

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**SECCION DE POST GRADO - SEPES**



**"CONSTRUCCION Y EVALUACION DE UN  
SISTEMA DE REFRIGERACION POR  
ADSORCION INTERMITENTE"**

**TRABAJO PRACTICO**

**SEGUNDA ESPECIALIZACION  
PROFESIONAL EN ENERGIA SOLAR**

**LIC: FRANCISCO JUGO RODRIGUEZ**

**LIMA - PERU**  
**1997**

## RESUMEN

En este trabajo se presenta la Construcción y evaluación de un sistema de Refrigeración por Adsorción, cuyo objetivo es poder estimar el comportamiento térmico de un refrigerador bajo condiciones reales.

La capacidad del recipiente adsorbedor (campana de vacío ), fue de 3 kg. de masa y para el fluido de trabajo (recipiente evaporador) fue de 750 ml. de volumen. La selección de materiales de trabajo se hizo en base tanto a estudios<sup>y</sup> de datos reportados en la literatura, como de experiencias previas con algunos materiales.

La literatura reporta 2 adsorbentes idóneos para este objetivo: Sílico - gel y Wurtzita, que tienen una gran afinidad con el agua. Es decir los adsorbentes tienen porosidad en su superficie, donde tratan de adsorber vapor de agua. Por esta razón se eligieron estos materiales de trabajo.

Se reportan resultados experimentales de Wurtzita y Sílica - gel con agua. Como resultados interesantes se alcanzó temperaturas de hasta 0.43°C con la pareja Wurtzita -agua.

Por otro lado se alcanzó temperaturas de hasta 2.9°C con la pareja sílica gel-agua. De esta manera me alentó mucho para diseñar en el futuro un Sistema de Refrigeración más grande y que operen bajo condiciones reales.

## CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCION	1
II FUNDAMENTOS TEORICOS	4
2.1 La Entalpía	4
2.1.1 Entalpía de cambios de fase	5
2.2 La Entropía	8
2.2.1 Los cambios de Entropía que acompañan a un cambio de fase	10
2.2.2 El cambios de Entropía con la temperatura	11
2.3 Evaporación y ebullición de los líquidos	13
2.4 Cálculo de la Eficiencia Térmica	19
2.5 El fenómeno de la Adsorción	20
2.5.1 Tipos de Adsorción	21
2.5.2 Adsorción de gases por sólidos	23
2.5.3 Aplicación de Adsorción	24
2.6 El Sistema de Refrigeración por Adsorción Intermitente	25
2.7 Termistor	28
2.8 Higrometría	28
III PARTE EXPERIMENTAL	30
3.1 Equipos y Materiales	30
3.2 Procedimiento experimental	31
3.3 Esquema del equipo experimental de refrigeración por adsorción intermitente	33
3.4 Recolección de datos experimentales obtenidos y su procesamiento	36

IV	RESULTADOS EXPERIMENTALES	38
	Figuras Nº 8, 9, 10, 11 y 12	39 - 43
V	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	44
VI	REFERENCIAS	45
	APÉNDICE	47
	1. Tablas	48 - 60
	2. Wurtzita	61
	3.1 Humedad Absoluta	63
	3.2 Humedad Relativa	63
	3.3 Carta Psicrométrica	64
	3.4 Curva de temperatura de bulbo húmedo	67



## I. INTRODUCCION

El punto de ebullición del agua es  $100^{\circ}\text{C}$  a nivel del mar a una presión de 1 atm (760 mmHg); en una altura de 3000 m s.n.m., donde la presión es aproximadamente 525 mmHg el agua hierve a  $90^{\circ}\text{C}$ . Cuando la presión disminuye la temperatura de ebullición también lo hace, tal como se representa en la Fig. (1). La temperatura de ebullición es menor de  $5^{\circ}\text{C}$  bajo a una presión de 7 mmHg. Por esta razón es que el agua puede ser usado como refrigerante.

Si dos recipientes conectados uno al otro por un tubo, ver Fig. (2a) a una presión mínima (sea 6 mmHg). El recipiente A (absorbedor) que contiene una solución de Bromuro de Litio con agua ( $\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O}$ ), el recipiente E (evaporador) que contiene un poco de agua pura. El LiBr tiene una alta afinidad con el agua, además tiene una fuerte tendencia para adsorber el vapor de agua. Aún con una baja temperatura (sea  $4^{\circ}\text{C}$ ) hay producción de vapor de agua en el evaporador. El vapor de agua es absorbido por la solución de LiBr en el recipiente A (absorbedor), manteniendo la presión mínima deseada, la producción de vapor de agua puede pasar al evaporador.

El proceso descrito es por su puesto no continuo (intermitente)

- 1) El proceso de absorción es exotérmico (la solución recibe una cantidad de calor, llamada calor de adsorción, el cual es igual a la suma del calor de condensación del vapor y el calor de disolución del absorbente). La temperatura de la solución tiende a incrementarse y el proceso de adsorción se hace débil. Además el recipiente que adsorbe debe ser enfriado

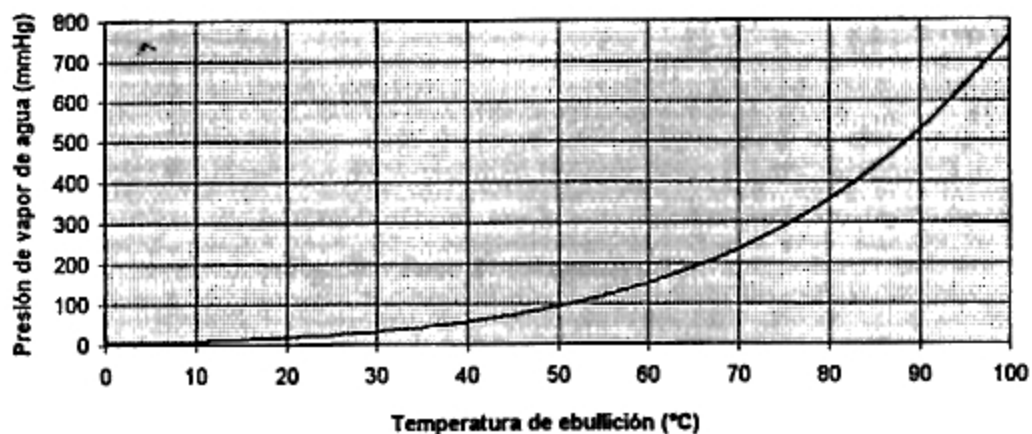
para mantenerlo a una temperatura razonable (sea 30°C)

- 2) La absorción del vapor de agua diluye la solución, reduciendo su tendencia a disolver el vapor. Además la solución debe ser regenerado. Esto puede ser logrado en un tercer recipiente G (generador) a una presión alta Fig. (2b). Aquí la solución sacada del adsorbedor, es calentada, algo de agua se evapora y la solución mencionada puede regresar al recipiente que absorbe. El intercambiador de calor recobra una cantidad apreciable de calor, calentando la solución desde el generador y calentando la solución débil desde el absorbente.

Además se plantea que una vez que el agua evaporada es regresada el evaporador, puede trabajar continuamente [1]

El objetivo central de este trabajo fue construir y evaluar un sistema de refrigeración por adsorción, usando las parejas de adsorbato - adsorbente (agua - sílica gel; agua - wurtzita)

**Figura 1: Presión de vapor de agua saturada.**



### SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCION INTERMITENTE

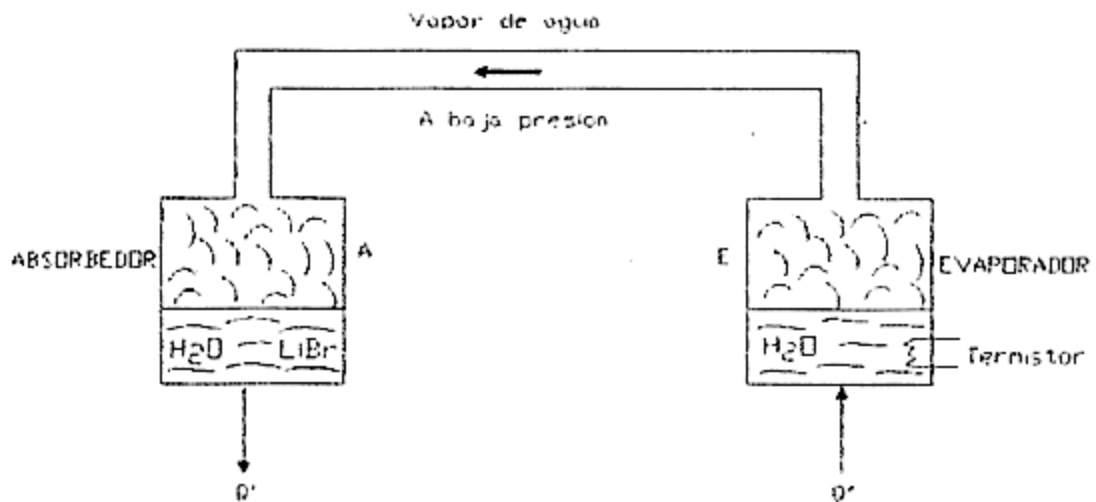


Fig. 2a. Fase 1° : Enfriamiento

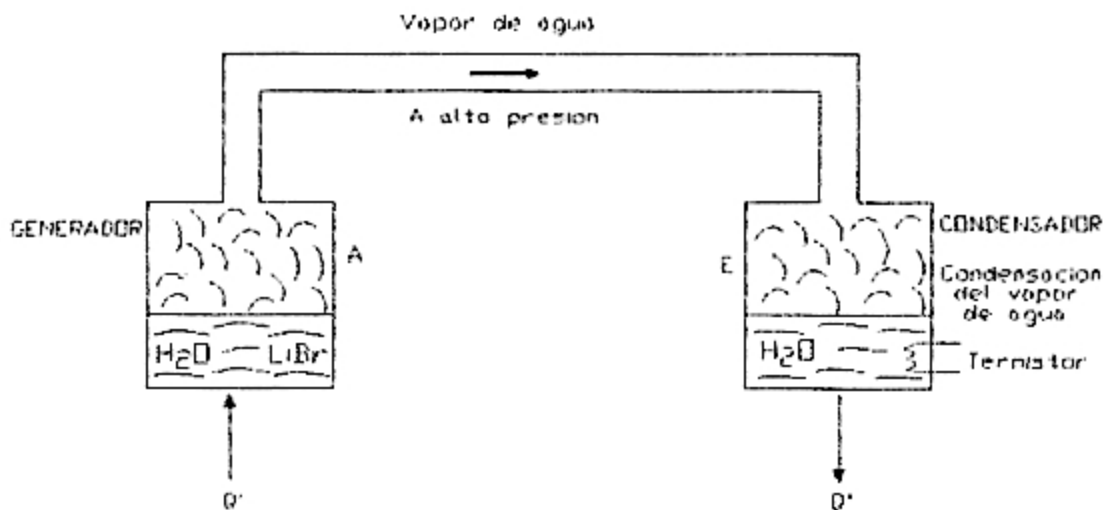


Fig. 2b. Fase 2° : Regeneración

## II. FUNDAMENTOS TEORICOS

### 2.1 LA ENTALPIA

La ecuación de la primera ley de la termodinámica para los procesos en que se efectúa sólo trabajo de expansión, toma la siguiente forma:

$$\delta Q = dU + pdv \quad (1)$$

Si el proceso transcurre a presión constante, entonces, integrando, obtenemos

$$Q_p = U_2 - U_1 + p(v_2 - v_1) \quad (2)$$

$$Q_p = (U_2 + pv_2) - (U_1 + pv_1) = H_2 - H_1 \quad (3)$$

Puesto que  $p$  y  $v$  son parámetros de estado, y  $U$  es función de estado, la suma  $U + pv$  es también función de estado y su variación en el proceso no depende de la trayectoria del proceso, sino solamente del estado inicial y final. Esta función se llama entalpía\*) y se designa con el símbolo  $H$ . La identidad:

$$H \equiv U + pv \quad (4)$$

De la ecuación (3) se ve el calor adsorbido a presión constante es igual al incremento de la entalpía  $\Delta H$  y no depende de la trayectoria del proceso.

Para hallar la diferencial total de la función H, diferenciamos la ecuación (4):

$$dH = dU + pdv + vdp$$

Sustituyendo el valor dU de la ecuación (1) y luego el valor  $\delta Q$  de la ecuación  $\delta Q = hdp + C_p dT$ , obtenemos:

$$dH = \delta Q + vdp = hdp + c_p dT + vdp = (h + v)dp + c_p dT$$

Si la presión es constante, entonces

$$dH = c_p dT \quad (5)$$

La variación de la entalpía puede ser fácilmente medida en muchos casos, y, por lo tanto, esta función encuentra amplia aplicación en las investigaciones termodinámicas, sobre todo, para los procesos que transcurren a presión constante. [2,3]

### 2.1.1 ENTALPIA DE CAMBIOS DE FASE

Los cambios como la fusión de un sólido, la evaporación de un líquido, la sublimación de un sólido o el cambio de un sólido de una forma cristalina a otra se llaman cambios de fase o cambios en el estado de agregación.

Los cambios en la energía interna U y en la entalpía H de una sustancia se acompañan de un cambio de fase. Considera, por ejemplo,

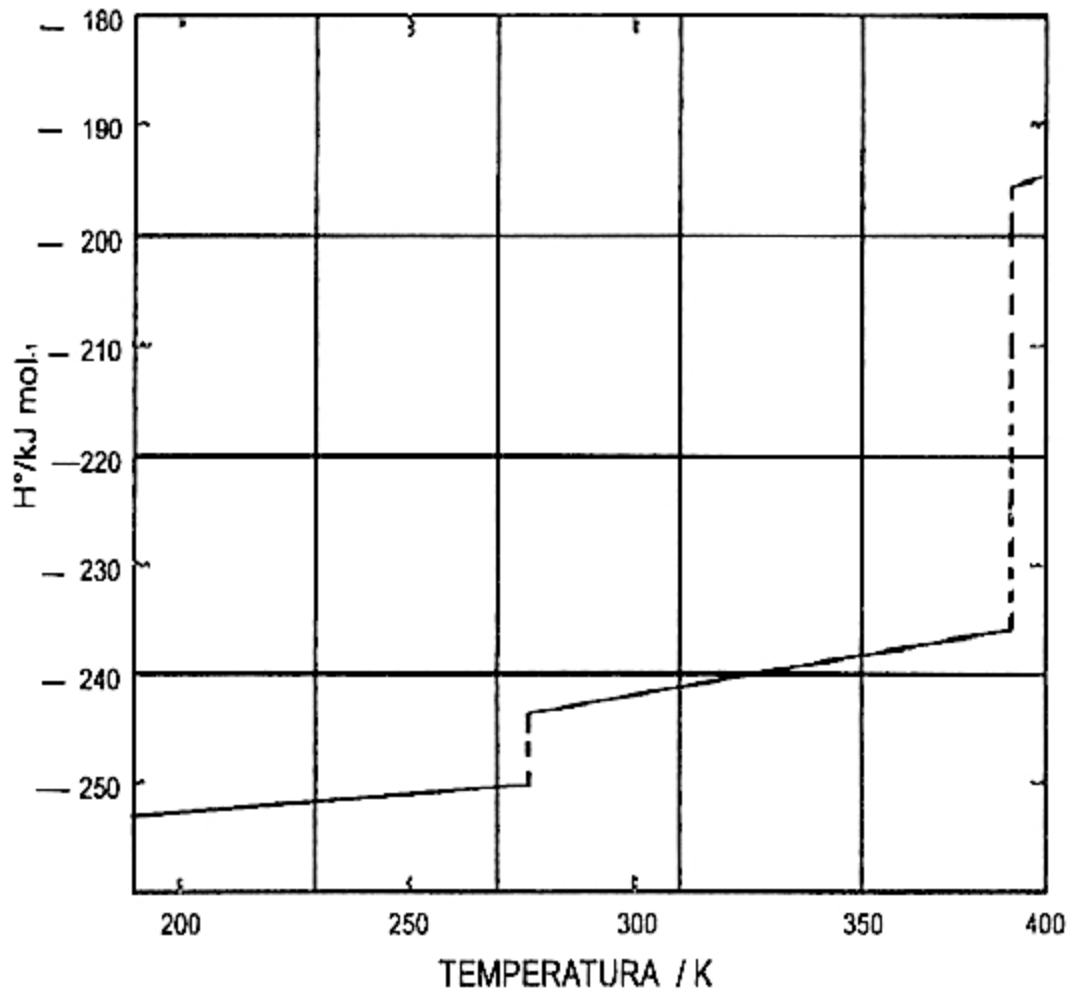
agua líquida  $\rightarrow$  vapor de agua

$$\Delta H(\text{evaporación}) = H(\text{H}_2\text{O}, \text{g}) - H(\text{H}_2\text{O}, \ell)$$

Las energías internas cinética y potencial de las moléculas del agua son muy diferentes en los dos estados de agregación. Las energías potenciales intermoleculares son muchos más negativas en una fase condensada que en un gas. Esta energía cohesiva, debida a las fuerzas de atracción netas entre las moléculas, es la causante de la condensación de gas a líquido cuando la temperatura cae de debajo del punto de ebullición del líquido.

Si se calienta una sustancia de  $T_1$  a  $T_2$  y ocurre un cambio de fase en el intervalo el  $\Delta H$  del cambio de fase se debe incluir en el cálculo de  $\Delta H$  total para el cambio de temperatura. La entalpia del  $\text{H}_2\text{O}$  por mol se grafica contra  $T$  en la figura (3). Obsérvense los cambios en la  $H$  en los puntos de fusión y ebullición. Los  $\Delta H$  de cambio de fase se llaman algunas veces calores latentes, de acuerdo con la terminología histórica de Joseph Black (1760). [4]

Las magnitudes  $H^*_T - H^*_0$ ,  $H^*_T - H^*_{T_0}$  se componen de aquellas obtenidas por medio de la integración de la capacidad calorífica en los correspondientes límites de temperatura y los intercambios de la entalpia en los cambios de estados de agregación (es decir, el calor de los cambios de estados de agregación):



**FIGURA 3 :** Entalpía  $H^\circ$  del  $\text{H}_2\text{O}$  en función de la temperatura  $T$ . Las discontinuidades ocurren en las transiciones de fase, fusión de sólido y evaporación del líquido a  $P^\circ$

$$\lambda = \Delta H_{\text{egr.}} = Q_{p,\text{egr}}$$

Así, para un mol de vapor de agua, la magnitud  $H_T^* - H_0^*$  a 400°K se halla como la suma:

$$H_T^* - H_0^* = \int_0^{273,15} C_{p,s} dT + \lambda_{\text{fus}} + \int_{273,15}^{373,15} C_{p,l} dT + \lambda_{\text{ev.}} + \int_{373,15}^{400} C_{p,g} dT \quad (6)$$

donde  $\lambda_{\text{fus}}$  y  $\lambda_{\text{ev}}$  son los calores de fusión y evaporación molares del agua [2]

Los subíndices s, l y g significan respectivamente los estados sólido, líquido y gaseoso.

## 2.2 LA ENTROPIA

La entropía es un de las más importantes propiedades de estado o funciones termodinámicas. Viene de una palabra griega que quiere decir "cambio" y se representa por la letra "S".

Se define un cambio de entropía diciendo que el "incremento de entropía en el curso de un proceso infinitesimal es igual a  $\delta q_{\text{rev}}$ , el calor absorbido cuando el proceso se realiza de manera reversible, dividido por la temperatura T", por definición entonces



$$\boxed{dS = \frac{\delta q_{rev}}{T}} \quad (7)$$

La entropía tiene las dimensiones de energía/temperatura. La unidad de entropía es calor por grado. En el Sistema Internacional de Unidades, la entropía y la capacidad calorífica se expresan en Julios por kelvin ( $J.K^{-1}$ .) Como la entropía es una propiedad extensiva, generalmente se fija como base un mol de sustancia.

Para expresar el incremento de entropía  $\Delta S$  correspondiente a un cambio finito en el sistema, es necesario integrar la ecuación (7) entre los límites del estado inicial 1 y del estado final 2. [5]

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{q_{rev}}{T} \quad (8)$$

### 2.2.1 LOS CAMBIOS DE ENTROPIA QUE ACOMPAÑAN A UN CAMBIO DE FASE

Cuando una sustancia sufre un cambio de fase, por ejemplo, de sólido a líquido o de líquido a vapor, hay una absorción de calor, y como consecuencia, un cambio de entropía. La fusión de un sólido en su punto de fusión o la vaporización de un líquido a presión constante igual a la tensión de su vapor, son ejemplos de procesos isotérmicos reversibles. El paso del calor de un cuerpo a otro a temperatura constante, es un proceso mediante un cambio infinitesimal en la temperatura de uno de los cuerpos. Los correspondientes cambios de entropía se obtiene dividiendo el calor absorbido entre la temperatura constante a la cual ocurre el cambio de fase.

La entropía molar de fusión, a temperatura y presión constante bajo condiciones de equilibrio, es la siguiente:

$$\Delta S_f = \frac{\Delta H_f}{T_f} = \frac{\lambda_f}{T_f} \quad (9)$$

donde  $\Delta H_f = \lambda_f =$  calor latente molar de fusión; y

$T_f =$  temperatura absoluta de fusión

De igual modo, la entropía molar de vaporización se representa por

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_e} = \frac{\lambda_v}{T_e} \quad (10)$$

donde,  $\Delta H_v = \lambda_v =$  calor latente molar de vaporización;

$T_e =$  temperatura absoluta de ebullición.

Desde que, tanto en la fusión como en la evaporización se absorbe calor, o lo que es lo mismo, que  $\lambda_f$  y  $\lambda_v$  son positivos, estos procesos van acompañados por un aumento en la entropía. Debido a esto la entropía de un líquido es más grande que aquella del sólido con el cual está en equilibrio en el punto de fusión, en igual forma que la entropía del vapor es más grande que la del líquido en el punto de ebullición.

La transición de una forma cristalina a otra, se realiza también bajo condiciones de equilibrio, asociada con un cambio reversible de calor, por lo cual habrá un cambio de entropía. La entropía de transición es igual al calor de transición  $\lambda_t$  dividido entre la temperatura de transición  $T_t$  en la escala absoluta. [5]

$$\Delta S_t = \frac{\Delta H_t}{T_t} = \frac{\lambda_t}{T_t} \quad (11)$$

### 2.2.2 EL CAMBIO DE ENTROPIA CON LA TEMPERATURA

Si un sistema de capacidad calorífica  $C$  absorbe calor de un reservorio de temperatura más alta en una cantidad infinitesimal  $dT$ , entonces

$$\delta q = C \cdot dT \quad (12)$$

Reemplazando el valor (12) en la ecuación de la entropía (7), se tiene

$$dS = C \frac{dT}{T} \quad (13)$$

De común, el calentamiento se hace, bien a volumen constante o bien a presión constante, por lo cual

$$dS = C_v \frac{dT}{T} \quad (14)$$

$$dS = C_p \frac{dT}{T} \quad (15)$$

Para cambios finitos, la variación en la entropía por un calentamiento de la sustancia, se obtendrá integrando ahora la ecuación (14), ahora la ecuación (15). Generalmente el suministro de calor a las sustancias se realiza bajo la presión atmosférica constante, por lo cual integrando la ecuación (15) a presión constante [5]

$$\int_{S_1}^{S_2} dS = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T} \quad (16)$$

Cuando  $C_p$  es constante, resulta que:

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (17)$$

### 2.3 EVAPORACION Y EBULLICION DE LOS LIQUIDOS

1° El proceso de vaporización que tiene lugar en la superficie libre de un líquido se llama evaporación. La evaporación se produce a cualquier temperatura y aumenta al elevarse ésta. En la capa superficial del líquido hay moléculas que tiene gran velocidad y energía cinética del movimiento térmico. Su escape de la superficie del líquido explica la evaporación y la disminución, relacionada con ella, de la reserva de energía interna del líquido y su enfriamiento. De medida del proceso de vaporización sirve la velocidad de evaporación.  $u$ , apreciada por la cantidad de líquido que pasa a vapor en la unidad de tiempo. La velocidad  $u$  depende la presión externa y del movimiento de la fase gaseosa sobre la superficie libre del líquido [6]

$$u = \frac{cS}{P_o} (p_s - p) \quad (18)$$

donde:

$C$  = Es una constante

$S$  = área de superficie libre del líquido

$P_s$  = Presión del vapor saturado

$p$  = Presión del vapor del líquido sobre la

superficie libre de ésta.

$p_0$  = Presión barométrica externa

- 2° La ebullición es la evaporación intensa de un líquido que tiene lugar no sólo en su superficie, sino también en toda su masa dentro de las burbujas de vapor que se forman en este caso. Las dimensiones de las burbujas de vapor aumentan rápidamente y éstas emergen a la superficie y revientan. A esto se debe el borboteo característico del líquido en ebullición. La presión  $p$  dentro de una burbuja gaseosa inmersa en el líquido se compone de la presión externa  $p_0$ , la presión hidrostática  $p_h$  de las capas del líquido que hay sobre ella, y la presión adicional  $\Delta p$  debido a la tensión superficial:

$$p = p_0 + p_h + \Delta p \quad (19)$$

Siendo:

$$p_h = \rho gh \quad y \quad \Delta p = \frac{2\sigma}{r}$$

donde:

$r$  = radio de la burbuja de vapor

$h$  = distancia desde su centro a la superficie del líquido

$\rho$  = densidad del líquido

$\sigma$  = coeficiente de tensión superficial del líquido

La ebullición del líquido comienza a la temperatura en que la tensión  $P_s$  del vapor saturado dentro de la burbuja no es menor que la presión  $p$ :

$$P_s \geq P_o + \rho gh + \frac{2\sigma}{r} \quad (20)$$

Si esta condición no se cumple la burbuja (se cierra) y el vapor que había en ella se condensa [6]

- 3° Cuando los radios de las burbujas de vapor son pequeños, la presión de saturación  $P_s$  debe ser grande y para que el líquido empiece a hervir hay que calentarlo hasta una temperatura alta. Si en el líquido hay centros de vaporización (partículas de polvo, burbujas de gases disueltos, etc). La ebullición comienza a una temperatura bastante más baja. Esto se debe que en los centros de evaporización surge burbujas de vapor de tal dimensión que la influencia del tercer término de la desigualdad (Ec. 20) Se puede despreciar. Además, por lo general,  $\rho gh \ll P_o$  y la condición aproximada para el comienzo de la ebullición tiene la forma

$$P_s \approx P_o \quad (21)$$

La temperatura del líquido a la cual la presión de su vapor saturado es igual a la presión externa se llama temperatura (o punto de ebullición [6])

- 4° A presión constante, la temperatura del líquido en ebullición también permanece constante. La cantidad de calor que se le suministra al líquido hierve se gasta totalmente en transformar en vapor las moléculas del líquido. El calor ( $L_v$ ) necesario para vaporizar hasta la temperatura de ebullición se llama calor de vaporización o calor latente de vaporización. La magnitud ( $L_v$ ) necesario para vaporizar la unidad de masa de un líquido calentado hasta la temperatura de ebullición se llama calor de vaporización o calor latente de vaporización. La magnitud ( $L_v$ ) disminuye a medida que se eleva la temperatura de ebullición y se anula a la temperatura crítica.

La variación que experimenta la energía interna de un líquido cuando una unidad de masa suya se transforma en vapor a la temperatura de ebullición se denomina calor interno de vaporización [6,7]

- 5° La ebullición de un líquido y la condensación de su vapor son ejemplos de transición de fase de I orden. Estas transiciones de fase se caracterizan por la constancia simultánea de la presión y la temperatura, pero la razón entre las masas de las dos fases varía. Para que efectúe la transición de fase de I orden hay que cederle al sistema o extraer del mismo el calor  $L_v$  de transición de fase. Referido a la unidad de masa, el calor  $L_v$  se determina por la ecuación de Clapeyron - Clausius.



$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_v}{T(v_2 - v_1)}$$

$$L_v = (v_2 - v_1) T \frac{dp}{dT} \quad (22)$$

Donde:

$v_2$  y  $v_1$  = volúmenes específico de la substancias en las fases inicial y final

T = Temperatura absoluta

p = presión de la transición de fase [6,7]

6° De la Ecuación de Clapeyron - Clausius para la ebullición de un líquido se sigue que:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{(V_v - V_L)}{L_v} T \quad (23)$$

Donde:

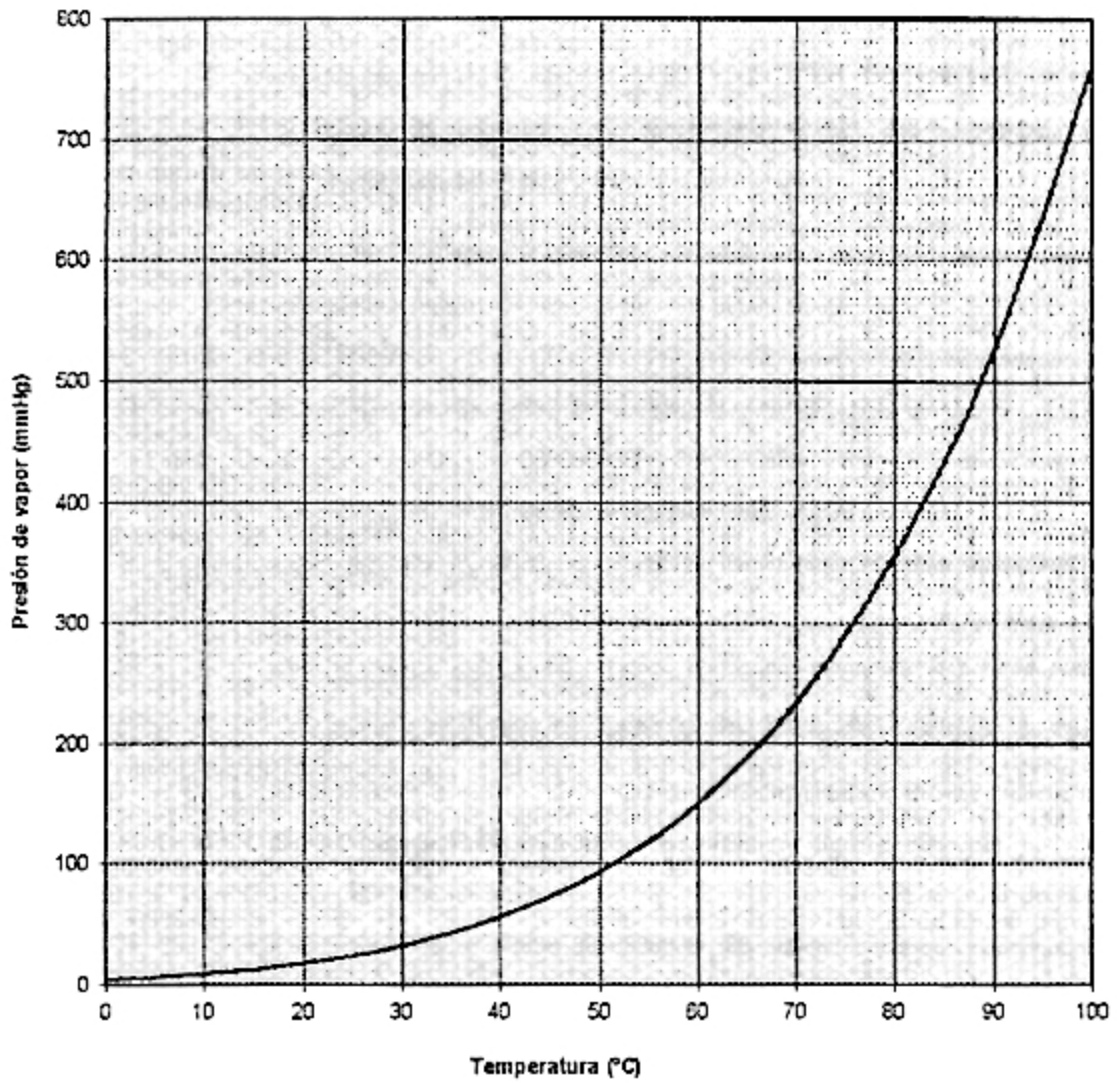
$v_l$  y  $v_v$  = volúmenes específico del líquido y del vapor

T = Temperatura absoluta

Como  $v_v > v_l$  y  $L_v > 0$ , resulta que

$$\frac{dT}{dP} > 0$$

es decir, cuando aumenta la presión la temperatura de ebullición se eleva. Ver Fig. (4) [6,7]



**Figura 4: Curva presión de vapor-temperatura.**

#### 2.4 Cálculo de Eficiencia Térmica

El sistema de Refrigeración por adsorción intermitente se definió a la eficiencia térmica como la relación de la cantidad de calor útil y el calor latente de evaporización.

- a) Cálculo del calor útil cantidad de energía necesaria para disminuir la temperatura del agua hasta llegar a refrigerar)[8]

$$Q_u = -M_{\text{agua}} C_p \text{ agua } \Delta T \quad (24)$$

Donde

$$C_p = 4.186 \text{ KJ/Kg K calor específico a presión constante del agua}$$

$$M_{\text{agua}} = \text{Masa líquida del agua.}$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \text{Cambio de temperatura absoluta.}$$

- b) Cálculo del calor latente (cantidad de energía necesaria para realizar el cambio de fase de líquido o vapor)

$$Q_{\text{latente}} = M_v L_v \quad (25)$$

Donde:

$$M_v = \text{Masa de vapor de agua}$$

$$L_v = 2258.7657 \text{ KJ/Kg}$$

Calor latente de ebullición del agua

$$\eta = \frac{-Q_u}{Q_{L_v}} = \frac{-M_{\text{agua}} C_p \text{ agua } \Delta T}{M_v L_v}$$

$$\eta = \frac{-M_{\text{agua}} C_p \text{ agua } (T_2 - T_1)}{M_v L_v} \quad (26)$$

## 2.5 EL FENOMENO DE LA ADSORCION

Adsorción significa un exceso de concentración de la sustancia extraña en la superficie del sólido.

Desde hace tiempo se sabe que el carbón de madera puede absorber grandes cantidades de gases, especialmente los que se licúan fácilmente como el amoníaco, el anhídrido sulfuroso y el cloro, y así mismo, retirar sustancias colorantes de ciertas soluciones acuosas. En la actualidad, el gel de sílice obtenido mediante la desecación de un precipitado de ácido sílico, se usa en forma particular para remover la humedad del aire en los lugares de conservación de instrumentos delicados.

La adsorción se debe a fuerzas superficiales. Al tratar de la tensión superficial se vio que las fuerzas superficiales tiene su origen en las atracciones moleculares no compensadas. En la capa superficial, las moléculas tienen su lado exterior libre de la acción de campos de fuerzas, lo que produce el desarrollo de la energía superficial. Se recordará que es una película absorbida de líquido sobre una superficie de vidrio, lo que causa que el agua y otros líquidos suban por el interior de los tubos capilares.

En un sólido, las moléculas superficiales están retenidas por un lado al resto del sólido, por lo cual presentan en el lado exterior libre una energía superficial latente que fijará moléculas extrañas. Si estas moléculas superficial latente que fijará moléculas extrañas. Si estas moléculas

extrañas poseen una determinada afinidad por el sólido, quedarán firmemente unidas a éste, ocurriendo realmente una reacción química. De acuerdo a la teoría del norteamericano LANGMUIR, formulada en 1916, sobre la estructura de una superficie sólida, un átomo, ion o molécula en la superficie de un cristal tiene una fuerza atractiva que se extiende en el espacio por una distancia comparable al diámetro de una molécula, por lo cual es capaz de sostener por adsorción una capa monomolecular de la sustancia extraña sobre la superficie del cristal. La adsorción es una tendencia general de los sólidos, de concentrar alrededor de sus superficies una capa de cualquier gas o soluto que se halla en contacto con ellos. Para el estudio de la adsorción conviene usar sustancias porosas, que presentan además superficies interiores en los poros [5]

#### 2.5.1 TIPOS DE ADSORCION

- a) Física o adsorción de Van der Waals.- Que se presenta en todas las sustancias. Las moléculas absorbidas se adhieren a la superficie del adsorbente, mediante el mismo tipo de fuerza que existen entre las moléculas de los gases a altas presiones o fuerzas de Van der Waals. Se caracteriza principalmente por su calor de adsorción relativamente bajo, de menos de 10 kcal/mol, que es el mismo orden que los calores de vaporización, lo que indicaría que las fuerzas que retienen las moléculas absorbidas en la superficie del sólido, son análogas a las fuerzas de cohesión de las moléculas en el estado líquido.

La magnitud de esta adsorción está relacionada con la facilidad de la licuación del gas absorbido. Se presenta a temperaturas bajas o moderadamente bajas. El equilibrio de adsorción es reversible y se establece rápidamente. La adsorción ocurre en capas multimoleculares. La cantidad absorbida de gas aumenta con su presión parcial, y es función más particular de la sustancia absorbida que del absorbente. Este es el tipo observado en la adsorción de varias gases sobre el carbón de madera.

- b) Química o adsorción activada.- Comprende fuerzas de interacción de naturaleza química entre el gas y el adsorbente y es de carácter muy específico. Debido a que las fuerzas químicas decrecen muy rápidamente con la distancia, se admite que en la adsorción química sólo se adsorbe una capa de moléculas sobre la superficie del sólido, como lo dijera LANGMUIR, lo que se ha establecido en un gran número de casos.

El calor de la adsorción química es más grande que 20 kcal/mol. Se produce en casos limitados y puede ocurrir a temperaturas altas. La cantidad adsorbida de gas es característica de la sustancia adsorbida y del adsorbente, a la vez. La presión del gas no tiene generalmente el efecto relatado para la adsorción física, más que hasta cierto límite que corresponde a la saturación de la película monomolecular.

Esta adsorción conduce una adhesión mucho más firme

del gas sobre la superficie. Es bastante cierto que esta adsorción consiste de una combinación de las moléculas del gas con la superficie, para formar un compuesto superficial. En la adsorción del oxígeno sobre el tungsteno a  $1200^{\circ}\text{K}$ , se encuentra que permanece oxígeno sobre la superficie como  $\text{WO}$ . Otros ejemplos de adsorción química son el monóxido de carbono sobre tungsteno, oxígeno sobre plata, platino y oro, y el hidrógeno sobre el níquel [5]

La adsorción de un gas va acompañada por una disminución de la entalpía, es decir que hay un desprendimiento de calor que se conoce como calor de adsorción. Se llama adsorbato a la sustancia que se adsorbe. Se forma un complejo de adsorción cuando las moléculas del adsorbato integran una capa monomolecular sobre el adsorbente. Cuando se trata de la adsorción química el complejo es fuerte, o sea constituye una adsorción localizada donde las moléculas no se desplazan por la superficie. En cambio, en la adsorción física sólo se presenta a temperaturas bajas [5].

#### 2.5.2 ADSORCION DE GASES POR SOLIDOS

Es posible que todos los sólidos adsorban gases en algún grado, la adsorción por regla no es muy pronunciada, a menor que el adsorbente posea una superficie considerable por unidad de masa. Por esta razón son tan efectivos como agentes adsorbentes el

gel de sílice y los negros de humo obtenidos de diferente procedencia como la madera, hueso y lignito. Estas sustancias tienen una estructura muy porosa y pueden adsorber volúmenes apreciables de gas. El grado de adsorción puede incrementarse aún más por "activación" de los absorbentes de diferente forma. Así, si el carbón de madera se calienta entre 350° y 1000°C en vacío.

La cantidad de gas absorbido por un sólido depende de la naturaleza y área del adsorbente y del gas absorbido, así como de la temperatura y presión del gas.

Como cabe esperar, un incremento en el área superficial del adsorbente aumenta la cantidad total de gas absorbido. Como el área superficial de los agentes adsorbentes no se determina en general con facilidad, se acostumbra utilizar la masa como una medida de la superficie disponible y expresar la cantidad de adsorción por unidad de agente adsorbente usado [9].

### 2.5.3 APLICACION DE ADSORCION

La adsorción de gases sobre los sólidos se emplea en el laboratorio para preservar el vacío entre las paredes de las vasijas de Dewar diseñadas para almacenar aire o hidrógeno líquidos. El carbón activado, al colocarse entre las paredes, tiende a adsorber todos los gases que aparecen como



consecuencia de las imperfecciones del vidrio o por difusión a través del vidrio.[9]

## 2.6 EL SISTEMA DE REFRIGERACION POR ADSORCION INTERMITENTE

- Es de construcción más sencilla y consta de dos tanques, conectados uno al otro por una manguera, a una presión mínima (sea 6 mmHg), cada uno de los cuales desempeña una doble función. Durante la operación de carga, uno de ellos actúan como generador, que al calentarse, expulsa el refrigerante (amoníaco) de la solución (en agua); y el otro actúa de condensador, haciendo cambiar el estado físico del refrigerante de gas a líquido.
- La operación de carga suele ser breve comparada con la operación del enfriamiento, durante el cual el tanque que era generador pasa actuar de cámara de adsorción y el tanque que era condensador pasa a actuar de evaporador, obteniéndose así la temperatura de refrigeración necesaria. Ver fig. (5) [10]
- El recipiente A (adsorbedor) que contiene una solución de Bromuro de litio con agua ( $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ ), el recipiente E (evaporador) que contiene agua pura. El LiBr tiene una alta afinidad con el agua, además tiene una fuerte tendencia para adsorber el vapor de agua. Aún con una baja temperatura (sea  $4^\circ\text{C}$ ) hay producción de vapor de agua en el evaporador. El vapor de agua es absorbido por la solución de LiBr en

el recipiente A (Adsorbedor) [1]

- Los ciclos de Adsorción intermitente sólida parecen poseer una alternativa prometedora para la refrigeración solar debido a su operación simple. Para perfeccionar el desempeño de tales sistemas, es necesario estudiar el par más apropiado y para perfeccionar los diversos componentes del sistema.

Existen muchos modelos para la adsorción, se propone dos modelos.

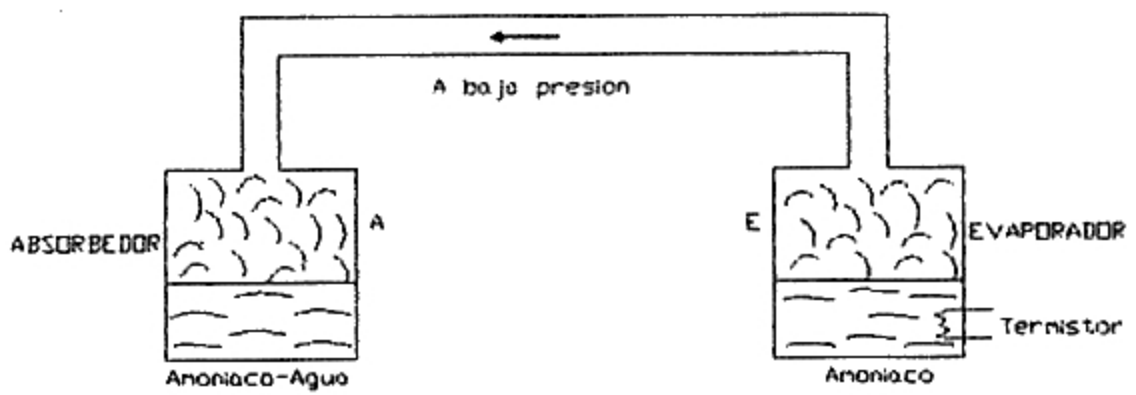
El modelo de Temperatura uniforme: En el caso del par sílica gel -agua, usaron tres ecuaciones básicas: una ecuación de balance de color global (en función de la fuente), una ecuación cinética para cuantificar

la transferencia de masa; y finalmente la ecuación de estado del par adsorbente adsorbato [11]

- La literatura reporta 3 adsorbentes idóneos para este objetivo: zeolitas, sílica gel y carbón activado (obtenido de huesos de pollo) con respecto a los fluidos de enfriamiento se centran principalmente en agua, metanol y acetona.

Pareja de Adsorbato - Adsorbente

Agua - sílica gel (marca sigma, grado, cromatográfico de 100 mallas) [12]



**Fig. 5. : Sistema de refrigeración por absorción intermitente.**

## 2.7 TERMISTOR

La sustancia termométrica es un semiconductor.

Resistores.- Están hechos de óxido metálico y tiene una variación negativa de la resistencia con la temperatura. Esta variación es mucho más grande que la de las resistencias metálicas (1 a 6%)

El rango de temperaturas usual para termistores es entre  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta  $10^{\circ}\text{C}$ , con la excepción de las resistencias de carbono que trabajan en el rango de  $0^{\circ}\text{K}$  a  $4^{\circ}\text{K}$  con una precisión de  $0.001^{\circ}\text{K}$ .

La ecuación del Termistor en forma exponencial en función de temperatura absoluta es;

$$R = R_0 e^{B/T} \quad (27)$$

Donde:

T = Temperatura absoluta

B = Es un constante cuyo valores típicos varían entre 2000 a 6000 ( $^{\circ}\text{K}$ )

$R_0$  = Es el valor de la resistencia correspondiente a la temperatura T (absoluta) [13]

## 2.8 HIGROMETRIA

La atmósfera terrestre está compuesta de una mezcla de gases mayormente oxígeno, nitrógeno y vapor de agua. Cada uno de estos gases contribuye casi independientemente a la presión de aire total.

Para una presión de aire cualquiera (lectura de barómetro), la presión atmosférica va a ser igual a la presión de aire seco más la presión parcial del vapor de agua, la máxima presión que el vapor de agua pueda ejercer es llamada la **presión de saturación**, la que se define como la presión de vapor sobre la superficie de agua en ebullición dentro de un recinto cerrado, del cual todo el aire ha sido eliminado.

La presión de saturación varía con la temperatura a la cual esta ebulliciosa: el valor es 101,3KPa a 100°C y 19,9 KPa a 60°C. Esto significa que para hervir agua a 60°C es necesario disminuir la presión en el recipiente a cerca de 0,2 atmósferas.[15]

## III. PARTE EXPERIMENTAL

## 3.1 EQUIPO Y MATERIAL

## 3.1.1 EQUIPOS

- Bomba de Vacío (aceite)  
CENCO HYVAC 2. Chicago USA  
 $P = \frac{1}{4}$  HP = 186.5 Watts  
1725 RPM, Frecuencia: 60 Hz  
115/230v
- Campana de Vidrio, para hacer el vacío h (altura) =  
33 cm, D (base) = 25 cm
- Monómetro de Mercurio (1-0.001 mmHg)  
Vacustat Edwards High Vacurum (Canadá)
- Multímetro Digital Modelo 190 Keithley
- Tanque cilíndrico acrílico para agua, v = 725 ml
- Termómetro de Mercurio (-10°C a 150°C)
- Termómetro Digital - Therm 2285-2  
T : K - 200 ..... + 1370°C
- Caja de Teknopor (aislamiento térmico)

## 3.1.2 MATERIALES

Sílica - gel con indicador de humedad en forma de perlas de (1 - 3 mm) de diámetro.

- Densidad aparente: 70 g/100 ml
- Capacidad de adsorción de agua (humedad relativa de 80%, en 24 h)
- Hierro < 0,02 %, cloruro < 0.02 %, PH de la suspensión acuosa al 10%.
- Pérdida al secar (150°C) ..... <2%

Wurtzita - pequeñas partículas en forma de Cerámica.

Agua destilada.

### 3.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

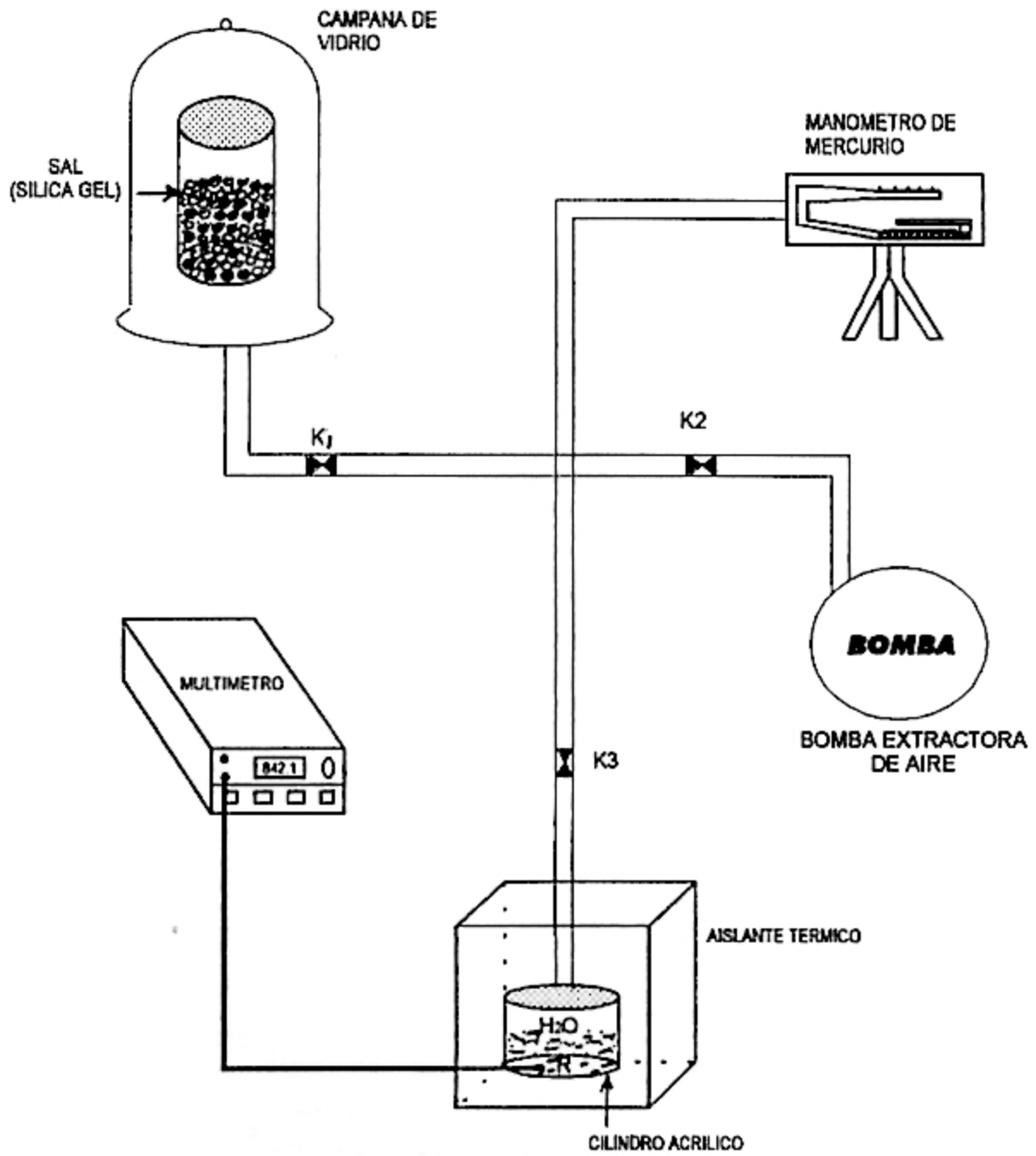
Para llevar a cabo el experimento se prosiguió con las siguientes pasos:

1. La Sal (sílica gel, Wurtzita) es colocada en la mufla a una temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$ , durante un tiempo de 14 horas.
2. La Sal es sacado de la mufla y es depositado en un tanque metálico especial y luego es pasado y enseguida es colocado dentro de la Campana de vacío.
3. Se instala el equipo experimental según Fig. (6). Campana de vidrio, bomba de vacío Manómetro de mercurio, tanque con agua destilada dentro de la Caja Teknopor, multitester y demás conexiones de mangueras de vacío, con sus respectivas llaves. Ver foto 1.
4. Se empieza encendiendo la bomba de vacío para evacuar el aire que se encuentra dentro de la Campana de vidrio que contiene la sal (sílica - gel o Wurtzita), manteniendo las llaves  $K_1$  y  $K_2$  completamente abiertas y la llave  $K_3$  completamente cerrada, durante el tiempo de 35 a 40 minutos y a una presión de 1 Torr (1 mm Hg)
5. Se cierra la llave  $K_1$  y manteniendo las llaves  $K_2$  y  $K_3$  abiertas, se comienza a evacuar el aire que se encuentra dentro del recipiente que contiene el agua destilada, durante 5 minutos.
6. Se cierra la llave  $K_2$  y se abre la llave  $K_1$ , simultáneamente. Luego se procede a tomar los datos experimentales es decir midiendo el omega, del Termistor R ( $\Omega$ ), durante un tiempo de cada minuto.

La lectura de la resistencia dará información de la temperatura a la que está llegando dentro del recipiente que contiene el agua, durante todo este proceso. Ver Fig. 7 y fotos 2 y 3.



3.3 ESQUEMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE REFRIGERACION POR ADSORCION INTERMITENTE



K1, K2, K3 : LLAVES DE SEGURIDAD

R : TERMISTOR

FIG. 6 : ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

FOTO Nº 1



FOTO Nº 2



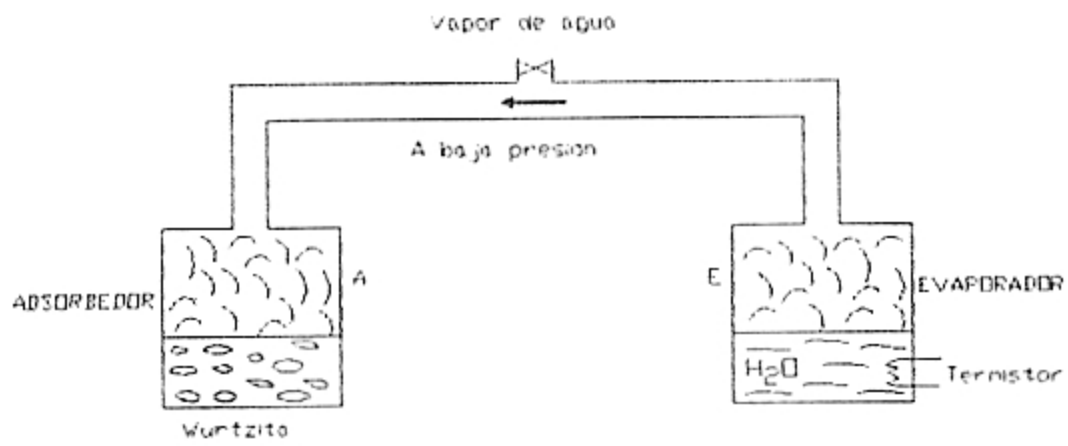


Fig. 7. Sistema de refrigeración por adsorción intermitente

FOTO N° 3



### 3.4 RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS Y SU PROCESAMIENTO

#### 3.4.1 CALIBRACION DEL TERMISTOR (R)

La calibración del termistor se realizó en agua a una y temperatura de 60°C y a una temperatura ambiente.

Y haciendo uso de la Ec. (27) es decir la Ecuación del Termistor, y de la Tabla # 2, se determinaron la constantes B y  $R_0$

$$R = R_0 e^{\frac{B}{T}}$$

$$\ln R - \ln R_0 = (B/T)$$

$$\ln 809 - \ln R_0 = (B/293.7) \dots \dots \dots (28)$$

$$-\ln 230 + \ln R_0 = (-B/324.5) \dots \dots \dots (29)$$

---


$$\ln 809 - \ln 230 = B (1/293.7 - 1/324.5)$$

$$\ln (809/230) = B = (0.003404835 - 0.003081664)$$

$$\ln (3.517391304) = B (0.000323171)$$

$$B = \frac{\ln (3.517391404)}{0.000323171} = \frac{1.257719608}{0.000323171}$$

$B = 3892^{\circ}\text{K}$
----------------------------

$$\ln 809 - \ln R_0 = (B/293.7)$$

$$-\ln R_0 = (B/293.7) - \ln 809$$

$$\ln R_0 = \ln 809 - (3892/293.7)$$

$$\ln R_0 = -6.55581838$$

$$R_0 = e^{-6.55581838}$$

$R_0 = 0.001422^{\circ}\text{K}$
----------------------------------

## 3.4.2 CURVA APROXIMADA DE CALIBRACION DEL TERMISTOR

$$R = R_0 e^{B/T}$$

$$\ln R = \ln R_0 + (B/T)$$

$$T = \frac{B}{\ln (R/R_0)} \dots \dots \dots (30)$$

Donde: B = 3892 °K

R<sub>0</sub> = 0.001422 K

ver fig. (8)

3.4.3 Para determinar los cambios de Entalpía del sistema de refrigeración del agua, usando los adsorbentes sílica - gel y Wurtzita, se uso la Ec. (5) y los resultado ver Tabla # 1.

3.4.4 Para calcular la eficiencia térmica del sistema de Refrigeración por Adsorción, se uso la Ec. (26) y los resultados ver Tabla # 1.

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

TABLA # 1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA DE REFRIGERACION

Material	$M_{sal}(kg)$	$M_{H_2O}(kg)$	$M_{H_2O(v)}(kg)$	$t_1(\text{min})$	$t_2(\text{min})$	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$	$\Delta H (KJ/Kg)$	$\eta(\%)$
Sílica gel	0.508	0.046	0.014	5	128	25.90	2.90	-96.28	14.00
	0.508	0.083	0.017	5	94	25.23	3.35	-91.60	17.80
	0.508	0.129	0.021	5	162	24.70	5.00	-82.55	22.45
Wurtzita	1.703	0.043	0.017	5	156	25.40	0.43	-104.52	11.70
	1.690	0.088	0.022	5	145	24.60	0.48	-100.97	17.88
	1.703	0.135	0.025	5	182	24.85	0.80	-100.67	24.07
	1.698	0.174	0.026	5	193	24.57	1.24	-97.66	28.93

$M_{sal}$  = Masa de la Sal

$M_{H_2O}$  = Masa del agua destilada refrigerada

$M_{H_2O(v)}$  = Masa de vapor de agua

$t_1$  = tiempo de bombeo (bomba - recipiente que contiene agua)

$t_2$  = tiempo de refrigeración del agua

$T_1$  = Temperatura inicial del agua

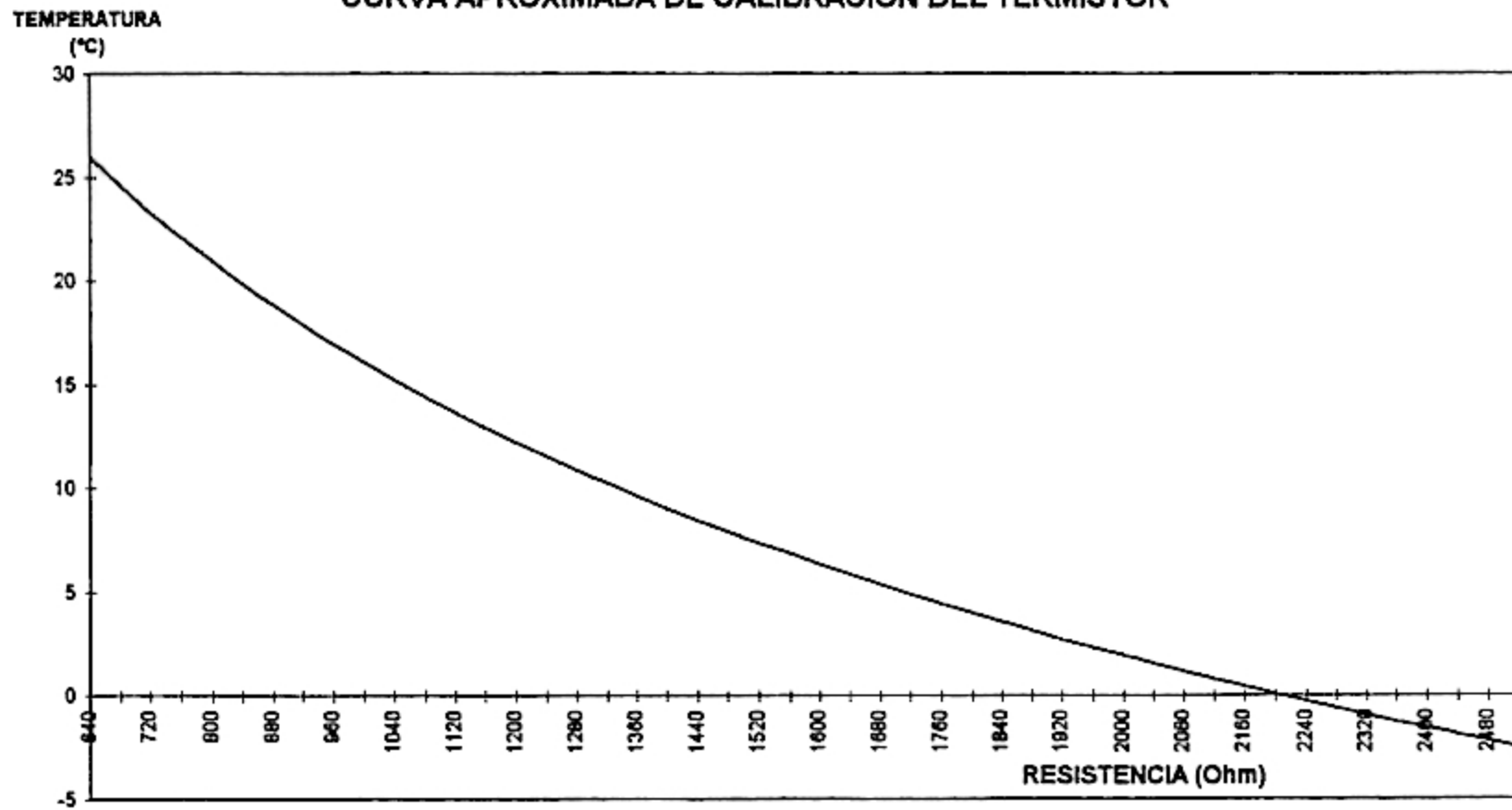
$T_2$  = Temperatura final del agua

$\eta$  = Eficiencia Térmica

$\Delta H$  = Variación de la entalpía

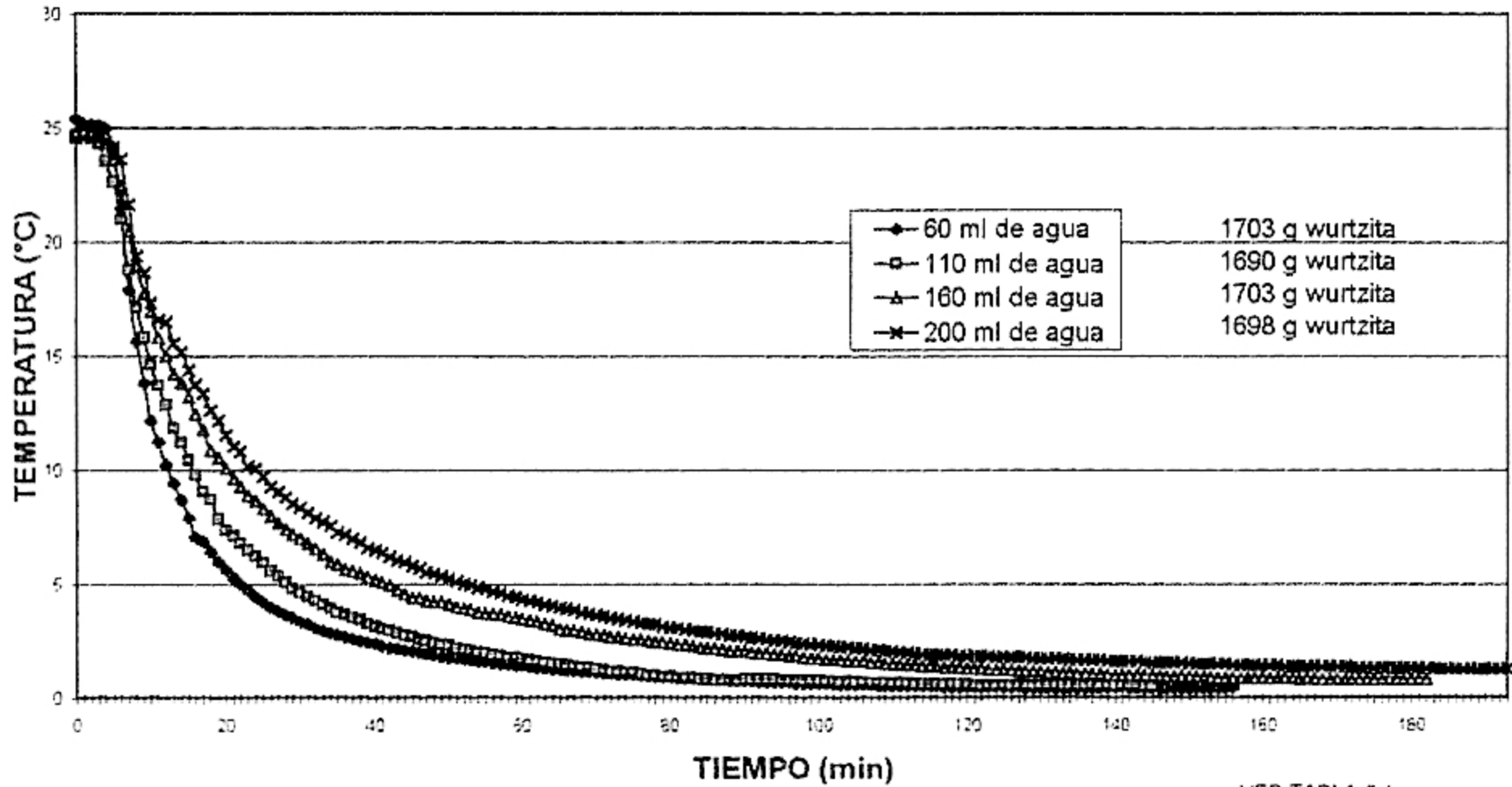
**FIG. 8: TEMPERATURA vs RESISTENCIA**

**CURVA APROXIMADA DE CALIBRACION DEL TERMISTOR**



VER TABLA #3

**FIG. 9: TEMPERATURA vs TIEMPO**  
**Adsorbente (wurtzita), 5 min. de bombeo**

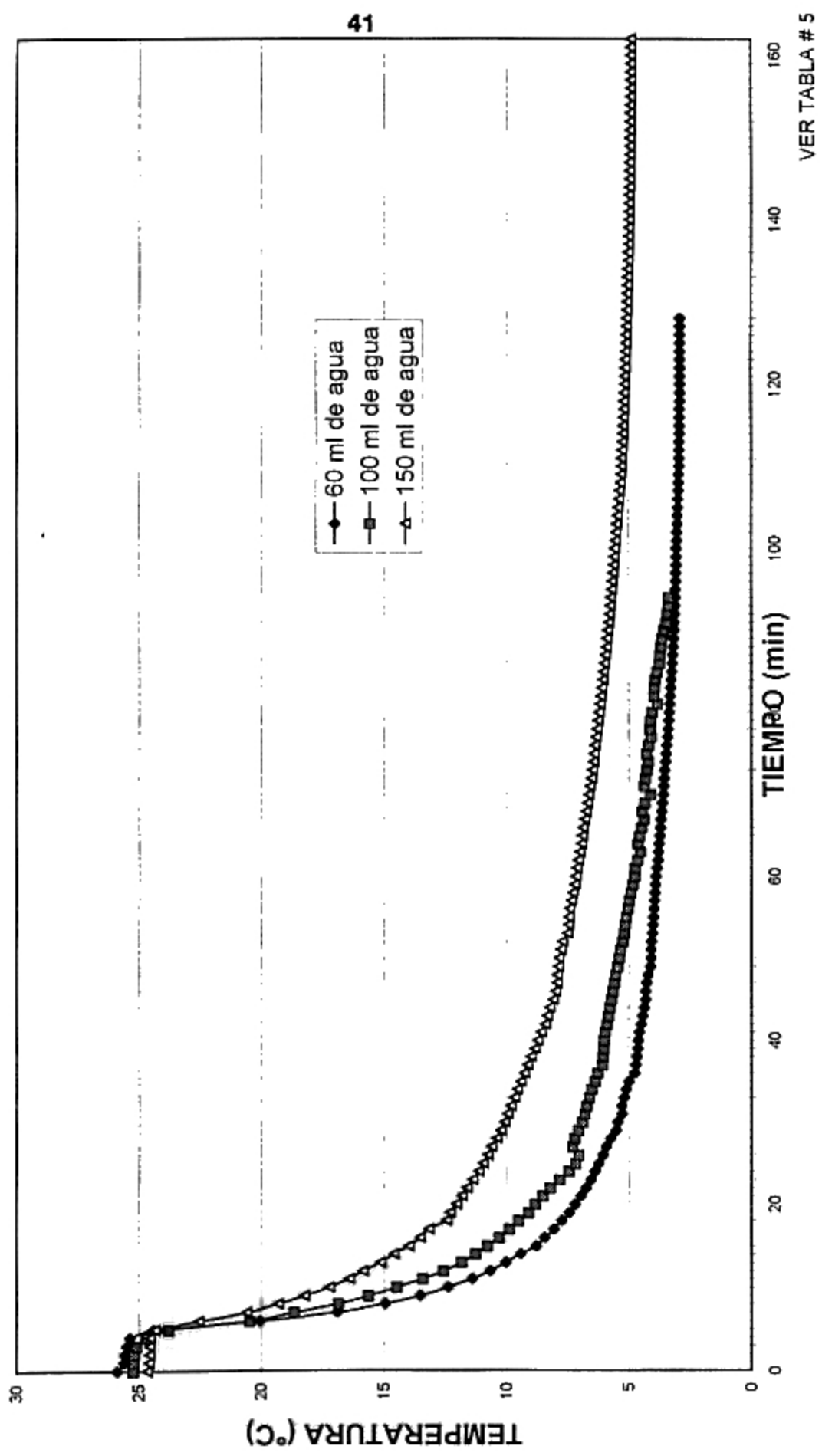


8

VER TABLA # 4

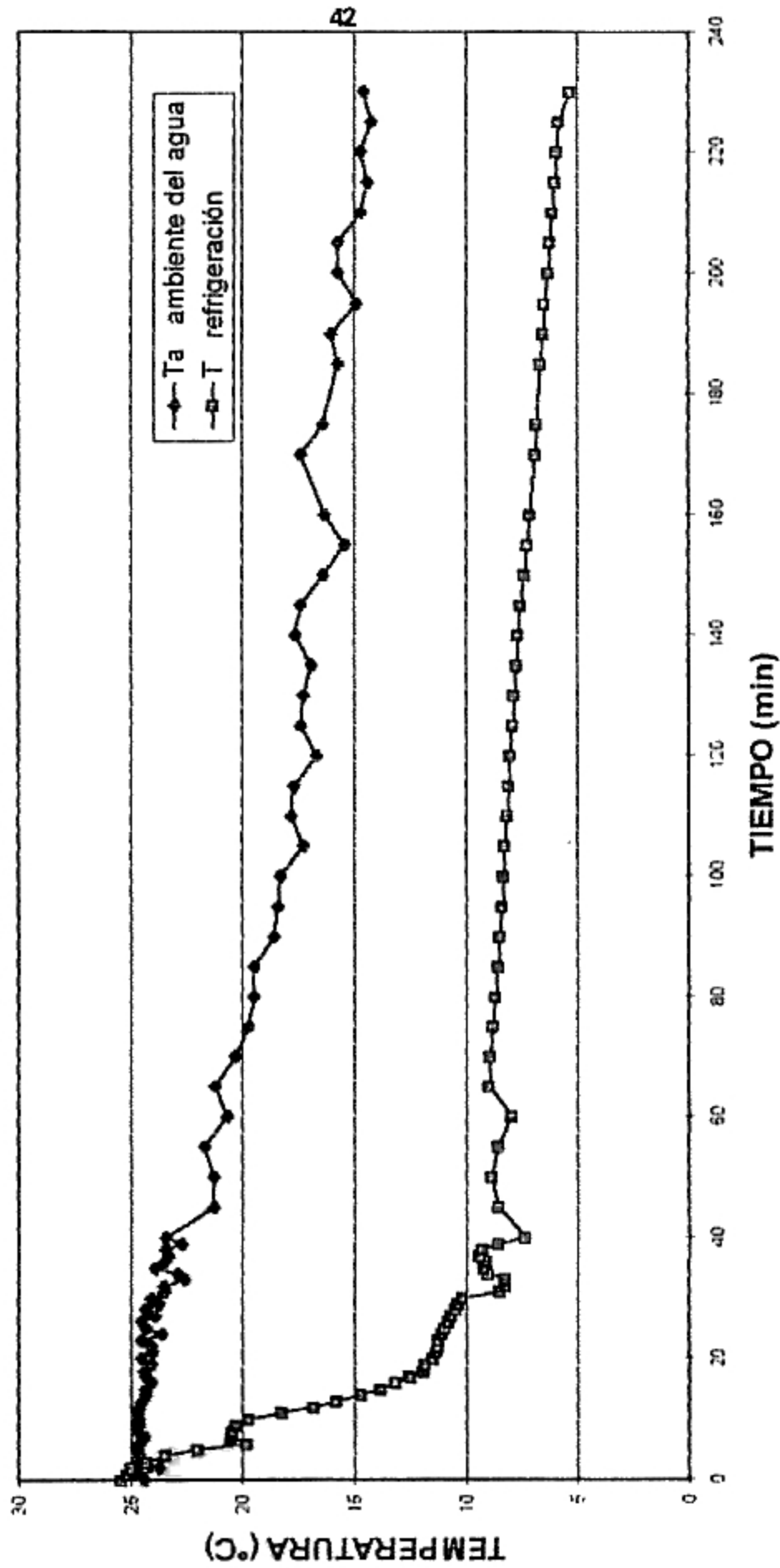


**FIG. 10: TEMPERATURA vs TIEMPO**  
**Masa de sal (silica gel)=508gr, 5 min de bombeo**



# FIG. 11: TEMPERATURA VS TIEMPO

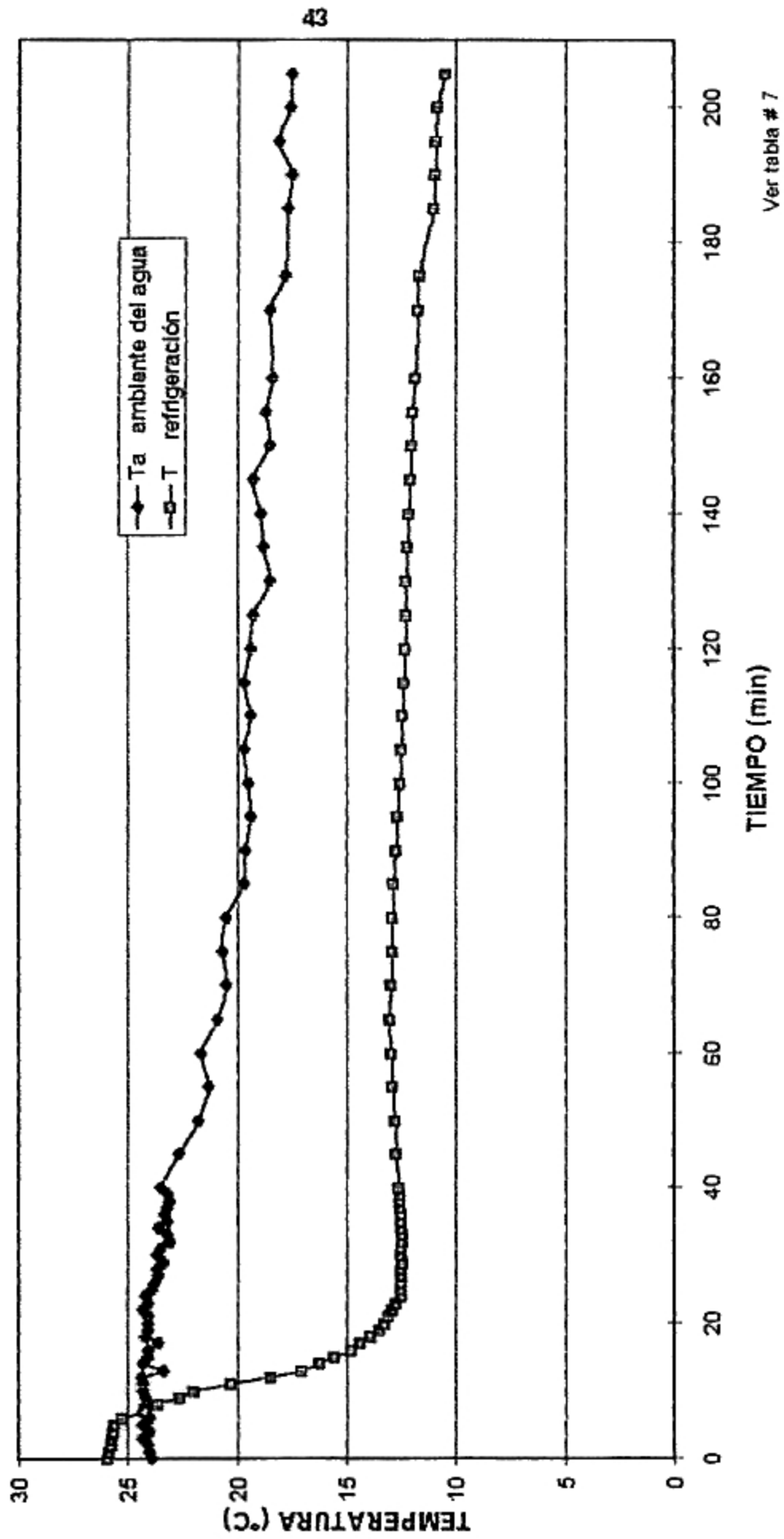
Vagua = 110ml, Masa de sal (wurtzita) = 1700gr, 10 min de



Ver tabla # 6

# FIG. 12: TEMPERATURA VS TIEMPO

Vagua= 120ml. Masa sal (sílica gel)= 507 gr. tiempo de bombeo= 10 min



## V. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

### 5.1 CONCLUSIONES

1° A partir de los resultados experimentales mostrados en la Tabla # 1 y las Figs. (9) y (10) se puede demostrar el papel tan importante en un sistema de refrigeración por adsorción, al hacer funcionar una bomba de vacío durante un tiempo de 35 minutos y a una presión de 1 Torr, para extraer el aire dentro de la campana que contiene el adsorbente, y luego evacuando el aire del recipiente con agua destilada, (de 60 ml de volumen), durante 5 minutos, se logró refrigerar el agua:

- Con sílica - gel a una temperatura de 2.9°C, con una eficiencia térmica ( $\eta=14\%$ )
- Con Wurtzita a una temperatura de 0.43 C, con una eficiencia térmica ( $\eta=11.70\%$ )

2° El desarrollo de un sistema de refrigeración por adsorción es de gran importancia para comunidades rurales o alejadas de las grandes ciudades en donde no existen redes de suministro de energía eléctrica y en donde los requerimiento de refrigeración son aplicados principalmente a la preservación de alimentos, medicinas y a la producción de hielo.

### 5.2 SUGERENCIAS

- Financiar los materiales para construir un sistema de refrigeración con energía solar, proyectadas a las comunidades rurales.

## VI. REFERENCIAS

- [1] R. Lazzarin, "Analysis of the LiBr Absorption Refrigeration Cycle", Fourth Course on Solar Energy Conversion, ICTP - Italy, 6 - 24 September (1977)
- [2] Ya Guerasimov - Dreving, "Curso de Química Física" Ed. Mir - Moscú (1977)
- [3] J. Aguilar Peris, "Curso de Termodinámica", Ed. Alhambra, Madrid - España (1981)
- [4] Walter J. Moore, "Físico Químico Básico", Ed. Prentice Hall Hispanoamericano S.A., México, (1986)
- [5] G. Pons Muzzo, "Físico Químico", Ed. UNMSM, Lima - Perú, (1985)
- [6] B.M. Yavorski - A.A Detlaf, "Prontuario de Física", Ed. MIR, Moscú, (1983)
- [7] S. Glasstone - D. Lewis, "Elementos de Química Física", Ed. Médico Quirúrgico, Buenos Aires - Argentina
- [8] J.F. Hinojosa, L.A. Blanco, J.R. Hernández, R.E. Cabanillas y J.W. Strachan, "Determinación de la Eficiencia Térmica de una Hielera Solar", Memoria de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, La Paz, Baja California Sur - México, 2 al 16 de Octubre de 1995, pp. 421 - 425.

- [9] S.H. Maron - C.F. Prutton, "Físico Químico". Ed. Limusa, México (1989)
- [10] Revista "Tecnología para aprovechar la Energía Solar", vol # 5 ONUDI, Nueva York (1979) pp. 97-99.
- [11] E.F. Passos - J.F. Escobedo, "Simulation of an Intermittent Adsorptive Solar Cooling System", Journal of Solar Energy, vol 42, Nº 2 (1989) pp 103 - 111.
- [12] J.F. Rodríguez G., B. Quintana D., R. Dorantes R. H.E. Solis C., M. Gordon S., "Diseño Construcción y operación de un Prototipo Experimental para la Refrigeración Solar por Adsorción", Memoria de la XIX Semana Nacional de Energía Solar, La Paz, Baja California Sur - México, 2 al 6 de Octubre de (1995),pp 427 al 431.
- [13] Manual de Laboratorio del SEPES, UNI - Lima.
- [14] A.Betejtin, "Curso de Minerología", Ed.MIR, Moscú, (1977).
- [15] Aníbal Valera Palacios, "Energía Solar, Teoría y Práctica", Edi. CONCYTEC, Lima, 1993.