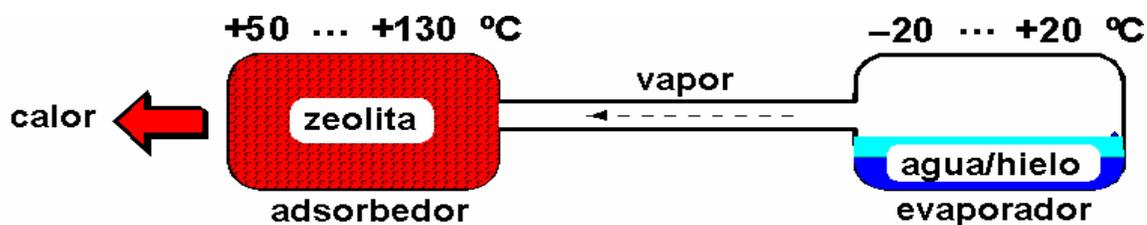


Figura 5. Adsorción de la Zeolita

Si este proceso de adsorción se realiza en un ambiente al vacío (sin aire) la atracción de agua por la zeolita es tan poderosa que la presión interior cae drásticamente. El agua restante en un recipiente acoplado se evapora, se enfría y se congela inmediatamente debido al calor de evaporación. El hielo resultante puede usarse para enfriar, mientras el calor producido en el tanque de zeolita puede utilizarse para calentar. Si se incluye una válvula entre los dos recipientes, el calor o frío producido puede interrumpirse para cualquier período sin la pérdida de energía.

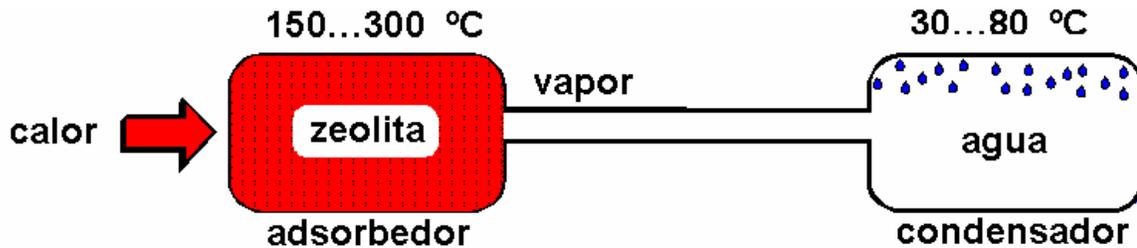


Figura 6. Desorción de la Zeolita

La primera fase de este proceso procede al punto cuando la zeolita se satura con el agua. El proceso inverso se comienza calentando la zeolita a altas temperaturas en la segunda fase. Las moléculas de agua adsorbidas son forzadas a evaporarse (Desorción).

La Condensación tiene lugar en el tanque de agua (el condensador). La sucesión de procesos de adsorción/desorción es completamente reversible y puede repetirse indefinidamente.

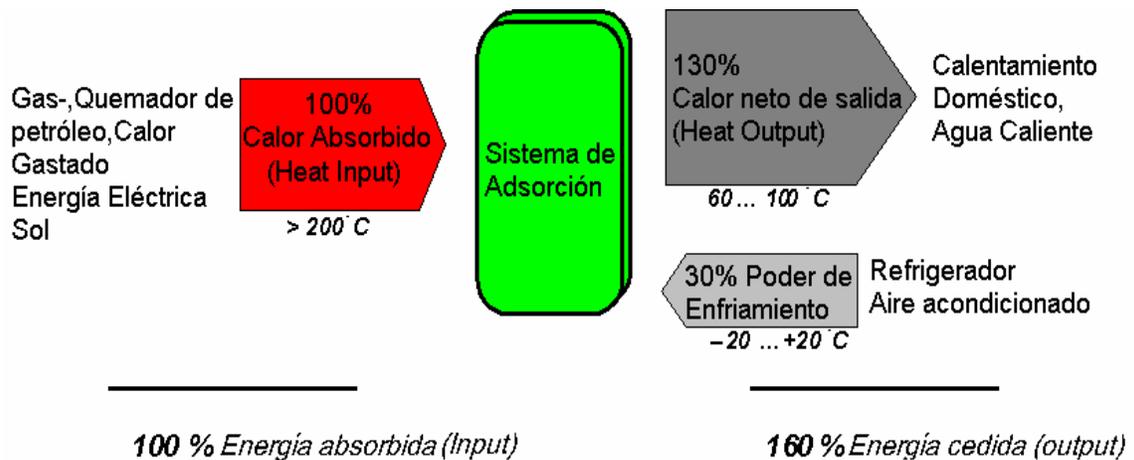


Figura 7. Energía involucrada en el proceso

Un poder refrigerante casi continuo es realizado si dos o más de estos dispositivos de adsorción se operan de una manera alternada. La regeneración puede realizarse con energía eléctrica con el calor del proceso de combustión o incluso con colectores solares (dependiendo de la perspectiva de uso de energía primaria).

Como muestra la figura 7, la fuente de energía es el calor (100%) que recoge un 30% adicional del poder refrigerante neto y así proporciona un poder de calefacción neto utilizable de 130% como resultado total de la conversión del ciclo. Si este sistema es aplicado en un modo dual de calentamiento y enfriamiento en paralelo, el efecto total neto suma a 160% del calor suministrado de 100%, alcanzado un rendimiento calorífico de 130% y un poder refrigerante 30%.

Incluso con el calentamiento eléctrico, un sistema de adsorción proporciona ahorros considerables de energía y una reducción correspondiente de anhídrido carbónico. Con otras fuentes de calor de entrada, el ahorro de energía es mucho más alto, con los correspondientes beneficios ambientales. Incluso el uso de un sistema unitario, utilizando sólo calentamiento o sólo enfriamiento, es comparable o mejor (con respecto a la utilización de energía) que cualquier tecnología convencional. . (ALFARO y BISSESAR, Tesis Ing. 2001)

3.5 Vacuna

“Es cualquier preparación antigénica, constituida por microorganismos, administrada con el fin de estimular los mecanismos de defensa específicos del individuo contra un(os) determinados patógenos

Dependiendo del microorganismo, se disponen de vacunas elaboradas a partir de bacterias, rickettsias o virus.” (ROIA, 1995) (Ver apéndice A)

CAPITULO IV

Diseño del Prototipo

Para la creación del prototipo se realizó un diseño preliminar, estableciéndose las condiciones de funcionamiento y las características del medio en el cual operará el equipo, con el fin de determinar las dimensiones y componentes adecuados para lograr el objetivo del diseño, el cual es congelar agua para refrigerar medicamentos (vacunas) que están en un rango de temperatura entre 2° C y 8° C.

El diseño consiste en una fase de enfriamiento (adsorción) y calentamiento (desorción).

En la fase de adsorción se congeló un determinado volumen de agua; este hielo se usó para formar un ambiente adecuado a las especificaciones requeridas por las vacunas. Luego se calculó la cantidad de zeolita en función del vapor de agua.

Finalmente para la fase de desorción se calculó el calor promedio para calentar la zeolita a 120° C durante 6 horas para deshumidificarla. Luego de haberse realizado los cálculos, se acotó definitivamente las características del equipo.

4.1 Diseño preliminar del prototipo.

Como punto de partida proponemos el siguiente diseño del prototipo, que finalmente será modificado de acuerdo a los cálculos y análisis elaborados en el desarrollo de este capítulo.

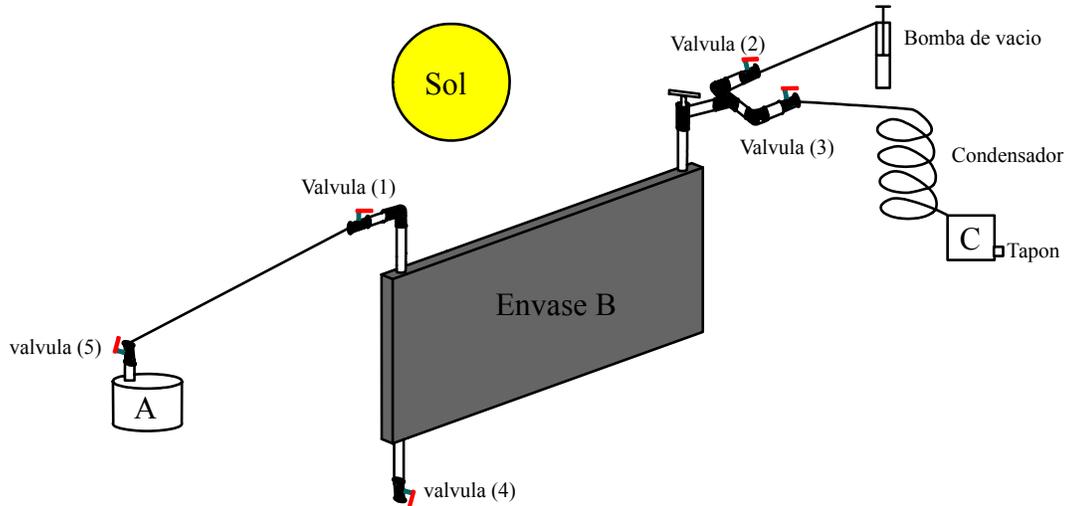


Figura 8. Diseño inicial del prototipo

El sistema propuesto opera de la siguiente manera:

El funcionamiento comienza con la fase de enfriamiento, creando una presión baja en el sistema mediante la bomba de vacío, entonces el agua contenida en un tubo de cobre en el centro del envase, comienza a enfriarse hasta congelarse. El hielo producido es utilizado para mantener refrigeradas las vacunas, al realizar esto, parte del agua contenida en el dispositivo de enfriamiento se evapora, este vapor viaja hasta el recipiente que contiene la Zeolita, donde es adsorbido por la misma.

La fase de desorción se inicia cerrando la válvula triple 1 para conducir el vapor por la salida correspondiente como se aprecia en la figura 8 (cerrando el paso hacia el dispositivo de enfriamiento), y teniendo la válvula 2 cerrada para evitar el paso de vapor hacia la bomba para comenzar el calentamiento. Con el concentrador solar se calienta la Zeolita que está distribuida en el centro del mismo, garantizando de esta manera un calentamiento uniforme, que proporcione una efectiva desorción del vapor de agua.

Luego el vapor de agua recuperado durante la fase de desorción es condensado y reutilizado para completar el ciclo, reiniciándose nuevamente el proceso.

4.2 Parámetros para el diseño del evaporador

El sistema se diseño para un ambiente de Ciudad (Caracas) en donde las condiciones climáticas son las siguientes:

Temperatura ambiente = 300 K (27 °C)

Presión atmosférica = 91.929 KPa

Temperatura inicial de los medicamentos a refrigerar = 276 K (3 °C)

Temperatura de la zeolita = 301K (28 °C)

Gravedad = 9,8091 m/seg²

4.2.1 Selección de los componentes del evaporador

Usaremos un termo cilíndrico en donde las características del mismo serán pautadas según los cálculos que se obtengan del diseño como se muestra en la figura 9.

Teniendo como recubrimiento interno acero inoxidable y como recubrimiento externo corcho protegido con pintura negra Parson con las siguientes propiedades (Incropera y DeWitt, 1999, Tablas A.1 Pág. 829, A.3 Pág. 834 y A.11 Pág. 852):

Conductividad térmica del corcho, $K = 0.039$ W/m K

Conductividad térmica del acero inoxidable, $K = 14.33$ W/m K

Emisividad de la pintura negra Parson $\varepsilon = 0.98$

Emisividad del acero inoxidable $\varepsilon = 0.22$

Como aislante, poliestireno expandido (Anime) con la siguiente propiedad:

Conductividad térmica, $K = 0.027$ W/m K

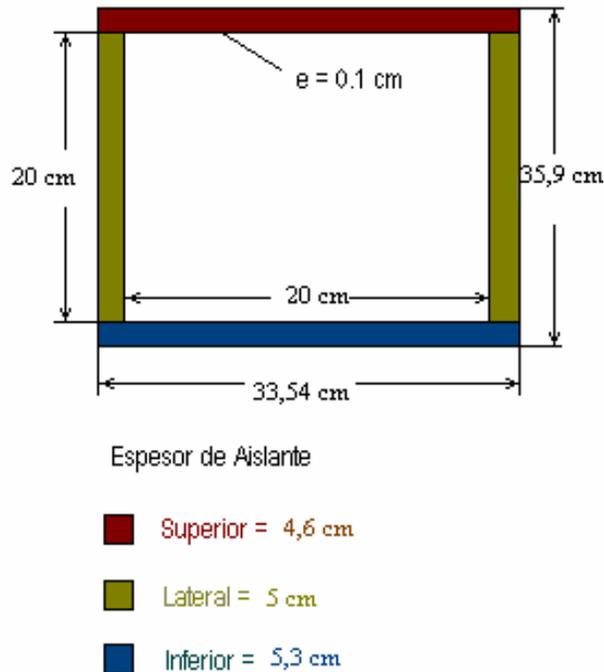


Figura 9. Evaporador

Internamente se tendrá un recipiente cilíndrico de acero inoxidable AISI 304, en la parte del centro del mismo se tendrá un tubo de cobre en donde se formará el hielo, el acero inoxidable tendrá una altura de 20×10^{-2} m, y un diámetro de 20×10^{-2} m y un espesor de pared de 1×10^{-3} m, la tubería de cobre tendrá un diámetro de 1.27×10^{-2} m ($1/2''$) y en la parte superior e inferior de este recipiente tendrán acoplados tuberías de 0.635×10^{-2} m ($1/4''$) de cobre, la cual sobre saldrán de las tapas del termo y estarán acopladas a unas válvulas de globo 0.635×10^{-2} m ($1/4''$), con el fin de mantener el vacío dentro del recipiente con hielo.

4.2.2 Cálculo de la Carga Térmica de enfriamiento:

- **Condiciones internas:**

Para el diseño del envase se tomó en cuenta el siguiente escenario:

- Las vacunas deben de estar en un rango de temperatura de entre 2°C y 8°C .

- Se supone régimen permanente.
- Se desprecia la curvatura del cilindro para el cálculo de la carga térmica.
- Se considera que el tubo de cobre está totalmente lleno.
- Se desprecia la resistencia térmica de la tubería de cobre.
- Se desprecia la resistencia térmica del acero inoxidable.
- La altura del envase es de 20×10^{-2} m
- El diámetro interno del envase es de 20×10^{-2} m
- La temperatura ambiente interna es de 276 K (3 °C).
- Se consideran superficies Isotérmicas.

Para los cálculos de la carga térmica de enfriamiento determinaremos las pérdidas de todas las superficies del termo de la siguiente manera:

Partiendo de las condiciones antes señaladas, y de un procedimiento de cálculo iterativo determinaremos el coeficiente convectivo promedio del ambiente interno, luego se calculará el valor de la tasa de flujo de calor q_1 (ver ecuación 15), con este valor se determinarán las temperaturas en cada uno de los nodos, con el fin de determinar la temperatura de la pared externa y en consecuencia el coeficiente convectivo externo promedio, seguidamente se comprobará la temperatura del ambiente externo T_{oo2} , finalmente usando un criterio de convergencia se calcula el error relativo entre T_{oo} y T_{oo2} , si este es menor del 1% se detiene la iteración tomando este valor como el valor definitivo de la temperatura ambiente externa, si no es menor del 1% se usa un promedio para calcular el valor de temperatura promedio o de película de la siguiente iteración utilizando la ecuación (9), y a continuación se repetirá el proceso iterativo.

4.2.2.1 Cálculo del calor perdido en el evaporador

Para realizar una aproximación de este proceso se considera un sistema de conducción unidimensional en estado estable con convección libre.

Se emplearán correlaciones empíricas (Incropera y DeWitt, 1999), para calcular el coeficiente convectivo promedio, en forma general se utilizará la ecuación:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} L}{k} = C Ra_L^n \quad (6)$$

Donde \overline{Nu}_L es el número de Nusselt, este proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie, \bar{h} es el coeficiente convectivo promedio, L es una longitud característica, k es el coeficiente de conductividad térmica, C es un valor constante y Ra_L es el número de Rayleigh éste es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de empuje con las fuerzas viscosas en el fluido cuya fórmula es:

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (7)$$

Donde g es la gravedad, L es la longitud característica de la geometría dada, ν la viscosidad cinemática, α la difusividad térmica que representa la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía térmica, T_s la temperatura de la superficie, T_∞ la temperatura del medio convectivo, β el coeficiente volumétrico de expansión térmica, para líquidos y gases no ideales β se debe obtener de las tablas de propiedades adecuadas, para un gas ideal es:

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (8)$$

T_m es la temperatura media o de película y se calcula como un promedio entre T_s y T_∞ , esto se hace debido a que las propiedades del fluido varían con la temperatura a través de la capa límite, por tanto esta variación influye en la transferencia de calor.

$$T_m \equiv \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (9)$$

Superficies laterales del evaporador:

— Cálculo del coeficiente convectivo promedio interno

Se supone un valor de temperatura ambiente interna $T_o = 276 \text{ K}$ ($3 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos la temperatura media entre el medio ambiente (T_o) y la superficie del tubo de cobre $T_s = 273 \text{ K}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), mediante la ecuación (9). (De la tabla A.4 para aire, del Incropera y De Witte, 1999) [1], a T_m obtenemos las propiedades del aire. Sustituyendo la T_m en la ecuación (8) se tiene β . Luego con la ecuación (7) calculamos Ra_L .

Para la convección libre en placas verticales con $Ra_L \leq 10^9$ empleamos la ecuación, (Incropera y DeWitt, 1999):

$$\bar{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (10)$$

Luego mediante esta ecuación se obtiene \bar{Nu}_L y sustituyendo en la ecuación (6), tenemos \bar{h}_i

— Cálculo del coeficiente de radiación.

Para nuestro caso el intercambio de radiación ocurre entre una superficie pequeña a T_s (temperatura superficial), y una superficie isotérmica ($T_{\text{ambiente}} = T_\infty$) mucho más grande que rodea por completo la pequeña (ambiente).

$$q_{\text{radiacion}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{ambiente}}^4) \quad (11)$$

Con el propósito de linealizar la expresión para calcular el calor por radiación se utiliza el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r .

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{\text{ambiente}})(T_s^2 + T_{\text{ambiente}}^2) \quad (12)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), ε es la emisividad de la superficie

Este cambio facilita el cálculo al obtener la expresión:

$$q_{\text{radiacion}} = h_r A (T_s - T_{\text{ambiente}}) \quad (13)$$

donde A es el área de la superficie en contacto con el ambiente.

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Para calcular la transferencia de calor la ecuación apropiada es:

$$q_{\text{conveccion}} = \bar{h} A (T_s - T_{\infty}) \quad (14)$$

Donde \bar{h} es el coeficiente convectivo promedio, A es la superficie en contacto con el ambiente.

Sumando las ecuaciones (13) y (14) se obtiene el calor entre T_s y T_{∞} .

$$q_1 = q_{\text{conveccion}} + q_{\text{radiacion}} \quad (15),$$

— **Comprobación de la temperatura ambiente interna y externa.**

Partiendo del circuito análogo de la figura 10 y bajo las condiciones mencionadas inicialmente planteamos la ecuación de calor a través de las resistencias de la siguiente manera:

$$q = \frac{T_{\text{interno}} - T_{\text{externo}}}{\sum_{\text{interno}}^{\text{externo}} R_{\text{total}}} \quad (16)$$

Donde $\sum R_{\text{total}}$ es la suma de cada una de las resistencias presentes, si $T_{\text{externo}} > T_{\text{interno}}$ se invierte el orden de estos parámetros, para obtener un valor positivo, recordando que la dirección del flujo de calor es hacia adentro.

Para la resistencia por conducción en pared plana se tiene:

$$R_{\text{conduccion}} = \frac{\Delta X}{kA} \quad (17)$$

Donde ΔX es el espesor del material, k es la conductividad térmica y A es el área transversal.

La resistencia por convección en pared plana es:

$$R_{\text{conveccion}} = \frac{1}{\bar{h}A} \quad (18)$$

Donde \bar{h} es el coeficiente convectivo promedio (en el caso de considerar la radiación se suma el h_r correspondiente con el \bar{h}), A es el área de la superficie que convecta.

Usando la ecuación (16) y con la resistencia por convección se despeja la temperatura ambiente interna y se comprueba que es igual a la supuesta. Luego se plantea la ecuación (16) para cada material sustituyendo en ella la ecuación (17), de esta expresión se despeja la temperatura en cada nodo (ver figura 10), hasta llegar a la temperatura T_4 , con esta temperatura y la temperatura ambiente externa (T_{∞}), se calcula la temperatura promedio o de película y luego todas las propiedades del aire. Con la ecuación (10), sustituyéndola en la ecuación (6) tenemos el coeficiente convectivo externo \bar{h}_e . Utilizando la ecuación (12) obtenemos el coeficiente de transferencia de calor por radiación externo h_r , con estos coeficientes, utilizándolos en la ecuación (16), con la resistencia por convección y q_1 , se despeja la temperatura ambiente externa y se comprueba que es igual a la supuesta.

Comparando T_{∞} deseada y T_{∞} comprobada se tiene el error relativo:

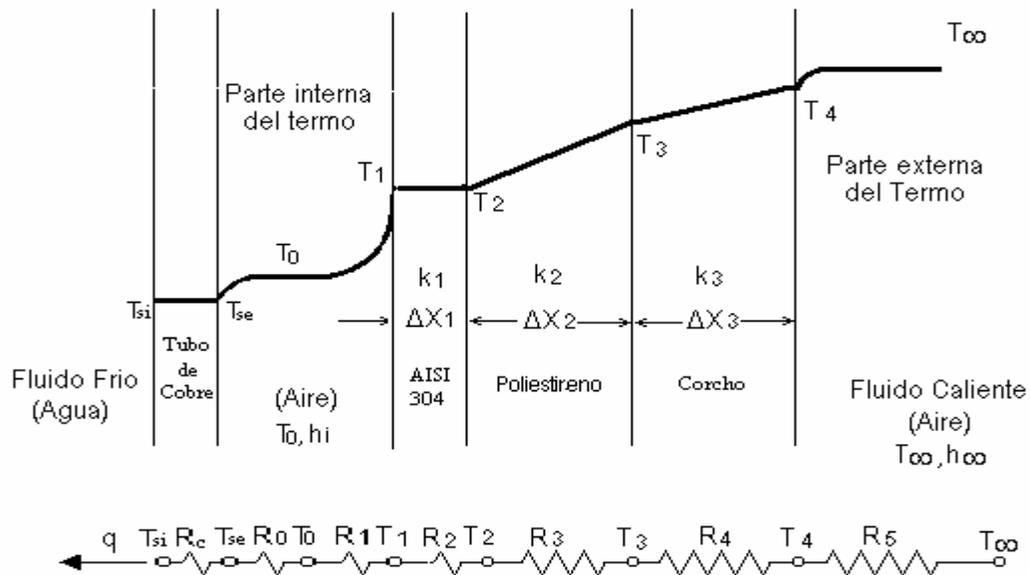


Figura 10. Circuito Térmico análogo para pared Plana (superficie Lateral)

Se desprecian las resistencias térmicas R_c y R_2 , por lo que $T_{si} = T_{se} = T_s$ y $T_1 = T_2$

Luego de todos estos cálculos los resultados obtenidos son los siguientes:

T_s	273 (K)
T_o	276 (K)
T_m	274,5 (K)
L	0,2 (m)
K	2,426E-02 (W / m * K)
ρ_r	0,7136
ν	1,362E-05 (m ² / s)
α	1,913E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_1	0,03
β	0,00364 (K ⁻¹)
R_{aL}	3291084,856
N_{ul}	22,5955
h_i	2,74084 (W / m ² * K)
h_r	0,14073 (W / m ² * K)
h_{total}	2,88158 (W / m ² * K)
q_1	0,036498 (W)
R_0	82,1959 (K / W)
T_o	276 (K)
R_1	82,1959 (K / W)
T_1	279 (K)
Δx_1	0,05 (m)
K_2	0,027 (W / m * K)
R_3	438,6187246 (K / W)
T_3	295,0087 (K)
Δx_2	0,0177 (m)
K_3	0,039 (W / m * K)
R_4	107,4953274 (K / W)
T_4	298,9321 (K)
T_{oo}	300 (K)
T_m	299,4660 (K)
K	2,626E-02 (W / m * K)
ρ_r	0,70713
ν	1,584E-05 (m ² / s)
α	2,243E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_2	0,98
β	0,003339 (K ⁻¹)
R_{aL}	787541,4727

N_{ul}	15,9923
h_e	2,0995 (W / m ² * K)
h_r	5,9691 (W / m ² * K)
h_{total}	8,0687 (W / m ² * K)
R_5	29,3545 (K / W)
T_{oo2}	300,0035 (K)
E	0,001182 %

Tabla 1. Resultados de la superficie lateral del evaporador

- **Cálculo del calor perdido en las placas superior e inferior del evaporador**

Placa superior:

- **Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo**

Se comienza el diseño suponiendo un valor de temperatura superficial externa $T_s = 298$ K (25 °C), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞). (De la tabla A.4 para aire, del Incropera y DeWitt, 1999), a T_m obtenemos las propiedades del aire. Sustituyendo la T_m en la ecuación (8) se tiene β . Luego con la ecuación (7) calculamos Ra_L .

Luego para una placa horizontal circular de superficie inferior de placa fría o una superficie superior de placa caliente, tenemos que para valores de $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$, el Nusselt viene dado por, (Incropera y DeWitt, 1999):

$$\bar{Nu}_L = 0.54 \times (Ra_L)^{1/4} \quad (10)$$

De la ecuación (6) para una geometría circular $L = \text{área superficial} / \text{perímetro}$. Se sustituyen los demás valores y se despeja el coeficiente convectivo promedio \bar{h}_e .

— **Cálculo del coeficiente de radiación.**

De la ecuación (12) con $T_s = 298 \text{ K}$ y $\varepsilon = 0.98$ se obtiene \bar{h}_r .

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Sumando las ecuaciones (13) y (14) se obtiene el calor q_1 entre T_s y T_∞ .

— **Comprobación de la temperatura ambiente externa e interna.**

Primero se plantea la ecuación (16) y se comprueba la T_{∞} , luego se calcula el resto de las temperaturas sustituyendo en ella la ecuación (17), de esta expresión se despeja la temperatura en cada nodo (ver figura 11). Después se promedia T_2 y la temperatura interna deseada en el termo ($T_o = 276 \text{ K}$), con esto se calculan todas las propiedades del aire y se comprueba que la temperatura deseada en el termo es de $T_o = 276 \text{ K}$.

Comparando T_o deseada y T_o comprobada se tiene el error relativo.

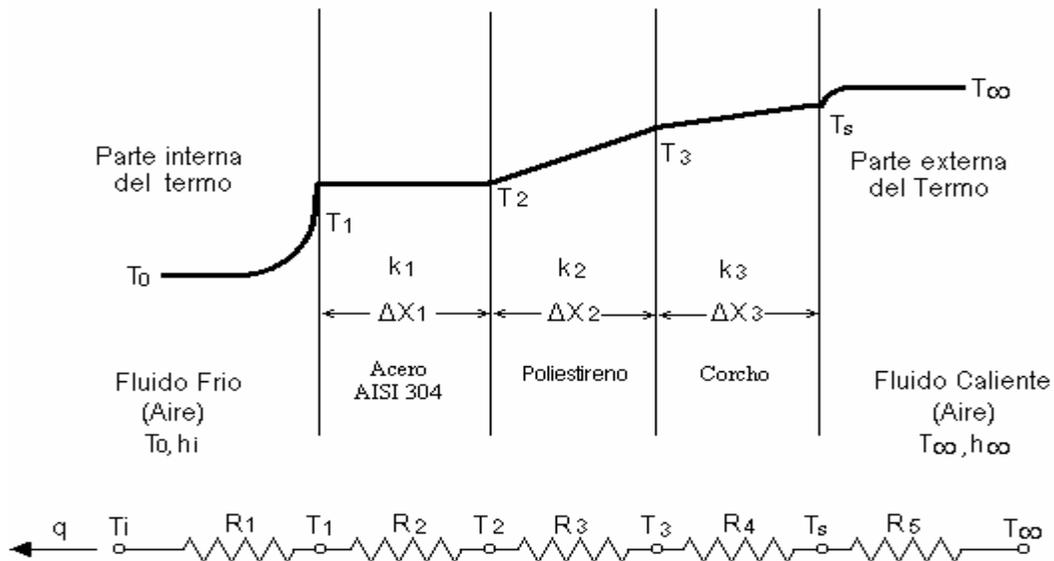


Figura 11. Circuito Térmico análogo para pared Plana (Placa Superior y Placa Inferior)

Se desprecia la resistencia térmica R_2 , por lo que la temperatura T_2 es igual a T_1 .
Luego de todos estos cálculos los resultados obtenidos son los siguientes:

T_s	299 (K)
T_{oo}	300 (K)
T_m	299.5 (K)
L	0,08385 (m)
K	2,626E-02 (W / m * K)
ρ_r	0,70713
ν	1,585E-05 (m ² / s)
α	2,243E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_1	0.98
β	0,003338 (K ⁻¹)
R_{aL}	54321,1203
N_{ul}	8,2439
h_e	2,5818 (W / m ² * K)
h_r	5,9711 (W / m ² * K)
h_{total}	8,5530 (W / m ² * K)
q_1	0,7556 (W)
R_5	1,3233 (K / W)
T_s	299 (K)
Δx_3	0,026 (m)
K_3	0,039 (W / m * K)
R_4	7,5455 (K / W)
T_3	293,2979 (K)
Δx_2	0,046 (m)
K_2	0,027 (W / m * K)
R_3	19,2831 (K / W)
T_2	278,7261 (K)
T_o	276 (K)
T_m	277,3630 (K)
K	2,454E-02 (W / m * K)
ρ_r	0,7127
ν	1,393E-05 (m ² / s)
α	1,9598E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_2	0.22

β	0,0036053 (K ⁻¹)
R_{aL}	2,082E+05
N_{ul}	11,5345
h_i	3,3759 (W / m ² * K)
h_r	1,0646 (W / m ² * K)
h_{total}	4,4405 (W / m ² * K)
R_1	2,5488 (K / W)
T_o	276,80 (K)
E	0,2898 %

Tabla 2. Resultados de la placa superior del evaporador

Placa inferior:

— Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo

Se comienza el diseño suponiendo un valor de temperatura superficial externa $T_s = 298$ K (25 °C), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞). (De la tabla A.4 para aire, del Incropera y De Witte, 1999), a T_m obtenemos las propiedades del aire. Sustituyendo la T_m en la ecuación (8) se tiene β . Luego con la ecuación (7) calculamos R_{aL} .

Luego mediante la ecuación de \overline{Nu}_L para superficie inferior de placa caliente o superficie superior de placa fría, (Incropera y DeWitt, 1999).

$$\overline{Nu}_L = 0.27 \times (Ra_L)^{1/4} \quad (21)$$

De la ecuación (6) para una geometría circular $L = \text{área superficial} / \text{perímetro}$, y para una geometría cuadrada $L = \text{altura}$. Se sustituyen los demás valores y se despeja el coeficiente convectivo promedio \overline{h}_e .

— **Cálculo del coeficiente de radiación.**

De la ecuación (12) con $T_s = 298 \text{ K}$ y $\varepsilon = 0.98$ se obtiene \bar{h}_r .

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Sumando las ecuaciones (13) y (14) se obtiene el calor q_1 entre T_s y T_∞ .

— **Comprobación de la temperatura ambiente externa e interna.**

Primero se plantea la ecuación (16) y se comprueba la T_{oo} , luego se calcula el resto de las temperaturas sustituyendo en ella la ecuación (17), de esta expresión se despeja la temperatura en cada nodo (ver figura 11). Después se promedia T_2 y la temperatura interna deseada en el termo ($T_o = 276 \text{ K}$), con esto se calculan todas las propiedades del aire y se comprueba que la temperatura deseada en el termo es de $T_o = 276 \text{ K}$.

Comparando T_o deseada y T_o comprobada se tiene el error relativo.

Luego de todos estos cálculos los resultados obtenidos son los siguientes:

T_s	299 (K)
T_{oo}	300 (K)
T_m	299.5 (K)
L	0,08385 (m)
K	2,626E-02 (W / m * K)
p_r	0,70713
ν	1,585E-05 (m ² / s)
α	2,243E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_i	0.98
β	0,003338 (K ⁻¹)
R_{aL}	54321,1203
N_{ul}	4,1219

h_e	1,2909 (W / m ² * K)
h_r	5,9711 (W / m ² * K)
h_{total}	7,2621 (W / m ² * K)
q_1	0,6416 (W)
R_5	1,5585 (K / W)
T_s	299 (K)
Δx_3	0,034 (m)
K_3	0,039 (W / m * K)
R_4	9,8672 (K / W)
T_3	292,6689 (K)
Δx_2	0,053 (m)
K_2	0,027 (W / m * K)
R_3	22,2175 (K / W)
T_2	278,4136 (K)
T_o	276 (K)
T_m	277,206847 (K)
K	2,448E-02 (W / m * K)
p_r	0,7129
ν	1,386E-05 (m ² / s)
α	1,9491E-05 (m ² / s)
σ	5,670E-08 (W / m ² * K ⁴)
ε_2	0.22
β	0,0036074 (K ⁻¹)
R_{aL}	1,864E+05
N_{ul}	11,22
h_i	3,2752 (W / m ² * K)
h_r	1,0628 (W / m ² * K)
h_{total}	4,3381 (W / m ² * K)
R_1	2,60904887 (K / W)
T_o	276,7396 (K)
E	0,2679 %

Tabla 3. Resultados de la placa inferior del evaporador

El diseño cumple con las expectativas de mantener refrigerado los medicamentos, pero se le va a hacer unas modificaciones debido a que el tubo de cobre que está en el medio quita espacio para colocar mayor cantidad de medicamentos, y la forma en que está colocada el agua no permite la adsorción de ella, por lo tanto, se dificulta la refrigeración

de ésta porque primero se iría congelando por capas desde la capa superior hacia el centro, por lo que para cuando se logre congelar el centro habrá pasado mucho tiempo y el esfuerzo para lograr obtener el hielo sería muy grande.

Por lo antes señalado, el nuevo diseño constará en la parte superior e inferior del mismo de dos tubos de cobre en forma de anillo donde se formará el hielo, el acero inoxidable tendrá una altura de 17×10^{-2} m, y un diámetro de 0.2 m y un espesor de pared de 1×10^{-3} m, las tuberías de cobre tendrán un diámetro de 1.27×10^{-2} m ($1/2''$) y el anillo tendrá un diámetro de 18.73×10^{-2} m, estos anillos de cobre están acoplados mediante dos tuberías de cobre, éstas poseen un diámetro de 0.635×10^{-2} m ($1/4''$) y en la parte superior e inferior de este recipiente tendrán acoplados tuberías de 0.635×10^{-2} m ($1/4''$) de cobre, la cual sobre saldrán de las tapas del evaporador y estarán acopladas a unas válvulas de globo 0.635×10^{-2} m ($1/4''$), con el fin de mantener el vacío dentro del recipiente con hielo, como se muestra en la figura 12.

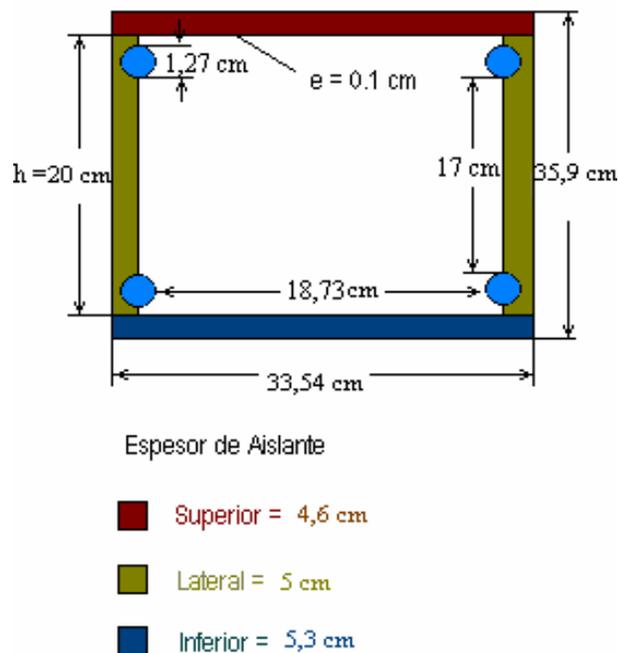


Figura 12. Modificaciones del evaporador

Para modelar este nuevo diseño usaremos la transferencia de calor en superficies extendidas (aleta), tomando en cuenta que es una aleta de área de sección transversal uniforme y con una geometría circular.

Se hará el estudio sólo para la superficie lateral debido a que las placas superior e inferior no presentarán modificaciones en cuanto a su diseño, ni en cuanto a sus condiciones térmicas.

Para el diseño se tomó en cuenta el siguiente escenario:

- Por simetría se asume que $L = h/2$
- Se supone que la pérdida de calor convectiva en el extremo de la aleta (en $x = L$) es cero, debido a la simetría, entonces se trata como adiabático.
- Se supone una conductividad térmica promedio entre el corcho y el poli estireno expandido.
- La temperatura base es conocida $T_b = 273 \text{ K } (0^\circ \text{ C})$.

Para calcular la distribución de temperaturas usamos la ecuación:

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}$$

donde

$$\theta = T - T_{oo}; \quad \theta_b = T_b - T_{oo} \quad \text{y} \quad m = \sqrt{\frac{h * P}{k * A_c}}$$

teniendo como h el coeficiente convectivo promedio externo, k la conductividad promedio entre el poli estireno y el corcho, P es el perímetro de la aleta ($P = \pi * D$) y A_c es

el área de la sección transversal ($A_c = \pi D^2/4$).

Para el cálculo del calor total transferido por la aleta se tiene:

$$q_f = M \tanh mL$$

donde

$$M = \sqrt{hPkA_c} \theta_b$$

Para medir el desempeño térmico de la aleta calculamos la eficiencia de ésta como sigue:

$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$$

donde L_c es la longitud de aleta corregida que viene dada por

$$L_c = L + (D / 4)$$

Luego de todos estos cálculos los resultados obtenidos son los siguientes:

T_{oo}	300 (K)
T_b	273 (K)
h_e	8,0687 (W / m ² * K)
$k_{prom.}$	0,03 (W / m * K)
D	0,3354 (m)
L	0,1 (m)
P	0,42537 (m)
A_c	0,01439 (m ²)
m	2,6741 (m ⁻¹)
θ/θ_b	0,9656

T	273,92 (K)
M	1,0396 (W)
q _f	0,27156 (W)
L _c	0,13385 (m)
η _f	0,959375
η _f	95,9375 %

Tabla 4. Resultados de la superficie extendida (aleta).

4.2.2.2 Cálculo de la carga térmica total

Sumando la tasa de calor que fluye a través del evaporador, obtenemos un total de $q = 1,4337 \text{ W}$, considerando que el líquido se desea mantener refrigerado durante 6 horas tenemos:

$$Q_{\text{total}} = 30969.964 \text{ J}$$

Para efectos de cálculos de refrigeración consideramos un factor de seguridad del 5%.

Por lo tanto el valor final del calor es:

$$Q_{\text{total}} = 30969.964 \text{ J} \times 1.05 = 32518.46 \text{ J}$$

4.2.3 Cálculo de la cantidad de hielo

Para determinar la cantidad de hielo, se usó la entalpía de fusión del hielo $\Delta h_f = 6012.24 \text{ J/mol}$, y el peso molecular del agua = 18 gr/mol como sigue:

$$\text{Masa de agua} = \frac{Q_{\text{total}}}{\Delta h_{f_{\text{Hielo}}}} \times P.M_{\text{Agua}} \quad (30)$$

Masa de agua = 97.35 gr

4.2.4 Cálculo de la cantidad de vapor de agua

Para poder determinar la cantidad de vapor de agua es necesario hacer ciertas consideraciones en cuanto al comportamiento del proceso.

Inicialmente consideramos que si el termo está vacío el calor cedido del recipiente con hielo hacia el termo es despreciable. Tomando como limite de control el recipiente donde se forma el hielo, el trabajo a través del sistema es cero, la velocidad del movimiento del fluido es cero, el cambio de cota es despreciable, y existe cambio de fase, por tanto se usará la ecuación (27) que al multiplicarla por la masa nos queda:

$${}_1Q_2 = m(h_2 - h_1) \quad (31)$$

teniendo la entalpía de fusión del hielo 320.988 KJ/Kg que representa la variación de entalpía y la masa de hielo de $97,35 \times 10^{-3}$ Kg tenemos:

$$Q = 31,248 \text{ KJ}$$

Si extraemos de cierta cantidad de agua este calor en forma de vapor, estaríamos formando hielo. Ahora, conociendo la entalpía de vaporización promedio del agua 2469.44 KJ/Kg entre 27° C y 0° C (ya que son los rangos de temperatura entre los cuales ocurre el proceso), calculamos la masa de vapor mediante la siguiente expresión:

$$\text{Masa de vapor} = \frac{\text{Calor de fusión del hielo}}{\text{Entalpía de vaporización del agua}} \quad (32)$$

$$\text{Masa de vapor} = 12.65 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

Esta cantidad de vapor, mas la cantidad de hielo, nos da la cantidad inicial de agua que se debe colocar en el sistema. Esta es 110×10^{-3} Kg de agua, el porcentaje de agua evaporada es:

$$\% \text{ de vapor de agua} = \frac{\text{Masa de vapor}}{\text{Masa inicial de agua}} \times 100 \quad (33)$$

$$\% \text{ Vapor de agua} = 11,5 \%$$

Con el fin de corroborar el funcionamiento del ciclo teórico y además de comprobar los resultados teóricos obtenidos, se realizó una parte experimental, la cual nos permitirá definir la cantidad de vapor y determinar la relación Zeolita-hielo.

4.3 Parte experimental

- Ensayo de adsorción

Se realizó el montaje con el fin de comprobar los resultados teóricos obtenidos y ver si realmente se puede mantener un ambiente adecuado para refrigerar las vacunas. También para obtener unas curvas del tiempo en que se logra obtener hielo.

- **Componentes**

Para este propósito se realizó la configuración mostrada en la figura 19, la cual consta de los siguientes componentes:

- Una campana de evaporación de plástico (figura 18).
- Bomba de vacío manual con un caudal de 2-3 m³/h, con vacío máximo de 0.2 Kpa, modelo ZT 9705, de Zeo-tech GmbH. (figura 15).

- Mangueras de alta presión 300 Psi (2068427.18 Pa), de diámetros 1/4" (0.635×10^{-2} m) y de 3/8" (0.9525×10^{-2} m) (figura 16).
- Trampa de vapor de Acero, de altura 26 cm (0.026 m), de largo 95 cm (0.095 m) y de ancho 1.8 cm (0.0018 m), distancia del tubo interno de aspiración hasta la base 24 cm (0.024 m), y diámetro de los tubos 0.635 cm (0.635×10^{-2} m), con espesor de pared de 1mm aproximadamente. Temperatura de trabajo 300 K aplicando vacío de 0.9 mbar (0.09 KPa) (figura 14).
- Tamiz Molecular, Zeolita Tipo 4A granulada de 4-8 Mesh (Figura 13).
- Recipiente de plástico (vaso) de diámetro inferior 6 cm (0.06 m), diámetro superior 8 cm (0.08 m) y una altura de 4 cm (0.04 m) (Figura 17).
- Cronómetro.
- Balanza con apreciación de ± 0.01 gr.
- Medidor de Temperatura digital Wadetek meterman 28XT con termopar tipo K, con una apreciación de ± 0.1 °C. (figura 26).



Figura 13. Zeolita 4A



Figura 14. Trampa de Vapor



Figura 15. Bomba de Vacío



Figura 16. Manguera 1/4 ”



Figura 17. Vaso Plástico



Figura 18. Campana Evaporadora

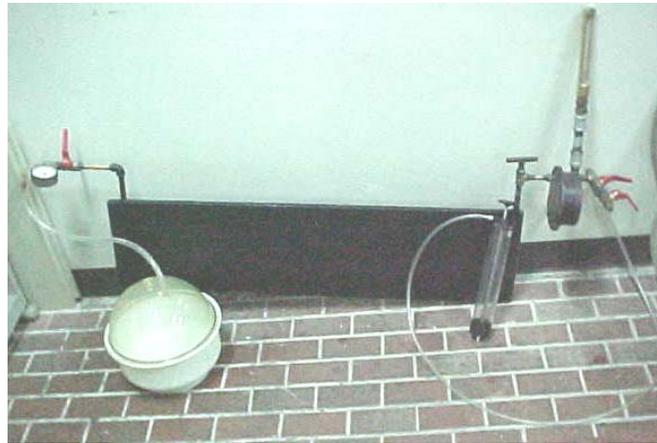


Figura 19. Montaje Experimental



Figura 20. Manómetro de vacío.

▪ **Procedimiento**

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Medimos la masa del vaso de plástico (vacío).
2. Medimos la masa de Zeolita.
3. Colocamos una masa específica de agua en el vaso de plástico.
4. Medimos la temperatura ambiente, la temperatura del agua dentro del recipiente de plástico, y la temperatura de la zeolita.
5. Se introdujo el vaso de plástico con el agua dentro de la campana de evaporación y se selló con grasa para vacío.
6. Acoplamos la bomba de vacío con la trampa de vapor y ésta con la campana de evaporación.
7. Se hizo vacío con la bomba manual en la trampa de vapor, con el fin de comprobar que no existen fugas en este tramo.
8. Al estabilizarse la presión abrimos la válvula de la campana, y comenzamos a cronometrar y medir temperatura.
9. En cada minuto se midió la temperatura y se paró el proceso cuando se formó el hielo (Cuando la temperatura se estabilizó en cero grados centígrados (0°C)).
10. Cerramos la válvula de la campana de evaporación, y procedimos a desacoplar todo el sistema.
11. Abrimos la válvula, medimos la masa del recipiente con hielo.
12. Medimos la temperatura y la masa de la Zeolita.

▪ **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos son reflejados en la siguiente tabla:

Masa del vaso plástico sin Agua = 35.5 gr, (Figura 17).

Prueba N°	Temperatura Ambiente (°C)	Inicial				Final				Tiempo en que se formo el hielo (min)
		Zeolita		Recipiente con Agua		Zeolita		Recipiente con Agua		
		Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	
1	23,5	500,0	23,1	145,5	20,1	508,7	34,1	135,6	0,0	136
2	22,3	500,0	22,6	145,5	22,3	509,1	34,6	135,3	0,0	140
3	24,1	500,0	23,9	145,5	23,5	509,3	35,1	135,4	0,0	150
4	22,8	500,0	23,0	145,5	22,4	508,8	35,5	135,8	0,0	152
5	25,0	500,0	24,6	145,5	23,1	509,6	35,4	134,9	0,0	141
6	23,5	500,0	23,2	145,5	21,5	508,4	36,6	136,2	0,0	148
7	24,3	500,0	24,5	145,5	20,8	509,4	34,3	135,4	0,0	145
8	22,2	500,0	22,0	145,5	22,4	509,0	33,0	135,8	0,0	155

Tabla 5. Resultados experimentales

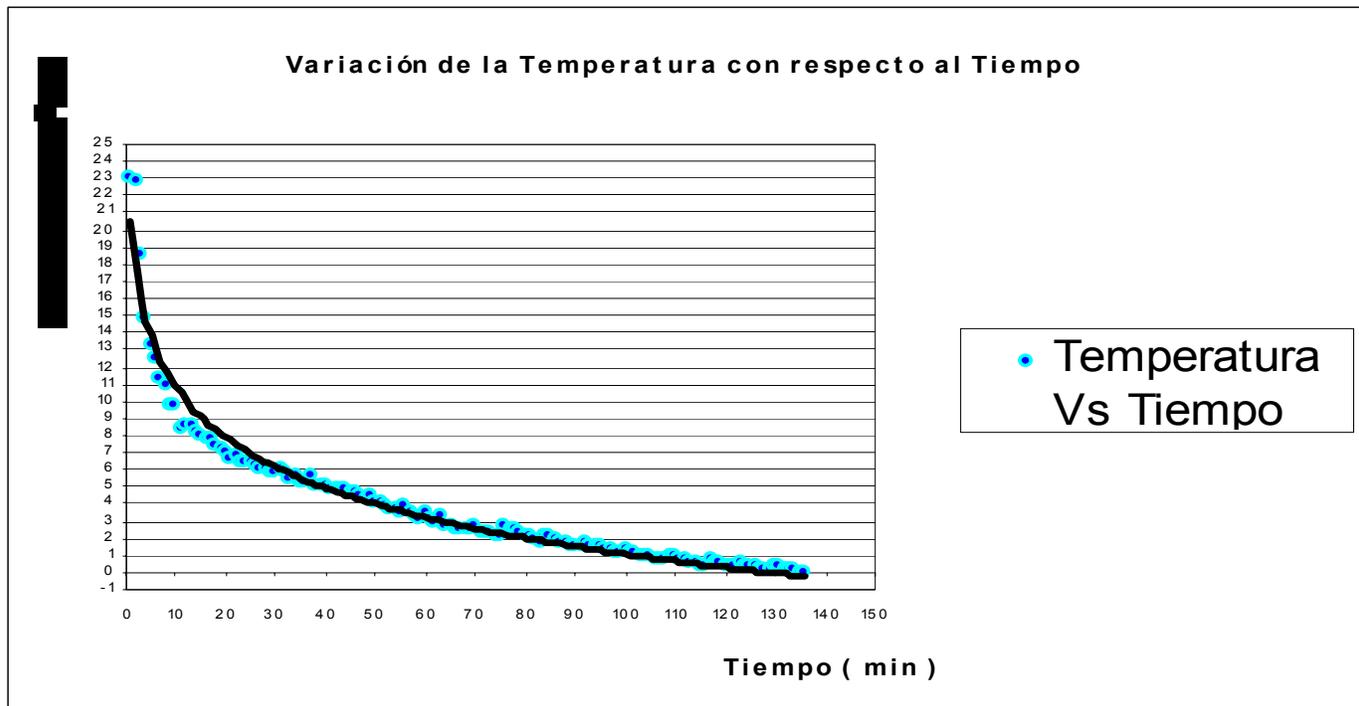


Figura. 21 Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba Manual).

▪ **Cálculo de la cantidad de vapor**

Para obtener la cantidad de vapor extraído de la masa de agua para generar hielo, calculamos la diferencia de masa en el recipiente de plástico, también se calculó la diferencia de masa en el recipiente de Zeolita y se utilizó este último valor como la masa de

vapor generada, ya que durante el proceso se observó una pérdida de agua en el recipiente debido a salpicaduras, esta pérdida se calcula en el siguiente cuadro:

Masa adsorbida por la Zeolita (gr.)	Diferencia de Masa en el agua (gr.)	Pérdidas de Vapor de Agua (gr.)	Pérdidas de Vapor de Agua (%)
8,7	9,9	1,2	12,12
9,1	10,2	1,1	10,78
9,3	10,1	0,8	7,92
8,8	9,7	0,9	9,27
9,6	10,6	1,0	9,43
8,4	9,3	0,9	9,67
9,4	10,1	0,7	6,93
9,0	9,7	0,7	7,21

Tabla 6. Pérdidas de vapor

Cuyo promedio es 0.91 gr (9.17 %)

▪ **Análisis de Resultados:**

Se comprobó que utilizando la bomba de vacío manual se puede bajar la temperatura de la masa total (110 gr.) de agua hasta llegarla a la temperatura de congelación.

El tiempo utilizado para bajar la temperatura del agua es elevado lo que implica el uso de dos o más personas para la utilización de la bomba.

El tiempo en que se logra bajar la temperatura del agua hasta los 0 °C varia respecto a cada ensayo.

Se puede comprobar que el vapor adsorbido por la zeolita para que el agua llegue hasta los 0 °C es mas o menos el mismo sin importar el tiempo.

La zeolita aumenta su temperatura a medida que va adsorbiendo vapor de agua.

La masa de agua que se evapora no es la misma que adsorbe la zeolita.

Se obtuvo un resultado bastante aproximado de la masa de vapor experimental con respecto a la masa de vapor teórica.

Los primeros 15 minutos se experimentó una baja de temperatura brusca y luego los cambios de temperatura son menores.

- **Ensayo de Desorción y Condensación**

- **Componentes**

- Concentrador solar (Figura 22).
- Reloj solar (Figura 23).
- Tubo de cobre de ¼".
- Condensador (Figura 24).
- Envase de condensado de vidrio (Figura 25).
- 4 tapones.
- Termómetro digital (Figura 26).
- Manómetro (Figura 27).



Figura 22. Concentrador solar



Figura 23. Reloj solar.

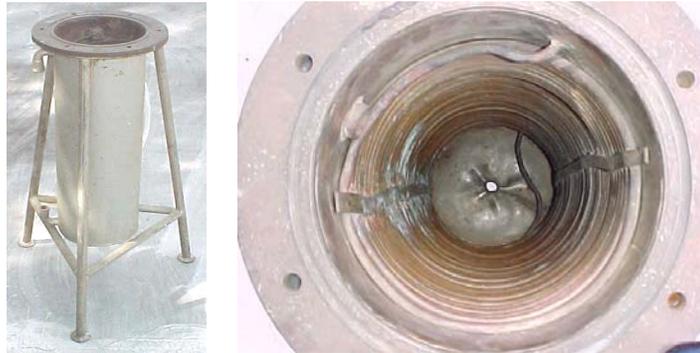


Figura 24. Condensador



Figura 25. Recipiente de condensado.



Figura 26. Termómetro digital.



Figura 27. Manómetro de presión y vacío.



Figura 28. Ciclo de desorción.

▪ **Procedimiento**

1. Medimos la masa de zeolita y la del vaso de condensado (vacío)
2. Se midió la temperatura de la zeolita y la del vaso de condensado

3. Se midió la presión de vapor
4. Se midió la masa de zeolita y la masa del vaso de condensado con el condensado
5. Se midió la temperatura del condensado con la de la zeolita.
6. Se midió el tiempo de recolección de condensado
7. Se dejó enfriar la trampa de vapor.
8. Se puso a calentar la trampa de vapor con las válvulas 1, 2, 3 y 4 cerradas.
9. Cuando se llegó a la temperatura de 120°C y a la presión de 1,9 bar aproximadamente se abrió lentamente la válvula 3 y se dejó abierta para recolectar el condensado.

▪ **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos son reflejados en la siguiente tabla:

Tiempo de condensado 6 hr.

Masa del recipiente de condensado = 350 gr, (Figura 25).

Prueba Nº	Temperatura Ambiente (°C)	Inicial				Final			
		Zeolita		Recipiente sin Condensado		Zeolita		Recipiente con Condensado	
		Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)
1	27,2	508,7	122,7	350	27,2	500,4	30,2	356,4	29,4
2	26,6	509,1	118,2	350	26,6	500,5	31,6	357,1	29,3
3	28,4	509,3	119,4	350	28,4	500,3	35,7	356,7	31,8
4	25,9	508,8	126,9	350	25,9	500,4	33,9	356,3	27,8
5	27,1	509,6	123,1	350	27,1	500,4	32,4	357,4	31,2
6	28,2	508,4	116,3	350	28,2	500,5	38,1	355,4	31,7
7	25,5	509,4	120,6	350	25,5	500,3	34,8	357,3	28,8
8	24,9	509,0	125,5	350	24,9	500,4	33,4	356,4	27,6

Tabla 7. Resultados experimentales

Masa desadsorbida por la Zeolita (gr.)	Masa de condensado (gr.)	Pérdidas de condensado (gr.)	Pérdidas de condensado (%)
8,3	6,4	1,9	22,89
8,6	7,1	1,5	17,44
9,0	6,7	2,3	25,55
8,4	6,3	2,1	25,00
9,2	7,4	1,8	19,56
8,0	5,4	2,6	32,5
9,1	7,3	1,8	19,78
8,6	6,4	2,2	25,58

Tabla 8. Pérdidas de condensado

▪ **Análisis de Resultados:**

Se logró condensar un promedio de 6,625 gr

El promedio de vapor de agua que posee la Zeolita al comenzar el proceso de desorción es de 9,04 gr.

Al desadsorber la Zeolita se encontró que siempre quedaba un remanente de vapor de agua de aproximadamente 4% en la Zeolita.

Se pudo calcular que la pérdida de condensado en la tubería del condensador es de 2,025 gr, lo que corresponde al 23,54 % del vapor total desadsorbido por la Zeolita, y al 27,96% del vapor total adsorbido por la Zeolita.

La temperatura promedio del condensado es de 29,7 °C.

La temperatura en las paredes de la trampa de vapor en el proceso de desorción alcanzó un promedio de 121,6 °C.

- **Ensayo con Bombas Eléctricas**

Estos ensayos se realizaron para tener un patrón de comparación entre el proceso de adsorción utilizando una bomba de vacío manual contra el mismo proceso utilizando diferentes bombas de vacío eléctricas.

- **Componentes**

- Bomba 1 de vacío de 0.35 Kw. de potencia, utiliza 120 Vol.
- Bomba 2 de vacío de 0.75 Kw. de potencia, utiliza 220 Vol. (Figura 29).

Los demás componentes fueron nombrados en el proceso de adsorción.



Figura 29. Bomba Eléctrica 220 Vol.

- **Procedimiento**

El procedimiento utilizado es el mismo que se utilizó en el proceso de Adsorción descrito anteriormente, con la diferencia de que en lugar de conectar la bomba manual, se conectó la bomba eléctrica a la trampa de vapor.

▪ **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos en este proceso se muestran en la siguiente tabla:

Masa del vaso plástico sin Agua = 35.5 gr, (Figura 17).

Prueba N°	Temperatura Ambiente (°C)	Inicial				Final				Tiempo en que se formo el hielo (min)
		Zeolita		Recipiente con Agua		Zeolita		Recipiente con Agua		
		Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	Masa (gr.)	Temperatura (°C)	
Bomba 1	22,5	500,0	22,1	145,5	20,1	509,0	33,1	135,5	0,0	39
Bomba 2	23,6	500,0	22,6	145,5	21,2	512,2	34,3	132,0	-0,2	66
Bomba 2	23,3	500,0	23,1	145,5	22,2	531,3	34,5	112,6	-11,0	360

Tabla 9. Resultados del proceso de Adsorción utilizando Bombas de vacío eléctricas

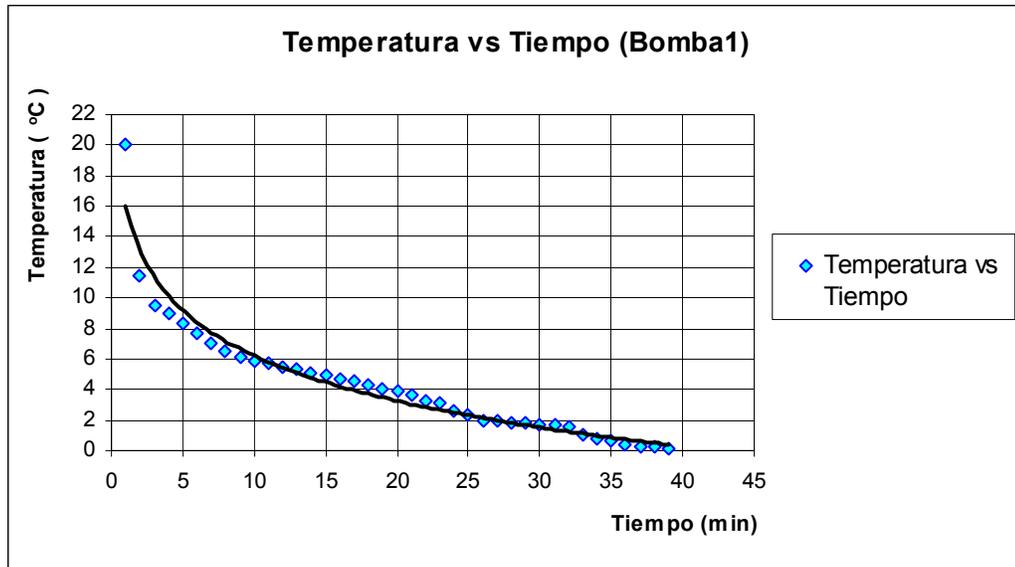


Figura 30. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 1).

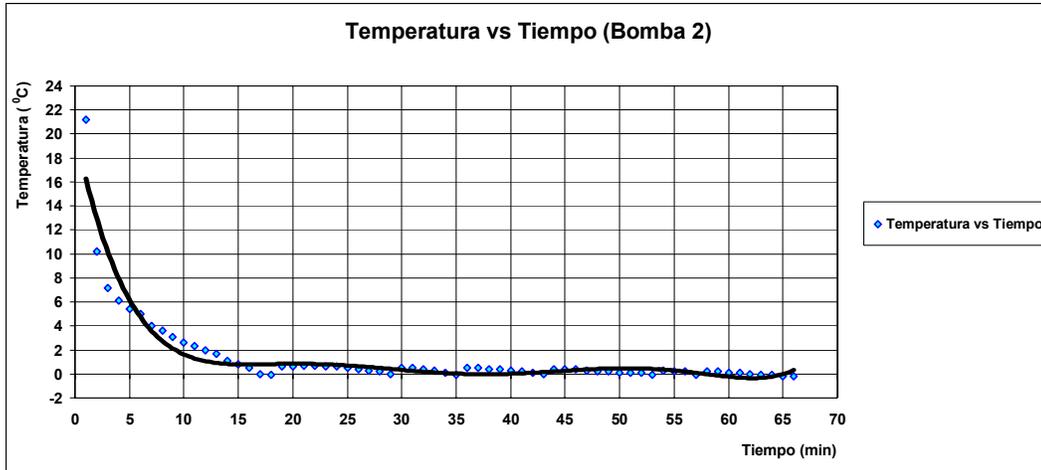


Figura 31. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 2).

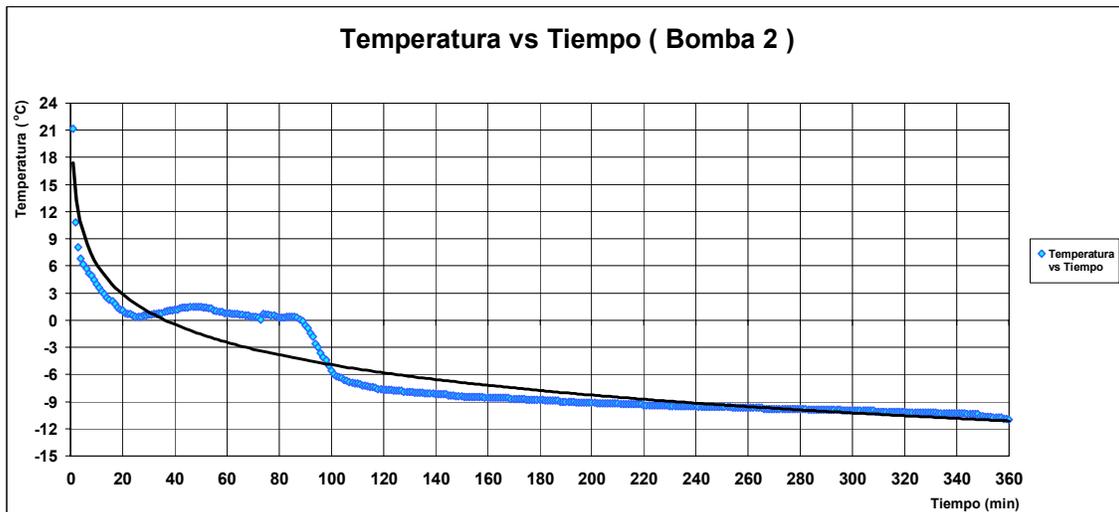


Figura 32. Curva Promedio de Temperatura vs Tiempo (Bomba 2).

4.4 Coeficiente de realización

Para calcular el valor de efectividad del sistema utilizamos el calor calorífico de enfriamiento promedio de la zeolita 390 W / Kg. zeolita (zeo-tech), el trabajo de la bomba, la energía que hay que suministrarle a la zeolita durante el proceso de desorción, y la energía en el proceso de condensación.

$$\text{Coeficiente de realización} = \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

Donde el $Q_{\text{salida}} = ((390 \text{ W/Kg. zeolita}) \times m_{\text{zeolita}}) \times t + W_{\text{Bomba}}$

y el Q_{entrada} es el flujo de calor que hay que suministrarle a la zeolita en 6 horas. El Q_{entrada} va a ser el calor generado en el concentrador solar para llevarlo de 27° C a 120° C , más el flujo de calor necesario para desadsorber la zeolita, más las pérdidas que se tienen en el concentrador solar durante las 6 horas de funcionamiento, más la energía del proceso de condensación, entonces:

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{Tconcentrador}} + Q_{\text{zeolita}} + Q_{\text{pérdidas concentrador}} + Q_{\text{condensación}}$$

donde $Q_{\text{Tconcentrador}}$ y $Q_{\text{pérdidas concentrador}}$ son valores extraídos de (PARRA y PICHARDO, Tesis Ing. 1984), y Q_{zeolita} representa la energía necesaria para extraer el vapor de agua de la estructura de la zeolita y viene dada por :

$$Q_{\text{zeolita}} = \overline{Cp}_{\text{zeolita}} \times m_{\text{zeolita}} \times \Delta T + m_{\text{agua}} \times (\Delta H_{\text{desorcion}} + \overline{Cp}_{\text{agua}} \times \Delta T)$$

empleando la entalpía de desorción ($\Delta H_{\text{desorcion}}$) que representa la energía necesaria para extraer el vapor de agua de la estructura de la zeolita, y considerando sus respectivos calores específicos promedio ($\overline{Cp}_{\text{agua}} = 1948 \text{ J/Kg K}$, $\overline{Cp}_{\text{zeolita}} = 3375 \text{ J/Kg K}$), tenemos:

$$Q_{\text{zeolita}} = 151405,38 \text{ J}$$

y el $Q_{\text{condensación}}$ viene dado por:

$$Q_{\text{condensación}} = m \times \Delta h_{\text{fg}} = 1509,8 \text{ J}$$

Sustituyendo esto en el Q_{entrada} nos queda:

$$Q_{\text{entrada}} = 6954503,103 \text{ J}$$

Entonces el COP es:

$$\text{COP} = \frac{(390\text{W/Kg. zeolita} \times 0,5 \text{ Kg}) \times 21600 \text{ seg.} + 1236,255 \text{ J}}{6954503,103 \text{ J}} = 0,4955$$

Lo cual equivale a un 49,55%.

CAPITULO V

Funcionamiento y Costos

5.1 Diseño final

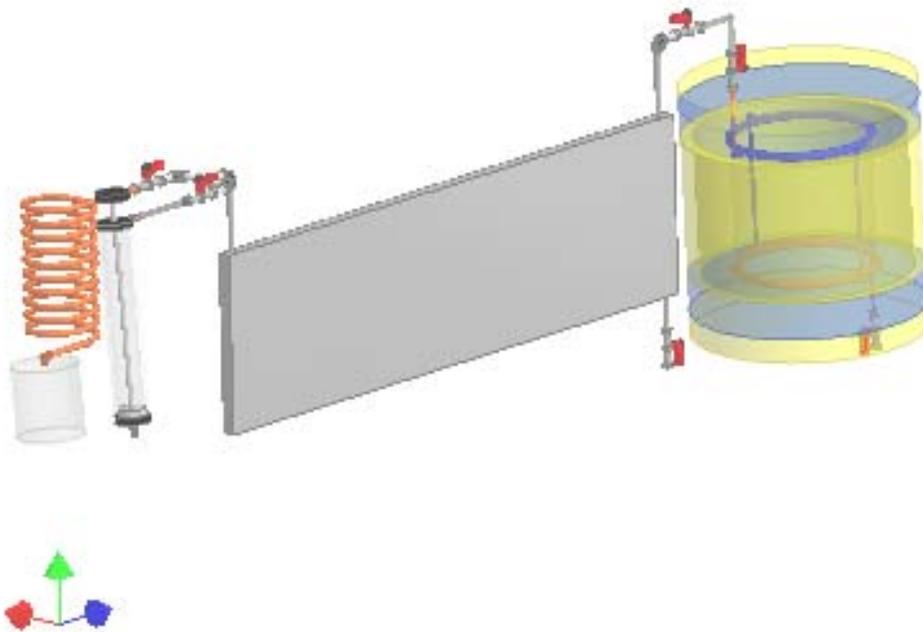


Figura 33. Diseño final

A continuación se muestran por etapas los distintos componentes que conforman el equipo (mayor información ver planos y despiece en el apéndice D).

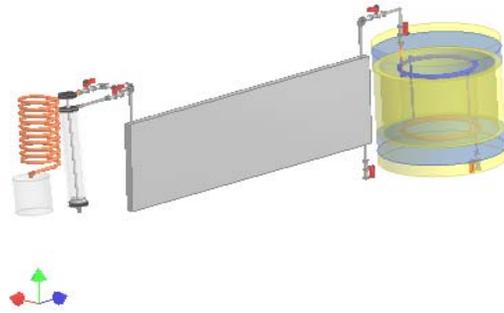


Figura 34.1

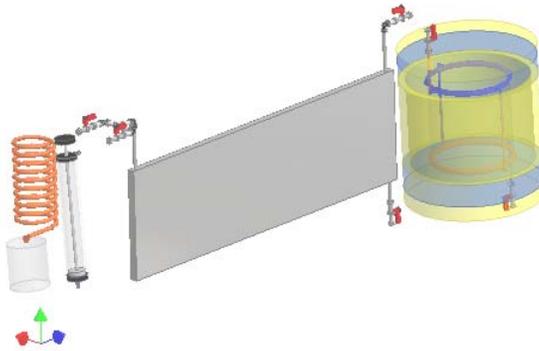


Figura 34.2

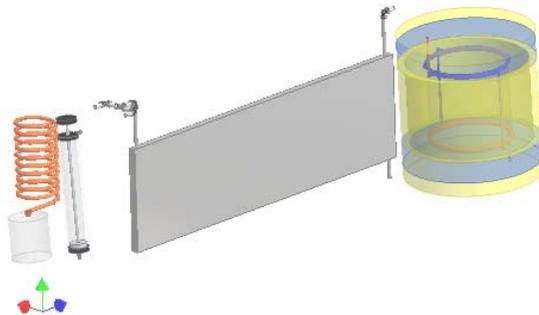


Figura 34.3

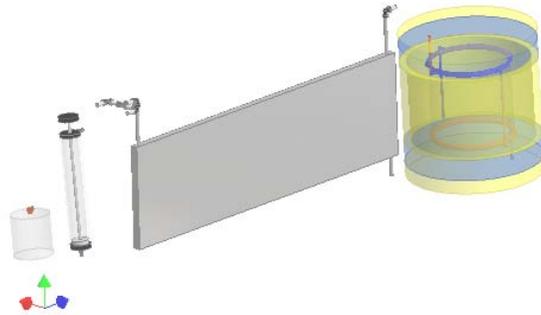


Figura 34.4

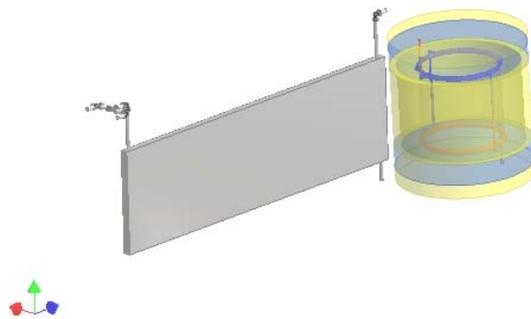


Figura 34.5

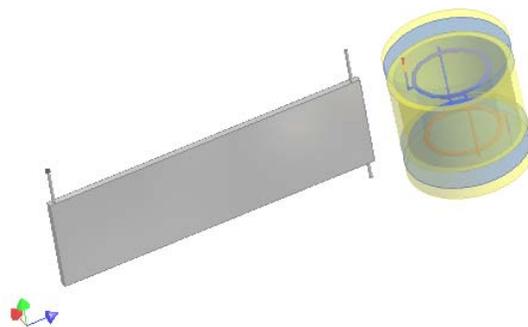


Figura 34.6

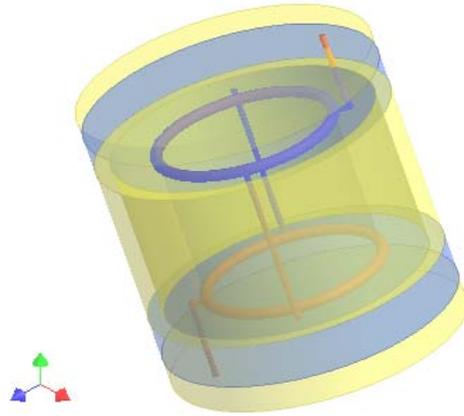


Figura 34.7

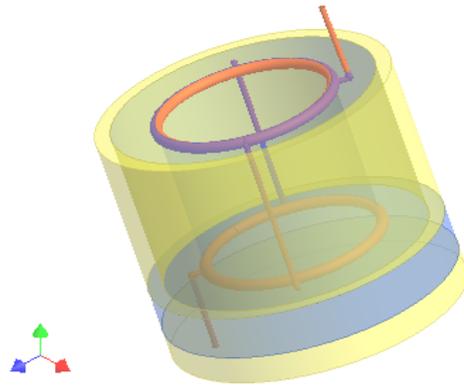


Figura 34.8

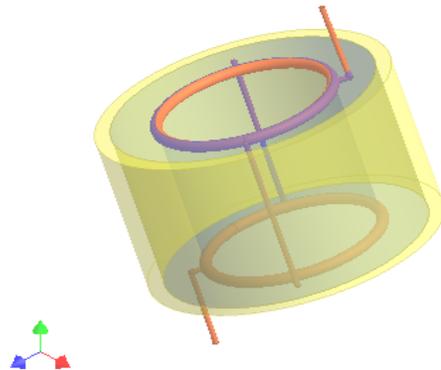


Figura 34.9

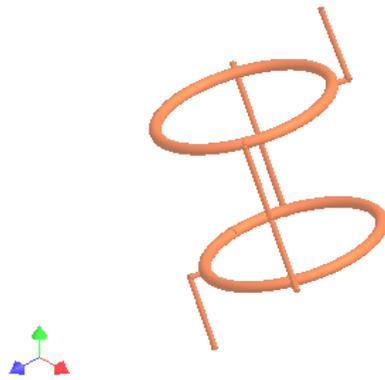


Figura 34.10

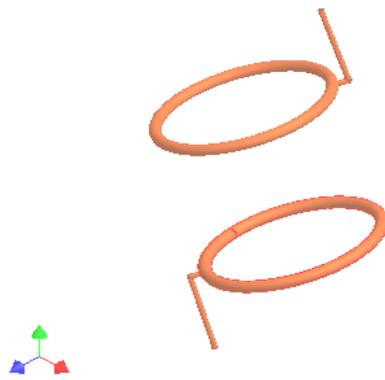


Figura 34. 11

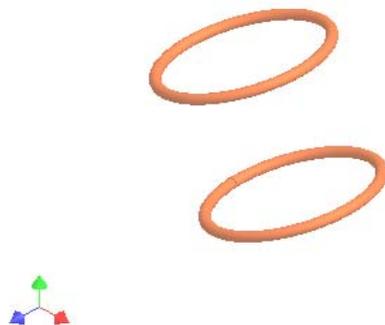


Figura 34. 12

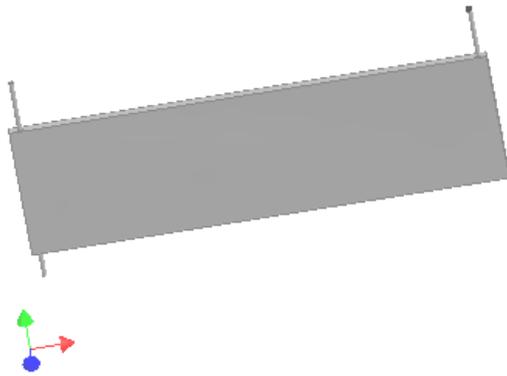


Figura 34.13

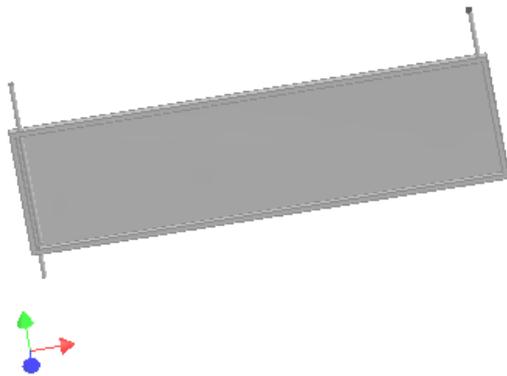


Figura 34.14

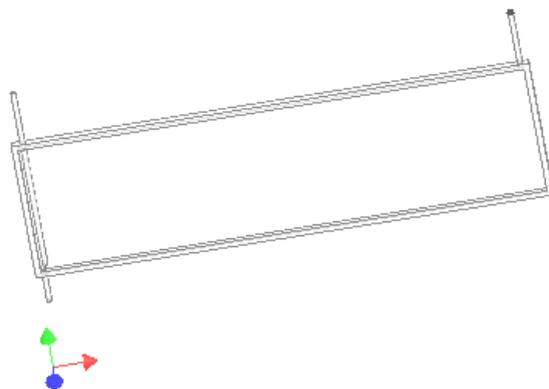


Figura 34.15

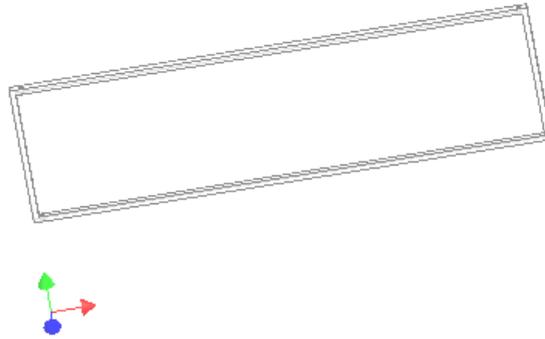


Figura 34.16

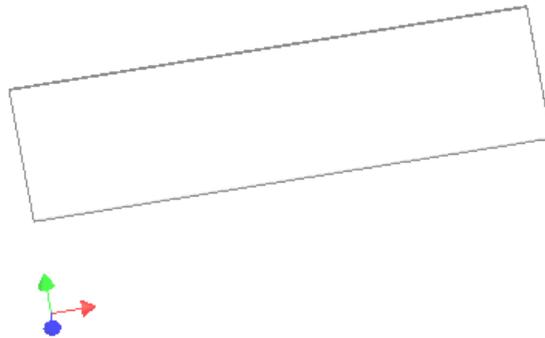


Figura 34.17

Figura 34. Diseño definitivo en etapas

5.2 Funcionamiento del sistema

El uso del prototipo (ver planos) será llevado a cabo de acuerdo a los siguientes pasos:

Adsorción:

1. Se carga la trampa de vapor con 0,5 Kg. de Zeolita 4A granulada desadsorbida, por la válvula 4 al finalizar este procedimiento se cierra la válvula.

2. Introducir en el evaporador agua a través de la válvula 5 manteniendo la válvula 6 abierta hasta observar que sale agua por la válvula 6 en ese momento se detiene la introducción de agua y se espera que deje de gotear agua por la válvula 6 luego se procede a cerrar la misma, (el volumen de agua en las tuberías es de 11×10^{-2} litros aproximadamente).
3. Acoplar las válvulas 5 y 1 a través de una manguera de $1/4''$.
4. Acoplar la bomba de vacío a la válvula 2 a través de una manguera de $1/4''$, manteniendo la válvula 2 abierta, y se mantiene cerrada la válvula 3.
5. Se aplica vacío en el sistema mediante la bomba, este vacío tiene que ser constante hasta que se observa que la temperatura interna del termo llegue a la temperatura que se desea, a partir de ese momento el vacío comienza a ser intermitente para lograr mantener la temperatura interna del termo.
6. Este proceso termina en el transcurso de 6 horas, luego de este tiempo se procede a cambiar la trampa de vapor, por otra previamente desadsorbida como a continuación se describe:
 - Al pasar las seis horas, se abre la válvula 3 para que el sistema vuelva a presión ambiente, luego de que el sistema llegue a presión ambiente se cierra la válvula 3.
 - Se cierran las válvulas 1 y 2 dejando abierta la válvula 5 y se desconectan las mangueras.
 - Luego de liberadas estas mangueras se procede a restituir el agua que se evaporó siguiendo el paso (2) de adsorción.
 - Se siguen los pasos 3, 4, 5 y 6.

Desorción:

Para la realización de este proceso se necesito la construcción de un concentrador solar de cuádruple reflexión y un sistema mecánico para transmitir movimiento a captadores solares. (PARRA y PICHARDO, Tesis Ing. 1984), (CARRERO y LEON, Tesis Ing. 1981).

1. Se llena la trampa de vapor con 2 Kg. de zeolita, por la válvula 4.
2. Se coloca la trampa de vapor en el concentrador solar.
3. Se acopla la válvula 3 con el condensador mediante una tubería de cobre de ¼", y se conecta el condensador con el envase de condensado.
4. Se mantienen las válvulas cerradas hasta que la temperatura llega a 120° C y a la presión de vapor del agua, luego se abre la válvula 3 para que el vapor salga y se condense.
5. Se mantiene este proceso durante 6 horas, luego se cierra la válvula 3 y se deja reposar hasta que este listo para comenzar el proceso de adsorción.

En caso de dañar la zeolita (recalentamiento, contaminación con sustancias distintas al agua), esta debe ser restituida por una nueva zeolita.

5.3 Costos

A continuación se presentan los precios de los diferentes componentes del Ciclo:

Sistema compacto de refrigeración por adsorción empleando zeolita y agua

Ítem	Cantidad	Precio x unidad	Total
Válvulas de globo de ¼"	6 uni.	@ \$3.26	= \$19.56
Mangueras de alta presion 300Psi 1/4"	60 cm	@ \$5.04	= \$3.02
Reloj Solar			

Ángulos de 40x40x4 mm acero 1020

Rodamientos (10)

Engranajes (7)

Cadena de ¼" de paso (6 m)

Guaya (1,5 m)

Ejes (5)

Otros

Total por costo de fabricación con materiales incluidos @ \$136.33 = \$136.33

Trampa de vapor

Tuberías de acero inoxidable AISI 304 de ¼"

Láminas de acero AISI 304/2B de 3mm de espesor

Rejilla metálica

Barra cuadrada 3/16" acero 1020

Pintura para horno

Total por costo de fabricación con materiales incluidos @ \$46.36 = \$46.36

Recipiente evaporador

Lámina de acero inoxidable AISI 304 de 1mm de espesor

Tubería de cobre de ¼"

Anime

Corcho

Total por costo de fabricación con materiales incluidos @ \$105.3 = \$105.3

Concentrador Solar

Platina de 2" x 3/16" acero 1020

Ángulos de 40x40x4 mm acero 1020

Tocho de 3" de diámetro, 800 mm acero 1020

Espejos (4) 3 mm de espesor

Vidrio transparente de 5 mm de espesor

Lamina Anime (7)

Madera

Engranajes (8)

Rodamientos (2)

CAPITULO V: Funcionamiento y Costos

Total por costo de fabricación con materiales incluidos	@ \$200	= \$200
Silicón para altas temperaturas	1 tubo @ \$2.28	= \$2.28
Unión en "T" 1/4"	1 uni. @ \$1.00	= \$1.00
Mangueras de alta presión 300Psi 3/8"	60 cm. @ \$6.71	= \$4.03
Niple con rosca completa 1/4"	5 uni. @ \$1.00	= \$5.00
Bomba de Vacío con manguera de P.V.C (1)	1 uni. @ \$120	= \$120
Termómetro de medida digital 28XT	1 uni. @ \$130	= \$130
Zeolita 4A de 4-8 Mesh (1.1 Kg)	3 Kg. @ \$15	= \$45
Otros		= \$6

Total = \$823.88

Total = Bs.1 211 103.6

CAPITULO VI **Conclusiones y Recomendaciones**

6.1 Conclusiones:

- Para lograr una temperatura de 0 °C con la bomba de vacío manual fue necesario el uso de 2 o mas personas, debido a que en este proceso de adsorción el vacío debe ser constante y por un periodo prolongado de tiempo, esto trae como consecuencia variaciones de los tiempos de congelación, ya que el hombre no es capaz de mantener una potencia constante.
- Con la utilización de diferentes bombas, ya sea manual o eléctrica, se comprobó que la adsorción de vapor por la zeolita fue prácticamente el mismo, sin importar el tiempo en que se logre llevar el agua a la temperatura de 0 °C.
- El aumento de la temperatura de la zeolita en el proceso de adsorción se debe a que el agua esta perdiendo energía en forma de vapor de agua y la zeolita recoge esta energía liberada.
- Debido a las pérdidas en las tuberías y salpicaduras existentes en el proceso de adsorción la zeolita no adsorbe la misma cantidad de vapor de agua que la que se evapora.
- En todos los procesos con diferentes tipos de bombas se comprobó que en los primeros minutos hay una gran liberación de energía en el agua, por lo que se produce un descenso brusco en la temperatura hasta que el sistema se equilibra, esto ocurre hasta que el agua alcanza una temperatura de 10 °C aproximadamente, y luego de llegar a esta temperatura el descenso de la misma ocurre en una forma gradual; durante este descenso gradual la temperatura del agua experimenta fluctuaciones debido a la liberación de energía.

- Se comprobó que en la superficie del agua, durante el proceso de adsorción, la temperatura del agua era menor que la temperatura en cualquier otro nivel, aumentando así la temperatura a medida en que se llega al fondo del envase, debido a esto la superficie es la primera en llegar a 0 °C.
- Cercano a los 0° C, se forma la primera capa de hielo en la superficie, la cual es rota constantemente por la liberación de energía, produciendo aumento de temperatura en la superficie, este proceso se detiene en el momento en que toda la masa de agua uniformiza su temperatura y en ese momento el descenso de la misma se comporta de forma logarítmica.
- Además del agua de condensado es necesario añadir agua de reposición, debido a que existen pérdidas en las tuberías y en la desorción de la zeolita.
- En 6 horas a la temperatura promedio de 121,6 °C, en el proceso de desorción, la zeolita retuvo aproximadamente 4% de vapor de agua lo cual es normal en este tipo de proceso.
- El COP de este sistema es de 0,4955 lo que corresponde a un 49,55 %, lo cual se aproxima al COP de un ciclo de refrigeración doméstica.

6.2 Recomendaciones

- Diseñar una bomba de vacío manual o mecánica de mayor capacidad, que se ajuste a un funcionamiento de 6 horas aproximadamente.
- Se recomienda el uso de válvulas que soporten vacío y presión.
- Para obtener temperaturas criogénicas se recomienda el uso de alcoholes.

- Colocar en las tuberías internas de la trampa de vapor, rejillas para evitar que estas se obstruyan con la zeolita.
- Hacer un estudio del comportamiento de la zeolita, a bajas temperaturas.
- Para tener un ciclo cerrado de 24 horas se recomienda tener 2 trampas de vapor, 3 kilos de zeolita y un colector solar.
- La utilización de grasa para vacío en los sellos de los envases y válvulas.
- Adaptarle un sistema de gas que sirva para desadsorber la zeolita en días no soleados.

- ALFARO, David, y BISSESAR, Kamal, Tesis Ing.: Diseño de un sistema compacto de refrigeración por adsorción empleando zeolita y agua, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2001.
- CARRERO B., Bernardo, y LEON B., Luis A., Tesis Ing.: Sistema mecánico para transmitir movimiento a captadores solares orientables, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 1981.
- INCROPERA, Frank P., y DeWITT, David P., Fundamentos de transferencia de calor, Cuarta Edición, Prentice Hall, México, 1999.
- Kobboon Phonglumchiag, Dr. Tirachoon Muangnapoh; Mr. Pairot Limprapayom, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de KMITNB, Tailandia. 1995.
Página Web: <http://library.kmitnb.ac.th/thes/engineer/MME/mme0055e.html>
- LIMSI, LIMSI-CNRS Bâtiment 508, Université de Paris-Sud 91403 ORSAY (Francia) Laboratorio de procesamiento de datos para mecánica y ciencias de la ingeniería, Francia, .J. Guilleminot, Ph. Grenier, M. Pons and F. Meunier "Desarrollo de unidades de adsorción para refrigeración solar" las cuales emplean Zeolita NaX y Agua como par de adsorción. 2001 Página Web: <http://www.limsi.fr/Individu/mpons/solaradsor.htm>. Página Web: <http://www.zeo-tech.de/>
- PARRA, Leonel, y PICHARDO, Miguel, Tesis Ing.: Diseño, construcción y pruebas de un colector solar plano de cuádruple reflexión, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 1984.

- PONS, Michel, Principle of adsorption cycles for refrigeration or heat pumping, 2002 <http://www.limsi.fr/Individu/mpons/pricyc.htm>
- ROIA, F., Agentes inmunizantes y antígenos para diagnósticos cutáneos, 19ª Edición, 1995. México, Editorial Médica Panamericana.
- Siegfried Kreussler and Detlef Bolz, Laboratory for Solar Energy, University of Applied Sciences Luebeck, Stephensonstr. 3, D-23562 Luebeck, Germany. (2001)
- SLEJKO, F.L., y DEKKER, Marcel, Tecnología de Adsorción, Nueva York, Segunda Edición, 1985.

APÉNDICES

Apéndice A

Características y descripción de la zeolita

- **Estructura**

“De acuerdo al estudio cristalográfico se define que es un “polvo cristalino”, y para insistir sobre la importancia de la aseveración anterior se compara la regularidad característica de los cristales con el desorden típico de los gases. En efecto, así como se habla de un gas ideal, se utiliza el concepto de cristal ideal o cristal perfecto.

Un gas ideal está formado por partículas idénticas infinitamente pequeñas y no existen fuerzas entre ellas, además, no ocupan posiciones fijas en el espacio. En un cristal ideal hay grupos idénticos de átomos de tamaño finito, retenidos por fuerzas mutuas en posiciones fijas en el espacio, y dichos átomos se encuentran en reposo. La energía del gas ideal es totalmente cinética, la del cristal ideal totalmente potencial.

El gas ideal obedece leyes correspondientes a un arreglo al azar de partículas en movimiento y la geometría no interviene. Por el contrario, el cristal ideal está sujeto a las leyes geométricas que rigen un arreglo periódico de partículas en reposo, el azar no se toma en cuenta, las posiciones de los átomos o moléculas están perfectamente definidas. Todos los gases se parecen (excepto por la masa de sus partículas), los cristales ideales presentan una inmensa variedad de arreglos periódicos, la complejidad o distorsión del grupo atómico no importa, siempre y cuando se repita exactamente con periodicidad perfecta. En la figura 35 se compara el orden de un cristal y desorden en un gas constituidos por el mismo tipo de átomos. La representación es en un plano, así que hay que imaginársela en el espacio.

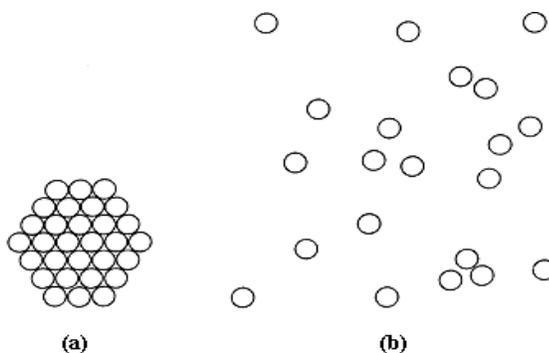


Figura 35. Orden en un cristal (a) y desorden en un gas (b).

Debido a que posee una estructura regular periódica, los átomos o grupos de átomos ocupan posiciones tales que forman cubos de lado igual a 24.8 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ metros). La estructura de una zeolita (faujasita) se muestra en la figura 36. En esta figura, los átomos de silicio y de aluminio ocupan los vértices. Cada uno de ellos está rodeado por oxígenos y dichos oxígenos se encuentran en medio de los segmentos. No hace falta mucha imaginación para darse cuenta de que este motivo repetido al infinito genera un sistema de cavidades comunicadas que resulta en una serie de canales, la simetría cúbica es evidente. La estructura se basa en un conjunto de cuboctaedros (constituidos cada uno por 24 tetraedros).

La "gran cavidad" tiene un diámetro de 12.5 \AA y se tiene acceso a la "cavidad sodalita" de 6.6 \AA de diámetro por las caras hexagonales, a través de aberturas de 2.2 \AA . Son esas mismas caras hexagonales las que sirven para unir a los cuboctaedros, la pequeña cavidad de comunicación es el prisma hexagonal. Esta estructura microscópica origina grandes cristales cúbicos, fácilmente visibles en el microscopio electrónico de barrido Figura 37.

En un inicio, las zeolitas se clasificaron en función de su apariencia externa, hoy se hace en función de las características estructurales y de las propiedades fisicoquímicas, aunque la clasificación y nomenclatura todavía están en proceso de cambio y refinamiento. En algunos casos es confusa debido a una caracterización inadecuada de

zeolitas previamente bautizadas. Por lo general, los materiales sintéticos equivalentes se describen con su nombre mineral, por ejemplo, mordenita. Los tipos sintéticos nuevos se suelen designar con una letra o un grupo de letras que les asigna el investigador original, por ejemplo: A, X, Y, L, ZSM. Así, los tipos X y Y están estructural y topológicamente relacionados con una zeolita mineral y se les menciona a menudo como zeolitas del tipo faujasita (Tabla 10).

La estructura de la Zeolita X y la de la Y son similares: estructura cúbica constituida por celdas elementales de cerca de 192 tetraedros $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$. Al escribir $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$ queremos decir que son tetraedros de un silicio o de un aluminio combinados con cuatro oxígenos. La estructura es sorprendentemente estable y rígida. De hecho, son las zeolitas más "huecas" de todas, pues cerca del 50% del volumen de los cristales deshidratados de las zeolitas faujasitas es espacio vacío (Tabla 10). Ese espacio es el que se llena de agua cuando la zeolita se encuentra al aire.

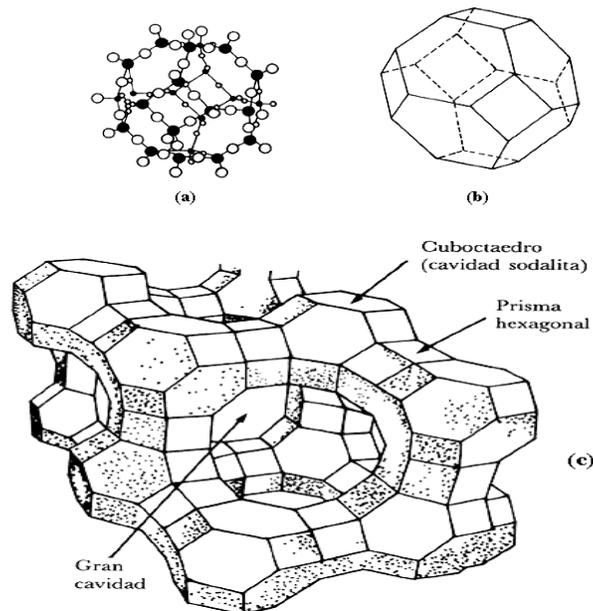


Figura 36. Estructura de una zeolita faujasita, (a) en el que aparecen los átomos de oxígeno (o) y los de aluminio o silicio (*), (b) representación simplificada del cuboctaedro. Estos cuboctaedros unidos forman a la zeolita faujasita (c).

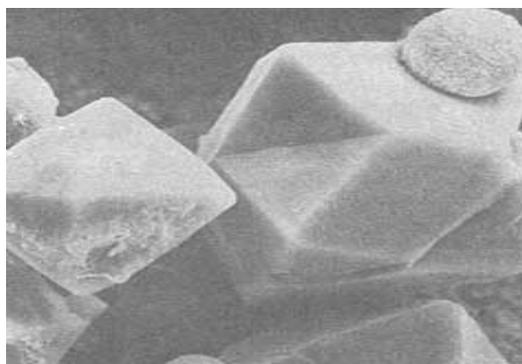


Figura 37. Zeolita faujasita X observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 m aproximadamente. Las partículas esféricas son de zeolita P.

		Volumen de poro
<i>Grupo de las analcimas</i>		
Analcimas	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Wairakita	$\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Leucita	$\text{K}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$	0
<i>Grupo de las natrolitas</i>		
Natrolita	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80})16\text{H}_2\text{O}$	0.21
Edingtonita	$\text{Ba}_2(\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20})6\text{H}_2\text{O}$	0.35
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8(\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80})24\text{H}_2\text{O}$	0.32
<i>Grupo de las filipsitas</i>		
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5(\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32})10\text{H}_2\text{O}$	0.30
Garronita	$\text{NaCa}_{2.5}(\text{Al}_8\text{Si}_{10}\text{O}_{32})14\text{H}_2\text{O}$	0.41
Gismondina	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32})16\text{H}_2\text{O}$	0.47
<i>Grupo de las heulanditas</i>		
Heulandita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$	0.35
Clinoptilolita	$\text{Na}_6(\text{Al}_8\text{Si}_{30}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$	0.34
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72})32\text{H}_2\text{O}$	0.38
<i>Grupo de las Mordenitas</i>		
Mordenita	$\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96})24\text{H}_2\text{O}$	0.26
Ferrierita	$\text{Na}_{1.5}\text{Mg}_2(\text{Al}_{5.5}\text{Si}_{30.5}\text{O}_{72})18\text{H}_2\text{O}$	0.24
Epistilbita	$\text{Ca}_3(\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$	0.34
<i>Grupo de las Chabasitas</i>		
Chabasita	$\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24})13\text{H}_2\text{O}$	0.48
Heroinita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Na},\text{K})_{4.5}(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72})27\text{H}_2\text{O}$	0.36
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72})21\text{H}_2\text{O}$	0.28
<i>Grupo de las faujasitas</i>		
Faujasitas (X, Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}(\text{Al}_{59}\text{Si}_{133}\text{O}_{384})26\text{H}_2\text{O}$	0.53
Zeolita A	$\text{Na}_{12}(\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48})27\text{H}_2\text{O}$	0.47

Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30}(\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192})98\text{H}_2\text{O}$	0.45
<i>Grupo de las laumontitas</i>		
Laumontita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$	0.35
Yugawaralita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{20}\text{O}_{56})16\text{H}_2\text{O}$	0.30
<i>Grupo de las pentasil</i>		
Zeolita ZSM-5	$\text{Na}_n(\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192})16\text{H}_2\text{O}$	0.32
Zeolita ZSM-11	$\text{Na}_n(\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192})16\text{H}_2\text{O}$	0.32

Tabla 10. Clasificación de algunas zeolitas.

La Zeolita A consiste en un octaedro truncado formado por silicón aluminio y átomos de oxígeno asociados con sodio potasio o calcio, en el caso que la estructura tenga sodio tenemos Zeolita 4A (tamaño de poro 4 Å), si tiene potasio es Zeolita 3A (tamaño de poro 3 Å), y si esta hecha con calcio entonces se tiene Zeolita 5A (tamaño de poro 5 Å).

La Zeolita A se parece mucho a la faujasita con la diferencia que en vez de unirse las cavidades por canales hexagonales lo hace por canales cuadrados Figura 38.

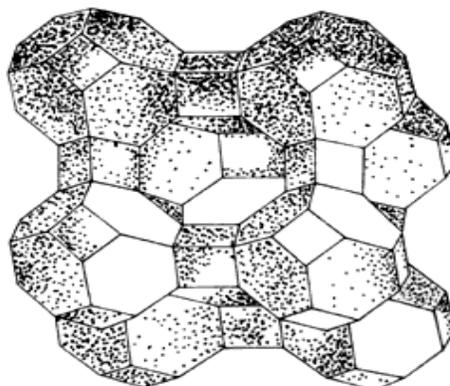


Figura 38. Estructura de una zeolita A.

Claramente, las características de los poros de la zeolita van a ser de primordial importancia. Es más, dada la regularidad de su estructura, es posible aprovecharlas para tamizar moléculas, atrapar compuestos o absorber gases.”

Especificaciones de la zeolita

“Las especificaciones dependen de los usos de los productos de la zeolita y varía ampliamente debido a la gran gama de productos de zeolita natural y variedad en el mercado. La sociedad americana para materiales y pruebas (ASTM) ha establecido métodos, pruebas y especificaciones estándares para la zeolita en los EU.

Las especificaciones y pruebas en Europa y en Japón se hacen conjuntamente por las compañías productoras. Los productores de zeolita dividen de dos maneras las especificaciones: la venta del mineral en base a especificaciones negociadas con el comprador, o la venta del mineral en base a una línea de productos, donde cada producto de zeolita, tiene una designación de nombre o número con especificaciones físicas y/o químicas. Los productos de la zeolita se venden usualmente con un nombre comercial en lugar de una variedad de mineral. Por ejemplo, la clinoptilonita.”

Regulaciones ambientales para la zeolita

“Las regulaciones ambientales varían dependiendo del lugar esto puede ser una fuente de conflicto entre los inspectores del gobierno y los operadores encargados del minado. Las zeolitas naturales son relativamente inocuas y no presentan problemas ambientales particulares, con tres excepciones:

1. Varios minerales de zeolita tienen formas fibrosas y pueden comportarse como materiales de asbesto.
2. Los cristales de silicio fino se generan usualmente en depósitos de zeolita y los productos finos pueden ser respirados (0.1%).
3. El minado de la zeolita y las plantas procesadoras secas tienden a generar polvos, ocasionando problemas en la calidad del aire.

El polvo generado en la planta y el minado pueden considerarse como un contaminante ambiental local. La mayoría de las zeolitas contienen sílice en forma de sílice amorfa o cristalina. Las plantas procesadoras, pueden por lo tanto requerir de un sistema eficiente para controlar la contaminación del aire, que van desde la norma

Benhouse en donde se utilizan colectores de polvo, a precipitadores electrolíticos para minimizar la exposición de los trabajadores a estos polvos en el almacén del mineral o en los molinos, y para cumplir con los requerimientos locales de control de calidad del aire. La mayoría de las zeolitas se producen usando métodos de procesamientos secos. El procesamiento de las zeolitas se inclina inevitablemente hacia procesos de lavados con agua y métodos húmedos de clasificación, requiriendo para esto un estanque de desperdicio y una manipulación apropiada de la planta.

Los minerales de zeolita son considerados generalmente por ser químicamente inertes, y la mayoría no son fibrosas. La erionita se establece como un mineral fibroso, y puede ser marcada como un posible carcinógeno en base a los estudios médicos.”

Usos de las Zeolitas

- Tamices Moleculares
- Secado de Gases
- Separación de Hidrocarburos
- Detergentes
- Catálisis
- Para hacer gasolina a partir de Metanol
- Rompimiento de Moléculas de Petróleo
- En la nutrición de animales. Da eficiencia en el desarrollo del ganado haciendo decrecer el agua amoniacal en el sistema digestivo (la clinoptilolita).
- Sistemas de Refrigeración y acondicionamiento de aire
- Adsorbente de contaminantes del aire
- Secar aire comprimido.
- En la agricultura como acondicionador y fertilizante de suelos.
- Para separar el nitrógeno del oxígeno del aire.
- En el tratamiento de desechos radiactivos, la zeolita se utiliza para remover el cesio y el estroncio radiactivos de las aguas residuales.
- Utilizada para suavizar agua.
- Acuicultura.

- Gasificación del carbón.
- Intercambio iónico.
- Purificación del gas natural.”

El agua como refrigerante en sistemas de adsorción

“Tchernev en 1980 determinó que en un rango de temperatura entre 0 y 10°C el vapor de agua proporcionaba la mayor eficiencia para sistemas de adsorción. La mayoría de las Zeolitas adsorben la misma cantidad de refrigerante (agua), cerca de un 20% en peso, el agua tiene un calor de vaporización de 2330 KJ / Kg vs. 1160 KJ / Kg para los alcoholes y amoníaco y 230 KJ / Kg para los halocarbonados. Además el vapor de agua es un refrigerante químicamente estable en presencia de Zeolita a 200°C. El agua se congela a 0°C, por lo que su utilización en un evaporador por debajo del punto de congelación es difícil a primera vista. Sin embargo los valores de presión de vapor de agua son significantes inclusive por debajo de -20°C, lo que quiere decir que la evaporación del agua continuará incluso en estado sólido. Si una sal es añadida al agua para disminuir el punto de congelación, entonces la evaporación de agua líquida puede sostenerse por debajo de esta temperatura. Debido a esto puede producirse con el sistema agua-Zeolita un poder de enfriamiento por debajo de - 20°C.”

Clasificación de las vacunas

- **“Vacunas simples**

Son vacunas constituidas por una sola especie. Por ejemplo, vacuna contra la fiebre tifoidea

- **Vacunas Mixtas**

Son vacunas constituidas por más de una especie. Por ejemplo, vacuna contra el sarampión, rubéola y paperas.

- **Vacunas Monovalentes**

Vacunas constituidas por una sola cepa de la especie. Por ejemplo, vacuna contra el sarampión.

- **Vacunas Polivalentes**

Vacunas constituidas por varias cepas de la misma especie. Por ejemplo, vacuna contra la poliomielitis.”

Almacenamiento y degradación de las vacunas

“Todas las vacunas tienden a degradarse durante el almacenamiento. Los factores que incrementan la tasa de degradación son la presencia de humedad, temperaturas de almacenamiento elevadas y tiempos de almacenamiento prolongados.

Generalmente todas las vacunas se deben almacenar a temperaturas tan bajas como sea posible entre 2 y 10° C y al abrigo de la luz.

En la siguiente tabla se presenta la forma de conservación de algunas vacunas.

VACUNAS	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO D	TIPO E
BCG				X	
Cólera	X				
Difteria tétanos y tosferina (triple)	X				
Fiebre amarilla					X
Hepatitis A	X				
Hepatitis B	X				
Influenza	X				
Lechía	X				
Neumococos		X			
Parotiditis		X			
Poliomielitis (virus inactivados)	X				
Poliomielitis (virus vivos atenuados)			X		
Rabia	X				
Rubéola		X			
Sarampión		X			

Sarampión parotiditis y Rubéola (trivalente)		X			
Tifoidea	X				

Tabla 11. Forma de conservación de algunas vacunas

TIPO A vacunas que se conservan a temperaturas entre 2 y 8° C y no se deben congelar.

TIPO B vacunas que antes de ser reconstituidas se conservan a temperaturas entre 2 y 8° C. Una vez reconstituidos se deben utilizar inmediatamente y se debe descartar cualquier porción que no se ha utilizado después que han transcurrido 8 horas.

TIPO C vacunas que se deben mantener congeladas, no se debe congelar y descongelar en más de 10 oportunidades, cuando esté descongelada se debe mantener entre 2 y 8° C. La vacuna no se debe mantener descongelada por más de 24 horas.

TIPO D vacunas que antes de ser reconstituidas se conservan a temperaturas entre 2 y 8° C. Una vez reconstituidas se deben utilizar inmediatamente y se debe descartar cualquier porción que no se ha utilizado después que han transcurrido 2 horas.

TIPO E vacunas que se deben conservar entre -30 y 5° C. Una vez reconstituidas se deben utilizar inmediatamente. La porción no utilizada se puede mantener entre 0 y 5° C solo durante 1 hora.

Es importante tener en cuenta que almacenadas bajo la forma apropiada

- La mayoría de las vacunas bacterianas estériles no muestran una pérdida de potencia significativa en 2 años.
- Las vacunas bacterianas vivas (vacuna BCG) liofilizadas puede esperarse que mantengan su potencia por lo menos durante 2 años, la vacuna reconstituida se debe usar inmediatamente después de su preparación.
- La mayoría de las vacunas virales y rickettsiales elaboradas a partir de gérmenes inactivados, no muestran una pérdida significativa de potencia en un periodo de 12 a 18 meses.”

Apéndice B

TABLA A. 4 Propiedades termo físicas de gases a presión atmosférica

T (K)	P (kg/m)	Cp (kJ/kgK)	$\mu \cdot 10^7$ (Ns/m²)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	$k \cdot 10^3$ (W/mK)	$\alpha \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720

950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Apéndice C

MSDS

Material Safety Data Sheet

From: Mallinckrodt Baker, Inc.
222 Red School Lane
Phillipsburg, NJ 08865



24 Hour Emergency Telephone: 908-959-2151
CHEMTREC: 1-800-424-9300

National Response in Canada
CANUTEC: 613-996-6666

Outside U.S. and Canada
Chemtree: 703-527-3887

NOTE: CHEMTREC, CANUTEC and National Response Center emergency numbers to be used only in the event of chemical emergencies involving a spill, leak, fire, exposure or accident involving chemicals.

All non-emergency questions should be directed to Customer Service (1-800-582-2537) for assistance.

Molecular Sieve, Activated, Indicating, Type 4A (4-8 Mesh)

MSDS Number: M7790 --- Effective Date: 11/17/99

1. Product Identification

Synonyms: Zeolite, Indicating; Sodium Aluminosilicate

CAS No.: Not applicable.

Molecular Weight: Not applicable.

Chemical Formula: Not applicable.

Product Codes: 2707

2. Composition/Information on Ingredients

Ingredient	CAS No	Percent
Hazardous		
-----	-----	-----

Sodium Aluminosilicate	N/A	90 - 100%
Yes		

3. Hazards Identification

Emergency Overview

CAUTION! MAY CAUSE IRRITATION. CAUSES EYE AND SKIN IRRITATION.

J.T. Baker SAF-T-DATA^(tm) Ratings (Provided here for your convenience)

Health Rating: 0 - None
 Flammability Rating: 0 - None
 Reactivity Rating: 0 - None
 Contact Rating: 1 - Slight
 Lab Protective Equip: GOGGLES; LAB COAT
 Storage Color Code: Orange (General Storage)

Potential Health Effects

Inhalation:

Irritation of upper respiratory tract.

Ingestion:

None identified.

Skin Contact:

Irritation.

Eye Contact:

Irritation.

Chronic Exposure:

No information found.

Aggravation of Pre-existing Conditions:

No information found.

4. First Aid Measures

Inhalation:

If a person breathes in large amounts, move the exposed person to fresh air.

Ingestion:

If large amounts were swallowed, give water to drink and get medical advice.

Skin Contact:

In case of contact, immediately wash skin with plenty of soap and water for at least 15 minutes.

Eye Contact:

In case of eye contact, immediately flush with plenty of water for at least 15 minutes.

5. Fire Fighting Measures

Fire:

Not expected to be a fire hazard.

Explosion:

Contact with moisture or water may generate sufficient heat to ignite combustible materials.

Fire Extinguishing Media:

Use extinguishing media appropriate for surrounding fire.

Special Information:

In the event of a fire, wear full protective clothing and NIOSH-approved self-contained breathing apparatus with full facepiece operated in the pressure demand or other positive pressure mode.

6. Accidental Release Measures

Wear suitable protective clothing. Carefully sweep up and remove.

7. Handling and Storage

Keep container tightly closed. Suitable for any general chemical storage area. Containers of this material may be hazardous when empty since they retain product residues (dust, solids); observe all warnings and precautions listed for the product.

8. Exposure Controls/Personal Protection

Airborne Exposure Limits:

None established.

Ventilation System:

In general, dilution ventilation is a satisfactory health hazard control for this substance. However, if conditions of use create discomfort to the worker, a local exhaust system should be considered.

Personal Respirators (NIOSH Approved):

For conditions of use where exposure to the substance is apparent, consult an industrial hygienist. For emergencies, or instances where the exposure levels are not known, use a full-facepiece positive-pressure, air-supplied respirator. **WARNING:** Air purifying respirators do not protect workers in oxygen-deficient atmospheres.

Skin Protection:

Wear protective gloves and clean body-covering clothing.

Eye Protection:

Use chemical safety goggles and/or full face shield where dusting or splashing of solutions is possible. Maintain eye wash fountain and quick-drench facilities in work area.

9. Physical and Chemical Properties

Appearance:

Blue Beads.

Odor:

Odorless.

Solubility:

Negligible (< 0.1%)

Specific Gravity:

2.10

pH:

No information found.

% Volatiles by volume @ 21C (70F):

0

Boiling Point:

No information found.

Melting Point:

No information found.

Vapor Density (Air=1):

Not applicable.

Vapor Pressure (mm Hg):

Not applicable.

Evaporation Rate (BuAc=1):

No information found.

10. Stability and Reactivity

Stability:

Stable under ordinary conditions of use and storage.

Hazardous Decomposition Products:

No information found.

Hazardous Polymerization:

Will not occur.

Incompatibilities:

Hydrogen fluoride, strong acids, alkalis, olefins, water.

Conditions to Avoid:

Moisture.

11. Toxicological Information

Ingredient Category	---NTP Carcinogen---		IARC
	Known	Anticipated	
Sodium Aluminosilicate	No	No	None

12. Ecological Information

Environmental Fate:

No information found.

Environmental Toxicity:

No information found.

13. Disposal Considerations

Whatever cannot be saved for recovery or recycling should be managed in an appropriate and approved waste disposal facility. Processing, use or contamination of this product may change the waste management options. State and local disposal regulations may differ from federal disposal regulations. Dispose of container and unused contents in accordance with federal, state and local requirements.

14. Transport Information

Not regulated.

15. Regulatory Information

-----\Chemical Inventory Status - Part 1\-----

Ingredient	TSCA	EC	Japan
Australia			
Sodium Aluminosilicate	Exempt	No	No

 No

-----\Chemical Inventory Status - Part 2\-----

Ingredient	Korea	--Canada-- DSL	NDSL
Phil.			
Sodium Aluminosilicate	No	No	No

 No

-----\Federal, State & International Regulations - Part 1\-----

Ingredient	-SARA 302-	-SARA
313----- Chemical Catg.	RQ TPQ	List
Sodium Aluminosilicate	No No	No No

-----\Federal, State & International Regulations - Part 2\-----

Ingredient	CERCLA	-RCRA- 261.33	-TSCA- 8 (d)
Sodium Aluminosilicate	No	No	No

Chemical Weapons Convention: No TSCA 12(b): No CDTA: No
 SARA 311/312: Acute: Yes Chronic: Yes Fire: No Pressure: No
 Reactivity: No (Pure / Solid)

Australian Hazchem Code: No information found.

Poison Schedule: No information found.

WHMIS:

This MSDS has been prepared according to the hazard criteria of the Controlled Products Regulations (CPR) and the MSDS contains all of the information required by the CPR.

16. Other Information

Label Hazard Warning:

CAUTION! MAY CAUSE IRRITATION. CAUSES EYE AND SKIN IRRITATION.

Label Precautions:

During use avoid contact with eyes, skin, clothing. Wash thoroughly after handling. When not in use keep in tightly closed container.

INTENDED FOR R & D USE ONLY.

NOT ON THE TSCA INVENTORY.

Label First Aid:

In case of contact, immediately flush eyes or skin with plenty of water for at least 15 minutes.

Remove contaminated clothing and shoes. Wash clothing before reuse.

Product Use:

Laboratory Reagent. Research and Development Use Only.

Revision Information:

No changes.

Disclaimer:

Mallinckrodt Baker, Inc. provides the information contained herein in good faith but makes no representation as to its comprehensiveness or accuracy. This document is intended only as a guide to the appropriate precautionary handling of the material by a properly trained person using this product. Individuals receiving the information must exercise their independent judgment in determining its appropriateness for a particular purpose.

MALLINCKRODT BAKER, INC. MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE WITH RESPECT TO THE INFORMATION SET FORTH HEREIN OR THE PRODUCT TO WHICH THE INFORMATION REFERS. ACCORDINGLY, MALLINCKRODT BAKER, INC. WILL NOT BE RESPONSIBLE FOR DAMAGES RESULTING FROM USE OF OR RELIANCE UPON THIS INFORMATION.

Prepared by: Strategic Services Division

Phone Number: (314) 539-1600 (U.S.A.)

Apéndice D
Planos (Dos)