

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO DE REFRIGERACIÓN POR
ADSORCIÓN EMPLEANDO ZEOLITA Y AGUA**

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES
ALFARO J., David J.
BISSESAR L., Francisco K.
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO DE REFRIGERACIÓN POR
ADSORCIÓN EMPLEANDO ZEOLITA Y AGUA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Rodolfo Berrios

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES
ALFARO J., David J.
BISSESAR L., Francisco K.
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

Caracas, 2001

Alfaro Guerreiro, David J.
Bissesar Lopez, Francisco K.

**DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO DE REFRIGERACION POR
ADSORCION EMPLEANDO ZEOLITA Y AGUA**

Tutor Académico: Prof. Ing. Rodolfo Berrios
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2001. 129 p.

Palabras claves: Desorción, Adsorción, Zeolita, Energía Solar, Refrigeración.

Resumen: 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 líquido(agua) durante seis horas, mientras esto sucede el prototipo regenera la zeolita en un periodo de tres horas. Dentro del trabajo se tomó en consideración la opción solar para lograr una mayor autonomía en el diseño.

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 Berrios, José Francisco Fernandez, Wadou Baré, Josué León, Sigfried Kreussler, Eugenio Sansone, Michel Ponds, Dimiter Tchernev, Luis García, Tibusay Zambrano, Rosalba Sciamanna, Miguel Rodríguez, Stephen Ziegler, Franklyn Baduy, Miguel Padilla, Rafael De Andrea, Gerardo Jaimes y los responsables del Laboratorio de Física R.M.N en la facultad de ciencias UCV.

También queremos dar un reconocimiento a:

Marielisa Di Bartolomeo(Grace Davison de Venezuela), Asociación Venezolana de Industrias del Plástico (AVIPLA), United Nations Environment Programme (UNEP), Marcos Colmenares, Carlo Cirrottola, Carlos Castro.

A todos aquellos entes e instituciones que directa o indirectamente abrieron el camino para la realización de este proyecto y muy especialmente a la ilustre Universidad Central de Venezuela y a nuestro país por formarnos como profesionales.

Agradecimientos

A Dios, al Maestro Jesús y a su Madre Divina, y a Sri Sathya Sai Baba que han sido la inspiración de mi vida.

A mi madre, por su cariño y apoyo, a su esposo Luis Somoza por su apoyo moral y financiero, a mi padre, mis hermanos Teresita y Luisito, mis abuelos, mis tíos, a mima por su apoyo incondicional, al Prof. Andrés Guzmán, Sra. Josefina Grimán, Sra. Alicia Guerreiro, Prof. Rafael Vázquez, y toda mi familia por haberme brindado su apoyo y animo constante.

A mis compañeros y amigos, especialmente a Alejandro Clemente, Miguel Azuaje, Leonardo Piña, David Alfaro, Arsenio de Oliveira, Alfredo Granes, Ismael Figueroa, Mónica Suárez, Natalia Serpa, Roberto Castro y Mike Vasallo, por su paciencia y apoyo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera ha aportado algo a mi vida

Fco. Kamal Bissessar-Singh. López

Agradecimientos.

A mi madre por ser una fuente de apoyo infinito en todas las cosas que hago, mis hermanos Analiss, Gilberto, Francisco, Luisalice y Maria Helena, por su apoyo moral y financiero, María del Mar por tenerme tanta paciencia en los días más difíciles y darme fuerzas, Kamal por trabajar y trabajar con tanto empeño. Profesor Andrés Guzmán, Sra Josefina Grimán, Sra María Teresa, Sri Satia Sai Baba, tia Izaida y tio Gerardo, Sr Luis Somoza, Tere y Luisito, A mis compañeros: Alfredo, Arsenio, Ismael, Luciano, Alejandro, Fidel, Rafael, Roberto, Euli, Elinés, Manuel, Manucel, Marcos, Emerson, Marcelino, Gerardo.

A la memoria de mi padre se que estás muy orgulloso del trabajo que he realizado.

David J. Alfaro G.

Nomenclatura

K = Conductividad térmica.

ε = Emisividad.

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

q_2 = Rata de calor entre el ambiente y el espacio interior del equipo.

Q = Calor promedio de cambio de temperatura del material.

q = calor promedio entre q_1 y q_2 .

R = Resistencia térmica.

r = radio desde el centro del cilindro a la pared donde se convecta.

L = Longitud característica.

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

\overline{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.

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

C_p = Calor específico a presión constante.

v_f = Volumen específico.

μ_f = Viscosidad Dinámica.

ρ = Densidad.

E = Error relativo.

PM = Peso molecular.

h = Horas.

s = Segundos.

$^{\circ}\text{C}$ = Grados centígrados.

K = Grados Kelvin.

pa = Pascal.

m = Metros.

W = Vatios.

“ = Pulgadas.

J = Joule.

Btu = British Thermal Units.

\AA = Ångstrom

INDICE

CAPITULO 1

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

CAPITULO 2

Marco Teórico.....	3
---------------------------	----------

2.1 Antecedentes del desarrollo de sistemas de refrigeración utilizando Zeolita, 3

2.2 Zeolita, 5

2.2.1 Historia de la Zeolita, 6

2.2.2 Características y descripción de la Zeolita, 6

2.2.3 Como hacer Zeolita, 12

2.2.4 Especificaciones, 18

2.2.5 Regulaciones ambientales, 18

2.2.5 Usos de las Zeolitas, 19

2.3 Principios de la Tecnología de Adsorción de Zeolita / agua, 20

2.3.1 Adsorción, 20

2.3.2 El agua como refrigerante en sistemas de adsorción, 21

2.3.3 Procesos de adsorción y desorción de la Zeolita, 22

CAPITULO 3

Diseño del Prototipo.....	25
----------------------------------	-----------

3.1 Esquema inicial del prototipo, 25

3.2 Condiciones del termo, 27

3.2.1 Selección de los componentes del termo, 27

3.2.2 Cálculo de la Carga Térmica de enfriamiento, 29

3.2.3 Cálculo de la cantidad de Hielo, 52

3.2.4 Cálculo de la cantidad de Vapor de agua, 52

3.3	Parte experimental,	56
3.4	Cálculo de la cantidad de Zeolita,	67
3.5	Condiciones iniciales del horno,	70
3.5.1	Selección de los componentes del horno,	70
3.5.2	Cálculo de la Carga Térmica de calentamiento,	73
3.5.3	Cálculo del número de quemadores y funcionamiento de los mismos,	92
3.6	Opción para calentamiento solar,	94
3.7	Cálculo del coeficiente de realización,	97

CAPITULO 4

Funcionamiento y Costos	98
--------------------------------------	-----------

4.1	Diseño final,	98
4.2	Funcionamiento del sistema,	101
4.3	Costos,	103

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones	105
---	------------

5.1	Conclusiones,	105
5.2	Recomendaciones,	106

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
---	------------

APÉNDICES

A	Tabla de las Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica,	111
B	Tablas de las Propiedades termofísicas de agua saturada,	113
C	Material Data Safety Sheet (Zeolita 4A, 4-8 Mesh),	118
D	Planos,	125

CAPITULO 1

Introducción

En la sociedad moderna la refrigeración representa uno de los pilares sobre los cuales transcurre el día a día de todos los seres humanos, este proceso se aplica desde las necesidades básicas de una persona, hasta los requerimientos de toda una nación, es decir, es un eslabón del cual no se puede prescindir al emprender un proyecto donde existan aumentos de temperatura que deban ser controlados.

Un problema vinculado directamente con la refrigeración es la contaminación ambiental, ocasionada por los refrigerantes que se emplean comúnmente en dicho sistema, la justificación del uso de estos compuestos (clorofluorocarbonos, clorofluorometanos y refrigerantes halogenados en general) viene de la necesidad de enfriar de una manera rápida, a bajas temperaturas y en espacios reducidos.

Nuestro planeta ha sido afectado apreciablemente en los últimos años producto de la industrialización. La capa de ozono se ha convertido en motivo de preocupación desde comienzos de la década de 1970, cuando se descubrió que los clorofluorocarbonos (CFC), o clorofluorometanos, estaban siendo vertidos a la atmósfera en grandes cantidades a consecuencia de su empleo como refrigerantes y como propelentes en los aerosoles. La preocupación se centraba en la posibilidad de que estos compuestos, a través de la acción solar, pudiesen atacar fotoquímicamente y destruir el ozono estratosférico, que protege la superficie del planeta del exceso de radiación ultravioleta. El resultado ha sido que, en los países industrializados, se ha abandonado la utilización de clorofluorocarbonos para todos aquellos usos que no son esenciales. (Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001)

Lo antes mencionado es motivo de alarma ya que siguiendo este ritmo afectaremos irreversiblemente el equilibrio ecológico de la tierra en un lapso relativamente corto. Los procesos de refrigeración son muy usados y como consecuencia contribuyen en buena parte al deterioro global, debido a esto es necesario probar nuevas alternativas que causen el

menor impacto posible sobre el ambiente, una de estas alternativas es el empleo de Zeolita como un componente ecológico de refrigeración el cual presenta las características necesarias para llevar a cabo estos procesos de una manera limpia y eficiente.

Este trabajo basado en un sistema de refrigeración por adsorción usando zeolita y agua, se pretende incentivar el uso de nuevas alternativas de refrigeración que proporcionen soluciones a problemas de esta índole, y de esta manera contribuir con el círculo de investigación de este tipo de opciones y así colaborar con el desarrollo e implementación de estos sistemas a todo nivel.

Además se pretende que el equipo a diseñar posea gran versatilidad por funcionar sin requerimientos de energía eléctrica y por sus reducidas dimensiones, que garantizan un fácil transporte del equipo.

Los principios usados en este diseño servirán para desarrollar equipos de transporte y almacenamiento de: alimentos y bebidas, medicamentos a lugares donde no se disponga de servicio eléctrico, mercancía en pequeñas embarcaciones pesqueras, y toda una gran gama de aplicaciones relacionadas a la refrigeración

CAPITULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Antecedentes del desarrollo de sistemas de refrigeración utilizando Zeolita:

Fabricación y Prueba del Modelo de Refrigeración por absorción usando Zeolita / agua.

El contenido de la investigación fue diseñar, fabricar y probar la refrigeración por absorción 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 absorción 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.

Kobboon Phonglumchiag, Dr. Tirachoon Muangnapoh; tmp@kmitnb.ac.th,

Mr. Pairot Limrapayom; plp@kmitnb.ac.th.

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de KMITNB, Tailandia.1995.

Pagina Web: <http://library.kmitnb.ac.th/thes/engineer/MME/mme0055e.html>

Experimentos en Refrigeración Solar por Adsorción usando Zeolita y Agua

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 desorbida 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.

Siegfried Kreussler and Detlef Bolz

Laboratory for Solar Energy, University of Applied Sciences Luebeck,
Stephensonstr. 3, D-23562 Luebeck, Germany.e-mail kreussler@fh-luebeck.de

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

- 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.

Pagina Web: <http://www.zeo-tech.de/>

• LIMSI, LIMSI-CNRS Bâtiment 508, Université de Paris-Sud 91403 ORSAY (Francia) dir@limsi.fr 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.

Página Web: <http://www.limsi.fr/Individu/mpons/solaradsor.htm>

2.2 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 ángstrom(Fisicanet), con una área de la superficie interna de mas de 1000 m²/g, campos electrostáticos fuertes en la estructura y con una densidad volumétrica de aproximadamente 0.8 kg/dm³.(Zeo-Tech).

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. (Fisicanet).

Las Zeolitas no son venenosas, ni inflamables, están naturalmente disponible 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. (Zeo-tech).

2.2.1 Historia de la Zeolita

En 1756, el mineralogista sueco Baron Axel Fredrick Cronstedt descubrió la zeolita. Se relata que su perro sacó la piedra mientras escarbaba, y el mineralogista la llamó zeolita debido a que significa “perro” en sueco. En otro relato, se dice que descubrió que cuando la zeolita se calentaba, emitía vapor. Zeolita significa “piedra hirviente” en griego.(United States Environmental Protection Agency,1990)

El estudio de las zeolitas se inició en 1756 por A. F. Cronstedt. Una rara curiosidad académica fue comprobar que servían de tamiz molecular, pero hoy se ahorran millones de dólares con sus variadas aplicaciones en la industria. Sin embargo, hace solamente unos cuantos años que es objeto de profundos estudios, y apenas ahora se plantea, con angustia, la necesidad de encontrar yacimientos, sintetizarlas, entender sus propiedades o ampliar su utilización. (Bosch, 1998).

En 1925 el proceso de separación de agua y metanol usando zeolitas fue observado por primera vez, y debido a la acción de esta separación (la acción de tamiz) el nombre "Tamiz molecular " fue atribuido a las zeolitas. (Zeo-tech)

2.2.2 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.

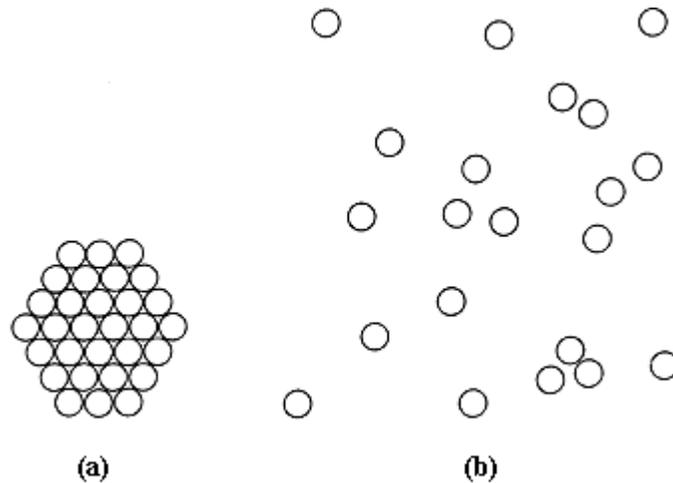


Figura 1. Orden en un cristal (a) y desorden en un gas (b).

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 1 se compara el orden de un cristal y un gas constituidos por el mismo tipo de átomos. La representación es en un plano, así que hay que imaginársela en el espacio.

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 2. 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 Å y se tiene acceso a la "cavidad sodalita" de 6.6 Å de diámetro por las caras hexagonales, a través de aberturas de 2.2 Å. 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 3).

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 (Cuadro 1).

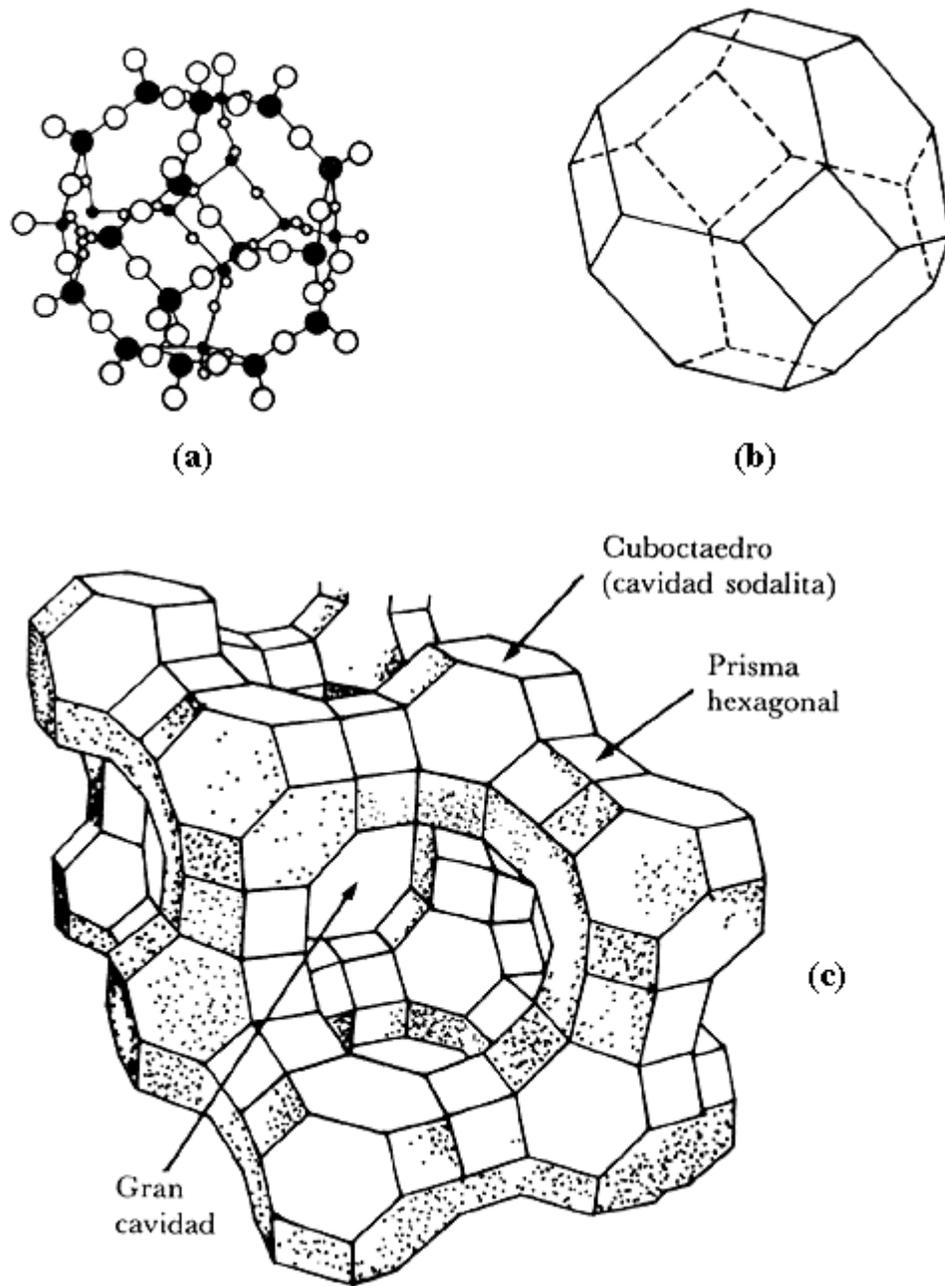


Figura 2. Estructura de una zeolita faujasita. (b) representación simplificada del cuboctaedro (a), en el que aparecen los átomos de oxígeno (o) y los de aluminio o silicio (*). Estos cuboctaedros unidos forman a la zeolita faujasita (c).



Figura 3. Zeolita faujasita X observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 m aproximadamente. Las partículas esféricas son de zeolita P.

La estructura de la Zeolita X y la de la Y son similares: estructura cúbica constituida por celdas elementales de cerca de 192 tetraedros (Si, Al)O₄. Al escribir (Si, Al)O₄ 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 (Cuadro 1). Ese espacio es el que se llena de agua cuando la zeolita se encuentra al aire. (Bosch,1988)

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).(Grace Davison, 1995)

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 (ver figura 4).(Bosch,1988)

CUADRO 1. Clasificación de algunas zeolitas.

		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	$\text{NaCa}_{2.5} (\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) 14\text{H}_2\text{O}$	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	$\text{Na}_6 (\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	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
Erionita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Na},\text{K})_{4.5} (\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 27\text{H}_2\text{O}$	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		

* cm^3 de agua/ cm^3 de cristal.

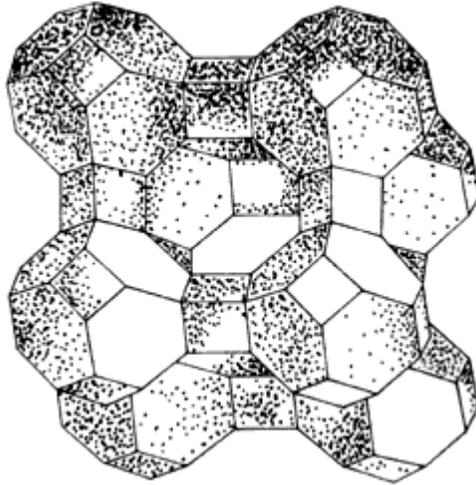


Figura 4. Estructura de una zeolita A.

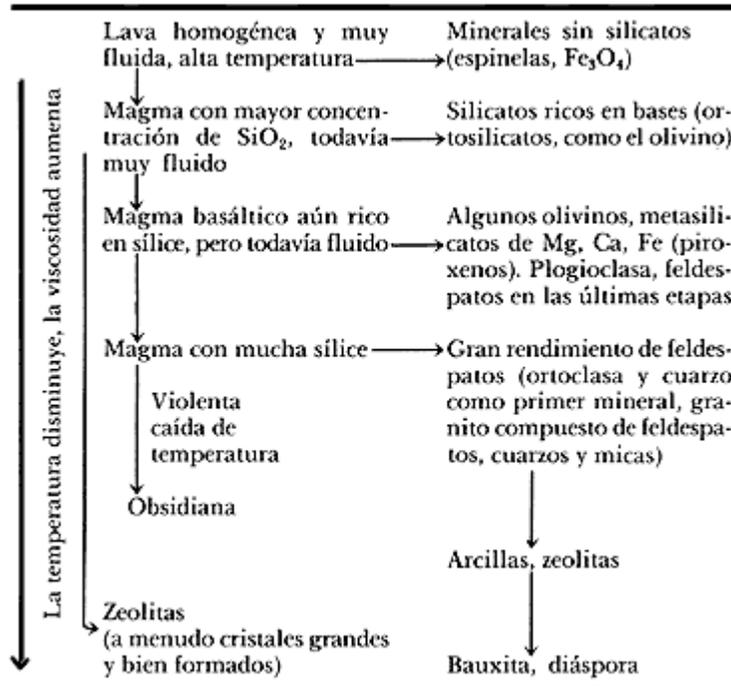
Claramente, las características de los poros de la zeolita van a ser de primordial importancia. Es más, dada la regularidad de su estructura, es posible aprovecharlas para tamizar moléculas, atrapar compuestos o absorber gases. (Bosch, 1988).

2.2.3 Como hacer Zeolita

En la naturaleza la zeolita se forma a partir de roca fundida cuya composición promedio es próxima a la de la litósfera. Cuando el enfriamiento fuese tal que la lava cristalizase suficientemente como para dar un magma basáltico rico en álcalis sería probable que se formasen zeolitas por medios acuosos salinos y alcalinos (Cuadro 2). La "zeolitización" también se provoca mediante una caída súbita de la temperatura en una lava basáltica.

Un ejemplo clásico de zeolitas formadas naturalmente son las zeolitas presentes en las rocas volcánicas de Sicilia, que incluyen la analcima, la chabasita y su variante, la herschelita, la epistilbita, la gmelinita, la gonnardita, la mesolita y la thomsonita. Los cristales de zeolita suelen crecer bien, lo cual es típico de las reacciones hidrotérmicas en soluciones de rocas ricas en álcalis, como por ejemplo, los basaltos. Las zeolitas debidas a alteraciones hidrotérmicas de corrientes de lava basáltica en regiones geotérmicas existen en muchas partes del mundo, por ejemplo, en los baños romanos de Plombières (Francia) o en el parque de Yellowstone (EUA). Se trata entonces de zeolitas de origen volcánico.

CUADRO 2. Formación de zeolitas en la naturaleza.



Por otro lado, como lo discutimos anteriormente (Cuadro 2), las zeolitas también pueden provenir de sedimentos. En este caso se caracterizan por ser aglomerados de cristales de muy pequeñas dimensiones y a menudo con caras cristalinas mal desarrolladas. De todas las zeolitas de origen sedimentario, por ahora, es la clinoptilolita la que parece ser la más abundante. Son este tipo de formaciones las que han dado los grandes depósitos de interés tecnológico. (Bosh, 1988).

- **Síntesis de una Zeolita**

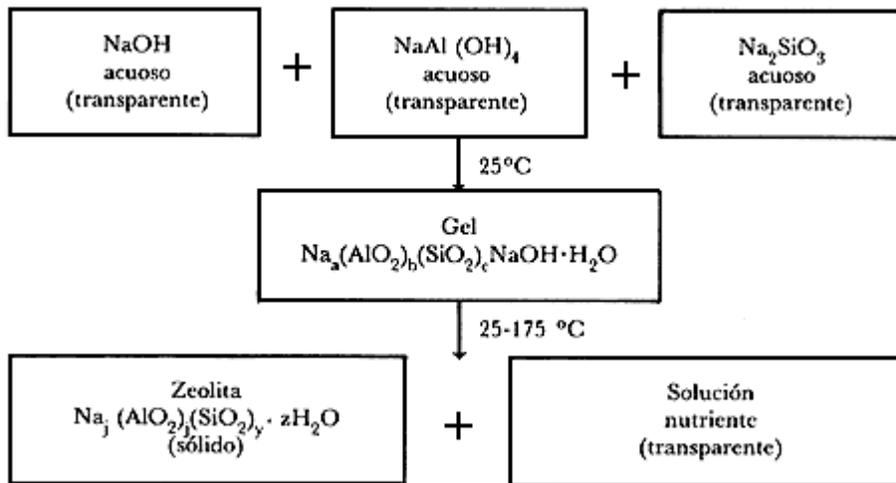
El objetivo para sintetizar una zeolita es destruir la estructura de los materiales iniciales, separar los tetraedros de silicio y los octaedros de aluminio y volverlos a cristalizar. De hecho, esta cristalización sólo es un nuevo arreglo de los octaedros de aluminio y los tetraedros de silicio que constituyen los compuestos iniciales. Si los tetraedros de Si y octaedros de Al estaban ordenados en cierta forma, ahora queremos "soltarlos" y volverlos a "fijar".

Iniciemos la síntesis a partir de tres soluciones acuosas: sosa (NaOH), NaAl (OH)₄ y Na₂SiO₃. Son soluciones típicas, transparentes y fluidas; las partículas de soluto están distribuidas homogéneamente en el disolvente. Mezclamos sin problemas el NaOH con el aluminato de sodio. Sin embargo, a medida que se va añadiendo la solución de silicato a la mezcla de aluminato y sosa, muy lentamente, a goteo, se nota que la solución resultante se vuelve turbia; ahora el líquido es gelatinoso y viscoso. Se ha formado un gel.

La estructura del gel se debe a una reacción en la cual se forman moléculas grandes a partir de muchas moléculas pequeñas (en química se habla de una polimerización). La composición y la estructura del gel polimerizado hidratado están controladas por el tamaño y la estructura de las especies que se polimerizan. Diferencias en la composición química y el peso molecular de las especies iniciales en las soluciones silicato conducen a diferencias en las estructuras del gel y por lo tanto a diferencias mayores en las fases zeolíticas producidas.

Los geles típicos se preparan a partir de aluminato de sodio, silicato de sodio e hidróxido de sodio porque todos son solubles. Durante la cristalización del gel, los iones de sodio y los componentes aluminato y silicato se acomodan paulatinamente y tienden a la estructura ordenada de un cristal, lo cual se debe a la depolimerización del gel debido a los iones hidróxilos (OH) presentes en la mezcla reactiva.

CUADRO 3. Síntesis de una zeolita.



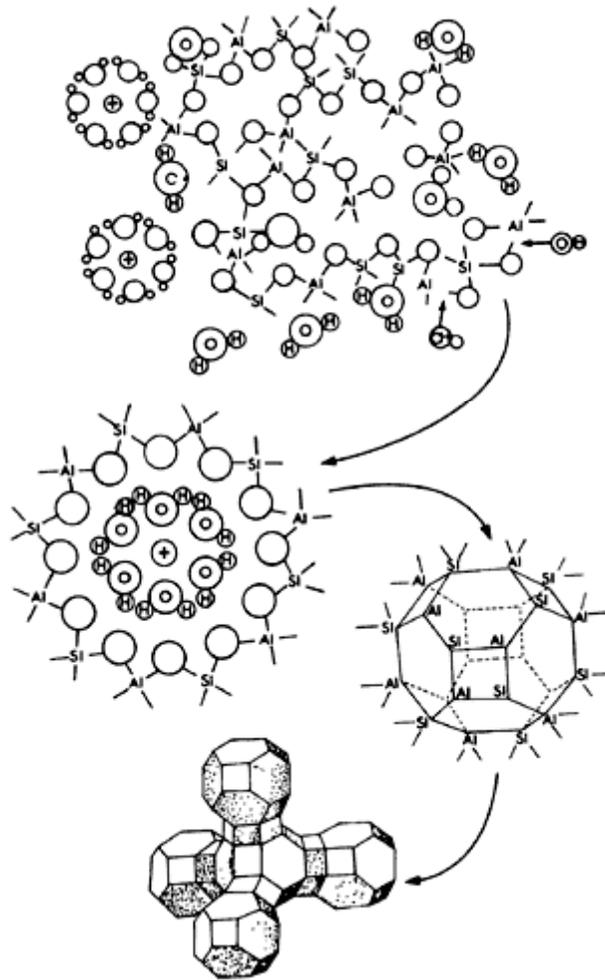


Figura 5. Síntesis de una zeolita; mecanismo de cristalización.

Viene entonces la formación de núcleos, que son pequeños cristales que a su vez sirven de base para que se formen los cristales grandes de zeolita. Estos núcleos, como en cualquier proceso de este tipo, crecen durante el periodo de cristalización. Como en los geles supersaturados se forma un gran número de núcleos cristalinos, el producto final consiste en un polvo finamente dividido en pequeños cristales usualmente de sólo unas cuantas micras.

La naturaleza de la zeolita obtenida queda determinada por las condiciones de la síntesis, o sea las concentraciones de los reactivos, el pH, el tiempo, la temperatura y la naturaleza, y la concentración de los promotores que se introduzcan. Muchas de las fases

formadas no son fases en equilibrio, son metaestables, que con el tiempo se convierten en otras fases más estables, así se trate de zeolitas o minerales. Las reacciones químicas que describen la síntesis de la zeolita están dadas en el cuadro 3 y en la figura 5.

La zeolita resultante se debe separar en el momento apropiado y lavar cuidadosamente hasta eliminar de la estructura porosa los productos que no hayan reaccionado. En el cuadro 4 resumimos las condiciones típicas para sintetizar algunas zeolitas importantes. En la figura 6, dependiendo de la razón de molaridad inicial $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, se predice el tipo de zeolita que se obtiene. Estos resultados son válidos siempre y cuando se trabaje con sales solubles y rangos de temperatura de cristalización entre 85 y 100°C, lo cual no siempre es el caso.

CUADRO 4. Condiciones típicas para sintetizar algunas zeolitas.

Tipo de zeolita	Composición de la mezcla reactiva (Moles)				Temperatura	Tiempo	Razón de molaridad
	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	H_2O	°C		Horas
A	2	1	2	35	100	2-4	2
X	3.6	1	3	144	100	7	2.5-3.0
Y	8	1	20	320	100	7	3-6
Mordenita	6.3	1	27	61	150	168	9-12

Más aún, también se pueden sintetizar zeolitas a partir de minerales, los caolines en particular, cuya composición, en lo que toca al contenido de Si y Al, es muy próxima a la de algunas zeolitas. Esta alternativa de obtención resulta interesante para nuestro país ya que las sales de aluminio se tienen que importar. Para que la síntesis sea eficaz hay que destruir por completo la red del caolín antes de preparar el gel. De allí que todas las patentes o artículos que tratan el tema propongan un tratamiento térmico extremo, preliminar a la disolución del caolín. Por ejemplo, si se desea obtener zeolita A o faujasita a partir de caolín, hay que calcinarlo entre 750 y 1000°C. En el cuadro 5 presentamos los resultados obtenidos: se comprueba que dependiendo de la temperatura de calcinación se obtiene una u otra zeolita y que las relaciones de la figura 6 no son válidas en este caso.

No queremos cerrar este punto sin mencionar que fue R.M. Barrer, en Inglaterra, el primero en sintetizar, por el procedimiento que hemos descrito, las contrapartes sintéticas de zeolitas; tales como la mordenita, analcima, etc. En 1953, R.M. Milton y colaboradores en EUA prepararon zeolitas cristalinas sintéticas mediante procesos de baja temperatura que fueron altamente exitosos y que no sólo reprodujeron zeolitas naturales (faujasita, chabasita), sino que generaron muchas especies nuevas de zeolitas, como es el caso de la zeolita A. (Bosch, 1998)

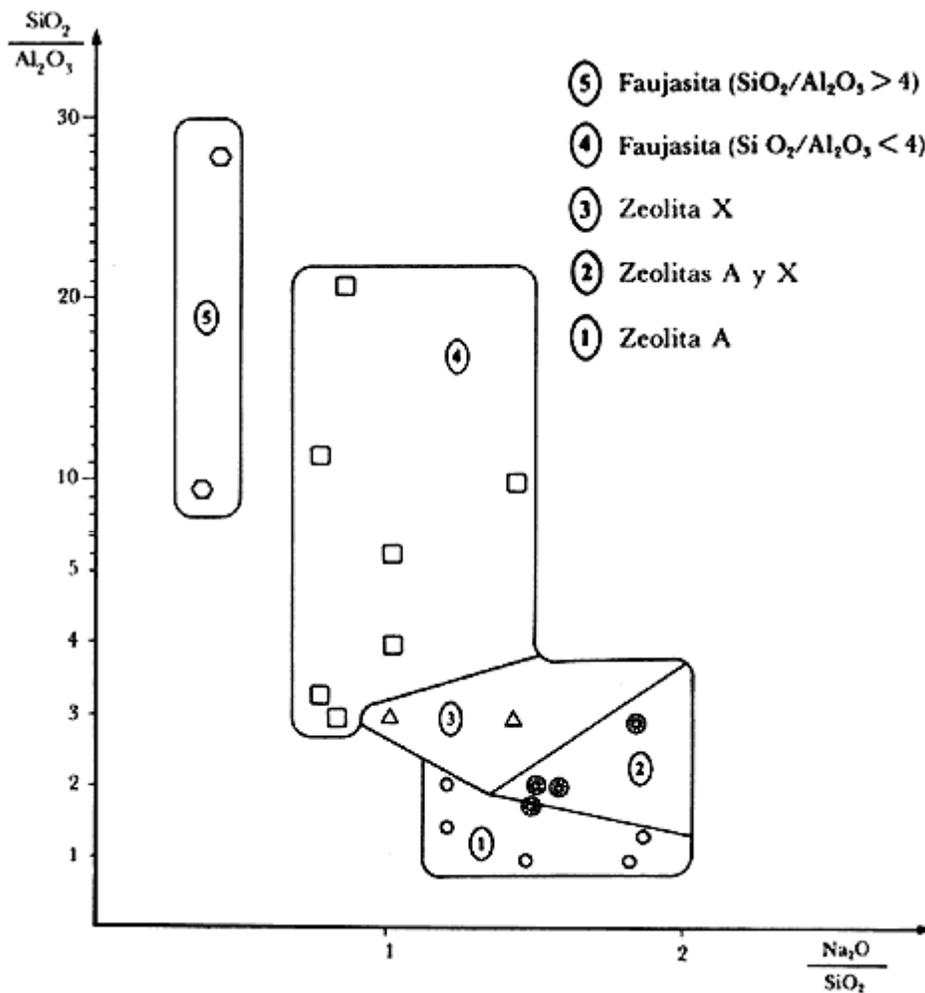


Figura 6. Tipos de zeolitas sintetizadas según la proporción de óxidos.

CUADRO 5. Dependencia entre el tipo de zeolita obtenida y la temperatura de calcinación del caolín

<i>Calcinación</i>		<i>Zeolita</i>
<i>Temperatura</i>	<i>Tiempo</i>	
750 °C	1 hora	A
900 °C	1 hora	A
950 °C	1 hora	X
1 000 °C	1 hora	Y
1 100 °C	1 hora	no se forma

2.2.4 Especificaciones

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 E.U.

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. (Fisicanet).

2.2.5 Regulaciones ambientales

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 amorfo o cristalino. 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 (Fisicanet)

2.2.6 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.

(Fisicanet),(United States Environmental Protection Agency, 1999), (Bosh,1988)

2.3 Principios de la Tecnología de Adsorción de Zeolita / agua

2.3.1 Adsorción

Esta consiste en la propiedad de ciertos materiales, que en estado sólido tienen una constitución porosa, capaz de absorber pequeñas cantidades de agua que se introducen en los poros del material. Esto tiene lugar sin que haya cambios permanentes, físicos o químicos, en cualquiera de las partes.

Para que esta agua pueda ser extraída del material, en forma de vapor, necesita una cierta cantidad de calor, el cual puede ser tomado de sus alrededores produciendo un efecto refrigerante. (Penso, Rivas, 1961)

Los sistemas de refrigeración por adsorción de agua y Zeolita, están conformados en su manera más simple por un evaporador / condensador, el cual contiene agua como líquido adsorbato y un adsorbedor / desorbedor el cual contiene Zeolita como sólido adsorbente. El material y la construcción de estos sistemas debe soportar temperaturas y bajos esfuerzos mecánicos (debido a la adsorción a presiones por debajo de 0.5 KPa). Además los recipientes deben de ser herméticos. Las construcciones de acero inoxidable de pared delgada han probado ser la mejor opción bajo estos requerimientos. La conductividad relativamente baja de la Zeolita requiere de grandes superficies de transferencia de calor para la entrada y salida del mismo.

Con el propósito de lograr la suficiente remoción de gases del sistema, como el vapor de agua, una pequeña bomba de vacío es suficiente, la cual es utilizada intermitentemente por corto tiempo. Bombas de vacío pequeñas y con presiones por debajo de 0.2 Kpa están disponibles comercialmente. (Schwarz, 1994)

2.3.2 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 la presión de vapor del 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 . (Schwarz,1994)

2.3.3 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.

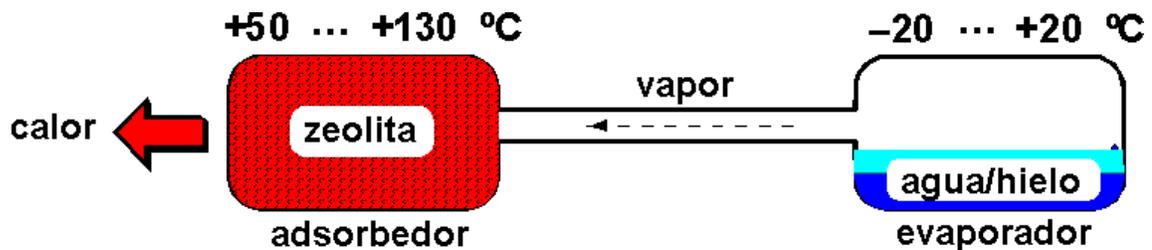


Figura 7. Adsorción de la Zeolita

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.

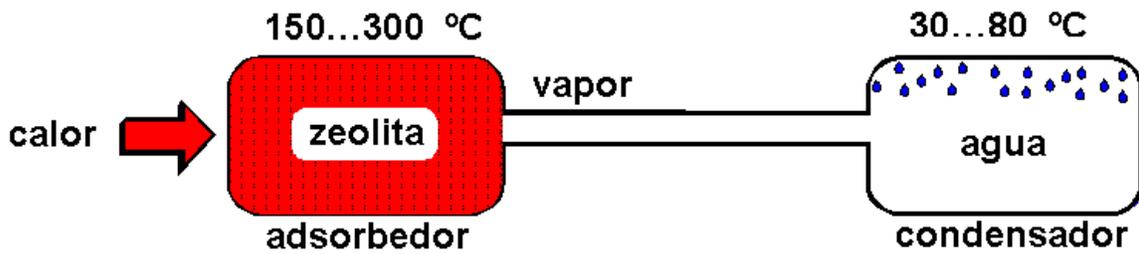


Figura 8. Desorción de la Zeolita

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.

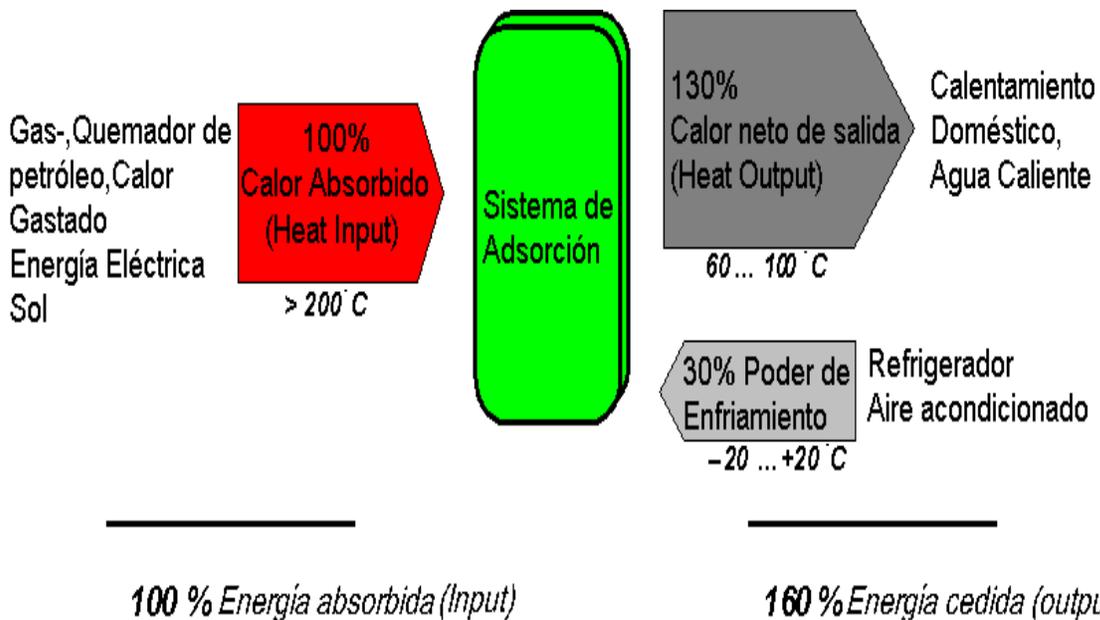


Figura 9. Energía involucrada en el proceso

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 9, 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.(Zeo-tech).

CAPITULO 3

Diseño del Prototipo

Para el diseño del prototipo se realizará un esquema inicial, 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 enfriar un líquido de 30 hasta unos 5°C en un ambiente de playa tropical.

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

En la fase de adsorción se congelará un determinado volumen de agua, este hielo formado se usará para refrigerar agua. Para determinar la cantidad de hielo se calcularán las pérdidas hacia el ambiente a través de las paredes del termo, y el calor promedio cedido del agua al hielo. Luego se calculará la cantidad de zeolita en función del vapor de agua.

Finalmente para la fase de desorción se calculará el calor promedio para calentar la zeolita a 250°C durante 3 horas para deshumidificarla. Luego de haberse realizado los cálculos se acotarán definitivamente las características del equipo.

3.1 Esquema inicial del prototipo.

Como punto de partida proponemos el siguiente esquema del prototipo (figura 10), que finalmente será cambiado de acuerdo a los cálculos y análisis elaborados en el desarrollo de este capítulo.

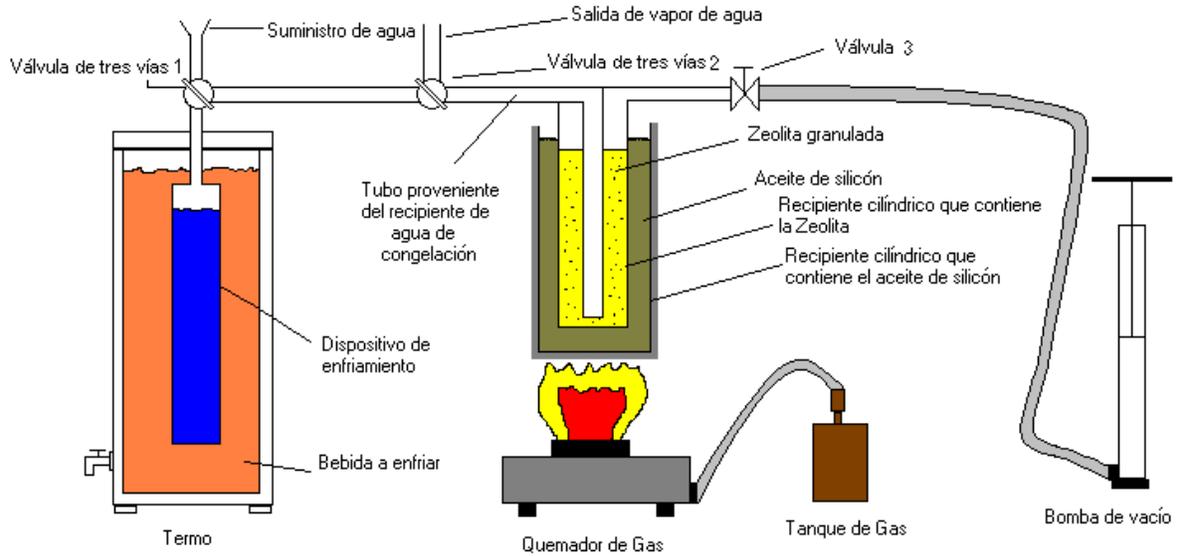


Figura 10. Esquema inicial del prototipo

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 (teniendo las válvulas de tres vías 1 y 2 cerradas al ambiente y la válvula 3 abierta), 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, entonces el agua contenida en el recipiente de enfriamiento comienza a enfriarse hasta congelarse, el hielo producido en este recipiente es utilizado para enfriar la bebida contenida en el termo.

La fase de Desorción se inicia cerrando la válvula de tres vías 2 para conducir el vapor por la salida correspondiente como se aprecia en la figura 10 (cerrando el paso hacia el dispositivo de enfriamiento), y teniendo la válvula 3 cerrada para evitar el paso de vapor hacia la bomba para comenzar el calentamiento. Al encender el quemador este calienta la zeolita por medio de un baño de María empleando aceite de silicón, garantizando de esta

manera un calentamiento uniforme, que proporcione una efectiva desorción del vapor de agua.

Finalmente se repondría el agua perdida durante la fase de desorción reiniciándose nuevamente el proceso.

3.2 Condiciones del termo

El sistema será diseñado para un ambiente de playa en donde las condiciones climáticas son más exigentes, las cuales son:

Temperatura ambiente = 303K (30°C)

Presión atmosférica = 101.3KPa

Temperatura inicial de la bebida a refrigerar = 303K (30°C)

Temperatura de la zeolita = 303K (30°C)

Gravedad = 9,8091 m/seg²

Temperatura del aceite de silicón = 303K (30°C)

3.2.1 Selección de los componentes del termo

Usaremos un termo comercial con una capacidad de 4 Lts (0.004m³) como se muestra en la figura 11.

Teniendo como recubrimiento interno y externo poliestireno de alto impacto con las siguientes propiedades:

Conductividad térmica, K = 0.0986 W/m K (Guide to Plastics (1979))

Emisividad $\epsilon = 0.9$ (Guide to Plastics(1979))

y como aislante espuma de poliuretano con las siguientes propiedades:

Conductividad térmica, $K= 0.020188 \text{ W/m K}$ (Guide to Plastics (1979))

Las otras propiedades de estos materiales no se tomaron en cuenta ya que no serán usadas para efectos de cálculos.

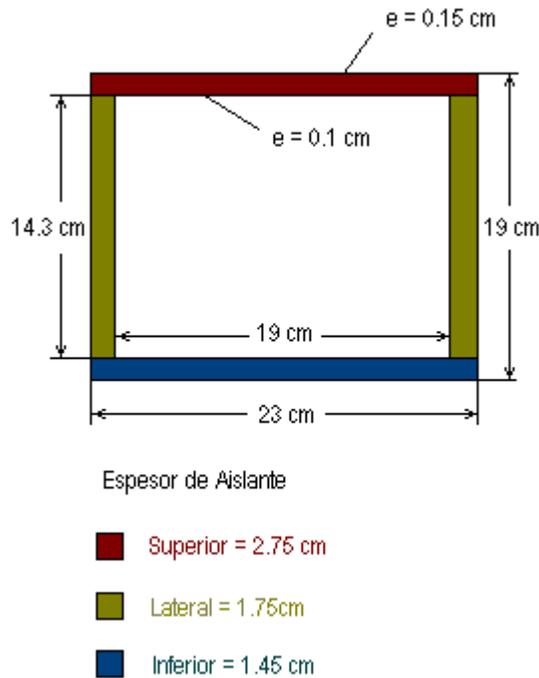


Figura 11. Termo

Internamente se tendrá un recipiente cilíndrico de acero inoxidable AISI 302 , donde se formará el hielo, el cual tendrá una altura $5.5 \times 10^{-2} \text{ m}$, y un diámetro de $1.8 \times 10^{-1} \text{ m}$ y un espesor de pared de $1 \times 10^{-3} \text{ m}$, la parte superior de este recipiente tiene acoplado una tubería de $\frac{1}{4}''$ de acero inoxidable, la cual sobre saldrá de la tapa del termo y estará acoplada a una válvula de globo $\frac{1}{4}''$, con el fin de mantener el vacío dentro del recipiente con hielo.

3.2.2 Cálculo de la Carga Térmica de enfriamiento:

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

Comenzaremos suponiendo una temperatura superficial, para determinar el coeficiente convectivo promedio del ambiente, luego se calculará el valor 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 interna y en consecuencia el coeficiente convectivo interno promedio, seguidamente se calculará el calor q_2 (ver ecuación 16), finalmente se calcula el error relativo entre q_1 y q_2 , si este es menor del 10% se promedian los dos valores de q y se detiene la iteración tomando este valor como el valor final de calor, si no es menor del 10% se usa este promedio para calcular el valor de temperatura superficial de la siguiente iteración utilizando la ecuación (15), y a continuación se repetirá el proceso iterativo.

Primeramente se calculará el radio crítico para comprobar qué espesor de aislante cumple su propósito.

- **Comprobación del Radio Crítico**

El cálculo se realizó en una hoja de Microsoft Excel determinando para distintos valores de espesor de aislante que resistencia total se origina.

Considerando una conducción unidimensional en estado estable, empleamos el siguiente circuito análogo para simular las resistencias térmicas:

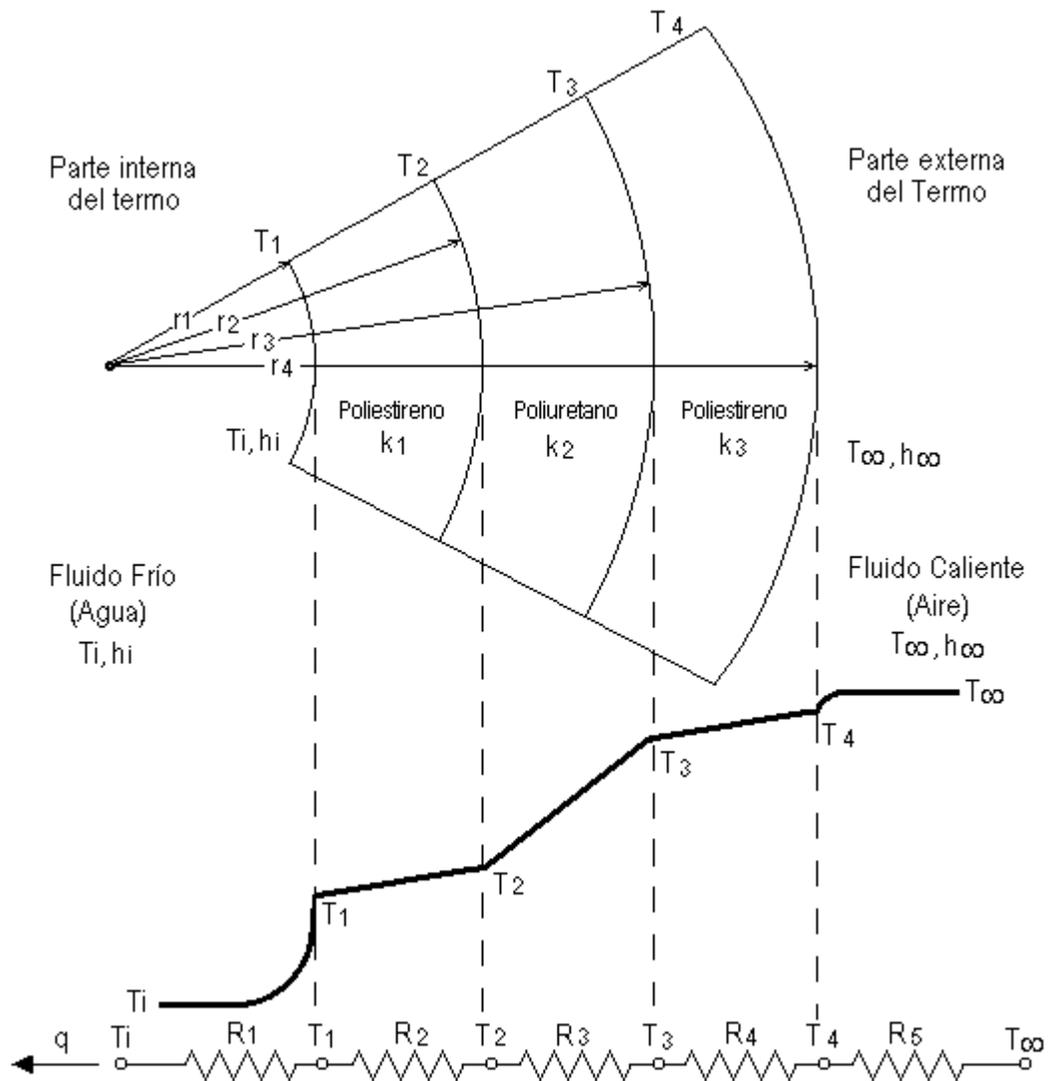


Figura 12. Circuito Térmico análogo para pared cilíndrica (Termo)

Donde R_1 y R_5 representan las resistencias térmicas por convección, dadas por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{2 \times \pi \times r \times L \times \bar{h}} \quad (1)$$

R2, R3 y R4, representan las resistencias térmicas por conducción, dadas por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\text{LN}(r_{\text{externo}}/r_{\text{interno}})}{2 \times \Pi \times L \times k} \quad (2)$$

Donde:

r = radio desde el centro del cilindro a la pared donde se convecta

L = altura del cilindro

\bar{h} = coeficiente convectivo promedio

k = conductividad térmica del material

La resistencia total a la convección es:

$$R_{\text{total a la convección}} = R_1 + R_5 \quad (3)$$

La resistencia total a la conducción es:

$$R_{\text{total a la conducción}} = R_2 + R_3 + R_4 \quad (4)$$

La resistencia total se calcula de la siguiente manera:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (5)$$

ya que se cumple que es un sistema lineal.

Los siguientes valores fueron sustituidos en las ecuaciones (1) y (2).

$$k_1 = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$k_2=2.02 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$k_3=9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$r_1=9.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$r_2=9.6 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$h_o= 2.84 \text{ W/m}^2 \text{ K (externo)}$$

$$\Pi=3.1416 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$L = 1.43 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$h_i =107.66 \text{ W/m}^2 \text{ K(interno)}$$

Graficando los valores obtenidos de las ecuaciones 3, 4 y 5, y variando el radio (r_3) en $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ obtuvimos lo siguiente :

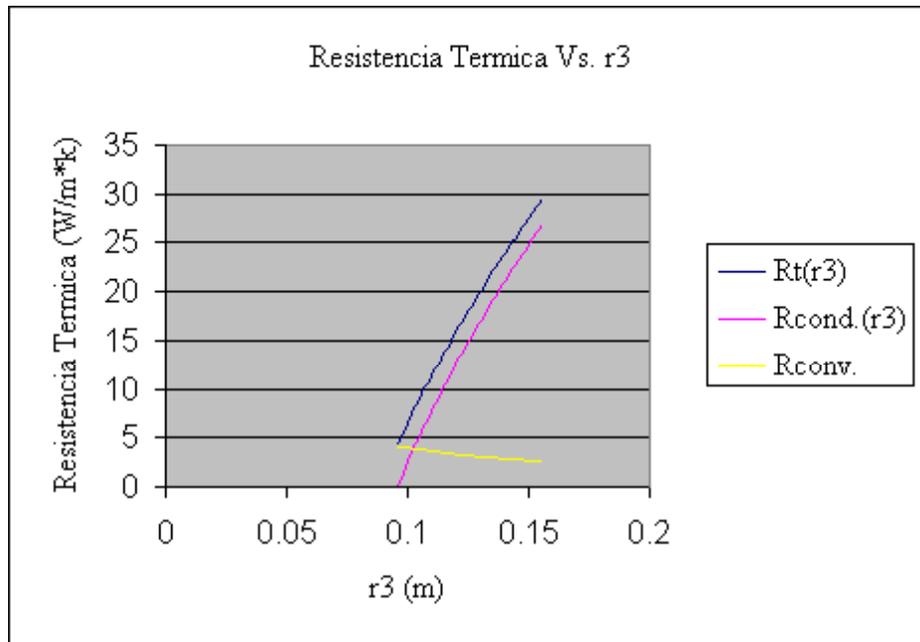


Figura 13. Gráfica de resistencia vs. Radio

De esta manera se comprueba que para cualquier espesor de aislante colocado, se cumplirá su función correctamente.

Para efectos de diseño seleccionaremos un espesor de $1.5 \times 10^{-3} \text{m}$, el cual cumple un buen efecto de aislamiento y no ocupa mucho espacio.

3.2.2.1 Cálculo del Calor Perdido en el Termo

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

Se emplearán correlaciones empíricas para calcular el coeficiente convectivo promedio, en forma general se utilizara la ecuación:

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

Donde $\overline{\text{Nu}}_L$ 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 este es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de empuje con las fuerzas viscosas en el fluido cuya formula es:

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

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.

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

- **Cálculo del Calor Perdido en las Placas Superior e Inferior del Termo**

Placa superior:

— **Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo**

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 301.22 \text{ K}$ ($28.22 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞).

De la ecuación (9) obtenemos:

$$T_m = 302.11 \text{ K}$$

De la tabla A.4 (Incropera, DeWitt) para aire a 302.11K:

$$\nu = 16.10 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 26.46 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$$

$$\alpha = 22.81 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 7.07 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con $T_m = 302.11\text{K}$:

$$\beta = 3.31 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$$

Con la ecuación (7) calculamos:

$$Ra_L = 29910.89$$

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:

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

sustituyendo se tiene:

$$\bar{Nu}_L = 7.10$$

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:

$$\bar{h}_o = 3.26 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— Cálculo del coeficiente de radiación promedio.

Para el cálculo del coeficiente de radiación se tomo un promedio entre las temperaturas máximas y mínimas esperadas en el ambiente(entre 298 y 303 K). 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). (Incropera, De Witt)

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

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:

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

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

Para poliestireno de alto impacto $\varepsilon = 0.9$

De la ecuación (12) con $T_s = 298 \text{ K}$

$$h_{r1} = 5.53 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Para $T_s = 302 \text{ K}$

$$h_{r2} = 5.65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Luego promediamos h_{r1} y h_{r2} :

$$\bar{h}_r = 5.59 \text{ W/m}^2\text{K}$$

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Para calcular la transferencia de calor por convección la ecuación apropiada es:

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

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_∞ .

$$q_1 = q_{\text{convección}} + q_{\text{radiación}} \quad (15)$$

$$q_1 = 6.55 \times 10^{-1} \text{ W}$$

Partiendo del circuito análogo de la figura 14 y bajo las condiciones mencionadas inicialmente planteamos la ecuación de calor a través de las resistencias de la siguiente manera:

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

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.

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 14).

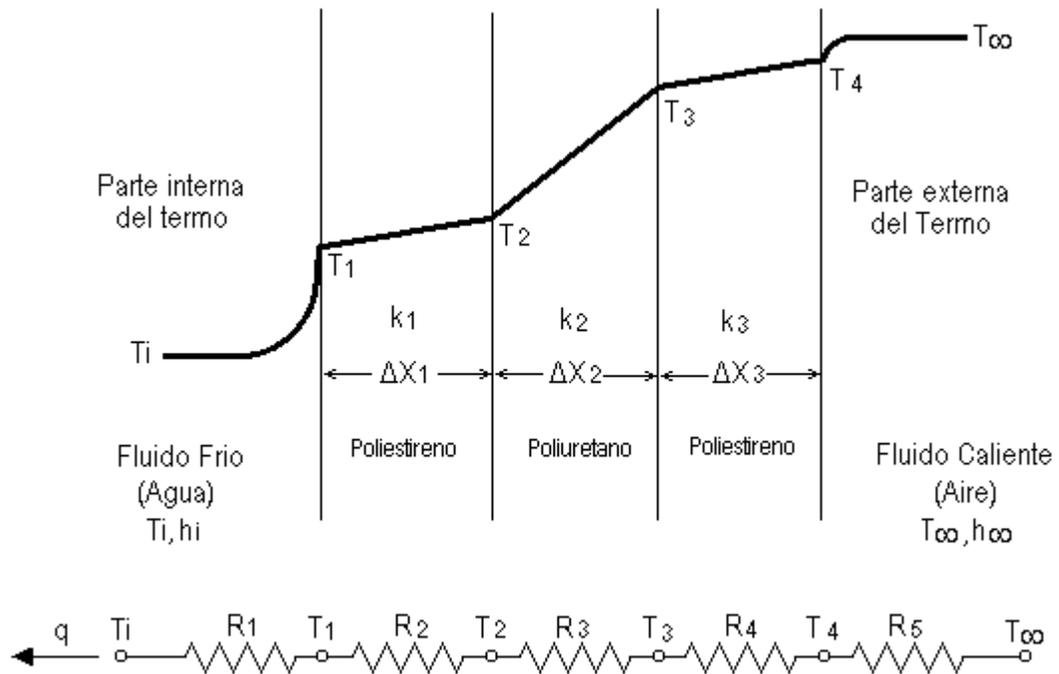


Figura 14. Circuito Térmico análogo para pared Plana (Termo)

Con $T_s = 301.22\text{K}$, $k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$, calculamos T_3 :

$$T_3 = 300.98\text{K}$$

Con T_3 y $k = 2.018 \times 10^{-2}$

$$T_2 = 279.51\text{K}$$

Con T_2 y $k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$

$$T_1 = 279.35\text{K}$$

Se promedia T_1 y la temperatura interna deseada en el termo ($T_i = 278\text{K}$):

$$T_m = 278.67\text{K}$$

De la tabla A.6 (Incropera, De Witt) a T_m :

$$v_f = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$c_{p_f} = 4201 \text{ J/Kg.K}$$

$$\mu_f = 1.48 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$$

$$k_f = 5.79 \times 10^{-1} \text{ W/m.K}$$

$$\beta_f = 2.51 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg /m}^3$$

Para determinar el coeficiente de difusividad térmica se emplea la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (19)$$

De la ecuación anterior obtenemos:

$$\alpha = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Para la viscosidad cinemática se utiliza la expresión:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (20)$$

Sustituyendo se obtiene:

$$v = 1.48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

De la ecuación (7) con: $\beta_f = 2.51 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $L = 5.75 \times 10^{-2}$, $T_\infty = T_i = 278 \text{ K}$, $T_s = T_1 = 279.35 \text{ K}$, $\alpha = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu = 1.48 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$Ra_L = 308541.60$$

Calculamos el número de Nusselt de acuerdo a la ecuación (10) :

$$\bar{Nu}_L = 12.72$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 128.34 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación(16).

$$R_i = 1.88 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 2.45 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 32.79 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 3.66 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_o = 2.79 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 6.89 \times 10^{-1} \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 4.91 \times 10^{-2} \text{ W} \Rightarrow 4.91\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 6.72 \times 10^{-1} \text{ W}$$

Placa inferior:

— **Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo**

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 294.49 \text{ K}$ ($21.49 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos con la ecuación (9) la temperatura media.

$$T_m = 298.74 \text{ K}$$

De la tabla A.4 para aire (Incropera, De Witt) a T_m :

$$\nu = 1.58 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 2.62 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 2.23 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 7.07 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 3.35 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con la ecuación (7) calculamos:

$$\text{Ra}_L = 128488.15$$

Luego mediante la ecuación de \overline{Nu}_L para superficie inferior de placa caliente o superficie superior de placa fría:

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

Sustituyendo en la ecuación (6):

$$\overline{h}_o = 2.32 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Por ser la parte inferior del termo no se considera la radiación en este cálculo.

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Con la ecuación (14) se obtiene el calor entre T_s y T_∞

$$Q_1 = 8.20 \times 10^{-1} \text{ W}$$

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 14).

Con $T_s = 294.49\text{K}$, $k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$, calculamos T_3 :

$$T_3 = 294.18\text{K}$$

Con T_3 y $k = 2.02 \times 10^{-2}$

$$T_2 = 280\text{K}$$

Con T_2 y $k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$

$$T_1 = 279.79\text{K}$$

Se promedia T_1 y T_i :

$$T_m = 278.89\text{K}$$

De la tabla A.6 (Incropera, De Witt) con T_m :

$$v_f = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$c_{p_f} = 4200 \text{ J/Kg.K}$$

$$\mu_f = 1473.06 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$$

$$k_f = 580.224 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$$

$$\beta_f = 28.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg /m}^3$$

De las ecuaciones (19) y (20)

$$\alpha = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu = 1.47 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

De la ecuación (7):

$$Ra_L = 468484.70$$

Calculamos el número de Nusselt de acuerdo a la ecuación (21) :

$$\bar{Nu}_L = 7.06$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 71.24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ . Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación (16).

$$R_i = 3.39 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 2.45 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 17.29 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 3.66 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_o = 10.37 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 8.74 \times 10^{-1} \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 6.13 \times 10^{-2} \Rightarrow 6.13\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 0.85 \text{ W}$$

Parte lateral del termo:

— Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 300.41 \text{ K}$ ($27.41 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞), mediante la ecuación(9)

$$T_m = 301.71\text{K}$$

De la tabla A.4 para aire(Incropera, De Witt) a T_m :

$$\nu = 1.61 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 2.64 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 2.28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 7.07 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 3.31 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con la ecuación (7) y considerando $L = 0.143\text{m}$ calculamos:

$$\text{Ra}_L = 673526.18$$

Para la convección libre en placas verticales con $\text{Ra}_L \leq 10^9$ empleamos la ecuación:

$$\bar{\text{Nu}}_L = 0.68 + \frac{0.670\text{Ra}_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (22) \quad (\text{Churchil, Chu (1975)})$$

Luego mediante esta ecuación:

$$\bar{\text{Nu}}_L = 15.40$$

Sustituyendo en la ecuación (6):

$$\bar{h}_o = 2.85 \text{ W/m}^2\text{K}$$

— **Cálculo del coeficiente de radiación promedio.**

De la ecuación (12) con $T_s = 298 \text{ K}$ y $\varepsilon = 0.9$

$$hr_1 = 5.54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Para $T_s = 302 \text{ K}$

$$hr_2 = 5.65 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Luego promediamos hr_1 y hr_2 :

$$\bar{h}_r = 5.5947 \text{ W/m}^2\text{K}$$

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

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

$$q_1 = 2.26 \text{ W}$$

Se plantea la ecuación (16) para cada material sustituyendo en ella la ecuación (2), de esta expresión se despeja la temperatura en cada nodo (ver figura 12).

Con $T_s = 300.41 \text{ K}$, $k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$, calculamos T_3 :

$$T_3 = 300.07\text{K}$$

$$\text{Con } T_3 \text{ y } k = 2.02 \times 10^{-2}$$

$$T_2 = 279.23\text{K}$$

$$\text{Con } T_2 \text{ y } k = 9.86 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$$

$$T_1 = 278.96\text{K}$$

Se promedia T_1 y T_i :

$$T_m = 278.48\text{K}$$

De la tabla A.4 con T_m :

$$v_f = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$c_{p_f} = 4.20 \text{ KJ/Kg.K}$$

$$\mu_f = 1.49 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$$

$$k_f = 5.80 \times 10^{-1} \text{ W/m.K}$$

$$\beta_f = 2.21 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = 1 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$$

De las ecuaciones (19) y (20)

$$\alpha = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$v = 1.49 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

De la ecuación (7):

$$Ra_L = 2969240.19$$

Calculamos el número de Nusselt de acuerdo a la ecuación (22) :

$$\bar{Nu}_L = 26.56$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 107.66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Con las ecuaciones (1) y (2) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación (16).

$$R_i = 1.09 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 1.18 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 9.32 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 1.48 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_o = 1.15 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 2.30 \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 2 \times 10^{-2} \text{ W} \Rightarrow 2\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 2.28W$$

3.2.2.2 Cálculo del calor promedio cedido por el líquido a enfriar

Para calcular un valor promedio del calor cedido por el líquido planteamos la ecuación de primera ley de la termodinámica, considerando flujo permanente estado permanente, para un volumen de control que en este caso es el espacio que ocupa el líquido.

$${}_1q_2 = u_2 - u_1 + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2} + g(Z_2 - Z_1) + {}_1w_2 \quad (23)$$

Se supone que no existe variación de energía cinética ni de energía potencial, además no existe trabajo en el sistema, por tanto la ecuación queda de la forma:

$${}_1q_2 = u_2 - u_1 \quad (24)$$

Aplicando la definición de entalpía

$$h = u + Pv \quad (25)$$

Sustituyendo la ecuación (25) en la ecuación (24) nos queda:

$${}_1q_2 = (h_2 - h_1) - P_2v_2 - P_1v_1 \quad (26)$$

Se considera que no hay variación de volumen por tanto:

$${}_1q_2 = (h_2 - h_1) \quad (27)$$

Debido a que no hay cambio de fase entre el proceso 1 y 2, considerando despreciable la variación del calor específico por la temperatura se tiene:

$$\Delta h = C_p \Delta T \quad (28)$$

Y multiplicando la variación de entalpía y por la masa involucrada en el volumen de control tenemos:

$${}_1Q_2 = mC_p\Delta T \quad (29)$$

Empleando la ecuación anterior con $\bar{C}_p = 4195\text{J/KgK}$, la masa de líquido a enfriar es de 2.3Kg para nuestro sistema tenemos:

$$Q = 241212.5\text{J}$$

En este cálculo no se considero el calor cedido al recipiente que contiene el hielo ya que este será de acero inoxidable AISI 302, y presenta una conductividad térmica muy alta, por tanto la resistencia a la transferencia de calor es despreciable.

3.2.2.3Cálculo de la carga térmica total

Sumando la rata calor que fluye a través del termo obtenemos un total de $q = 3.80\text{W}$, considerando que el líquido se desea mantener refrigerado durante 6 horas tenemos $Q = 82073.52\text{ J}$.

Ahora sumando este calor mas el calor promedio cedido por el líquido a enfriar tenemos el calor total que es absorbido por el hielo.

$$Q_{\text{total}} = 323286.02\text{ J}$$

Para efectos de cálculos de refrigeración consideramos un factor de seguridad de 1.1

Por lo tanto el valor final del calor es:

$$Q_{\text{total}} = 323286.02 \text{ J} \times 1.1 = 355614.62 \text{ J}$$

3.2.3 Cálculo de la cantidad de Hielo

Para determinar la cantidad de Hielo, se usará 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:

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

$$\text{Masa de agua} = 1064.67 \text{ gr}$$

3.2.4 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 esta 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 1.0646719Kg tenemos:

$$Q = 341,75\text{KJ}$$

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 2466.54KJ/Kg entre 30°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:

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

$$\text{Masa de vapor} = 1.39 \times 10^{-1} \text{ Kg}$$

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 1.20 Kg de agua, el porcentaje de agua evaporada es:

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

$$\% \text{ Vapor de agua} = 11,58 \%$$

Es de importancia tomar en cuenta que el proceso ocurre con extracción gradual de vapor por lo tanto el fluido no llega a un valor de calidad que nos permita obtener la masa de agua evaporada.

Con este propósito realizamos la representación del proceso en el siguiente diagrama termodinámico (ver figura 15), en el cual se representa el proceso, este tiene su estado inicial en 1, a Temperatura y presión ambiente de 303 K (30°C) y 101.3 Kpa respectivamente, comenzando a partir de este punto bajando la presión en el sistema manteniendo la temperatura constante hasta el estado 2 donde se llega a la línea de saturación a una presión de aproximadamente 4.29 Kpa y volumen específico de 0.01004 m³/Kg , comenzando el cambio de fase, donde se inicia la formación de vapor, que a su vez al formarse es adsorbido por la zeolita, esto ocurre desde el estado 2 hasta el estado 3 donde el agua ya se encuentra por debajo del punto triple (por debajo de 0.609 Kpa), específicamente en el estado sólido en equilibrio con vapor a 0.5 Kpa y -2°C.(Valores obtenidos de la Tablas de Vapor (Van Wilen y Sonntag(1997))

Es importante acotar que el proceso existen perdidas por lo cual bajamos la presión por debajo del punto triple para garantizar la formación de hielo.

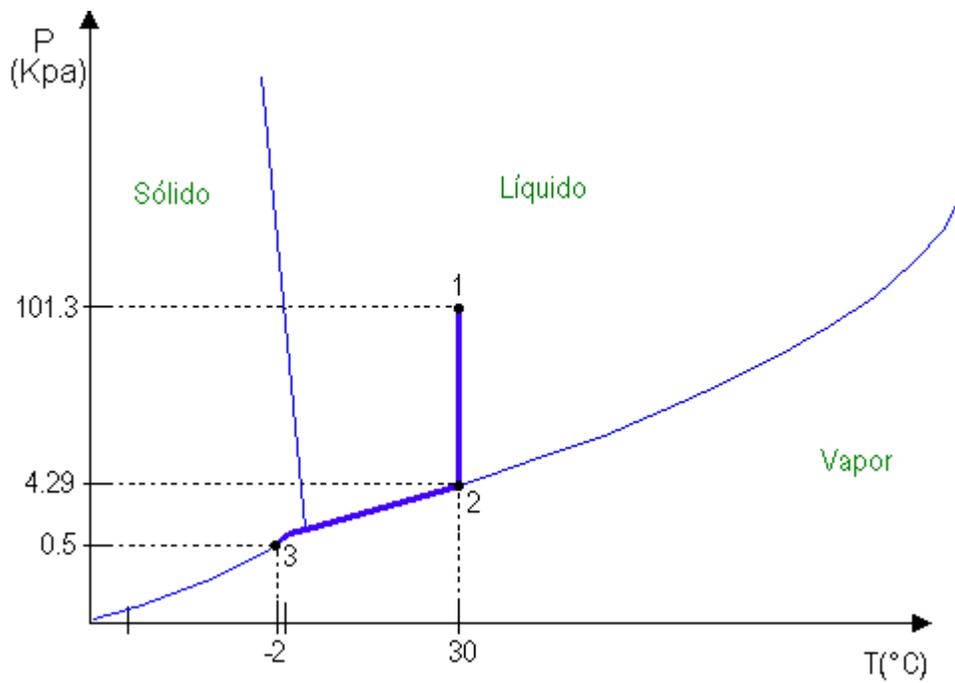
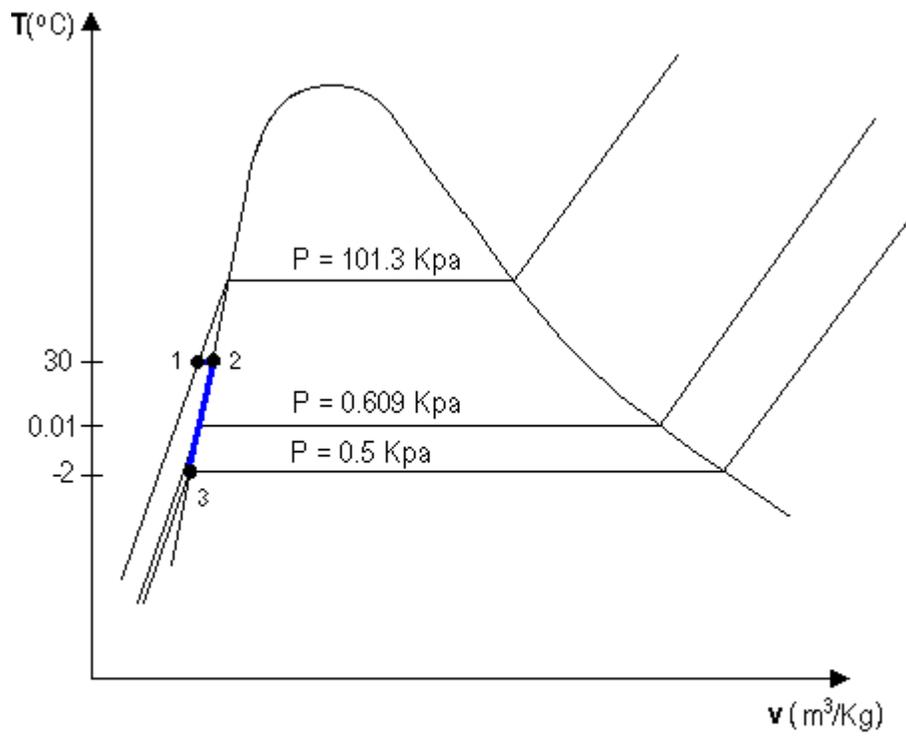


Figura 15. Diagrama Termodinámico del Proceso

Con el fin de corroborar los resultados teóricos obtenidos se realizara una parte experimental, la cual nos permitirá definir la cantidad de vapor y determinar la relación Zeolita-hielo, además de comprobar el principio de adsorción.

3.3Parte experimental

- **Ensayo de Adsorción**

Con el fin de comprobar el principio de operación del sistema, se realizó un montaje de la fase de adsorción, donde se obtuvieron datos de la cantidad de vapor formada, la cantidad de agua adsorbida por la Zeolita y la cantidad de hielo formado.

- **Componentes**

Para este propósito se realizó la configuración mostrada en la figura 23, la cual consta de los siguientes componentes:

- Una campana de evaporación de vidrio de aproximadamente 0.0027m^3 con base de acero y válvula a la entrada (figura 22).
- Bomba de vacío rotativa Leybold-Heraeus Modelo D-2 de un caudal de aproximadamente $0.001038\text{ m}^3/\text{Seg}$, con presiones de vacío menores a 500 Pa (figura 18).
- Mangueras de alta presión 300 Psi (2068427.18 Pa), de 5/16” (0.07937 m) (figura 19).
- Trampa de vapor de vidrio (Boro-Silicato), de diámetro 85 cm (0.85 m), altura 6.5 cm (0.065 m), distancia del tubo interno de aspiración hasta la base 2 cm (0.02 m), y diámetro de los tubos 0.9 cm (0.009), con espesor de pared de 1mm aproximadamente. Temperatura de trabajo 300 °C aplicando vacío de 10^{-3} mbar (0.1 Pa) (figura 17).

- Tamiz Molecular, Zeolita Tipo 4A granulada de 4-8 Mesh (Figura 16).
- Recipiente de plástico 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 21).
- Cronómetro.
- Balanza con apreciación de ± 0.01 gr.
- Medidor de Temperatura Trisense con termocuplas tipo J, con una apreciación de ± 0.01 °C.



Figura 16. Zeolita 4A



Figura 17. Trampa de Vapor



Figura 18. Bomba de Vacío



Figura 19. Manguera



Figura 20. Trampa de Vapor con Zeolita



Figura 21. Vaso Plástico



Figura 22. Campana Evaporadora



Figura 23. Montaje Experimental

▪ **Procedimiento**

El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Medimos la masa de la trampa de vapor y del recipiente de plástico (ambos vacíos).
2. Llenamos la trampa de vapor con la Zeolita y medimos su masa total.
3. Colocamos una cantidad específica de agua en el recipiente de plástico.
4. Medimos la temperatura ambiente, del agua dentro del recipiente de plástico, y de la zeolita en la trampa de vapor.
5. Introducimos el recipiente de plástico con el agua dentro de la campana de evaporación y se sella con vaselina, dejando cerrada la válvula.
6. Acoplamos la bomba de vacío con la trampa de vapor y esta con la campana de evaporación.
7. Arrancamos la bomba haciendo vacío en la trampa de vapor, con el fin de comprobar que no existen fugas en este tramo.
8. Al estabilizarse la presión se abrimos la válvula de la campana, y se comenzamos a cronometrar.
9. Tomamos la primera medición justo en el momento de la formación de hielo, y la segunda medición en el momento de apagar la bomba de vacío.
10. Cerramos la válvula de la campana de evaporación, y procedemos 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 trampa de vapor.

- **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos son reflejados en la siguiente tabla

Masa del recipiente sin Zeolita = 160.65 gr

Masa del recipiente sin Agua = 4.62 gr

Cuadro 5. Resultados experimentales

Prueba N°	Temp. Amb. (°C)	Inicial				Final				Tiempo En que se comenzó a formar hielo (min)	Tiempo Que se hizo vacío (min)	Masa de hielo (gr)
		Recipiente con Zeolita		Recipiente con Agua		Recipiente con Zeolita		Recipiente con Agua				
		Masa (gr)	Temp. (°C)	Masa (gr)	Temp. (°C)	Masa (gr)	Temp. (°C)	Masa (gr)	Temp. (°C)			
1	24.1	304.40	25.3	14.62	21.8	305.67	36.4	13.15		8	10:43	7.44
2	23.1	314.90	25.2	14.62	22.6	316.20	35.2	13.10		4:25	10	----
3	23.2	316.20	21.8	14.62	22.2	317.44	35.8	13.01		4:58	10	9.5
4	22.3	317.45	25.1	14.62	23.4	318.60	35.6	13.15		6:31	10	8.69
5	22.2	318.56	24.6	24.62	24.3	320.38	35.5	21.88		11:20	16:35	8.45
6	23.5	320.38	23.4	24.62	23.2	322.16	34.7	21.5		10:38	20	9.52
7	23	348.07	27	24.62	22	350.09	34	21.96		8:18	15:30	10.42
8	21	350.09	28	29.62	21	352.47	33	25.66		15	25	12.45

- **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:

Cuadro 6. Pérdidas de vapor

Diferencia de masa en la Zeolita (gr)	Diferencia de Masa en el Agua (gr)	Pérdida de vapor de agua (gr)	Pérdida de vapor de agua (%)
1.27	1.47	0.2	13.60
1.3	1.52	0.22	14.47
1.24	1.61	0.37	22.98
1.15	1.47	0.32	21.76
1.82	2.74	0.92	33.57
1.78	3.12	1.34	42.94
2.02	2.66	0.64	24.06
2.38	3.96	1.58	39.89

Cuyo promedio es 0.69 gr (26.66%)

Basándonos en la suma de la cantidad de hielo formado y la cantidad de vapor adsorbido en la Zeolita tenemos la cantidad inicial de agua, luego obtenemos el porcentaje de vapor dentro de la masa total.

$$\text{Masa de Vapor} = \text{masa final} - \text{masa inicial} \quad (34)$$

$$\text{Masa Total} = \text{Masa de Vapor} + \text{Masa de hielo} \quad (35)$$

empleando la ecuación (33) obtenemos:

Cuadro 7. Porcentaje experimental de vapor

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7	8
% Vapor	14.58	No se midió	11.54	11.68	17.72	15.75	16.23	16.04

En promedio la cantidad de vapor formado que se forma en el proceso es 14.79 %

- **Relación Hielo-Zeolita**

Para determinar la relación de la cantidad de Zeolita para generar cierta cantidad de hielo se verifica la cantidad de vapor adsorbido y la cantidad de Zeolita necesaria para hacer esta adsorción.

Para esto usamos el valor de capacidad de adsorción obtenida del grafico N° 24, con este valor calculamos la cantidad de Zeolita necesaria para adsorber el porcentaje de vapor obtenido de la diferencia de masa en la Zeolita.

$$\text{Masa de Zeolita} = \frac{\text{Masa de Vapor}}{0.204 \text{ gr Vapor/gr Zeolita}} \quad (36)$$

Cuadro 8. Relación zeolita-hielo

Masa de Zeolita (gr)	Masa de Hielo (gr)	Relación Zeolita-Hielo
6.22	7.44	1: 1.19
6.07	9.5	1: 1.56
5.63	8.69	1: 1.54
8.92	8.45	1: 0.94
8.72	9.52	1: 1.09
9.90	10.42	1: 1.05
1.66	12.45	1:1.06

Cuyo promedio es 1: 1.20

▪ **Análisis de Resultados:**

Las pruebas fueron hechas con diferentes volúmenes de agua para determinar si existía una relación entre la cantidad de agua que se evapora y la cantidad inicial de agua.

Para las pruebas se emplearon diferentes cantidades de zeolita, desde la prueba 2 hasta la prueba 6 no se cambio la Zeolita, al igual que en las pruebas 7 y 8.

Por condiciones del montaje experimental, existe un cierto error en las mediciones ya que el agua al ebulir salpica algunas gotas que caen fuera del recipiente de plástico.

Por lo dicho anteriormente la cantidad de agua fuera del recipiente, va generar una pérdida que se puede observar en la diferencia de masa en el recipiente de plástico la cual es mayor que la diferencia del recipiente de Zeolita, por lo que se puede decir que queda una cantidad de vapor atrapada en los ductos, además de la cantidad de agua mencionada anteriormente.

En las pruebas 7 y 8 se enfrió la Zeolita sumergiendo la trampa de vapor en agua.

Se realizó una prueba sin colocar la trampa de vapor, observando que la presión en el sistema estuvo muy por encima del nivel obtenido con el uso de la Zeolita.

Se determinó que la relación Zeolita-Hielo es 1: 1.20. Se debe tener en cuenta que en estos experimentos se utilizó Zeolita en exceso por lo cual se garantizaba una mayor adsorción, en un sistema donde la Zeolita que se utiliza es mínima necesaria para formar el hielo hay que considerar la existencia de un porcentaje de vapor que permanece en la Zeolita luego de la desorción.

Debido a esto y al calentamiento en la adsorción debe colocarse una cantidad extra de Zeolita con lo cual esta relación Zeolita-Hielo tiende a ser 1:1.

Hay que tomar en cuenta que las temperaturas medidas en el recipiente de Zeolita fueron medidas en todo el volumen de la misma, solo una parte de todo ese volumen realizó el proceso de adsorción, por tanto esta tuvo un incremento de temperatura, mientras el resto que quedo sin adsorber no tuvo este incremento, por este motivo la temperatura medida se puede considerar una temperatura media en todo el recipiente.

La cantidad de vapor obtenida experimentalmente es de 14.79% siendo un valor muy cercano al teorico 11.58%, la diferencia se debe a las causas mencionadas anteriormente.

Para efectos de los cálculos tomaremos el valor experimental de vapor obtenido de 14.74%. Teniendo este valor calculamos la cantidad total de agua que hay que introducir inicialmente para poder generar 1.0646719 Kg de hielo que representa el 85.21% de la masa total.

$$\text{Masa de vapor} = \frac{\text{Masa de hielo} \times 14.79\%}{85.21\%} \quad (37)$$

$$\text{Masa de vapor} = 1.8479 \times 10^{-1} \text{ Kg}$$

$$\text{Masa total de agua} = 1.25 \text{ Kg}$$

3.4Cálculo de la cantidad de Zeolita

Para determinar la cantidad de Zeolita usaremos la gráfica suministrada por el fabricante.

Para nuestro trabajo seleccionamos la Zeolita 4A (Cortesía de Grace Davison Venezuela S.A), la cual tiene como característica principal una abertura de poro de 4Å, garantizando la adsorción de las moléculas de agua cuyo tamaño de molécula es de 2.8Å.

Con el estado termodinámico de la Zeolita al comenzar la adsorción, presión de 0.5 kpa (3.75 mm Hg) y Temperatura 303K (88°F), buscamos el factor de adsorción de la Zeolita como se muestra en la figura 24.

De acuerdo a la gráfica obtenemos una capacidad de 20.4 lbs de agua / 100 lbs de Zeolita, tomando como la cantidad de vapor 0.18479 Kg (0.4073 lbs) tenemos:

$$\text{Cantidad de Zeolita} = \frac{\text{lbs de Vapor adsorbido} \times 100 \text{ lbs de Zeolita}}{20.4 \text{ lbs de Vapor}} \quad (38)$$

$$\text{Cantidad de Zeolita} = 0.9058 \text{ Kg}$$

Teniendo en cuenta que en la desorción se tiene un porcentaje entre 5 – 15 % (Según: Siegfried Kreussler y Detlef Bolz de masa de vapor sin desorber y debido a que la zeolita durante el proceso de desorción se calienta y disminuye su capacidad de adsorción se considera un factor de 1.2 para compensar lo antes mencionado.

$$\text{Cantidad de Zeolita} \times \text{factor} = 0.9058 \text{ Kg} \times 1.2 = 1.08696 \text{ Kg}$$

FIGURE 8. ISOTHERMS: WATER VAPOR ADSORPTION ON GRACE Davison 4A MOLECULAR SIEVES (HIGH PRESSURE)

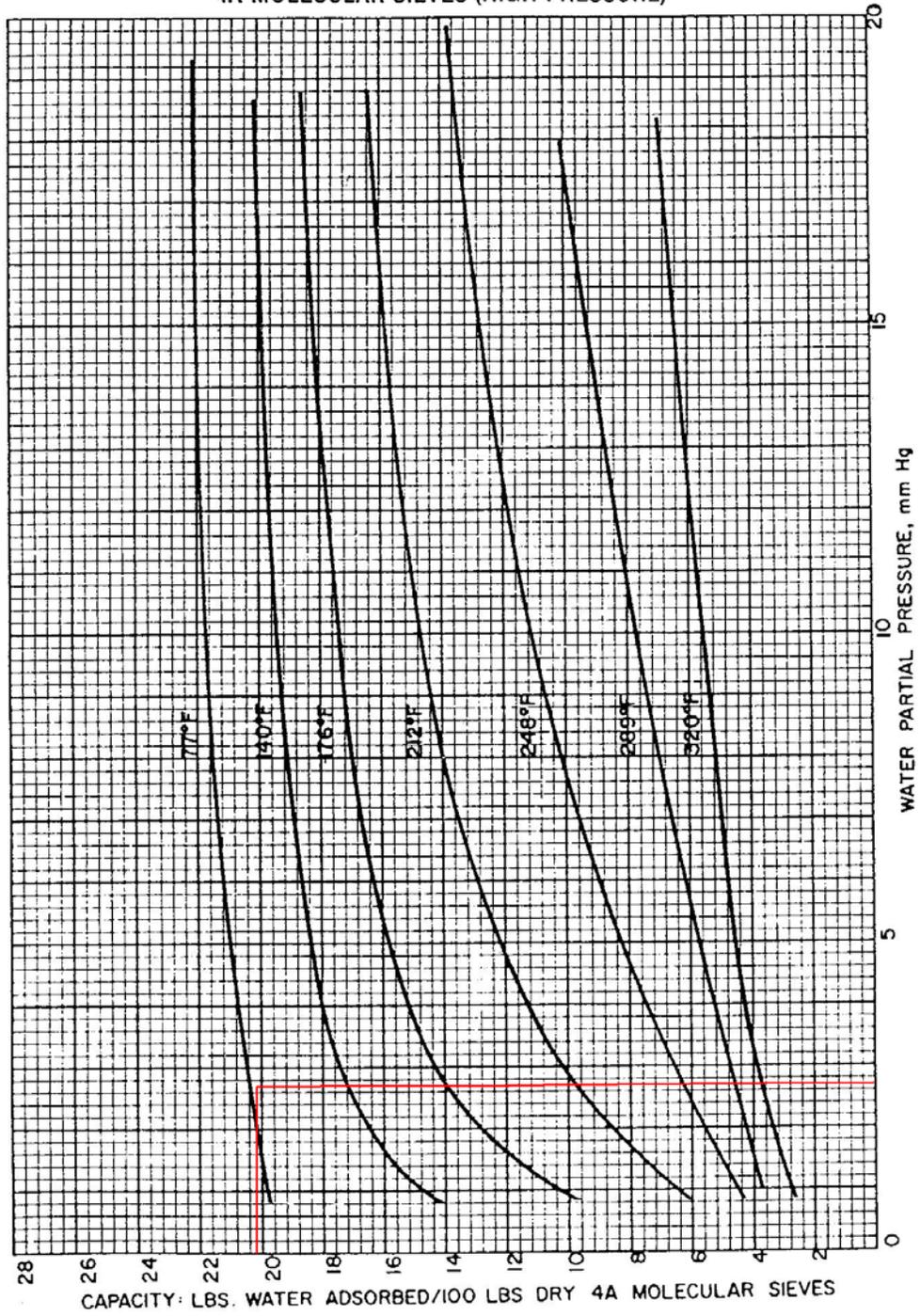


Figura 24. Isotermas de vapor adsorbido en zeolita Grace Davison 4A(alta presión)

3.5 Condiciones iniciales del horno

El calentamiento propuesto en el prototipo inicial era con un baño de María con aceite de silicón, para facilitar la manipulación del equipo y también para simplificar el diseño, se decidió realizar la desorción con un horno convencional.

Temperatura ambiente (T_{∞}) = 30°C

Presión atmosférica = 1 atmósfera

Temperatura inicial del Horno = 30°C

Temperatura de la Zeolita = 30°C

Gravedad (g) = 9,8091 m/seg²

3.5.1 Selección de los componentes del horno:

- **Componentes internos**

- **Paredes del Horno:**

El horno estará constituido por distintos materiales, para la pared interna se usará acero al carbono ordinario con 1×10^{-3} m de espesor, recubierto de pintura negro mate, luego se tiene un espesor de aislante de fieltro de unión orgánica de 1×10^{-2} m, finalmente una lámina de acero inoxidable pulido AISI 302, con un espesor de 1×10^{-3} m. Los espesores fueron seleccionados de manera que la estructura resistiera su propio peso y además se seleccionó acero inoxidable externamente por su resistencia a la corrosión.

Se colocará una plancha de acero al carbono ordinario de 1.5×10^{-3} m, ubicada entre los recipientes de zeolita y los quemadores, con el fin de tener un calentamiento más uniforme dentro del horno.

— **Recipientes de Zeolita (Trampa de Vapor):**

El recipiente durante la desorción debe soportar temperaturas mayores a 250°C además de resistir corrosión debido al vapor de agua, se prefiere que este tenga una forma cilíndrica con el fin de lograr uniformidad en el calentamiento de la zeolita.

El recipiente durante la fase de adsorción de agua en la zeolita debe además de resistir la corrosión del vapor de agua debe ser totalmente hermético y ser resistente a presiones de vacío.

Por las características antes mencionadas se seleccionó como material de construcción acero inoxidable AISI 302, cuyo comportamiento se adapta a estos requerimientos.

El volumen de este recipiente cilíndrico debe ser tal que la altura de zeolita dentro del mismo no exceda de 5 cm, además se emplearán 2 recipientes. Todo esto con el fin de garantizar una adsorción y desorción.

La cantidad de zeolita calculada es de $6.83 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ por recipiente por lo tanto las dimensiones serán 14 cm (0.14m) de diámetro externo, 6 cm (0.06m) de altura y un espesor de pared de 1mm, con una capacidad de $8.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Los recipientes tendrán un tapón roscado para realizar la carga y descarga de zeolita en el recipiente cuando sea necesario.

— **Tuberías**

Las condiciones de trabajo de las tuberías son las mismas que las de la trampa de vapor por tanto emplearemos tuberías de acero inoxidable, con un diámetro nominal de ¼” de schedule 40.

Las tuberías que están acopladas al recipiente de zeolita llevan en su extremo una malla metálica que evita que la zeolita salga a través de ella cuando se realice vacío o con el movimiento del equipo.

Para la parte externa del horno se usarán válvulas de bola de ¼” para vapor, y para la conexión con la bomba se utilizará un acople para manguera de 3/8”.

- **Componentes externos:**

El horno se comunicará con el termo mediante una manguera de alta presión 300 Psi (2068427.18 Pa), de 5/16” (0.07937 m). Por otra parte se comunicará a la bomba de vacío con una manguera transparente de P.V.C. de diámetro 7×10^{-3} m, a esta misma conexión se encuentra acoplada a una válvula de globo de ¼”, por la cual se evacuará el vapor adsorbido por la zeolita.

Para el calentamiento del horno se emplearán hornillas de camping (Campingaz Turbo 270) con una potencia máxima de 1000W en alta durante 2.2horas, empleando una bombona CV 470.

Se empleará una bomba de vacío manual con un caudal de 2-3 m³/h, con vacío máximo de 0.2Kpa, modelo ZT 9705, de Zeo-tech GmbH.

3.5.2Cálculo de la Carga Térmica de calentamiento:

3.5.2.1Cálculo del calor perdido en el horno

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

Comenzaremos suponiendo una temperatura superficial, para determinar el coeficiente convectivo promedio del ambiente, luego se calculará el valor 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 interna y en consecuencia el coeficiente convectivo interno promedio, seguidamente se calculará el calor q_2 (ver ecuación 16), finalmente se calcula el error relativo entre q_1 y q_2 , si este es menor del 10% se promedian los dos valores de q y se detiene la iteración tomando este valor como el valor final de calor, si no es menor del 10% se usa este promedio para calcular el valor de temperatura superficial de la siguiente iteración utilizando la ecuación (15), y a continuación se repetirá el proceso iterativo.

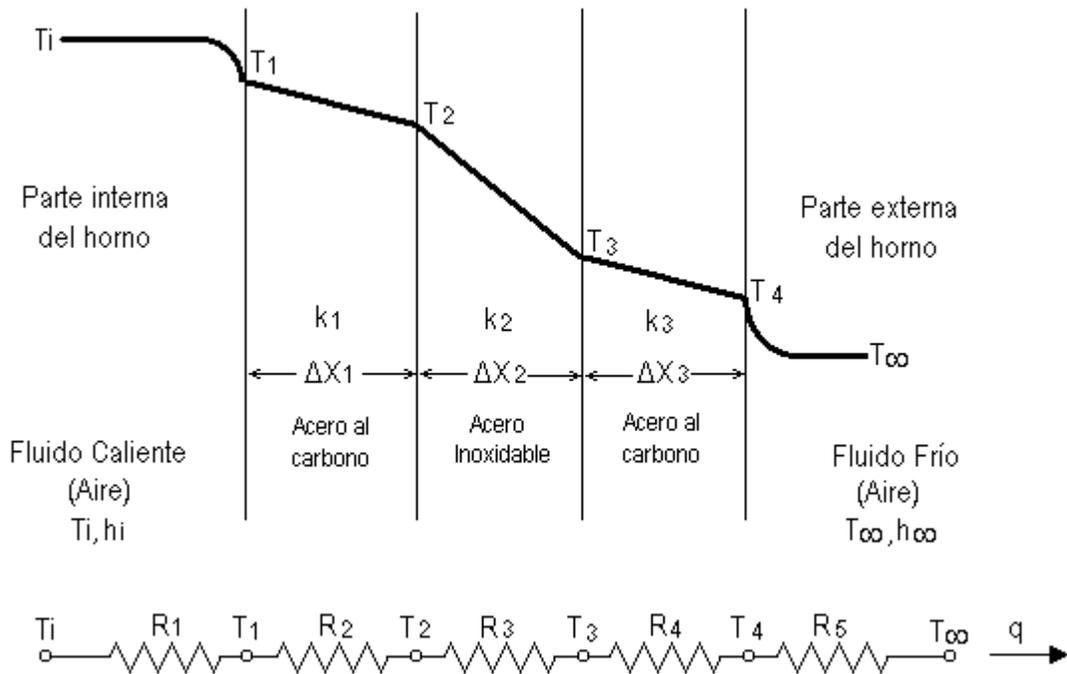


Figura 25. Circuito eléctrico análogo de pared plana (horno)

Placa superior:

— **Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo**

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 383 \text{ K}$ ($110 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞).

De la ecuación (9) obtenemos:

$$T_m = 343\text{K}$$

De la tabla A.4 para aire (Incropera, De Witt) a T_m :

$$\nu = 2.02 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 2.95 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 2.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 7.01 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 2.92 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con la ecuación (7) con $L = 5.88 \times 10^{-2}$ calculamos:

$$\text{Ra}_L = 796494.78$$

Luego mediante la ecuación (10):

$$\bar{\text{Nu}}_L = 16.13$$

Sustituyendo en la ecuación (6):

$$\bar{h}_o = 8.0884 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— Cálculo del coeficiente de radiación externo

Para acero inoxidable pulido $\varepsilon = 0.17$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_s = 383 \text{ K}$

$$h_{r_o} = 1.5770 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

— Procedimiento de cálculo del calor.

Con la ecuación (15) se obtiene el calor entre T_s y T_∞

$$q_1 = 47.3217.W$$

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 25).

Con $T_s = 383K$, $k = 16.93W/m K$ calculamos T_3 :

$$T_3 = 383.0456K$$

Con T_3 y $k = 6.02 \times 10^{-2} W/m K$:

$$T_2 = 511.5190K$$

Con T_2 y $k = 51.85W/m K$

$$T_1 = 511.5339K$$

Con la ecuación (9) se promedia T_1 y la temperatura interna del horno(T_i) esta se supone a $523 K (250^\circ C)$, luego se tiene T_m :

$$T_m = 517.27K$$

De la tabla A.4 del aire(Incropera, De Witt) con T_m :

$$\nu = 4.11 \times 10^{-5} m^2/s$$

$$k = 4.18 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 6.02 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 6.84 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 1.93 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

De la ecuación (7) con $L = 5.88 \times 10^{-2} \text{ m}$:

$$\text{Ra}_L = 17852.66$$

Calculamos el numero de Nusselt de acuerdo a la ecuación (10) :

$$\bar{\text{Nu}}_L = 6.24$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 4.44 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— Cálculo del coeficiente de radiación interno

Para pintura negra mate $\varepsilon = 0.91$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_1 = 511.53 \text{ K}$

$$h_{r_i} = 28.57 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación(16).

$$R_i = 4.95 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 3.15 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 2.71 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 9.65 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_o = 1.69 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 44.88 \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 5.15 \times 10^{-2} \cdot W \Rightarrow 5.15\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 46.10 \cdot W$$

Placa inferior:

— Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 410 \text{ K}$ (137 °C), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞).

De la ecuación (9) obtenemos:

$$T_m = 356.5\text{K}$$

De la tabla A.4 para aire(Incropera, De Witt) a T_m :

$$\nu = 2.16 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 3.05 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 3.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 6.98 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 2.81 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

De la ecuación (7) calculamos con $L = 5.88 \times 10^{-2} \text{m}$:

$$\text{Ra}_L = 892027.99$$

Luego mediante la ecuación (21):

$$\bar{\text{Nu}}_L = 8.30$$

Sustituyendo en la ecuación (6):

$$\bar{h}_o = 4.30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— Cálculo del coeficiente de radiación externo

Para acero inoxidable pulido $\epsilon = 0.17$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_s = 410 \text{ K}$

$$h_{r_o} = 1.79 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Con la ecuación (15) se obtiene el calor entre T_s y T_∞

$$q_1 = 39.85 \text{ W}$$

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 25).

Con $T_s = 410 \text{ K}$, $k = 17.44 \text{ W/m K}$ calculamos T_3 :

$$T_3 = 410.04 \text{ K}$$

Con T_3 y $k = 7.39 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$:

$$T_2 = 498.16 \text{ K}$$

Con T_2 y $k = 52.43 \text{ W/m K}$

$$T_1 = 498.17 \text{ K}$$

Se promedia T_1 y $T_i = 523 \text{ K}$ (250°C):

$$T_m = 510.58 \text{ K}$$

De la tabla A.4 del aire(Incropera, De Witt) con T_m :

$$\nu = 4.02 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 4.14 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 5.88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 6.84 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 1.96 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

De la ecuación (7) con $L = 5.88 \times 10^{-2}$:

$$\text{Ra}_L = 40956.59$$

Calculamos el número de Nusselt de acuerdo a la ecuación (21) :

$$\bar{\text{Nu}}_L = 3.84$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 2.70 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— Cálculo del coeficiente de radiación interno

Para pintura negra mate $\varepsilon = 0.91$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_1 = 511.53 \text{ K}$

$$h_{r_i} = 27.48 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación(16).

$$R_i = 5.41 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 3.11 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 2.21 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 9.37 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_o = 2.68 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 44.45 \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 1.48 \times 10^{-2} \cdot W \Rightarrow 1.48\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 40.1543 \cdot W$$

- **Paredes laterales del Horno**

Placas de 0.14m x 0.34m:

— **Cálculo del coeficiente convectivo promedio externo**

Se supone un valor de temperatura superficial $T_s = 383 \text{ K}$ ($110 \text{ }^\circ\text{C}$), y calculamos la temperatura media entre la superficie y el medio ambiente (T_∞).

De la ecuación (9) obtenemos:

$$T_m = 343\text{K}$$

De la tabla A.4 para aire a T_m :

$$\nu = 2.02 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 2.95 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 2.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 7.01 \times 10^{-2}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 2.92 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con la ecuación (7) con $L = 5.88 \times 10^{-2}$ calculamos:

$$\text{Ra}_L = 10750658.41$$

Luego mediante la ecuación (22):

$$\bar{Nu}_L = 30.08$$

Sustituyendo en la ecuación (6):

$$\bar{h}_o = 6.34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— **Cálculo del coeficiente de radiación externo**

Para acero inoxidable pulido $\varepsilon = 0.17$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_s = 383 \text{ K}$

$$h_{r_o} = 1.58 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Con la ecuación (15) se obtiene el calor entre T_s y T_∞

$$q_1 = 30.13 \text{ W}$$

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 25).

Con $T_s = 383 \text{ K}$, $k = 16.93 \text{ W/m K}$ calculamos T_3 :

$$T_3 = 383.04 \text{ K}$$

Con T_3 y $k = 6.02 \times 10^{-2} \text{ W/m K}$:

$$T_2 = 488.21\text{K}$$

Con T_2 y $k = 52.86\text{W/m K}$

$$T_1 = 488.22\text{K}$$

Se promedia T_1 y $T_2 = 523\text{K}(250^\circ\text{C})$:

$$T_m = 505.61\text{K}$$

De la tabla A.4 del aire (Incropera, De Witt) con T_m :

$$\nu = 3.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 4.11 \times 10^{-2} \text{ W/m.K}$$

$$\alpha = 5.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 6.84 \times 10^{-1}$$

De la ecuación (8) con T_m :

$$\beta = 1.98 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

De la ecuación (7) con $L = 5.88 \times 10^{-2}$:

$$\text{Ra}_L = 808947.49$$

Calculamos el número de Nusselt de acuerdo a la ecuación (22) :

$$\bar{\text{Nu}}_L = 16.04$$

Luego con la ecuación (6):

$$\bar{h}_i = 4.70 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

— **Cálculo del coeficiente de radiación interno**

Para pintura negra mate $\varepsilon = 0.91$

Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

De la ecuación (12) con $T_1 = 511.53 \text{ K}$

$$hr_i = 26.71 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación(16).

$$R_i = 6.69 \times 10^{-1} \text{ K/W}$$

$$R_1 = 3.97 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 3.49 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 1.21 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_o = 2.66 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 32.25 \text{ W}$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 6.58 \times 10^{-2} \text{ W} \Rightarrow 6.577\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 31.19 \text{ W}$$

$$q_{\text{Total}} = 2 \times 31.19 \text{ W} = 62.38 \text{ W}$$

Placas de 0.14m x 0.18m:

En esta sección posee las mismas características que la parte anterior, la única diferencia esta en el área, por lo tanto se calcula directamente el calor.

— **Procedimiento de cálculo del calor.**

Con la ecuación (15) se obtiene el calor entre T_s y T_∞

$$q_1 = 15.95 \text{ W}$$

Ahora se calcula el q_2 , con las ecuaciones (17) y (18) se calculan todas las resistencias entre T_i y T_∞ , empleando los coeficientes de conductividad térmica correspondientes a cada material y recordando considerar la radiación. Los resultados obtenidos se sustituyen en la ecuación(16).

$$R_i = 1.26 \text{ K/W}$$

$$R_1 = 7.06 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R_2 = 6.59 \text{ K/W}$$

$$R_3 = 2.34 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_o = 5.02 \text{ K/W}$$

$$q_2 = 17.09W$$

Comparando q_1 y q_2 se tiene el error relativo:

$$E = 6.64 \times 10^{-2} W \Rightarrow 6.64\%$$

Finalmente se toma el calor promedio entre q_1 y q_2

$$q = 16.52W$$

$$q = 2 \times 16.52W = 33.04W$$

- **Cálculo del calor total perdido al ambiente**

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{placas}(14\text{cm} \times 34\text{cm})} + Q_{\text{placas superior}} + Q_{\text{placas}(14\text{cm} \times 18\text{cm})} + Q_{\text{placas inferior}} \quad (39)$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = (62.38W) + (46.10.W) + (33.06W) + (40.15W) = 181.67W$$

3.5.2.2 Cálculo del calor promedio para el calentamiento del horno

Primeramente se procede a calcular la masa de cada uno de los componentes que se encuentran en la parte interna del horno.

- **Recipiente de Zeolita (Trampa de Vapor)**

Material: Acero inoxidable AISI 302

Densidad: 8055 Kg/m³

Dimensiones: radio(r)=7cm(7×10^{-2} m), altura(h)=6cm(6×10^{-2} m), espesor=1mm(10^{-3} m)

Volumen del material:

$$\text{Volumen externo} = \Pi \times r^2 \times h \quad (40)$$

$$\text{Volumen externo} = 9.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Con la ecuación (40), restando el espesor del material tenemos

$$\text{Volumen interno} = 8.67 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

El volumen de material es la resta de ambos volúmenes

$$\text{Volumen de material} = 5.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Multiplicando por la densidad tenemos:

$$\text{Masa del material de un recipiente} = 4.59 \times 10^{-1} \text{ Kg}$$

$$\text{Masa de dos recipientes} = 9.18 \times 10^{-1} \text{ Kg}$$

- **Tuberías**

Para facilitar el cálculo se encontrará el volumen por unidad de longitud.

Material: Acero inoxidable AISI 302

Densidad: 8055 Kg/m³

Dimensiones: diámetro externo = 1.37x10⁻²m, diámetro interno = 9.25x10⁻³m.

Volumen del material, sustituyendo en la ecuación (40)

Volumen externo = $1.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ por metro

Con el diámetro interno en la ecuación (40)

Volumen interno = $6.71 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ por metro

Restando el volumen externo y el interno tenemos:

Volumen de material $\times 1 \text{ m} = 8.06 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

Multiplicando el volumen por la longitud total ($L = 5.26 \times 10^{-1}$):

Volumen total de tuberías = $4.23 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

Multiplicando por la densidad del material encontramos la masa total de tuberías

Masa total de las tuberías = $3.41 \times 10^{-1} \text{ Kg}$

- **Zeolita**

Densidad (dato experimental) = 794.6 Kg/m^3

Masa de zeolita = 1.0683 Kg

- **Plancha de Acero**

Material: Acero al carbón ordinario AISI 302

Densidad: 7854 Kg/m^3

Dimensiones: Largo(L) = 0.3 m , ancho(W) = 0.14 m , espesor(e) = $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$

Volumen del material:

$$\text{Volumen del material} = L \times W \times e \quad (41)$$

Sustituyendo:

$$\text{Volumen del material} = 4.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Multiplicando este valor por la densidad del acero al carbón:

$$\text{Masa de la plancha} = 3.29 \times 10^{-1} \text{ Kg}$$

- **Aire**

Densidad promedio: $8.97 \times 10^{-1} \text{ Kg/m}^3$

Primero sumamos el volumen que ocupa cada uno de los equipos dentro del horno:

$$\text{Volumen equipos internos} = 1.92 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Luego hallamos el volumen interno del horno (ver planos).

$$\text{Volumen interno del horno} = \text{ancho} \times \text{alto} \times \text{largo} \quad (42)$$

$$\text{Volumen interno del horno} = 8.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Restando el volumen del horno y el volumen que ocupan los equipos:

$$\text{Volumen del aire} = 6.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Multiplicando por la densidad promedio del aire tenemos la masa.

$$\text{Masa de aire} = 5.96 \times 10^{-3} \text{Kg}$$

A continuación se procede a calcular el calor promedio para llevar el horno de 30°C a 250°C, ya que de acuerdo a los distribuidores de Zeolita 4A (Zeo-Tech GMBH y Grace & Davison) se recomienda calentar esta a 250°C durante 3 horas para realizar la desorción. Se plantea la primera ley de la termodinámica para un flujo permanente estado permanente y haciendo las mismas consideraciones empleadas para la ecuación (29), empleando esta ecuación tenemos:

— **Recipientes de Zeolita (Trampa de Vapor)**

Para el recipiente de acero inoxidable: Calor específico promedio = 510.93 J/KgK
Sustituyendo en la ecuación(29)

$$Q = 103.22 \text{KJ}$$

— **Tuberías**

En las tuberías de acero inoxidable: calor específico promedio = 510.93 J/KgK
Sustituyendo en la ecuación(29)

$$Q = 38.33 \text{KJ}$$

— **Zeolita**

Para el calor en la zeolita empleamos 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, además se emplea la ecuación (29) para determinar el calor en el agua y la zeolita considerando sus respectivos calores específicos promedio ($\overline{Cp}_{\text{agua}} = 2826.5 \text{ J/Kg K}$, $\overline{Cp}_{\text{zeolita}} = 3375 \text{ J/Kg K}$).

$$Q = \overline{Cp}_{\text{zeolita}} \times m_{\text{zeolita}} \times \Delta T + m_{\text{agua}} \times (\Delta H_{\text{desorcion}} + \overline{Cp}_{\text{agua}} \times \Delta T) \quad (43)$$

(Grover, Bruckner, 1998)

sustituyendo nos queda:

$$Q = 1505.26 \text{ KJ}$$

— **Plancha de Acero**

Calor específico promedio = 483.44 J/KgK

Sustituyendo en la ecuación (29)

$$Q = 35.08 \text{ KJ}$$

— **Aire**

Calor específico promedio = 1023.5 J/KgK

Sustituyendo en la ecuación (29)

$$Q = 1.34 \text{ KJ}$$

3.5.2.3 Calor promedio total de calentamiento del horno

Considerando un tiempo de precalentamiento de 15 minutos (900 segundos), para llevar el horno de 30 a 250°C

$$Q_{\text{interno}} = \frac{Q_{\text{aire}} + Q_{\text{trampa de vapor}} + Q_{\text{plancha}} + Q_{\text{tuberias}}}{\text{Tiempo de precalentamiento}} \quad (43)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:

$$q_{\text{interno}} = 197.74 \text{ W}$$

3.5.2.4 Calor Total del Horno

$$q = q_{\text{interno}} + q_{\text{perdidas}} \quad (44)$$

Sustituyendo estos valores:

$$q = 379.41 \text{ W}$$

3.5.3 Cálculo del número de quemadores y funcionamiento de los mismos

Cada quemador tiene una capacidad máxima de 1000W, entonces conocido el calor total del horno aproximamos el número de bombonas necesarias para el propósito.

- **Calentamiento de 30 a 250 °C**

Tomando en cuenta el calor total, para llevar el horno de 30 a 250°C en 15 minutos, se tiene que es necesario el uso de dos quemadores, conociendo esto se calcula la capacidad de trabajo de cada quemador.

$$\text{Calor por quemador} = \frac{379.41\text{W}}{2} = 189.71\text{W}$$

$$\text{Porcentaje de uso de la capacidad máxima} = \frac{189.71\text{W} \times 100\%}{1000\text{W}} = 18.97\% \quad (45)$$

- **Calentamiento constante a 250 °C**

Luego de alcanzar la temperatura de 250°C, se toman en cuenta las pérdidas de calor al ambiente y el calor de desorción del vapor de agua en la zeolita, este proceso tiene una duración de 3 horas.

$$q = q_{\text{pérdidas}} + q_{\text{desorción}} \quad (46)$$

$$q = 181.67\text{W} + \frac{1505.26\text{ KJ}}{10800\text{ seg}} = 321.05\text{ W}$$

$$\text{Calor por quemador} = \frac{321.05\text{ W}}{2} = 160.52\text{ W}$$

de la ecuación (45)

$$\text{Porcentaje de uso de la capacidad maxima} = 16.05\%$$

Para la duración de la bombona, determinamos la cantidad de energía total que se necesita para la desorción:

Energía durante 15 minutos a 379.41W = 379.41 W × 900 Seg = 341469 J (46)

Energía durante 3 horas a 321.05W = 160.52 W × 10800 Seg = 3467340 J

Sumando estos valores se obtiene la energía consumida durante la desorción, tenemos 3808809J.

Energía entregada por dos bombonas = 2 × 1000 W × 7920 Seg = 15840000 J

Con lo obtenido anteriormente determinamos el número de desorciones que pueden llevarse a cabo con dos bombonas:

$$\text{Número de desorciones} = \frac{15840000 \text{ J}}{3808809 \text{ J}} = 4.15 \approx 4 \text{ veces (47)}$$

3.6 Opción para calentamiento solar

Para la desorción se puede emplear una cocina solar. De acuerdo a los cálculos el calor necesario para la desorción de la Zeolita es 1505.26 KJ que para un tiempo de 3 horas nos da un rata de calor de 139.38 W.

Por lo tanto se puede emplear la cocina Solar SK 700 (ver Figura 26) de la Compañía EG-Solar (<http://www.eg-solar.de/Produkte/solarkocher.htm>) con las siguientes características:

SK 700

Precio aproximado = 150 \$ (111640 Bs)

desempeño óptimo de 200 vatios

El equipo completo es de aluminio

El peso del equipo: 6 kg

Medida de la parabólica: 700 mm x 400 mm x 50 mm



Figura 26. Cocina Solar

El uso de esta cocina es una opción para hacer 100% ecológico el diseño y no depender del gas aumentando su autonomía.

3.7Cálculo del coeficiente de realización

Para calcular el valor de “efectividad” del sistema utilizamos el poder calorífico de enfriamiento promedio de 390W/Kg zeolita (Zeo-tech), y la rata de energía que hay que suministrarle a la zeolita en un tiempo de 3 horas (promedio del calentamiento de 30 a 250°C y el calentamiento a 250°C).

$$\text{Coeficiente de realización} = \frac{Q_{\text{Salida}}}{Q_{\text{Entrada}}} = \frac{(390\text{W/Kgzeolita} \times 1.09\text{Kg}) \times 10800\text{Seg}}{3808809\text{J}} = 1.21 \Rightarrow 121\%$$

CAPITULO 4

Funcionamiento y Costos

4.1Diseño final

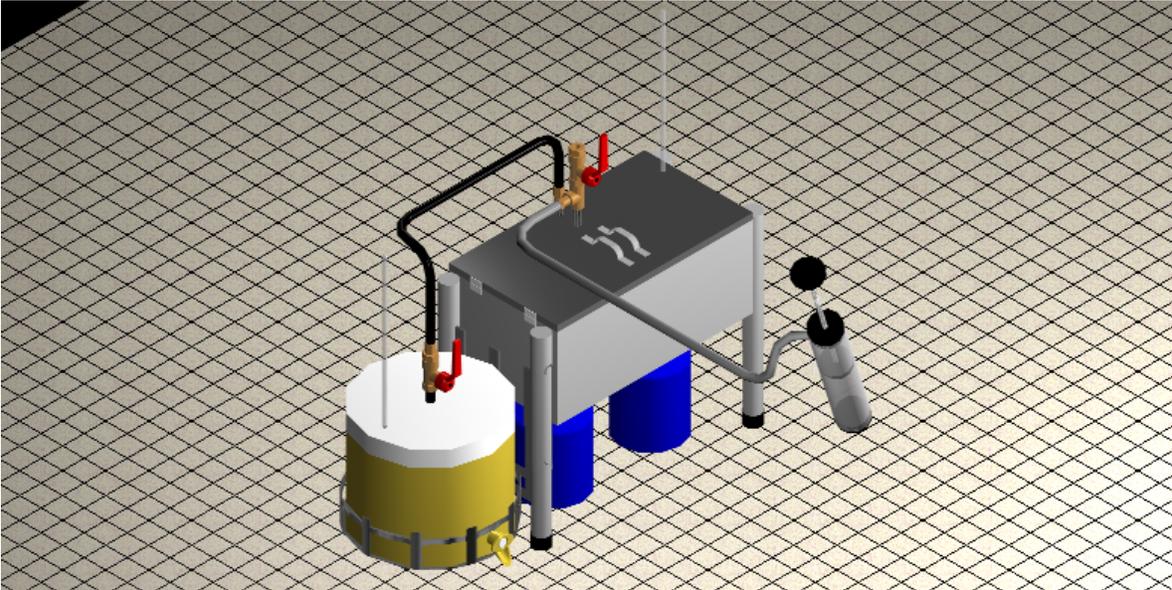


Figura 27. Diseño final

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

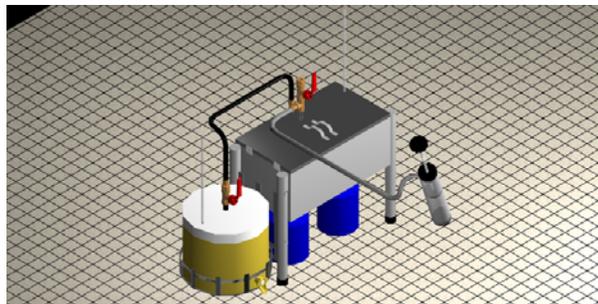


Figura 28.1

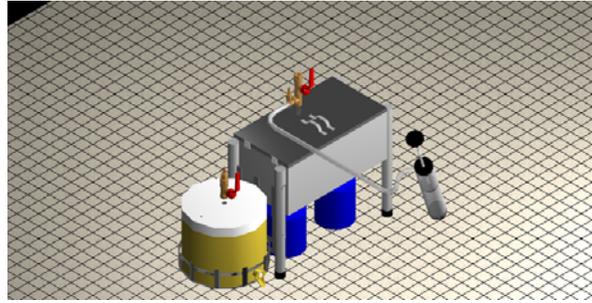


Figura 28.2

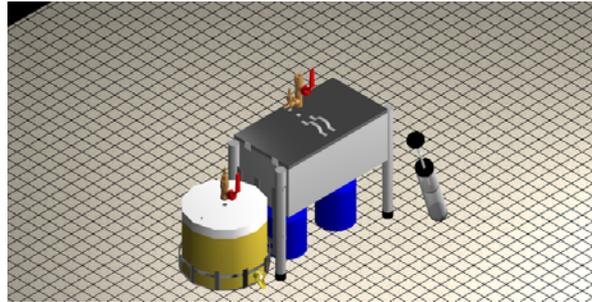


Figura 28.3

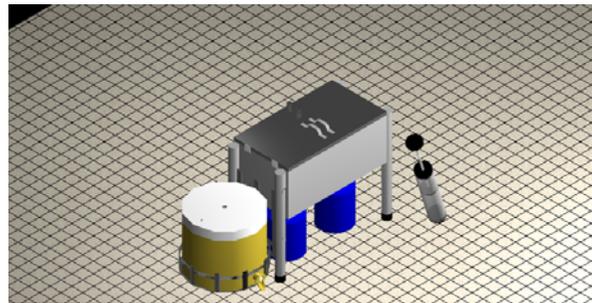


Figura 28.4

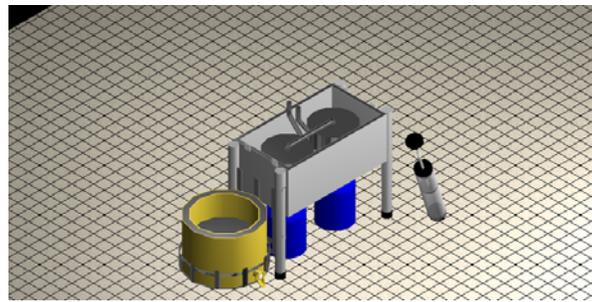


Figura 28.5

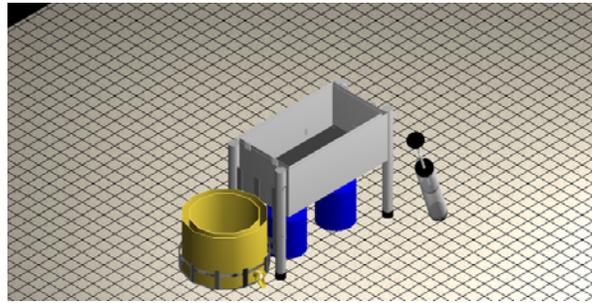


Figura 28.6

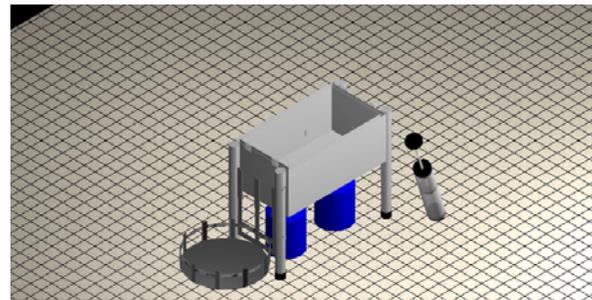


Figura 28.7

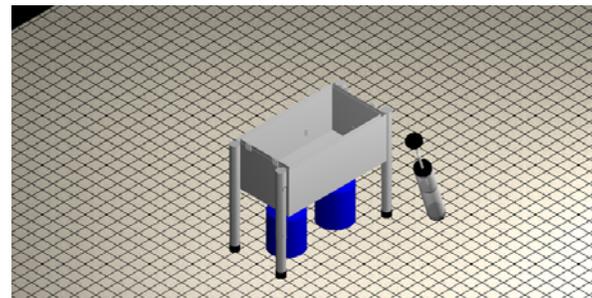


Figura28.8

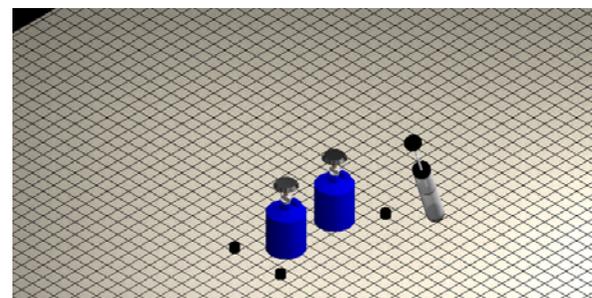


Figura 28.9

Figura 28. Diseño final en etapas

4.2Funcionamiento del sistema

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

Adsorción:

1. Se carga cada trampa de vapor con 0.55 Kg de Zeolita 4A granulada, por el tapón de carga (cerrar herméticamente).
2. Introducir en el evaporador 1.25 Lts de agua potable por la válvula de vapor (asegurarse de tener la válvula abierta).
3. Acoplar la manguera a la válvula de vapor y el otro extremo a la tubería de vapor del horno.
4. Acoplar la bomba de vacío a la tubería de presión, colocando la válvula de presión en posición cerrada.
5. Se aplica vacío en el sistema mediante la bomba, hasta que la resistencia de bombeo desaparezca.
6. Se verifica si la temperatura en el evaporador disminuye para constatar que se esta realizando el proceso correctamente.
7. Al alcanzar la temperatura deseada (0°C) en el evaporador se cierra la válvula de vapor.

Desorción:

1. Se desacopla la manguera de vapor de la tubería de vapor.
2. Se abre la válvula de presión y se desacopla la bomba de vacío.
3. Asegurarse que el horno este cerrado.
4. Encender los quemadores a través de la abertura de encendido, luego cerrar la abertura.
5. Graduar la llama de precalentamiento abriendo la válvula de cada quemador girando la perilla 0.63 vueltas.
6. Esperar hasta que la temperatura alcance 250°C (aproximadamente 15 minutos), y luego graduar cada válvula girando la perilla a 0.53 vueltas.
7. Chequear en intervalos de 20 minutos que la temperatura dentro del horno se mantenga a 250°C durante 3 horas.
8. Apagar los quemadores y abrir las tapas del horno, teniendo presente que estas se encuentran a alta temperatura.
9. Se deja reposando este sistema hasta comenzar el proceso de adsorción nuevamente.

Para comenzar nuevamente el ciclo se cierra el horno y se repite el proceso de adsorción a partir del paso N°2, agregando únicamente el agua de reposición (0.184 Lts).

En caso de dañar la zeolita (recalentamiento, contaminación con sustancias distintas al agua), esta se restituirá mediante el paso N°1.

4.3 Costos

A continuación se presentan los precios de los diferentes componentes del prototipo.

Sistema compacto de refrigeración por adsorción empleando zeolita y agua

Ítem	Cantidad	Precio x unidad	Total
Válvulas de globo de ¼"	2 uni.	@ \$3.26	= \$6.52
Mangueras de alta presión 300Psi 5/16"(60cm)	60 cm	@ \$6.71	= \$4.03
Espiga de ¼" (macho)	2 uni.	@ \$0.47	= \$0.94
Espiga de ¼" (hembra)	1uni.	@ \$0.77	= \$0.77

Horno

Tuberías de acero inoxidable AISI 302 de ¼"

Láminas de acero AISI 302 de 1mm de espesor

Láminas de acero al carbono ordinario

de 1 y 1.5 mm de espesor

Filtro de unión orgánica

Tapón de rosca (macho)

Rejilla metálica

Tornillos de plancha

Pintura para horno

Total por costo de fabricación con materiales incluidos @ \$36.5 = \$36.5

Recipiente evaporador

Lámina de acero inoxidable AISI 302 de 1mm de espesor

Tubería de acero inoxidable 302 de ¼"

Total por costo de fabricación con materiales incluidos @ \$7.01 = \$7.01

Silicón para altas temperaturas 1 tubo @ \$2.28 = \$2.28

Unión en "T" 1/4"(1) 1 uni. @ \$2.85 = \$2.85

Niple con rosca completa ¼" (1)	1 uni.	@ \$1.00	= \$1.00
Bomba de Vacío con manguera de P.V.C (1)	1 uni.	@ \$101.19	= \$ 101.19
Termómetro de medida entre -10 y 360 °C	1 uni.	@ \$5.64	= \$5.64
Termómetro de medida entre -10 y 60 °C	1 uni.	@ \$4.56	= \$4.56
Zeolita 4A de 4-8 Mesh (1.1 Kg)	1.1 Kg	@ \$3.00	= \$3.30
Termo comercial de 4Lts (1)	1 uni.	@ \$11.93	= \$11.93
Acero plástico (1 tubo)	1 tubo	@ \$2.68	= \$2.68
Hornilla campingaz turbo 270(2)	2 uni.	@ \$25.49	= \$50.98
Bombona CV 470 (2)	2 uni.	@ \$5.23	= \$10.46
Resorte (2)	2 uni.	@ \$0.28	= \$0.56

Total = \$253.2

Total = Bs.188634

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones:

- El efecto de congelación se realiza debido a la extracción de calor latente del agua por medio del vapor adsorbido por la zeolita.
- La zeolita al trabajar a bajas temperaturas (25° C) presenta un efecto de adsorción mayor que a altas temperaturas.
- La relación agua zeolita debe ser 1:1.
- Para la formación de hielo es necesario una extracción de vapor entre 11.5 y 15 % de la masa de agua inicial.
- La presión baja en el sistema hasta comenzar a formarse el hielo luego a partir de este punto comienza a subir hasta que se estabiliza.
- Sin la presencia de un adsorbente solamente se evapora el agua, sin llegar a la formación de hielo.
- El hielo se forma de la superficie del líquido hacia abajo.
- Para una misma cantidad de zeolita, a mayor cantidad de vapor adsorbido se genera mayor calor.
- El coeficiente de realización teórico calculado $COP = 1.21$ es bastante cercano al de un sistema real de refrigeración por compresión de vapor.

5.2 Recomendaciones

- Para este diseño se pueden emplear otros tipos de zeolita(3A, NaX, Y) cuya capacidad de absorción puede variar obteniendo así distintos efectos en la adsorción y desorción.
- Colocar rejillas en los extremos de las tuberías que entran en la trampa de vapor para evitar que los pellets salgan y obstruyan las tuberías.
- Realizar la desorción con un colector solar (como se comentó en los cálculos).
- Colocar sal en el agua para disminuir el punto de congelación, investigar cual es la sal más apropiada para lograr este efecto.
- Para tener un mayor efecto de adsorción de la zeolita se sugiere mantenerla a temperatura ambiente mediante un sistema que disipe el calor.
- Para realizar un ciclo cerrado y más independiente, colocar un condensador de vapor en el sistema.
- Estudiar el efecto de otros adsorbatos, en este sistema.
- Estudiar el uso de adsorbentes diferentes a la zeolita.
- Optimizar el funcionamiento de las distintas partes de este diseño.

- Para efectos prácticos se pueden emplear termos comerciales con características similares al empleado en el diseño, utilizando silicón u otro material para sellar las adaptaciones del evaporador al termo.
- Sellar todas las uniones roscadas del sistema con silicón de alta temperatura para evitar la entrada de aire al realizar el vacío.
- Se recomienda que el evaporador tenga una relación de aspecto baja de manera de facilitar la formación del hielo.
- La altura del volumen de zeolita debe ser menor a 5 cm para facilitar la desorción.
- Utilizar el calor producido en la zeolita durante la adsorción para fines de calentamiento.
- Colocar un vacuómetro para verificar que en el sistema se logra el vacío deseado.
- Investigar la factibilidad de producción de zeolita en nuestro país a partir del caolín.

Referencias Bibliográficas

- BOSCH, Pedro, Schifter Isaac, 1988, "La Zeolita, la piedra que hierve" La ciencia desde México, México. pp.9-80 o
http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/SEC_2.HTM
- CHURCHILL, S.W. y H.H.Chu, 1975, "Correlating Equations for laminar and Turbulent Free conection from a Vertical Plate" Int .J .Heat and Mass Transfer.pp.18,1323.
- Enciclopedia Microsoft® Encarta 2001. © 1993-2000 Microsoft Corporation., "Atmósfera", Reservados todos los derechos.
- FISICANET, "Zeolitas -ES28, Metalurgia de minerales no metálicos",
http://www.fisicaweb.com/materias/especiales/es_28.html
- GRACE DAVISON, 1995, "Molecular Sieves for Dynamic Applications". Germany
- GROVER M. R. y Bruckner P., 1998 "Water Vapor Extraction from the Martian Atmosphere by Adsorption in Molecular Sieves", Department of Aeronautics and astronautics, University of Washington, Seattle. U.S.A.
- GUIDE TO PLASTICS, 1976 "Property and Specification Charts", McGraw-Hill. U.S.A.
- INCROPERA, Frank P. y Dewitt David P., 1996, "Fundamentos de Transferencia de Calor". Editorial Prentice Hall. México. pp.3-10

- PENSO, Reinaldo y Rivas M.Carlos, 1961, "Refrigeración por medios mecánicos", Tesis de Grado, universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Schwarz, Jörn.1994. "Hydrocarbons and other progressive answers to refrigeration. Zeolite technology alternative to alternatives" Germany.pp.207
- Siegfried Kreussler and Detlef Bolz,Laboratory for Solar Energy, University of Applied Sciences Luebeck, Stephensonstr. 3, D-23562 Luebeck, Germany.
- SONNETAG Richard E, Moo Park Young y Khun Park Kyoung.1990 "Thermodynamic Tables, Figures y Charts" University of Michigan Ann Arbor.USA.
- TCHERNEV, Dimiter, 1995 "Zeolites in solar energy and refrigeration applications: a review of Zeopower company work for the past 20 years". Massachusetts.U.S.A pp.614.
- United States Environmental Protection Agency (EPA), Clean Air Technology Center ,1999 "Zeolita un adsorbente versatil de contaminantes del aire 456/F-99-003 May 1999",<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/zeolites2.pdf> ,pp.1
- VAN WYLEN y Sonnetag,1997 "Fundamentos de Termodinámica" Editorial Limusa, México
- WARREN, Harsh R., 1980,"Principios de Refrigeración". Editorial Diana.pp.36, 37,116-123

- ZEO-TECH, Zeolith-Technology GmbH, “Fundamentals of the Zeolite/Water Adsorption Technology” http://www.zeo-tech.de/e_index.htm., “Poder específico de enfriamiento promedio”,http://www.zeo-tech.de/htm/e/e_demog1.htm, “Regeneration” www.zeo-tech.de/htm/e/e_demog2.htm , Germany.

APÉNDICES

Apéndice A

TABLA A. 4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica

T (K)	P (kg/m)	Cp (kJ/kgK)	$\mu \cdot 10^7$ (Ns/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/mK)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /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 B

TABLA A. 6 Propiedades termofísicas de agua saturada

Temperatura, T (K)	Presión P (bars)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vaporización h _{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial τ _f · 10 ³ (N/m)	Coeficiente de expansión β _f (K ⁻¹)
		v _f · 10 ³	v _g		C _{p,f}	C _{p,g}	μ _f · 10 ⁶	μ _g · 10 ⁶	k _f · 10 ³	k _g · 10 ³	Pf _f	Pf _g		
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9

APÉNDICES

315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0,908	66.6	504.0
335	0,2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.1
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11,09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624)2
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	1L&9	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1,80	0.978	59.5	728.7
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761

APÉNDICES

380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814
390	1.794	1.058	0,980	2212	4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	841
400	2.455	1,067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	896
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	952
420	4,370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	1010
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	—
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	—
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	3.99	1.14	42.9	—
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	—
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	—
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	—
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	187	1.25	33.9	—
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	—
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	—

APÉNDICES

520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	—
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17,72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	—
540	52,38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	—
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	—
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	—
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	—
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	12.8	—
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	.05	1.84	10.5	—
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	.14	2.15	8.4	—
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	103	.30	2.60	6.3	—
620	159.1	1.705	0.0094	941	9,35	15,4	72	25.9	444	114	.52	3.46	4.5	—
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	121	.65	4.20	3.5	—
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	2.6	—
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392.	141	2.7	6.0	1.5	—

APÉNDICES

640	202.7	2,075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	155	.2	9.6	0.8	—
645	215.2	2,351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	178 1	2	26	0.1	—
647.3	221.2	3.170	0.0032	0	∞	∞	45	45.0	238	238	∞	∞	0.0	—

Apéndice C

MSDS *Material Safety Data Sheet*

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



24 Hour Emergency Telephone: 908-858-2151
CHEMTREC: 1-800-424-9300

National Response in Canada
CANUTEC: 613-996-6666

Outside U.S. and Canada
Chemtrec: 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

-----\Cancer Lists\-----

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			
-----\Chemical Inventory Status - Part 2\-----			
Sodium Aluminosilicate	Exempt	No	No
No			
-----\Federal, State & International Regulations - Part 1\-----			
Ingredient	Korea	DSL	NDSL
Phil.			
-----\Federal, State & International Regulations - Part 1\-----			
Sodium Aluminosilicate	No	No	No
No			
-----\Federal, State & International Regulations - Part 1\-----			
Ingredient	RQ	TPQ	List
Catg.			Chemical
-----\Federal, State & International Regulations - Part 1\-----			
Sodium Aluminosilicate	No	No	No
No			
-----\Federal, State & International Regulations - Part 2\-----			
Ingredient	CERCLA	-RCRA-	-TSCA-
		261.33	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