



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Elaboración de prácticas sobre acondicionamiento
de aire para el Laboratorio de Ingeniería Química.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

JOSÉ EDUARDO LÓPEZ RUIZ



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: ANTONIO VALIENTE BARDERAS

VOCAL: Profesor: JESÚS TORRES MERINO

SECRETARIO: Profesor: LUIS MEDINA TORRES

1er. SUPLENTE: Profesor: LETICIA VALLE ARIZMENDI

2° SUPLENTE: Profesor: BLANCA ESTELA GARCÍA ROJAS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA. FACULTAD DE QUÍMICA. CIUDAD UNIVERSITARIA

ASESOR DEL TEMA:

ANTONIO VALIENTE BARDERAS

SUSTENTANTE:

JOSÉ EDUARDO LÓPEZ RUIZ

GLOSARIO

ΔE = Energía interna
 ΔH = Cambio de entalpía
 ΔL = Diferencia del flujo másico y volumétrico de agua condensada
 ΔP = Caída de presión en mm de Hg
 ΔP_1 = Caída de presión en Pa
 ΔP_2 = Caída de presión en mm de H₂O
 ΔV = Cambio en volumen
 λ_0 = Calor latente de vaporización a T_0
 $\lambda, \lambda_H \lambda_S$ = Calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo
 μ = Viscosidad
 ρ = Densidad del aire seco
 A_0 = Área del orificio
 A = Área de transferencia
 A_f = Área de flujo
 C_0 = Coeficiente de orificio
 Ca = Caudal
 C_H = Calor húmedo
 Cp_G = Calor específico del aire
 Cp_V = Calor específico del agua
 D_0 = Diámetro del orificio
 D_{AB} = Difusividad de la sustancia A en B
 D_E = Diámetro equivalente
 G_s = Flujo másico del aire seco
 G_v = Flujo másico de vapor
 h, h_c = Coeficiente de transferencia de calor
 H_1 = Entalpía en el estado 1
 H_2 = Entalpía en el estado 2
 H_3 = Entalpía en el estado 3
 H_4 = Entalpía en el estado 4
 H, H_H = Entalpía húmeda
 $H_{Entrada}$ = Entalpía de entrada
 H_{Salida} = Entalpía de salida
 k_G, k_y = Coeficiente de transferencia de masa
 L = Flujo másico de agua condensada
 L_m = Flujo volumétrico de agua condensada que se midió
 M = Flujo másico del freón 12
 M_A = Masa de vapor transferida
 n_A = moles de A en la fase gaseosa
 n_B = moles de B en la fase gaseosa

N_A = Flux difusivo
 \tilde{P} = Presión parcial
 P° = Presión de vapor a la temperatura de bulbo húmedo
 \tilde{P}_A = Presión parcial del vapor A
 \tilde{P}_B = Presión parcial del gas B
 P_A° = Presión de vapor del líquido A
 P, P_T = Presión atmosférica
 P_A = Presión alta del freón 12
 P_B = Presión baja del freón 12
 P_C = Potencia del compresor
 P_m = Perímetro mojado
 PM_G = Peso molecular del aire
 PM_{H_2O}, PM_V = Peso molecular del agua
 Pr = Número de Prandtl
 Q_λ = Calor latente
 Q = Flujo de energía
 Q_a = Flujo de energía perdida en los alrededores del generador de vapor
 Q_c = Flujo de energía total que cede el vapor
 Q_C = Flujo de energía en el condensador
 Q_E = Flujo de energía en el evaporador
 Q_p = Calor absorbido
 Q_r = Flujo de energía que proporcionan las resistencias de inmersión
 Q_S = calor sensible
 Q_v = Flujo de energía que proporciona el vapor
 r_H = Radio hidráulico
 R = Constante de los gases
 Sc = Número de Smith
 t = Tiempo
 T_0 = Temperatura de referencia
 T, T_1, T_{bs} = Temperatura de bulbo seco
 T_{bh}, T_H, T_S = Temperatura de bulbo húmedo
 U_0 = Velocidad en la placa de orificio
 vol = Volumen
 V_H = Volumen húmedo
 W = Trabajo
 \tilde{y}_A = fracción mol de A en la fase gaseosa
 Y, Y_1, Y_A = Humedad absoluta
 $Y_{A\%}$ = Humedad porcentual
 Y_{AR} = Humedad relativa
 $Y_{Entrada}$ = Humedad absoluta de entrada
 Y_H = Humedad en la interfase
 Y_S = Humedad de saturación a la temperatura de bulbo húmedo
 Y_{Salida} = Humedad absoluta de salida

CONVERSIONES

$$1 \text{ mmHg} = 13.6 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$\left| \frac{1 \text{ mmHg}}{13.6 \text{ mmH}_2\text{O}} \right| \left| \frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}} \right| \left| \frac{101325 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} \right| = 9.8 \frac{\text{Pa}}{\text{mmH}_2\text{O}} \quad \&1$$

$$1 \text{ kW} = \frac{1 \text{ kJ}}{\text{s}}$$

$$1 \text{ hr} = 3600 \text{ s}$$

$$1 \text{ kcal} = 4.184 \text{ kJ} = 4184 \text{ J}$$

$$\left| \frac{1 \text{ kJ/s}}{1 \text{ kW}} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \right| \left| \frac{1 \text{ kcal}}{4.184 \text{ kJ}} \right| = 860.4 \frac{\text{kcal}}{\text{kW} * \text{hr}} \quad \&2$$

$$1 \text{ kN} = 0.1450 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad \&3$$

$$1 \text{ Btu} = 0.252 \text{ kcal} \quad \&4$$

$$1 \text{ W} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = 0.00134 \text{ Hp}$$

$$\left| \frac{4184 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \right| \left| \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ J/s}} \right| \left| \frac{0.00134 \text{ Hp}}{1 \text{ W}} \right| = 0.001557 \frac{\text{Hp} * \text{hr}}{\text{kcal}} \quad \&5$$

ÍNDICE

GLOSARIO	iii
CONVERSIONES	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PROPIEDADES DE LA MEZCLA AIRE – AGUA	3
1.1. Generalidades	4
1.2. Composición del aire	4
1.3. Aire húmedo	5
1.3.1. Presión de vapor	7
1.3.2. Equilibrio entre un líquido y un gas insoluble en el líquido	9
1.3.3. Humedad absoluta	11
1.3.4. Humedad relativa	12
1.3.5. Humedad porcentual	12
1.3.6. Volumen húmedo	13
1.3.7. Densidad del aire seco	13
1.3.8. Calor húmedo	13
1.3.9. Entalpía húmeda	13
1.4. Temperaturas características del aire húmedo	15
1.4.1. Temperatura de rocío	15
1.4.2. Temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco	16
1.4.3. Relación entre las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y punto de rocío, al pasar el aire por un humidificador	20
1.4.4. Temperatura de saturación adiabática	21
1.5. Ecuaciones Simplificadas	22
1.6. Curva de Mollier presión – entalpía (P-H) del agua	23
1.6.1. Líneas isobáricas	24
1.6.2. Líneas isoentálpicas	25
1.6.3. Línea de saturación	26
1.6.4. Líneas de calidad	27
1.6.5. Líneas isotérmicas	28
1.6.6. Líneas isoentrópicas	29
1.7. Diagrama psicrométrico	30
1.7.1. Isolíneas de humedad relativa	32
1.7.2. Líneas auxiliares	33
1.7.2.1. Obtención de los valores de las líneas auxiliares	34
1.7.3. Manejo del diagrama psicrométrico	36
1.7.4. Leyes psicrométricas	37

1.8. Psicrómetro	38
1.8.1. Fundamentos físicos del psicrómetro	38
1.8.2. Principio de funcionamiento	38
1.8.3. Psicrómetro de ventilación natural	39
1.8.4. Psicrómetro de ventilación forzada	39
1.8.4.1. Psicrómetro de giro	39
1.8.4.2. Psicrómetro de aspiración (tipo Assman)	40
1.9. Higrómetro	40
1.9.1. Historia del higrómetro	40
1.9.2. Modelos de higrómetros	41
CAPÍTULO II ACONDICIONAMIENTO DE AIRE	42
2.1. La temperatura efectiva	42
2.2. Factores que determinan la temperatura efectiva	43
2.2.1. Aclimatación diferente	43
2.2.2. Duración de la ocupación	44
2.2.3. Ropa	44
2.2.4. Edad y sexo	44
2.2.5. Efectos de choque	44
2.2.6. Actividad	45
2.2.7. Calor radiado	45
2.3. Condiciones de comodidad	45
2.3.1. Temperatura del aire	45
2.3.2. Humedad del aire	45
2.3.3. Movimiento del aire	46
2.3.4. Pureza del aire	46
2.4. Procesos sencillos de acondicionamiento	47
2.4.1. Calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante	47
2.4.2. Enfriamiento y deshumidificación	47
2.4.3. Humidificación adiabática	48
2.4.4. Mezclas de aires	48
2.4.5. Calentar y humidificar un aire	49
2.4.6. Disminución de la temperatura y la humedad de un aire	49
2.5. Humidificación y deshumidificación	50
2.6. Ciclo común de aire acondicionado	51
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	52
3.1. Unidad de Aire Acondicionado para Laboratorio P.A. Hilton LTD.	53
3.1.1. Sistema de aire.	53
3.1.2. Sistema de refrigeración	53
3.1.3. Vaporizador	53

3.2. Funcionamiento del equipo	54
3.2.1. Circuito de aire	54
3.2.2. Caldera	56
3.2.3. Refrigeración	57
3.2.4. Controles	58
3.2.4.1. Flujo de Aire	58
3.2.4.2. Calentadores	58
3.2.4.3. Refrigeración	58
3.2.4.4. Inyección de vapor	58
3.3. Operación del equipo	59
CAPÍTULO IV. TRABAJO EXPERIMENTAL	61
4.1. Velocidad del aire de salida	62
4.1.1. Coeficiente de orificio obtenido experimentalmente	63
4.2. Humedad absoluta	64
4.2.1. Por medio de las ecuaciones	64
4.2.2. Con la carta psicrométrica	65
4.2.3. Programa de cálculo de humedad	65
4.3. Ecuaciones utilizadas para realizar el balance	66
4.4. Calentamiento de aire	67
4.5. Enfriamiento de aire	71
4.6. Humidificación	75
4.7. Deshumidificación y enfriamiento	80
4.8. Ciclo de refrigeración por compresión	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
ANEXOS	90
Anexo A. Tabla de presión de vapor del agua	91
Anexo B. Obtención de la relación de Lewis	92
Anexo C. Diagrama psicrométrico aire-agua $p = 585\text{mmhg}$	93
Anexo D. Carta de temperatura efectiva	94
Anexo E. Ventilación recomendada para diferentes lugares	95
Anexo F. Carta de comodidad	96
Anexo G. Diagrama del equipo de acondicionamiento de aire	97
Anexo H. Vaisala Humidity Calculator	98
Anexo I. Diagrama de Mollier para el freón 12	100
Anexo J. Guión experimental de María Luisa Galicia Pineda	101
Anexo K. Guión experimental propuesto	114
Anexo L. Estancia Corta	122
BIBLIOGRAFÍA	126

INTRODUCCIÓN

Una parte importante en la formación de todo ingeniero químico es el estudio de los procesos de transferencia de masa y transferencia de calor, los cuales tienen una aplicación en el acondicionamiento de aire. El acondicionamiento de aire es básicamente la modificación de la temperatura, la humedad, el polvo y las cargas de humos presentes en el aire, para obtener condiciones confortables de un volumen o condiciones propicias para un proceso.

Un servicio de aire acondicionado normalmente consta de los siguientes elementos:

- A) Un ventilador.
- B) Un calentador.
- C) Un sistema de refrigeración (Evaporador, Compresor, Condensador y Expansor).
- D) Un generador de vapor.
- E) Un deshumidificador (Se encuentra dentro del sistema de refrigeración).

Asociado a estos serán los instrumentos y controles para la operación automática.

Actualmente no se proporciona al alumno el conocimiento práctico acerca de éste tema, a pesar de que en el laboratorio de ingeniería química se cuenta con un equipo de acondicionamiento de aire que lleva años sin ser utilizado y en el cuál se puede representar la aplicación de los conocimientos adquiridos. El equipo de acondicionamiento de aire (Hilton) para laboratorio unidad A572 ha sido diseñado para enseñar a los estudiantes cómo pueden cambiar la temperatura y la humedad del aire, y para demostrar que las transferencias de masa y calor necesarias para lograr estos cambios van de acuerdo con las predicciones teóricas. La unidad tiene su propia caldera de presión atmosférica (para la humidificación) y la planta de refrigeración (para el enfriamiento y deshumidificación).

El objetivo de mi tesis es que a las futuras generaciones se les pueda proporcionar la enseñanza práctica del acondicionamiento de aire con todos los procesos que involucra, usando de manera adecuada la carta psicrométrica y el diagrama de Mollier, y además adquirir el conocimiento sobre el funcionamiento de un ciclo de refrigeración. Para cumplir con ese objetivo es necesario darle nuevamente el uso al equipo de acondicionamiento de aire con el que cuenta el Laboratorio de Ingeniería Química para lo cual se debe aprobar un guión experimental que debe ser introducido en el temario de la asignatura “LIQ III” para que con esto los alumnos adquieran el aprendizaje elemental de las operaciones aire – agua aplicadas en un sistema de acondicionamiento de aire y así mismo reforzar el conocimiento de un ciclo de refrigeración por compresión. O bien en la asignatura “LIQ I” para la aplicación de los balances de materia y energía.

CAPÍTULO I. PROPIEDADES DE LA MEZCLA AIRE-AGUA

Muchas operaciones unitarias requieren del manejo apropiado de mezclas de vapores condensables y gases incondensables; el ejemplo más común de estas mezclas es la del vapor de agua y aire, aunque no es raro encontrar algunas otras mezclas, tales como: benceno-nitrógeno, acetona-bióxido de carbono, hexano-nitrógeno, etc.

Es frecuente la utilización igualada de los términos gas y vapor para describir a aquellas sustancias que se presentan en el estado gaseoso. En este capítulo es sin embargo, vital hacer una distinción entre ambos. Daremos el término de gas a toda sustancia gaseosa que está por arriba de su temperatura crítica y que por lo tanto es imposible condensar por medio de un aumento o disminución de presión a temperatura constante.

En el siguiente diagrama presión vs entalpía (figura I-1) se indican las zonas correspondientes a gases y vapores, para una sustancia dada.

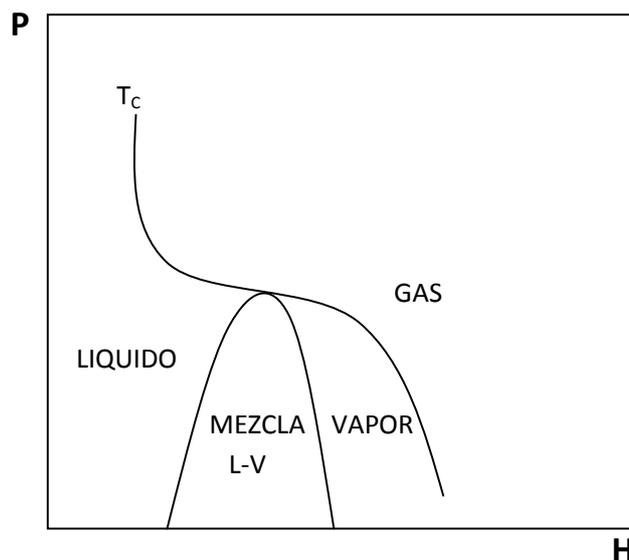


FIGURA I-1. Región de fases en un diagrama Presión-Entalpía. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

1.1. GENERALIDADES

Acondicionar el aire es controlar su temperatura, humedad, distribución y pureza. Su objeto es procurar el confort de los ocupantes de residencias, teatros, escuelas, etc., o bien, en la industria, mantener productos alimenticios, productos químicos, etc., a muy bajas temperaturas para evitar que se contaminen.

Antes de estudiar el acondicionamiento del aire, es necesario conocer sus características y propiedades.

1.2. COMPOSICIÓN DEL AIRE

La atmósfera que rodea la Tierra es una mezcla de gases cuya composición es:

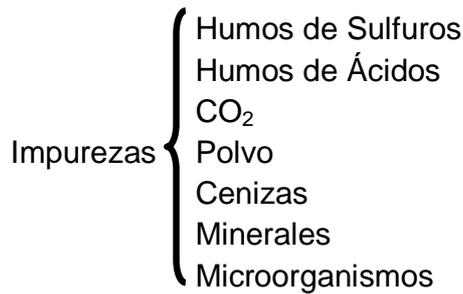
	<i>Volumen en %</i>	<i>Peso en %</i>
Nitrógeno	78.1	76.0
Oxígeno	20.9	23.1
Argón	1.0	0.9

Estos datos se refieren al aire seco.

El aire contiene, normalmente, muchas impurezas, como gases, sólidos, polvos, etcétera, en proporciones que dependen de varios factores. Se supone que en lugares montañosos y en el mar el aire es más puro, aunque los vientos también llevan consigo algunas impurezas.

El aire contiene, por lo general:

Gases en %	{	Nitrógeno	78.03	
		Oxígeno	20.99	
		Argón	0.94	
		Bióxido de Carbono	0.03	
	{	Hidrógeno	}	0.01
		Xenón		
		Kriptón		
		Otros		



1.3. AIRE HÚMEDO

La Psicrometría estudia las propiedades de las mezclas de gases permanentes con vapores condensables. El caso más importante es la mezcla de aire con vapor de agua. Sin embargo, existen otras mezclas de interés industrial, como pueden ser vapores valiosos mezclados con aire o con otros gases permanentes (es el caso de la recuperación de disolventes en instalaciones de pintura). El estudio que se hace de otras mezclas es paralelo al de las mezclas aire-agua, sólo que en lugar de hablar de humedad se habla de saturación.¹

El aire está compuesto de varios componentes (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, helio, etc.), que nunca condensan en las aplicaciones habituales. Además, el aire incluye vapor de agua que puede condensar al enfriarse, o que se puede añadir al aire por vaporización de agua o mezcla con vapor. Consideraremos todos los componentes no condensables como aire seco, y el vapor de agua como humedad.

La diferencia fundamental del estudio de las mezclas aire-agua respecto a las mezclas de gases es que la base de cálculo no es la masa total del sistema, sino la masa de aire seco; así, en vez de fracción molar se habla de humedad molar, la entalpía específica no es por 1 kg de mezcla sino por 1 kg de aire seco, etc.

Todos los gases pueden llegar a licuarse si se les coloca a temperaturas inferiores a la crítica y si se maneja adecuadamente la presión. Por otro lado todos los líquidos pueden pasar al estado gaseoso convirtiéndose en vapores.

Al paso del estado líquido al gaseoso se le da el nombre de vaporización; esta se produce a todas las temperaturas y presiones y se debe a que aquellas moléculas líquidas que tienen una energía mayor que la promedio logran escapar del seno del líquido dando lugar a la formación de vapor. Ver la figura I-2.

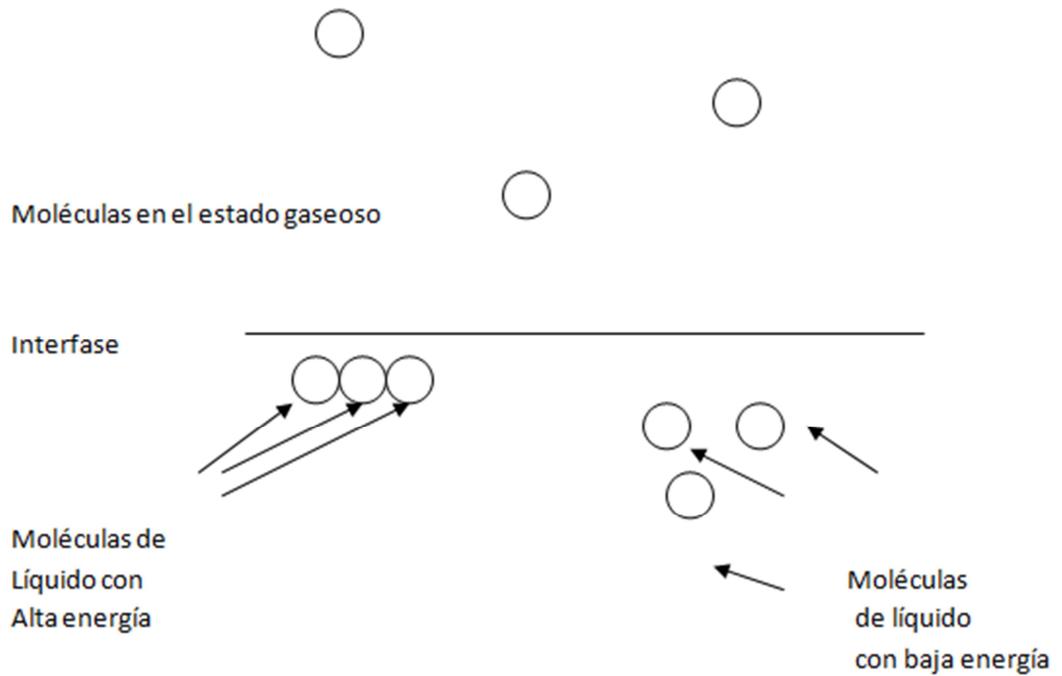


FIGURA I-2. Moléculas de agua en estado líquido y vapor. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

1.3.1. Presión de Vapor

Si colocáramos un líquido en un recipiente cerrado y aislado térmicamente, al calentarlo se provocaría su evaporación, pero desde el momento en que el espacio arriba del líquido se llena con moléculas de vapor, se produce un flujo inverso al del líquido ya que las moléculas de vapor en su movimiento desordenado chocan contra la superficie del líquido y se condensan.² La fuerza ejercida por las moléculas de vapor se conoce como presión de vapor. Ver la figura I-3.

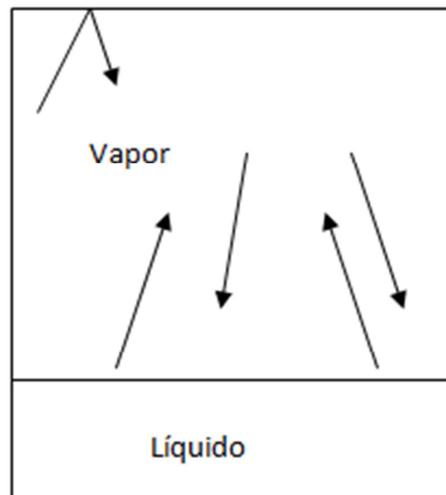


FIGURA I-3. Presión de vapor. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

Si N_A es la cantidad de líquido que se evapora por unidad de tiempo y área y $-N_A$ la cantidad de vapor que se condensa por unidad de tiempo y área, cuando $N_A > -N_A$, la concentración del vapor aumentará así como la presión de la fase gaseosa y la temperatura descenderá. Poco a poco (N_A) se va acercando a ($-N_A$). Cuando se alcanza el equilibrio, el número de moléculas que salen del líquido (se vaporizan) es igual a las que entran al líquido (se condensan) y la presión que existe en la fase gaseosa así como la temperatura se hacen constantes (Figura I-4). A la presión que existe en la fase gaseosa se le llama presión de vapor. Un aumento en la temperatura hará crecer a N_A haciendo que se aumente la concentración de la fase gaseosa. Si el sistema permanece así por un tiempo se alcanzará el equilibrio, la nueva presión de vapor será mayor que la anterior. En general la relación que existe entre la presión de vapor y la temperatura toma la forma de:³

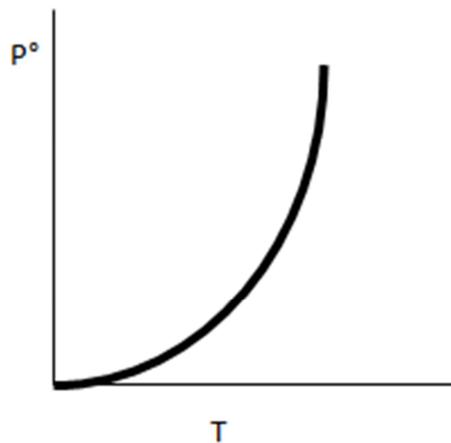


FIGURA I-4. Diagrama P° vs T . Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

Existen un gran número de ecuaciones para predecir la presión de vapor en función de la temperatura, una de las más utilizadas es la de Antoine

$$\log P^\circ = A - \frac{B}{T + C}$$

1

En donde A, B, C son constantes características de cada sustancia, las del agua se muestran en la tabla I-1. La temperatura debe estar en grados Celsius y la presión se obtendrá en mm de Hg.

A	8.10765
B	1750.286
C	235

TABLA I-1. Constantes de la ecuación de Antoine para el agua

También se puede obtener la presión de vapor mediante tablas. (Ver el anexo A).

1.3.2. Equilibrio entre un líquido y un gas insoluble en el líquido

Si ponemos a un líquido volátil en contacto con un gas, se producirá la vaporización del líquido y el vapor procedente de este se difundirá en el gas saturándolo si el espacio es limitado. Figura I-5

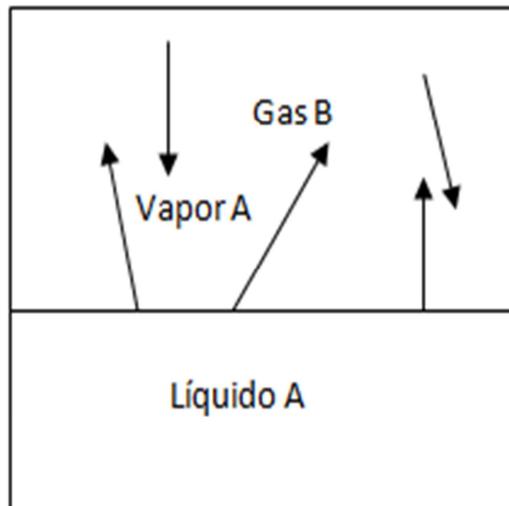


FIGURA I-5. Líquido volátil en contacto con un gas. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

Decimos que el espacio gaseoso se ha saturado cuando el número de moléculas del líquido A que pasan al estado gaseoso son iguales al número de moléculas de vapor que regresan al estado líquido. Cuando el gas se satura ya no hay más transferencia de masa y se establece el equilibrio. En el equilibrio la concentración, la temperatura y la presión son constantes.⁴

En el equilibrio

$$P_A^\circ = P_T \widetilde{y}_A = \widetilde{P}_A \quad 2$$

Ahora bien:

$$\frac{\widetilde{P}_A}{\widetilde{P}_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{P_A^\circ}{P_T - P_A^\circ} = \widetilde{Y}_A \text{ saturado}$$

$$\widetilde{Y}_A \text{ saturado} = \frac{\text{moles de vapor de A}}{\text{moles de gas (en la saturación)}}$$

Un gas en contacto con un líquido volátil que tiene menor cantidad del vapor que el correspondiente al equilibrio, se dice que está saturado parcialmente o que está insaturado. En estos casos:

$$\widetilde{y}_A = \frac{\widetilde{P}_A}{P_T - \widetilde{P}_A} \quad 3$$

En el caso de la mezcla aire-agua a los términos \widetilde{y}_A , $\widetilde{Y}_A \text{ saturado}$ se les da el nombre de humedad molar y humedad de saturación

1.3.3. Humedad absoluta

La humedad de una mezcla aire - vapor de agua se define como los kilogramos de vapor de agua que hay en un kilogramo de aire seco. Esta definición de la humedad sólo depende de la presión parcial del vapor de agua en el aire y de la presión total (en este caso tomamos la de la ciudad de México que es de 585 mm de Hg). Usando el peso molecular del agua de 18 y el del aire de 29.

Aun cuando las unidades comunes de concentración (presión parcial, fracción mol, etc.) que están basadas en la cantidad total son útiles, cuando en las operaciones ocurren cambios en el contenido de vapor de una mezcla vapor – gas sin cambios en el contenido del gas, es más conveniente utilizar una unidad basada en la cantidad no cambiante del gas. La relación masa de vapor/masa de gas es la humedad absoluta. En condiciones que se aplica la ley de los gases ideales.

$$Y_A = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de aire}} = \frac{\widetilde{P}_A}{P_T - \widetilde{P}_A} \left(\frac{PM_{Vapor}}{PM_{Gas}} \right) \quad 4$$

El aire saturado es aquel en el cual el vapor de agua está en equilibrio con el agua líquida en las condiciones prevalecientes de presión y temperatura. En esta mezcla, la presión parcial del vapor del agua en la mezcla aire – agua, es igual a la presión de vapor del agua pura a la temperatura establecida⁵

1.3.4. Humedad relativa

Es la humedad que posee una masa de aire en relación a la mayor cantidad de humedad absoluta que podría llegar a contener sin que se produzca ninguna condensación, conservando la misma temperatura y presión atmosférica, es decir, es la cantidad de saturación de una mezcla de aire – vapor de agua también puede expresarse como porcentaje de humedad relativa usando presiones parciales.⁶

$$Y_{AR} = \frac{\widetilde{P}_A}{P_A^\circ} * 100 \quad 5$$

1.3.5. Humedad porcentual

Es la relación entre la humedad existente en la masa gaseosa y la que existirá si ésta estuviera saturada

$$Y_{A\%} = \frac{Y_A}{Y_{A\text{Saturado}}} * 100 \quad 6$$

$$Y_{A\%} = \frac{\widetilde{P}_A}{P_A^\circ} \left(\frac{P_T - P_A^\circ}{P_T - \widetilde{P}_A} \right) 100 \quad 7$$

La humedad molar y la absoluta, se expresan en moles de vapor/moles de gas y masa de vapor/masa de gas respectivamente. En el caso de la relativa y porcentual, ambas se expresan en por ciento.

Las humedades o sea el contenido de vapor en la fase gaseosa se puede modificar mediante la adición o sustracción de vapor a la fase gaseosa.⁷

1.3.6. Volumen húmedo (V_H)

Es el volumen ocupado por un kilogramo de gas más el vapor que lo acompaña

$$V_H = \left(\frac{1}{PM_G} + \frac{Y}{PM_V} \right) \frac{R * T}{P} \quad 8$$

En donde PM_G , PM_V son los pesos moleculares del gas y del vapor, R la constante del estado gaseoso, T y P la temperatura y presión absolutas de la mezcla.⁸

1.3.7. Densidad del aire seco

$$\rho = \frac{1}{V_H} \quad 9$$

1.3.8. Calor húmedo (C_H)

El calor específico que corresponde a una mezcla vapor-gas, se define como el calor que hay que suministrar a una unidad másica de gas y al vapor que contiene, para elevar un grado de temperatura, manteniendo la presión constante de acuerdo a la relación siguiente:⁹

$$C_H = Cp_G + Cp_V * Y \quad 10$$

1.3.9. Entalpía húmeda (H_H)

Cuando un sistema cambia de un estado a otro puede perder o ganar energía en forma de calor (Q_p) y trabajo (W). Si en este cambio de estado, se incrementa el contenido energético del sistema (energía interna, ΔE) se tiene de acuerdo a la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta E = Q_p - W \quad 11$$

A presión constante el trabajo desarrollado es igual a $P\Delta V$ en donde ΔV es el cambio en volumen, entonces la ecuación 11 queda como:

$$\Delta E = Q_p - P\Delta V \quad 12$$

Despejando Q_p de la ecuación 12 obtenemos:

$$Q_p = \Delta E + P\Delta V \quad 13$$

En donde Q_p es el calor absorbido a presión constante.

Se utiliza el símbolo H para representar $E + PV$, al que se denomina generalmente contenido calorífico del sistema, aunque se emplean los términos función de calor a presión constante y entalpía. En un cambio de estado (1) al estado (2)

$$Q_p = H_2 - H_1 = \Delta H \quad 14$$

El incremento en el contenido calorífico de un sistema es igual al calor absorbido a presión constante:

$$\Delta H = \Delta E + P\Delta V \quad 15$$

En el caso de los gases húmedos la entalpía específica es la suma del calor sensible de una masa de gas, y el calor latente de vaporización a la temperatura a la que se refieren las entalpías.¹⁰

$$H_H = C_H(T - T_0) + \lambda_0 Y \quad 16$$

1.4. TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DEL AIRE HÚMEDO

1.4.1. Temperatura de rocío

Cuando una mezcla de un gas y un vapor se enfrían a presión constante, la mezcla llega a una temperatura tal que se satura y se forman gotas de vapor condensado. A esa temperatura se le da el nombre de temperatura de rocío.

La temperatura de rocío no se puede cambiar, si no se aumenta o disminuye la humedad del aire, aunque se aumente o disminuya el calor.

Si el aire se enfría a una temperatura menor que la del rocío, empieza la condensación y se establece una nueva temperatura de rocío.

La temperatura de rocío se puede disminuir, substrayendo humedad del aire, o sea, substrayendo vapor de agua de un peso dado de aire, y se puede aumentar añadiendo vapor de agua a un peso dado de aire.

La temperatura de rocío de cualquier mezcla de aire y vapor de agua se puede determinar de la manera siguiente:¹¹

1. Enfriando poco a poco un recipiente que contenga aire, la temperatura a la que la condensación empieza a aparecer en las paredes del recipiente es la temperatura de rocío.

2. La temperatura de rocío se puede encontrar psicrométricamente partiendo de la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco.¹²

Características de la Temperatura de rocío	{	Medida de la humedad Temperatura a la cual se satura el aire Temperatura que no cambia sin cambiar la humedad Si se enfría por debajo de ésta, empieza la condensación Sólo se reduce disminuyendo vapor Sólo aumenta añadiendo vapor
---	---	--

1.4.2. Temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco

Unas de las variables más empleadas para caracterizar a las mezclas de vapores y gases son las llamadas temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco, las cuales se miden mediante un psicrómetro (Figura I-6). Este aparato consta de dos termómetros, uno de ellos común y corriente y el otro cubierto por una mecha humedecida en el líquido que se está vaporizando.

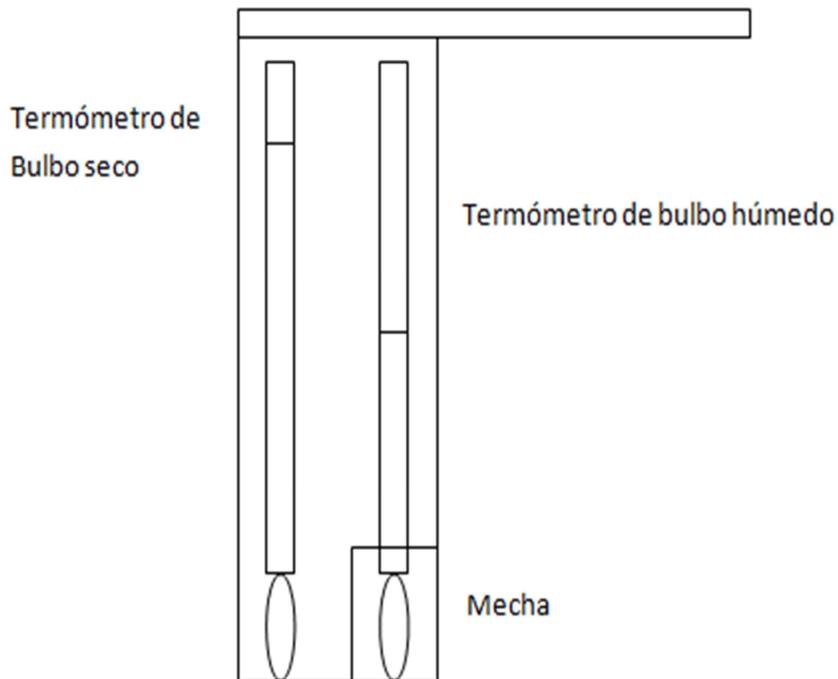


Figura I-6. Psicrómetro. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

Para determinar las temperaturas, se hace girar el psicrómetro en la mezcla gaseosa o bien se hace pasar ésta sobre los termómetros mediante un ventilador.

Al efectuar la medición se observa que la temperatura registrada en el termómetro humedecido por la mecha desciende lentamente hasta que llega un momento en el que permanece fija. La temperatura que registra el termómetro común y corriente recibe el nombre de temperatura de bulbo seco, la que registra el termómetro humedecido por la mecha, temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo húmedo es una temperatura de equilibrio en la cual el flujo de calor sensible que transmite el gas a la mecha se iguala con las pérdidas de calor latente producidas por la evaporación del líquido en la corriente gaseosa (Figura I-7).

Si está seco el aire que rodea al termómetro, la evaporación es rápida y el descenso de temperatura es grande (relativamente). Por el contrario, si el aire está muy húmedo, la evaporación es lenta y por lo tanto, la diferencia de temperatura entre el bulbo seco y el húmedo, es pequeña. Si el aire está saturado, no habrá evaporación ni bajará la temperatura.¹³

La diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la de bulbo húmedo se llama depresión del bulbo húmedo.

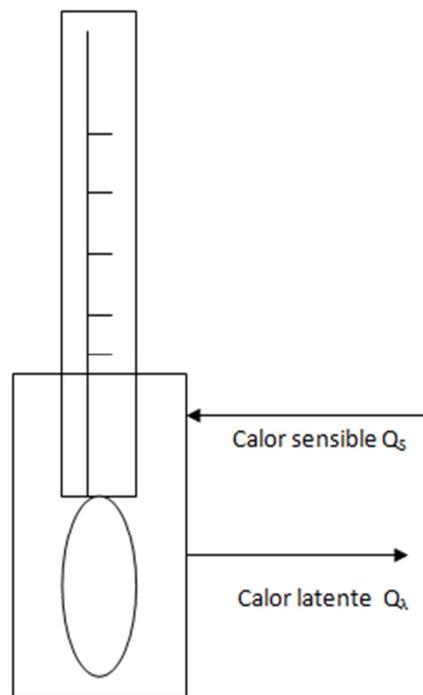


Figura I-7. Temperatura de bulbo húmedo. Fuente: Operaciones aire – agua. Antonio Valiente. 2010.

El calor transferido a la mecha es:

$$Q_S = h A (T_1 - T_H) \quad 17$$

La masa de vapor transferida desde la mecha es:

$$M_A = k_Y A (Y_H - Y_1) \quad 18$$

En el estado continuo todo el calor transferido sirve para vaporizar el líquido.

$$Q_A = M_A \lambda_H \quad 19$$

Igualando las ecuaciones 17 y 19:

$$h A (T_1 - T_H) = k_Y A (Y_H - Y_1) \lambda_H \quad 20$$

Como el área de transferencia es la misma para transferir calor que masa.

$$h (T_1 - T_H) = k_Y (Y_H - Y_1) \lambda_H \quad 21$$

La siguiente ecuación recibe el nombre de ecuación de la línea de bulbo húmedo y resulta del despeje de la diferencia de temperaturas de la ecuación 21.

$$T_1 - T_H = \frac{k_Y \lambda_H}{h} (Y_H - Y_1) \quad 22$$

La relación h / k_Y se conoce como coeficiente psicrométrico o relación de Lewis, esa relación se obtiene bajo condiciones turbulentas.

Para el flujo turbulento de gases que pasan sobre un cilindro húmedo tal como sucede en el caso de un termómetro de bulbo húmedo, los datos experimentales dan:

$$\frac{h}{k_Y} = 0.293 \left(\frac{\mu}{\rho D_{AB}} \right)^{0.56} \quad \text{Cuando el aire es el gas incondensable} \quad 23$$

$$\frac{h}{k_Y} = C \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{0.56} \quad \text{Para otros gases.} \quad 24$$

Para el caso de aire puro $Sc \cong Pr \cong 0.7$ y se encuentra que:

$$\frac{h}{k_Y} = C_H = 0.24 \quad 25$$

Para otros gases la relación de Lewis se puede obtener a partir de una gráfica.
(Ver el anexo B).

Desde el punto de vista de la presión

$$N_A = k_G A (P^o - \tilde{P}) \quad 26$$

$$M_A = k_G A P M_{H_2O} (P^o - \tilde{P}) \quad 27$$

$$Q_\lambda = M_A \lambda_H \quad 28$$

Balance

Sustituyendo 27 en 28 e igualándola con 17.

$$h_c A (T_1 - T_H) = k_G A P M_{H_2O} (P^o - \tilde{P}) \lambda_H \quad 29$$

Despejando el cambio de temperatura en 29.

$$T_1 - T_H = \frac{k_G P M_{H_2O} \lambda_H}{h_c} (P^o - \tilde{P}) \quad 30$$

$$\frac{h_c}{k_G P M_{H_2O} \lambda_H} = 0.5$$

Sustituyendo 31 en 30.

$$T_1 - T_H = 2(P^o - \tilde{P}) \quad 31$$

Despejando la presión parcial.

$$\tilde{P} = P^o - 0.5(T_1 - T_H) \quad 32$$

$$\log P^o = 8.10765 - \frac{1750.286}{T + 235} \quad 33$$

P^o en mm de Hg y T en °C

La humedad absoluta se puede obtener sustituyendo 33 en 35

$$Y = 0.62 \left(\frac{\bar{P}}{P_T - \bar{P}} \right)$$

$$Y \text{ en } \frac{\text{Kg de vapor}}{\text{Kg de gas}}$$

34

1.4.3. Relación entre las temperaturas de bulbo seco, de bulbo húmedo y punto de rocío, al pasar el aire por un humidificador

El aire no saturado entra al humidificador, aumenta el punto de rocío y disminuye la temperatura de bulbo seco, finalmente se satura y la temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y punto de rocío son iguales (Figura I-8).

El proceso realizado es de saturación adiabática, donde el calor total de la mezcla permanece constante, pero cambia su humedad absoluta. Al llegar al punto 2, se tiene una humedad relativa del cien por ciento.¹⁴

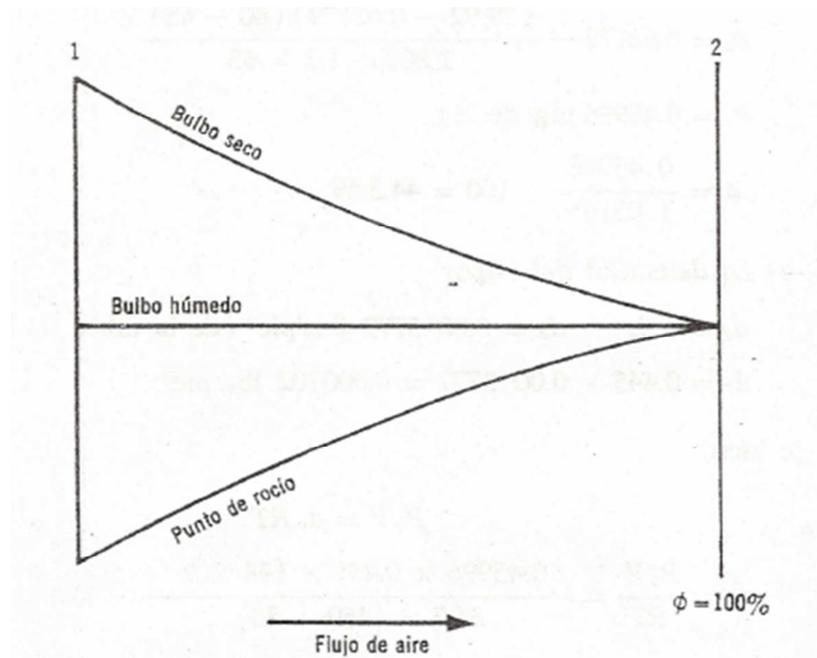


Figura I-8. Relación de la temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y punto de rocío, cuando se humidifica el aire. Fuente: Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración. Hernández. 1973.

1.4.4. Temperatura de saturación adiabática

Es la temperatura alcanzada por una masa gaseosa cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas. El calor latente de evaporación debe ser suministrado por el calor sensible transferido desde el aire.

Esta temperatura se puede calcular sustituyendo la ecuación 25 en la 22:

$$(Y_S - Y) = \frac{C_H}{\lambda_S} (T - T_S)$$

35

En donde Y_S y Y representan las humedades de saturación a la temperatura de saturación adiabática y la absoluta, T_S la temperatura de saturación adiabática λ_S es el calor latente de vaporización del líquido a T_S . Ésta ecuación resulta del balance entre las entalpías del aire entrante y saliente, tomando como base el cálculo de las entalpías, la temperatura T_S . El término $(- C_H / \lambda_S)$ es la pendiente de la línea de temperatura adiabática y $(- hc / k_Y \lambda_{Tbh})$ es la línea de bulbo húmedo. Para el caso de la mezcla aire-agua, el valor de la temperatura húmeda y el de la saturación adiabática es el mismo y se puede utilizar de manera indistinta.¹⁵

Todas éstas temperaturas características del aire húmedo se pueden observar en el diagrama psicrométrico. Figura I-9.

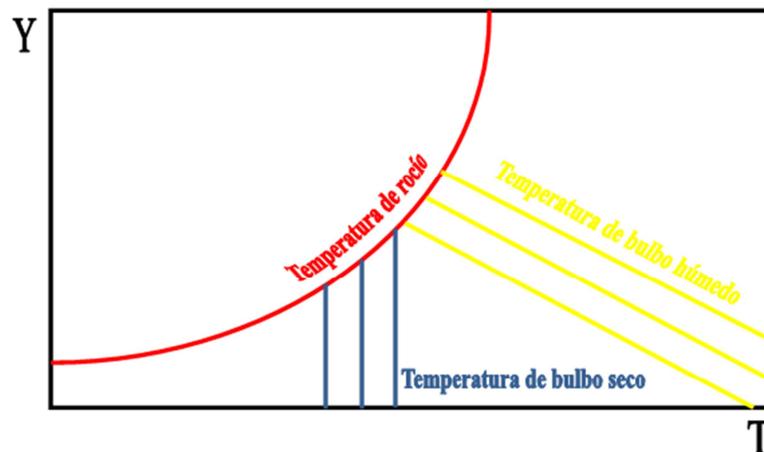


Figura I-9. En la curva de saturación es donde se puede leer la temperatura de rocío (en la figura I-24 se explica como). Para el caso de la mezcla aire agua, las líneas de humidificación adiabática corresponden a las líneas de temperatura de bulbo húmedo y se leen sobre la línea de saturación (en la figura I-24 se explica como). La temperatura de bulbo seco se puede leer directamente de forma vertical a cualquier punto que tengamos.

1.5. ECUACIONES SIMPLIFICADAS

Para el caso de la mezcla aire-vapor de agua, se tienen ecuaciones simplificadas para cada una de las propiedades:

Humedad absoluta

$$Y = \left(\frac{18}{29}\right) \left(\frac{\tilde{P}}{P_T - \tilde{P}}\right) = 0.62 \left(\frac{\tilde{P}}{P_T - \tilde{P}}\right) \text{ en } \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg } AS} \quad 36$$

Volumen húmedo

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18}\right) \frac{0.082 * T}{P} \text{ en } \frac{m^3}{\text{Kg } AS} \quad 37$$

si T en K y P en atm

Calor húmedo

$$C_H = 0.24 + 0.46 * Y \text{ en } \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } AS \text{ } ^\circ C} \quad 38$$

Entalpía húmeda (T=0°C)

$$H_H = [(0.24 + 0.46Y)T_{bs}] + [597 * Y] \text{ en } \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } AS} \quad 39$$

si T en °C

1.6. CURVA DE MOLLIER PRESIÓN – ENTALPÍA DEL AGUA

Las propiedades termodinámicas del agua se pueden referenciar mediante varias curvas que permiten su fácil comprensión y manejo, sin embargo la más importante, y la que más se utiliza es la curva de presión – entalpía. Esta curva es muy útil ya que permite conocer todas las propiedades termodinámicas del agua en cualquier punto y además tener una idea clara del comportamiento de los procesos y ciclos que ocurren. La curva está dividida en tres regiones: región de líquido subenfriado (azul), región de gas sobrecalentado (roja), y región de mezcla saturada (amarilla). Un punto de presión y entalpía puede estar en cualquiera de estas tres regiones y se traduce en que bajo esas condiciones termodinámicas el agua puede estar en estado líquido (región de líquido subenfriado), vapor (estado de gas sobrecalentado), o en mezcla de un estado y otro (región de mezcla saturada). Figura I-10.

En realidad este diagrama es más amplio y abarca otros estados físicos, pero el agua del aire se encuentra principalmente en algún punto de la región líquido-vapor, por lo que se utilizará solamente estos tres estados.¹⁶

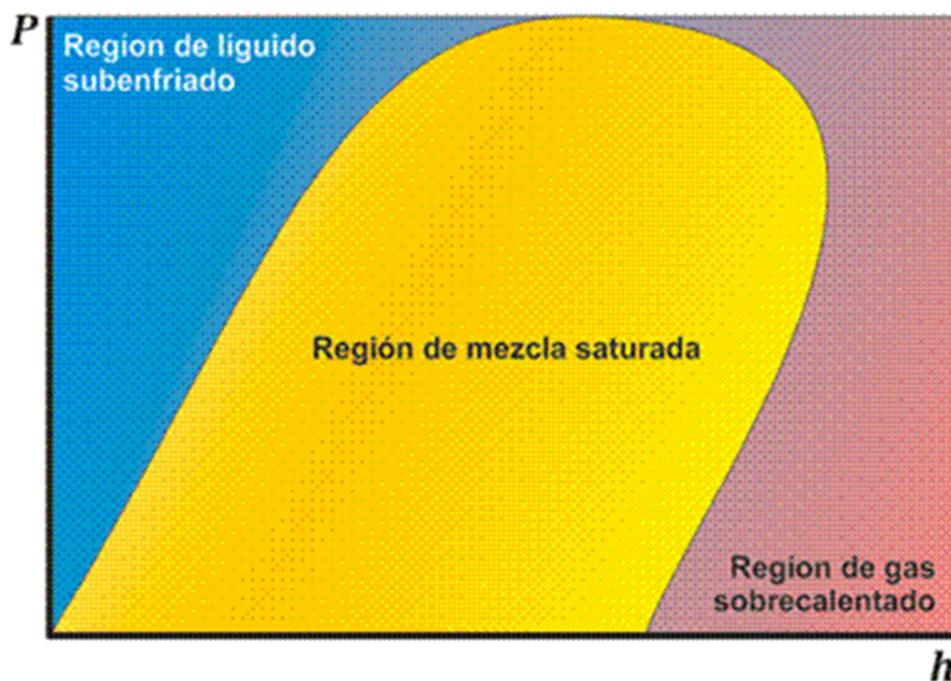


FIGURA I-10. Diagrama P vs H para el agua. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.1. Líneas isobáricas

Son líneas que unen todos los puntos que se encuentran a una misma presión, en el diagrama estas líneas son rectas horizontales, ya que el eje de las ordenadas corresponde a la presión (Figura I-11). Además, para representar de mejor manera las líneas isobáricas, los diagramas P-H van en una escala logarítmica.¹⁷

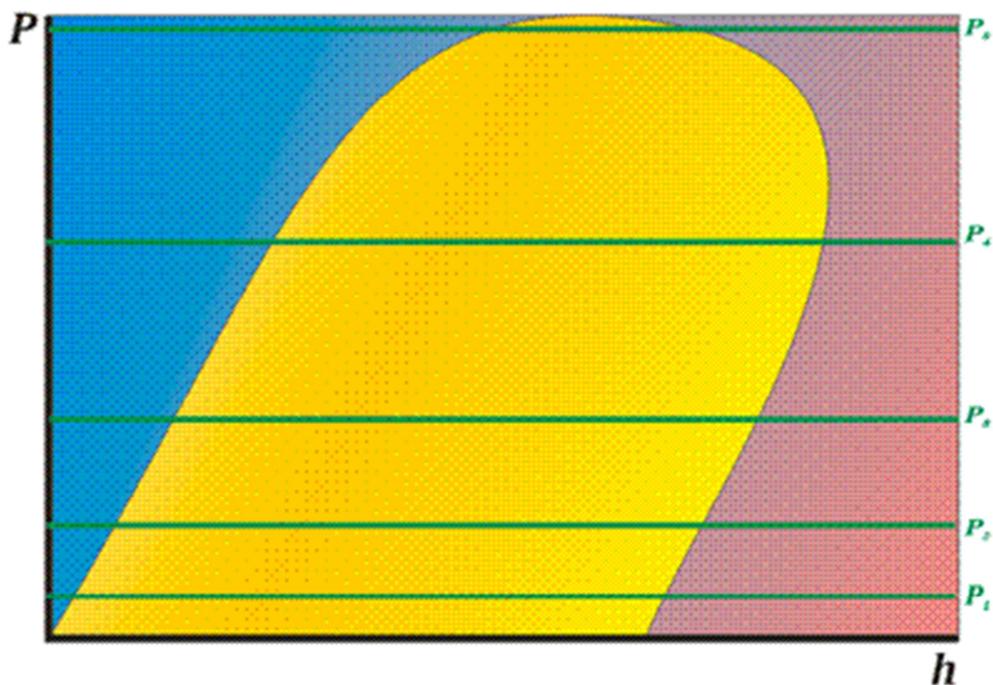


FIGURA I-11. Líneas isobáricas. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.2. Líneas isoentálpicas

Son líneas que unen todos los puntos que se encuentran a una misma entalpía, en el diagrama estas líneas son rectas verticales, ya que el eje de las abscisas corresponde a la entalpía. Un proceso que recorra una línea isoentálpica es un proceso que no realiza ningún intercambio de calor o trabajo. Figura I-12.¹⁸

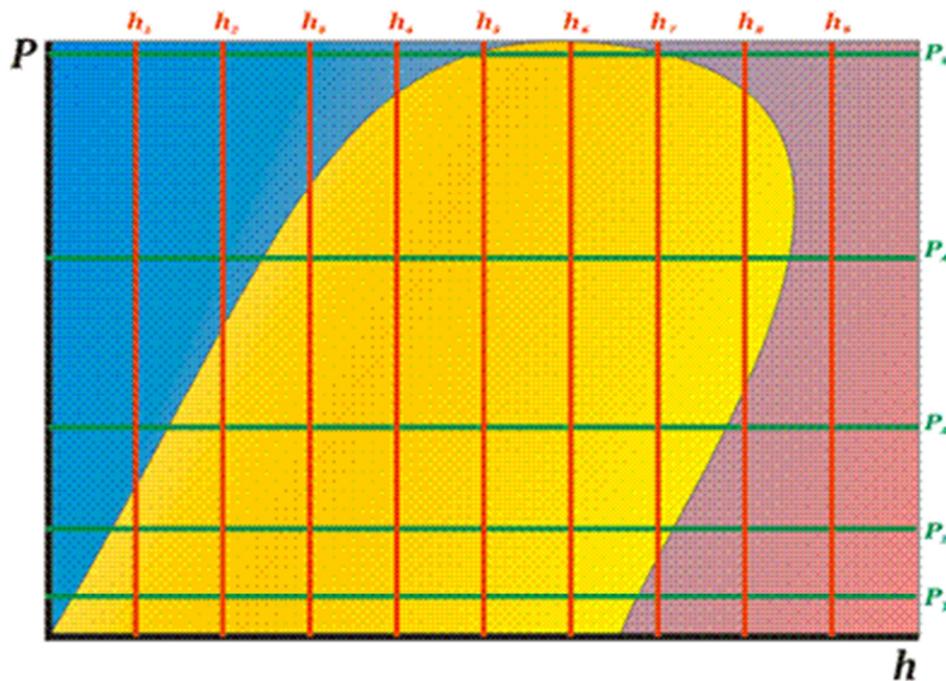


FIGURA I-12. Líneas isoentálpicas. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.3. Línea de saturación

Todos los diagramas termodinámicos presentan una línea que guarda la región de cambio de fase, esta línea representa el momento de inicio y final del proceso de cambio de fase y es conocida como línea de saturación. Ésta línea tiene la característica de poder ser valorada con solo conocer la temperatura, o la presión del punto a evaluar. La línea de saturación tiene una cima que se conoce como estado crítico, en el cual ya no existe un proceso de transición entre líquido a vapor, sino que ambas propiedades se mantienen en una mezcla homogénea gas y líquido conocida como fluido supercrítico.¹⁹ Figura I-13.

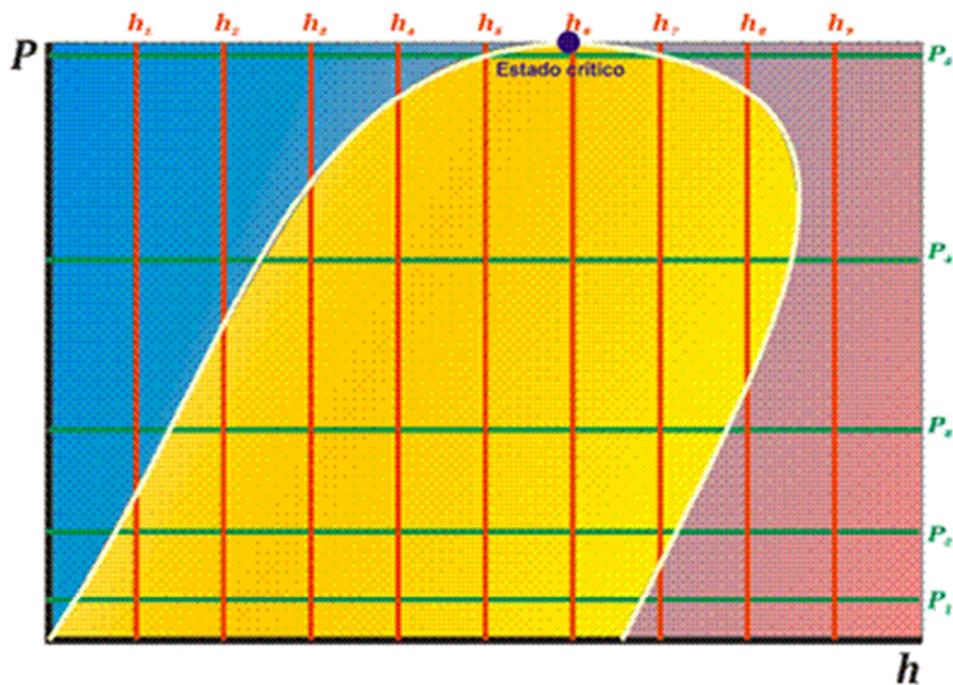


FIGURA I-13. Línea de saturación. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.4. Líneas de calidad

Son líneas de división dentro de la curva que forma la línea de saturación y representa los puntos en que el proceso de cambio de estado se encuentra a una misma relación líquido – vapor, van de 0% vapor a 100% vapor, donde estos límites corresponden a la línea de saturación.²⁰ Figura I-14.

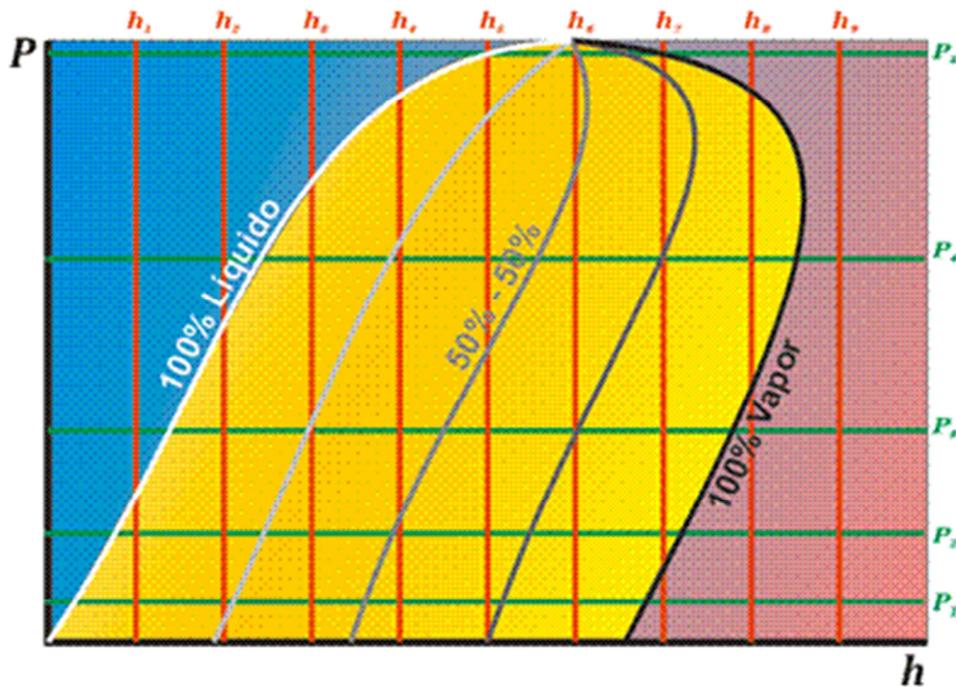


FIGURA I-14. Línea de calidad. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.5. Líneas isotérmicas

Son líneas que representan los puntos en donde la temperatura es la misma, se pueden ver dos tipos de comportamiento: un comportamiento en donde con poco cambio de entalpía, la presión cambia radicalmente, esto ocurre en las regiones de líquido subenfriado y gas sobrecalentado; y otra en donde ni la temperatura ni la presión cambia durante el cambio de entalpía, esto ocurre en la región de mezcla saturada.²¹ Figura I-15.

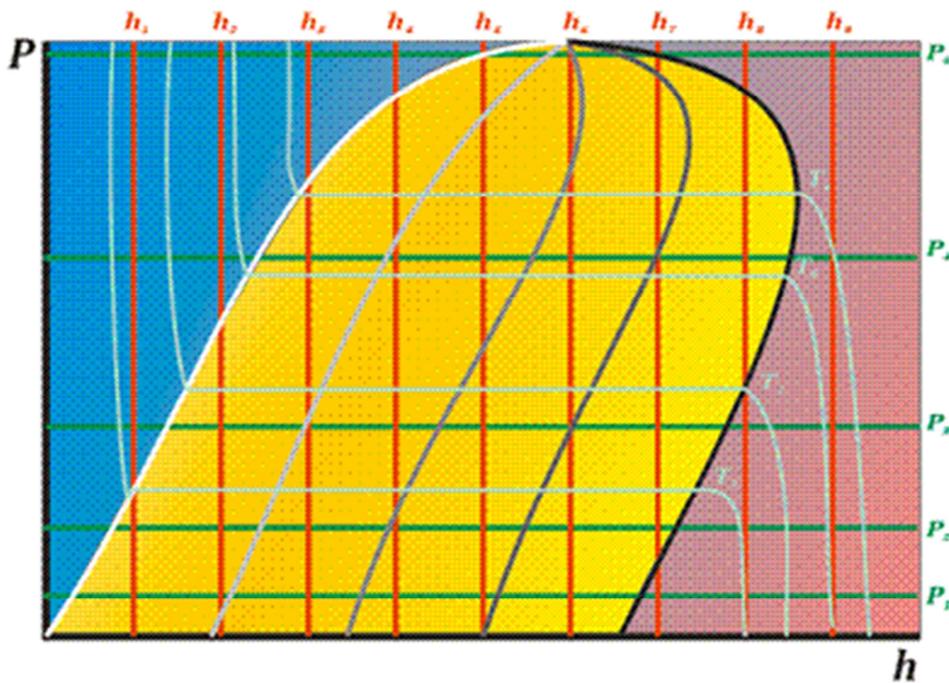


FIGURA I-15. Líneas isotérmicas. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.6.6. Líneas isoentrópicas

Son las líneas que agrupan puntos con el mismo valor de entropía, son de gran importancia ya que una línea de proceso que recorra una línea isoentrópica es un proceso que no varía su eficiencia. Por estar en una escala logarítmica, la proporción entre líneas isoentrópicas es a su vez logarítmica.²² Figura I-16.

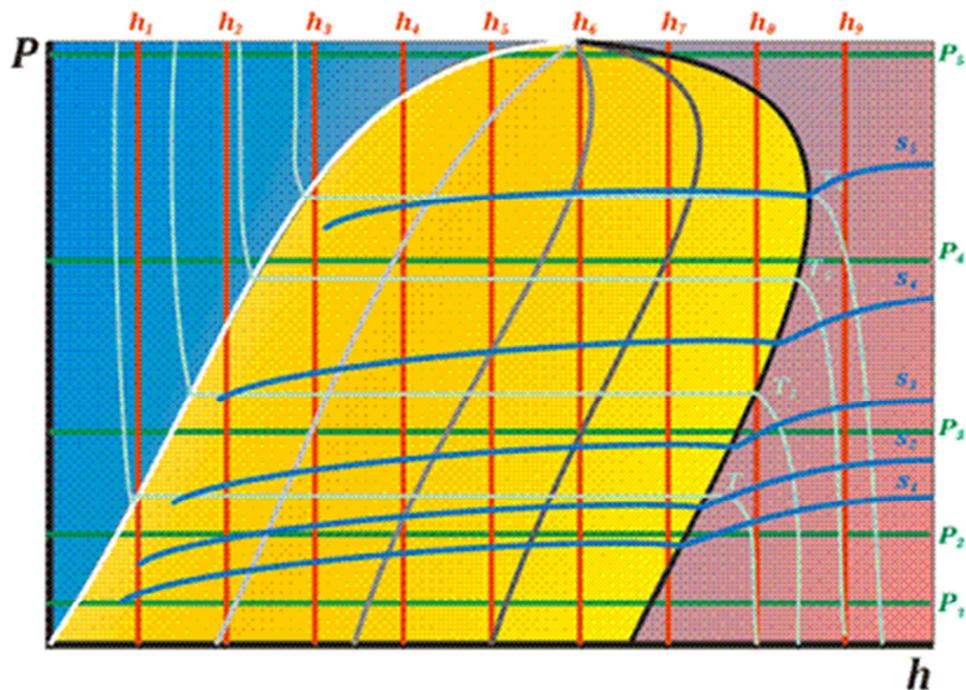


FIGURA I-16. Líneas isoentrópicas. Fuente: <http://efrainpuerto.wordpress.com/tag/diagrama/>

1.7. DIAGRAMA PSICROMETRICO

El diagrama psicrométrico es la representación gráfica de las ecuaciones analíticas descritas al principio de éste capítulo. La figura representa este diagrama para las mezclas aire y vapor de agua a la presión atmosférica normal. En este diagrama se representa la temperatura como abscisa y la humedad absoluta en la ordenada, también se muestra la humedad relativa del 100% o curva de saturación, en donde se obtiene la humedad del aire saturado en función de su temperatura.

Los puntos localizados a la izquierda de la curva de saturación representan mezclas de aire saturado con agua en estado líquido, lo que provoca bruma y son condiciones muy inestables. Cualquier punto localizado a la derecha de la curva de saturación, representa una mezcla de aire y vapor de agua.²³ La figura I-17 representa las diferentes zonas dentro del diagrama psicrométrico.

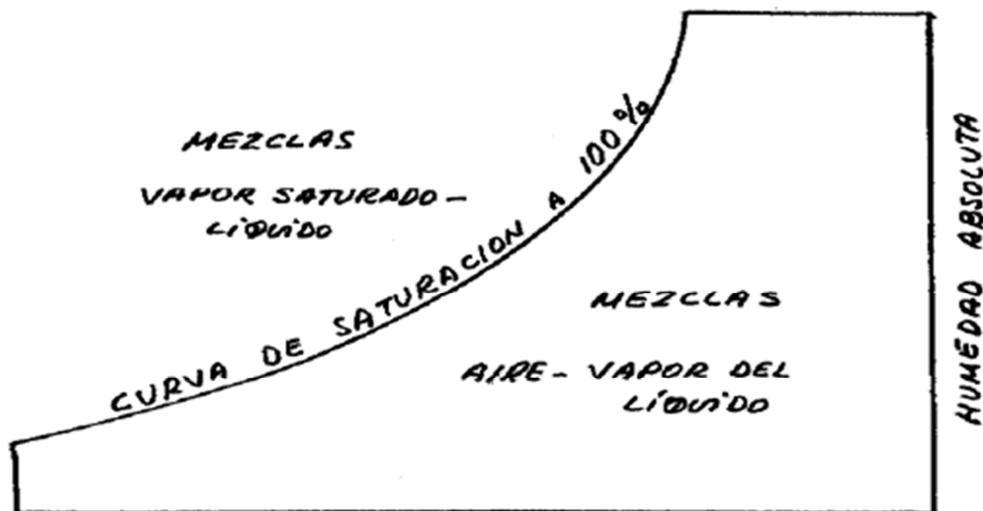


FIGURA I-17. Localización de las diferentes zonas en un diagrama psicrométrico. Fuente: Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Dr. Isaac. 2002.

Sobre el diagrama psicrométrico se pueden trazar las líneas de temperatura constante o isothermas de bulbo seco, que son paralelas al eje de la humedad absoluta y las líneas inclinadas con pendiente negativa corresponden a las isothermas de saturación adiabática, que como se menciono anteriormente coinciden con las de la temperatura húmeda para el caso aire-vapor de agua²⁴ tal como lo indica la figura I-18.

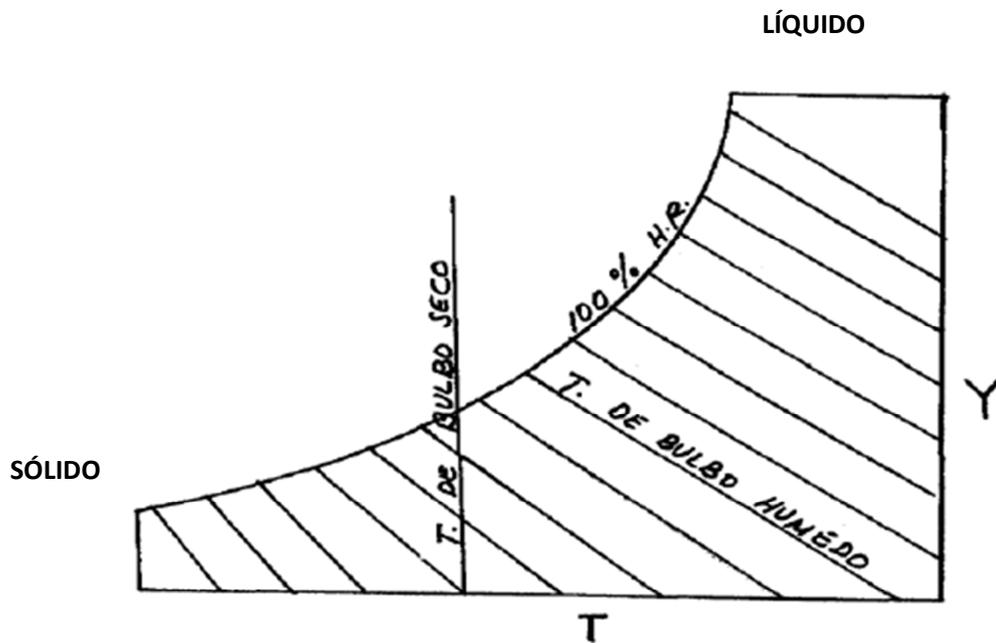


FIGURA I-18. Representación de isothermas de bulbo seco y de saturación adiabática en un diagrama psicrométrico. Fuente: Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Dr. Isaac. 2002.

1.7.1. Isolíneas de humedad relativa

Las curvas localizadas entre el eje de las abscisas y la curva de saturación corresponden a las isolíneas de humedad relativa, cuyo valor disminuye a medida que se alejan de la curva de saturación.²⁵ Figura I-19.

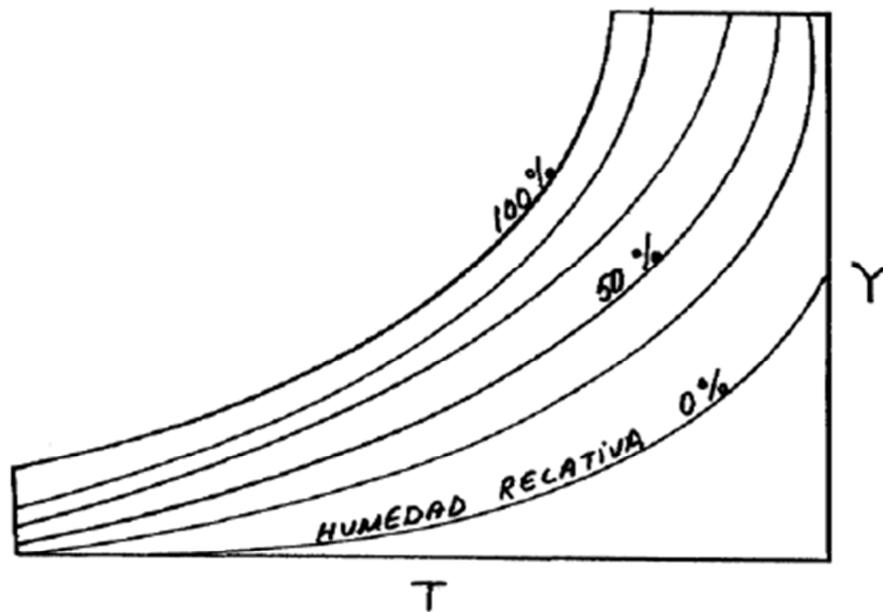


FIGURA I-19. Representación de las isolíneas de humedad relativa. Fuente: Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Dr. Isaac. 2002.

1.7.2. Líneas auxiliares

Además de las isolíneas anteriores existen líneas auxiliares que permiten la determinación de otras propiedades, tales como: calor húmedo, volumen húmedo y volumen de aire seco, así como el calor latente del vapor. Figura I-20.

Como se puede observar en la mayoría de los diagramas psicrométricos su construcción está basada para una presión de 1 atm, sin embargo, puede emplearse para otras presiones, por medio de un factor de corrección, que consiste en multiplicar los valores obtenidos de las humedades relativas en el diagrama por la relación entre la presión de operación y la presión a que se ha construido el diagrama.²⁶

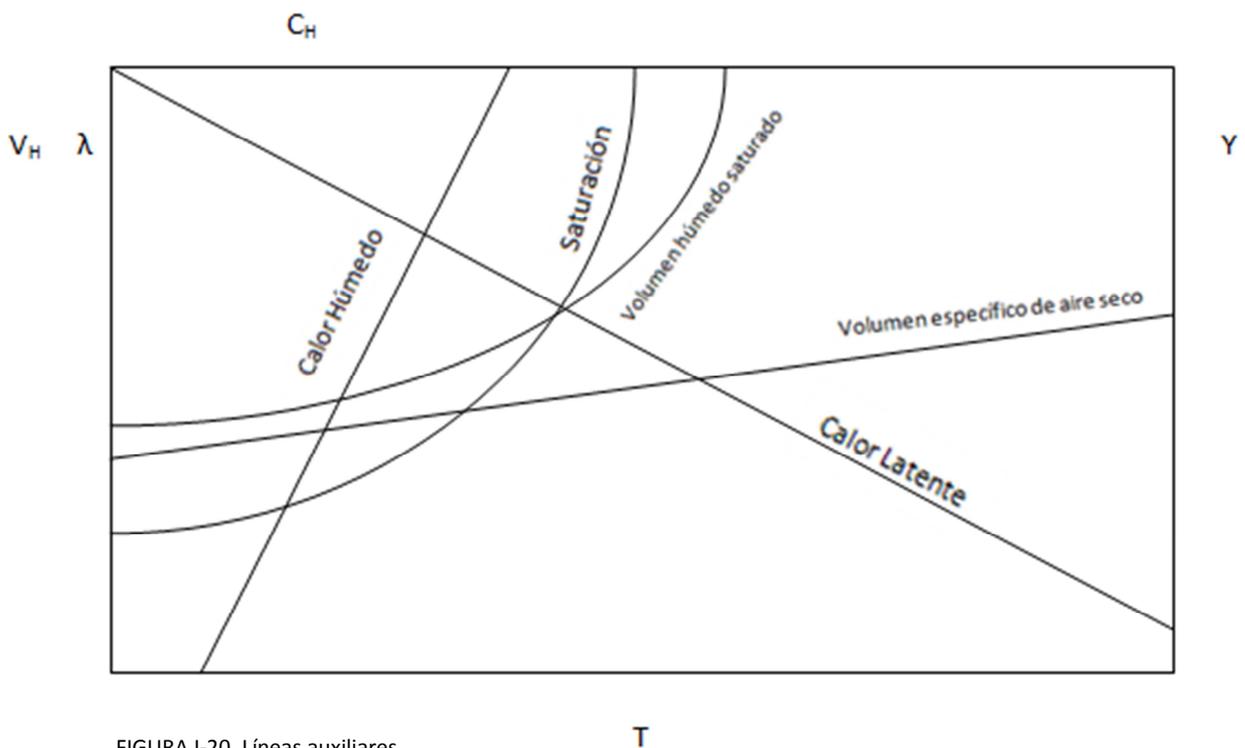


FIGURA I-20. Líneas auxiliares

Todas las líneas descritas anteriormente en su conjunto forman el diagrama psicrométrico que para el caso de la mezcla aire – vapor de agua lo podemos observar en el anexo C.

1.7.2.1. Obtención de los valores de las líneas auxiliares.

Calor húmedo: Teniendo el valor de la humedad absoluta hay que dirigirse en forma horizontal hasta la línea de calor húmedo y de ahí, subir en forma vertical para leer el valor. Figura I-21

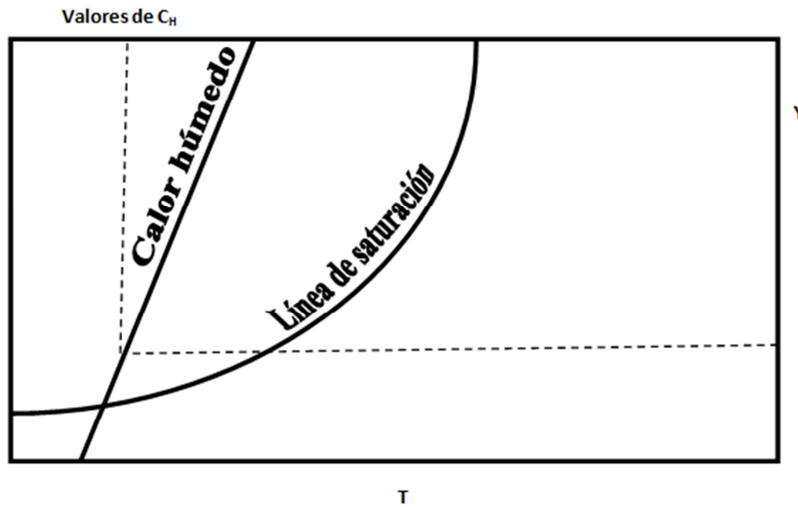


Figura I-21. Obtención del calor húmedo a partir del diagrama psicrométrico.

Calor latente: Con el valor de la temperatura de bulbo seco a la cual se lleva a cabo un cambio de estado, se sube en forma vertical hasta la línea de calor latente y de ahí nos dirigimos horizontalmente a la izquierda para leer su valor. Figura I-22.

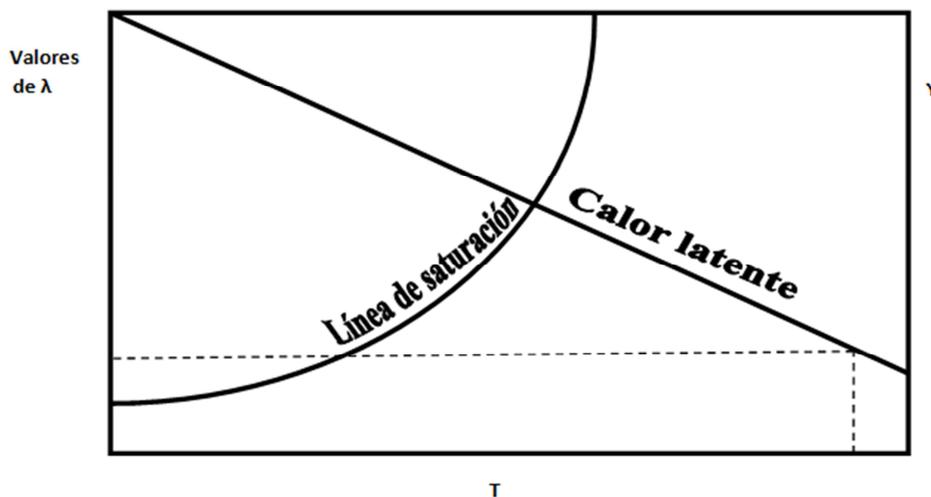


Figura I-22. Obtención del calor húmedo a partir del diagrama psicrométrico.

Volumen húmedo: Con el valor de la temperatura de bulbo seco se sube en forma vertical hasta las líneas de volumen húmedo saturado y volumen específico de aire seco, se hace una interpolación entre esas dos líneas de acuerdo al porcentaje de humedad relativa del aire y en forma horizontal nos dirigimos a la izquierda para leer el valor de volumen húmedo. Figura I-23.

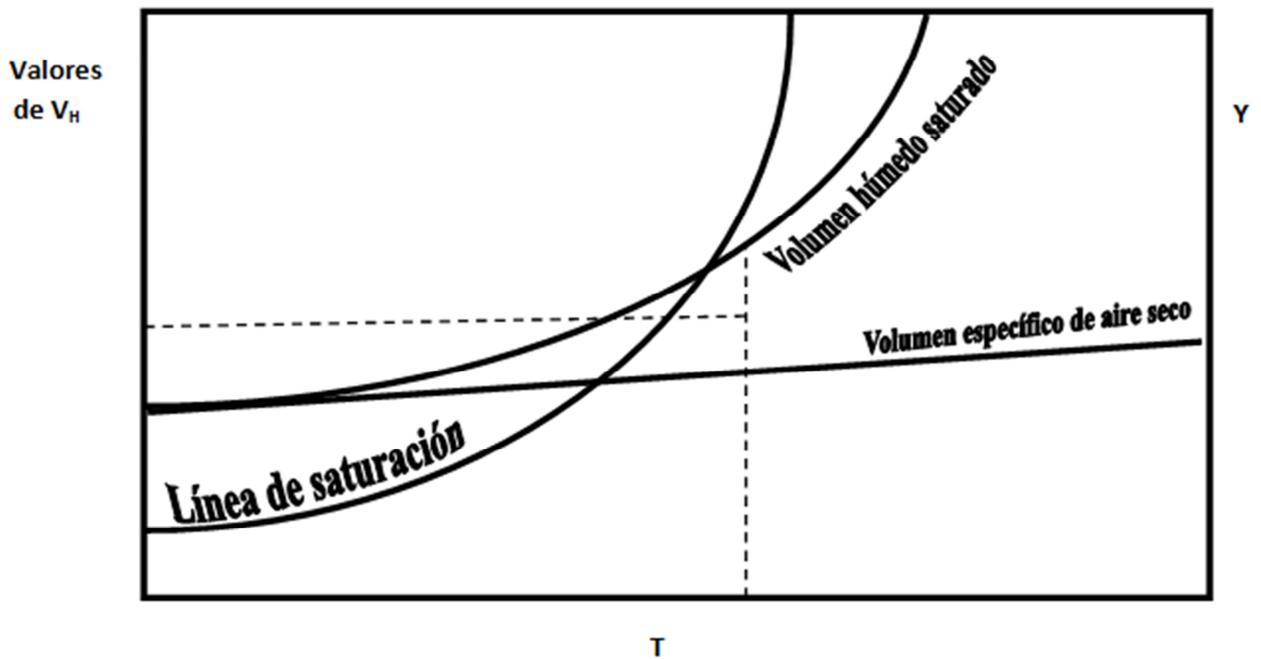


Figura I-23. Obtención del calor húmedo a partir del diagrama psicrométrico.

1.7.3. Manejo del diagrama psicrométrico

Para determinar un punto sobre este diagrama, es necesario conocer por lo menos dos de las cinco variables: 1) Temperatura de bulbo húmedo T_{bh} , 2) Temperatura de bulbo seco T_{bs} , 3) Temperatura de rocío T_R , 4) Humedad absoluta Y , 5) Humedad relativa Y_R . Si fijamos el punto 1 sobre el diagrama de la figura I-24 la determinación de sus propiedades se efectúa de la siguiente manera.

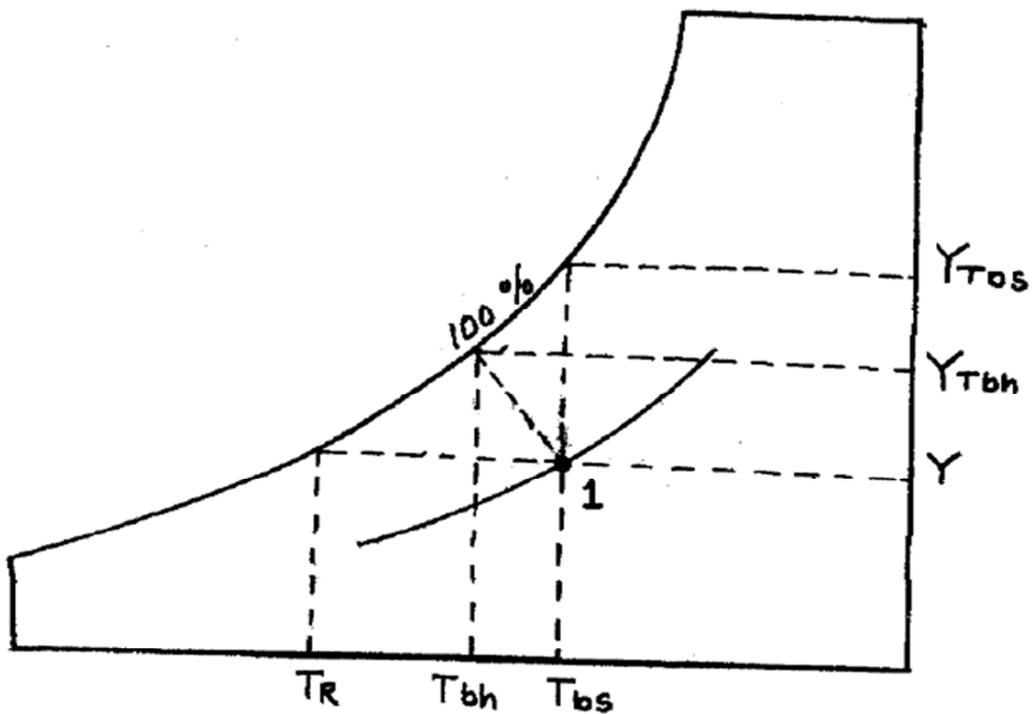


FIGURA I-24. Determinación de propiedades de una mezcla aire-vapor de agua, en un diagrama psicrométrico
Fuente: Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Dr. Isaac. 2002.

La ordenada del punto 1 corresponde a la humedad absoluta Y y su abscisa, es la temperatura de bulbo seco T_{bs} la abscisa de este punto que tiene la misma ordenada en Y hasta las condiciones de saturación, corresponde a la temperatura de rocío T_R ; la abscisa del punto de intersección de la línea con pendiente negativa que pasa por el punto 1 con la curva de saturación, es la temperatura de saturación adiabática o temperatura de bulbo húmedo T_{bh} , a la cual le corresponde la ordenada Y_{Tbh} . Prolongando la vertical que pasa por el punto 1 hasta la curva de saturación, la ordenada del punto de intersección es la humedad de saturación del aire a la temperatura T_{bs} ; la humedad relativa del punto de cuestión se obtiene leyendo directamente sobre la isólinea correspondiente.²⁷

1.7.4. Leyes psicrométricas

1. Cuando el aire seco se satura adiabáticamente, la temperatura se reduce y la humedad relativa se incrementa, y la reducción de calor sensible es igual al incremento simultáneo de calor latente.
2. Cuando el contenido de humedad del aire se incrementa adiabáticamente, la temperatura se reduce simultáneamente hasta que la presión de vapor corresponde a la temperatura de saturación. Ésta se llama temperatura de saturación adiabática.
3. Cuando cierta cantidad de agua aislada se evapora, se supone que la temperatura final será la adiabática de saturación y no está afectada por convección, por lo que la temperatura de bulbo húmedo será la adiabática de saturación.
4. La temperatura de bulbo húmedo del aire depende sólo del calor total sensible y latente y es independiente de sus proporciones relativas. En otras palabras, la temperatura de bulbo húmedo es constante ya que el calor total también lo es.

1.8. PSICROMETRO

El Psicrómetro está formado por dos termómetros; determina la humedad relativa midiendo la temperatura ambiente y la temperatura de una fuente de agua en evaporación. El bulbo de uno de ellos está envuelto en un tejido que se mantiene siempre humedecido.

1.8.1. Fundamentos físicos del psicrómetro

En la superficie de un volumen de agua líquida siempre hay moléculas de agua cruzando en el aire circundante a dicha superficie, que luego se evapora. La energía (calor latente) que es consumida en dicha evaporación, se deduce del contenido en energía térmica de la superficie, la cual por lo tanto se enfría (refrigeración por evaporación). Por otra parte, las moléculas de agua del aire siempre se juntan con el agua de la superficie y condensan allí, por lo que el anterior calor latente gastado en la evaporación de cada molécula de agua vuelve a dicha superficie (calor por condensación). La menor refrigeración de una superficie de agua que se evapora bajo la temperatura del aire es por tanto una medida de la humedad del aire.²⁸

1.8.2. Principio de funcionamiento

La evaporación desde la superficie del bulbo húmedo dentro de la corriente de aire enfría el bulbo húmedo hasta una temperatura estacionaria tal que haya un equilibrio entre el calor perdido por la evaporación y el ganado por la convección. Esta temperatura depende de la presión, temperatura y humedad atmosférica. Así pues cuando se dispone de un valor aproximado de presión, la humedad puede obtenerse a partir de las temperaturas observadas de los bulbos húmedo y seco.²⁹

Existen dos tipos de psicrómetros: Ventilación natural y ventilación forzada.

1.8.3. Psicrómetro de ventilación natural

Los psicrómetros de ventilación natural constan de dos termómetros, como ya se ha mencionado, para medir la temperatura de bulbo seco y húmedo. En este tipo de aparatos los termómetros no están sujetos al movimiento de aire forzado por lo tanto son menos exactos.³⁰ Figura I-25.

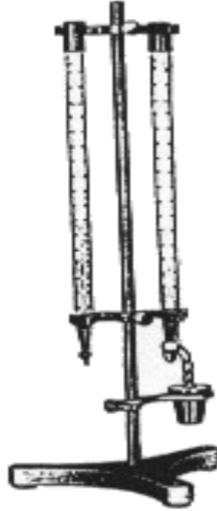


FIGURA I-25. Psicrómetro de ventilación natural. *Fuente:* Medición de humedad relativa con psicrómetro. Ing. Silvia Medrano. 2003

1.8.4. Psicrómetro de ventilación forzada

En un psicrómetro con ventilación forzada los dos sensores de temperatura se exponen a una corriente de aire. Estos son usualmente termistores, termopares o termómetros de mercurio.

1.8.4.1. Psicrómetro de giro

Al hacer girar el psicrómetro, el aire fluye sobre los bulbos húmedo y seco. Este tipo de psicrómetros no es tan exacto como uno ventilado por otros métodos, porque la temperatura del elemento húmedo comienza a elevarse tan pronto como el movimiento cesa para leer los termómetros³¹ (Figura I-26).

1.8.4.2. Psicrómetro de aspiración (tipo Assman)

Un ventilador pequeño accionado por un motor eléctrico o con mecanismo de relojería lleva el aire axialmente sobre los termómetros de mercurio. El agua debe ser agregada manualmente al elemento húmedo entre cinco a quince minutos antes de la medición bajo condiciones ambientales normales³² (Figura I-27).

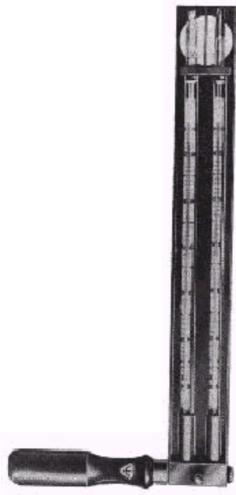


FIGURA I-26. Psicrómetro de giro *Fuente:* Medición de humedad relativa con psicrómetro. Ing. Silvia Medrano. 2003



FIGURA I-27. Tipo Assman *Fuente:* Medición de humedad relativa con psicrómetro. Ing. Silvia Medrano. 2003.

1.9. HIGROMETRO

1.9.1. Historia del higrómetro

El higrómetro es un instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire o de un gas determinado sirviéndose de sensores que perciben e indican su variación. Los higrómetros más antiguos se hallaban contruidos con sensores de tipo mecánico que se sustentaban en las respuestas de algunos elementos sensibles a las variaciones de la humedad atmosférica, tales como el cabello humano.

1.9.2. Modelos de higrómetros

El higrómetro de condensación es utilizado para definir la humedad atmosférica al alcanzar establecer la temperatura de empañamiento de una superficie pulida mientras va enfriándose de manera artificial y en forma demorada esa misma superficie. El higrómetro utiliza una cuerda de cabellos que se enrosca con mayor o menor fuerza según la humedad ambiente. El haz de cabellos desliza por una aguja indicadora que determina la proporción del grado de humedad, aunque no define el porcentaje.

El higrómetro de absorción utiliza sustancias químicas higroscópicas que en este caso son las que absorben y exhalan la humedad, según las condiciones climáticas reinantes.

El higrómetro eléctrico se halla conformado por dos electrodos enrollados en espiral, entre ellos se ubica un tejido impregnado en cloruro de litio acuoso. Si se aplica a estos electrodos una tensión alterna, el tejido se calienta y se evapora una parte del contenido de agua. A una temperatura determinada, se consigue un equilibrio entre la evaporación por calentamiento del tejido y la absorción de agua de la humedad del ambiente por el cloruro de litio, que es un material específicamente higroscópico. Así entonces, analizando estos datos puede definirse con precisión el grado de humedad.

En el higrómetro digital, el sistema de medición está compuesto de un medidor conectado a una sonda. Esta sonda está basada en la capacitancia de un sensor de humedad con un polímero o material dieléctrico plástico. La humedad hace que el dieléctrico se dilate, distanciando así las placas con la consecuente variación de la geometría del capacitador y la reducción de su capacitancia. Estas variaciones de capacitancia a su vez causan un cambio de frecuencia en los componentes electrónicos del instrumento, que resulta en una modulación de frecuencia la cual es una función de la humedad relativa. La frecuencia se convierte entonces en voltaje, que se convierte en un valor de humedad relativa y se visualiza en pantalla.³³

CAPÍTULO II. ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

La operación unitaria de acondicionamiento de aire tiene como objeto el diseño de proceso y de los equipos necesarios para producir un aire que llene las condiciones requeridas de humedad, temperatura confort y limpieza que requiera un usuario industrial o comercial. La comodidad de las personas bajo el punto de vista del aire acondicionado depende de cuatro factores principales, que son:

- a) Temperatura del aire.
- b) Humedad del aire
- c) Movimiento del aire.
- d) Pureza del aire.

2.1. LA TEMPERATURA EFECTIVA

Para establecer estándares de temperatura, humedad, velocidad y pureza del aire es indispensable encontrar valores óptimos para que el cuerpo humano tenga una sensación de comodidad. Debido a las grandes diferencias fisiológicas y psicológicas de los individuos encontrar valores comunes de comodidad es difícil. La mejor forma de solucionar este problema es mediante la carta de temperatura efectiva (Ver el anexo D).

La temperatura efectiva es un índice empírico del grado de calor que percibe un individuo cuando se expone a varias combinaciones de temperatura, humedad y movimiento de aire. Muy baja humedad produce la sensación de sequedad en la piel, la boca y la nariz, la humedad alta hace que la transpiración se acumule y que el cuerpo se cubra de sudor, la ropa esté húmeda y se produzcan malos olores, las altas velocidades del aire causan corrientes, resfriados y otras molestias. Cuando la humedad y la velocidad de aire, junto con la temperatura se controlan adecuadamente, el índice de temperatura efectiva realmente mide la comodidad.

Aunque alguna temperatura efectiva pueda tener cualquier humedad que varíe desde 0 a 100% y el movimiento de aire desde lento hasta altas velocidades, no todas las combinaciones son igualmente confortables. Cada combinación produce la misma sensación de calor, pero los otros efectos pueden producir sensación de incomodidad.³⁴

Desde luego es evidente que las personas que viven en lugares fríos están cómodas a temperaturas efectivas más bajas que los que viven en climas cálidos. La temperatura efectiva deseable en verano difiere de la del invierno, siendo la deseable en verano de 20 a 24 ° C con temperaturas de bulbo seco de 22 a 29 y con humedades relativas que vayan de 40 a 60 % y en invierno las temperaturas efectivas van de 19 a 22 °C con humedades del 35 %.

La cantidad de aire recomendada para la ventilación depende del número de personas, de la actividad que estas realicen, de la contaminación, los olores y del humo. (Ver el anexo E).

2.2. FACTORES QUE DETERMINAN LA TEMPERATURA EFECTIVA

2.2.1. Aclimatación diferente

Es evidente que los que viven en climas fríos están cómodos a temperatura efectiva más baja que los que viven en lugares cálidos.

La temperatura efectiva cómoda depende, entre otras cosas, de la temperatura exterior, que obviamente cambia de un día a otro y de una estación a otra; sin embargo, el efecto en la temperatura efectiva deseable es pequeño.

La temperatura efectiva deseable y la humedad varían por lo general, según el individuo, país o región.

2.2.2. Duración de la ocupación

Una importante variación de la temperatura efectiva es la duración de las personas dentro del volumen controlado.

La experiencia ha demostrado que mientras menor sea el tiempo en que se ocupe un volumen controlado debe haber un mayor cambio de temperatura; el cambio es con respecto a la temperatura exterior

2.2.3. Ropa

En muchos casos la ropa es factor determinante para la temperatura efectiva; existen lugares en que debido al tipo de ropa usado, la temperatura efectiva tendrá que ser mayor o menor independientemente de otros factores.

La diferencia de peso de la ropa de la mujer y la del hombre trae serios problemas para escoger la temperatura efectiva, pues por lo general, ellas visten más ligero y requieren de una mayor temperatura.

2.2.4. Edad y sexo

Las personas mayores de 40 años requieren, por lo general, 1°F más de temperatura efectiva. Las mujeres requieren, por lo general, 1°F más de temperatura efectiva que los hombres; sin embargo, las temperaturas de la carta de comodidad están consideradas para los hombres.

2.2.5. Efectos de choque

Este efecto se debe a la entrada rápida del exterior a un lugar controlado. Este problema es más grave en verano. Para evitar el choque, en los pasillos o corredores se mantiene una temperatura efectiva media entre la exterior y la interior; sin embargo, se ha demostrado que el choque no perjudica la salud de los que viven en lugares donde el aire acondicionado es indispensable y están acostumbrados a este tipo de cambios bruscos de temperatura.³⁵

2.2.6. Actividad

La actividad es un importante factor para determinar la temperatura efectiva, y por lo general las recomendaciones para elegir una temperatura efectiva varían de acuerdo con la actividad.

2.2.7. Calor radiado

Cuando hay mucha gente, en un teatro o en un cine por ejemplo, el efecto del calor radiado por el cuerpo de una persona a otra requiere que se disminuya la temperatura efectiva. El calor radiado de una persona a muros o ventanas frías, requiere compensación, aumentando la temperatura efectiva.

2.3. CONDICIONES DE COMODIDAD

El comportamiento fisiológico del cuerpo humano demanda que la cantidad de calor interno producido por el cuerpo, sea igual a la cantidad de calor externo perdido.

2.3.1. Temperatura del aire

Si no hubiera control de la temperatura, la vida sería imposible. Por esto, el control artificial de la temperatura dentro de un espacio cerrado fue el primer intento para lograr la comodidad humana.

2.3.2. Humedad del aire

Gran parte del calor del cuerpo humano se pierde por evaporación a través de la piel. La evaporación se debe a la baja humedad relativa del aire; las altas humedades la retardan. Esto da una idea de la importancia que tiene el control de la humedad.

Los excesos de la humedad relativa producen no solamente reacciones fisiológicas molestas, sino también afectan las propiedades de algunos materiales.³⁶

2.3.3. Movimiento del aire

El movimiento del aire sobre el cuerpo humano incrementa la pérdida de calor y humedad y modifica la sensación de frío o calor. Además, produce una sensación de corriente de aire agradable o desagradable.

2.3.4. Pureza del aire

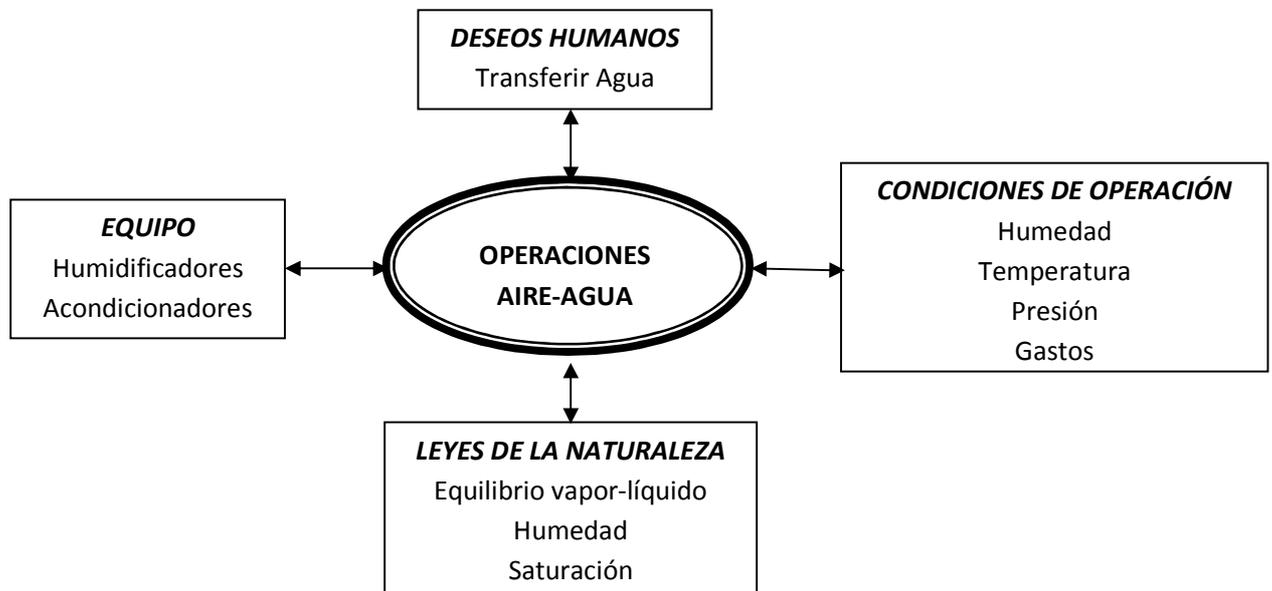
La nulificación de olores requiere, sin embargo, mucha ventilación, o bien, la purificación del aire por medio de algún recurso artificial.

Nulificar partículas sólidas en el aire es de vital importancia no solo para la salud, sino porque disminuye los gastos de limpieza y mantenimiento.

El humo que molesta los ojos y la nariz, requiere una buena ventilación.

En ciertos casos es necesario excluir el polen, porque causa asma y molestia a los que padecen cierto tipo de alergias.

En el siguiente esquema se muestran los factores que intervienen para lograr la sensación de comodidad.³⁷



Las zonas de comodidad para invierno y verano se pueden ver en una carta de comodidad. (Ver el anexo F).

2.4. PROCESOS SENCILLOS DE ACONDICIONAMIENTO

En las cartas de humedad o psicrométricas se pueden seguir algunos de los procesos más sencillos para acondicionar aire

2.4.1. Calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante

En este proceso un gas 1 puede enfriarse o calentarse haciéndolo pasar por un cambiador de calor para llegar a las condiciones finales 2 o 2'. Figura II-1.

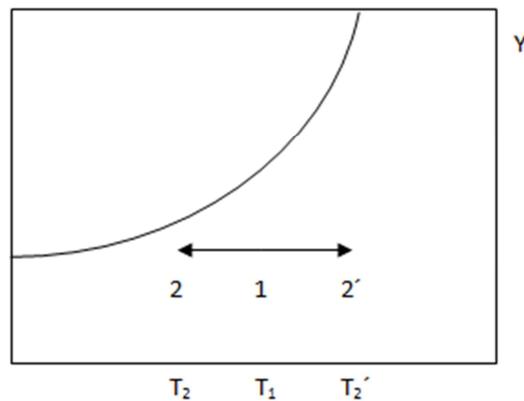


FIGURA II-1. Calentamiento o enfriamiento a humedad y presión constante

2.4.2. Enfriamiento y deshumidificación

En este proceso la mezcla se pone en contacto con una superficie seca y más fría que la temperatura de bulbo seco de la mezcla. Es un enfriamiento con condensación de agua. Figura II-2

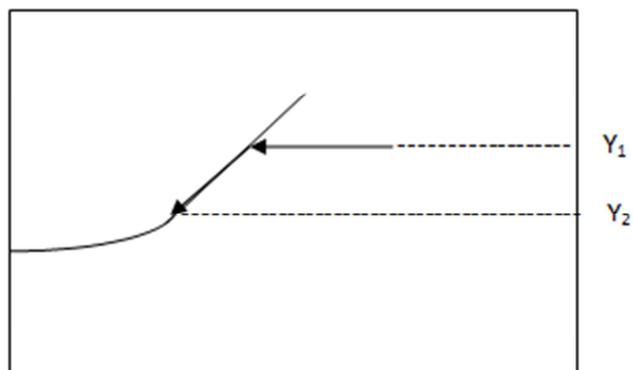


FIGURA II-2. Enfriamiento y deshumidificación T

2.4.3. Humidificación adiabática

En este proceso un aire A se hace pasar por una torre de humidificación para que adiabáticamente llegue a las condiciones B. Figura II-3.

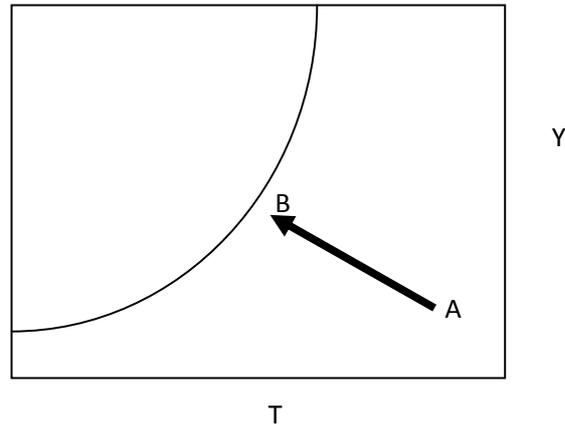


FIGURA II-3. Humidificación adiabática

2.4.4. Mezclas de aires

En este procesos dos aires a diferentes condiciones de humedad y temperatura A y B se mezclan para dar un aire a las condiciones C. Figura II-4.

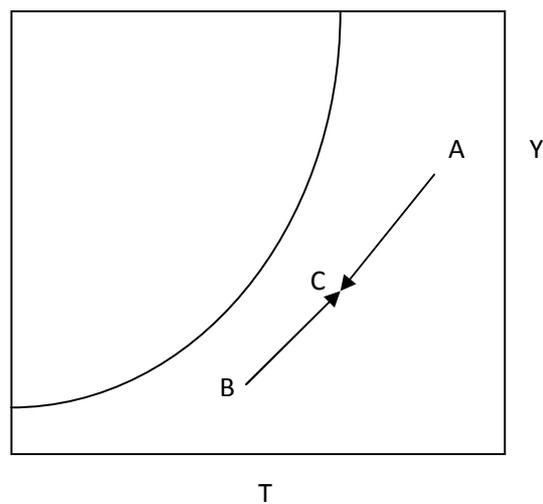


FIGURA II-4. Mezclas de aires

2.4.5. Calentar y humidificar un aire

El aire es calentado por medio de resistencias eléctricas y su humidificación se realiza con la adición de vapor de agua saturado (Figura II-5a) ó se puede humidificar con agua a la temperatura de bulbo húmedo del aire y después volverlo a calentar (Figura II-5b).

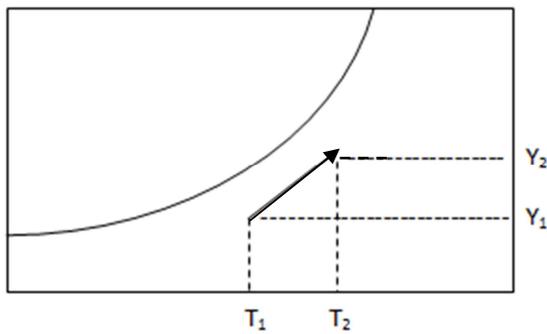


FIGURA II-5a. Adición de vapor de agua saturado

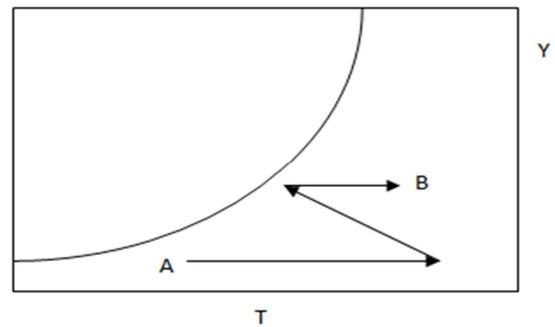


FIGURA II-5b. Adición de agua a T_{bh} del aire

2.4.6. Disminución de la temperatura y la humedad de un aire

Si tenemos un aire a las condiciones A y lo queremos llevar a las condiciones B es necesario realizar 3 operaciones unitarias, empezamos por enfriar el aire para poder deshumidificarlo y después lo calentamos como se observa en la figura II-6.

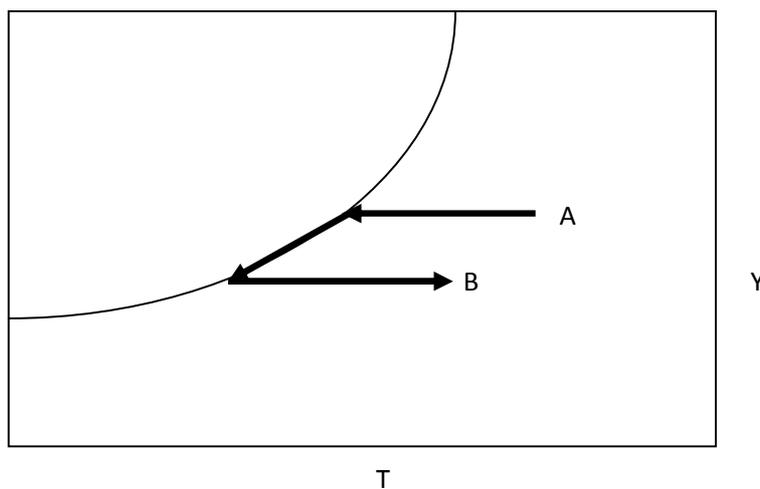


FIGURA II-6. Enfriamiento, deshumidificación y calentamiento de un aire

2.5. HUMIDIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN

La humidificación y deshumidificación del aire o de otro gas se puede efectuar de muy diversas maneras, la cuales se podrían observar en una carta psicométrica.

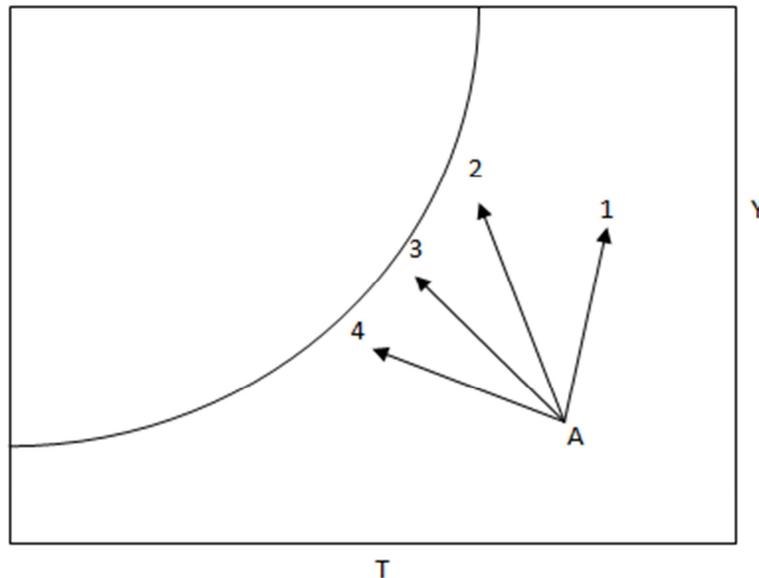


FIGURA II-7. Diferentes formas de humidificar el aire

En la figura II-7 se presentan algunos de los procesos posibles para humidificar un aire.

El proceso de A –1 es uno que puede darse al agregar vapor a un aire.

El Proceso A-2 se da cuando se pone en contacto el aire con agua más caliente que él.

El proceso A-3 es el proceso en el cual el aire se pone en contacto con agua que está a la temperatura de bulbo húmedo del aire

El proceso A-4 es típico de una humidificación con agua a menor temperatura que la de bulbo húmedo.

La práctica industrial de la humidificación del aire se lleva a cabo casi exclusivamente en las columnas de humidificación adiabática, que es el proceso A-3.

2.6. CICLO COMUN DE AIRE ACONDICIONADO

En el equipo de acondicionamiento se pueden realizar varios procesos como ya se ha mencionado antes. En la figura II-8 podemos observar que en los puntos “a”, “b”, “c” y “d” se colocaron termómetros de bulbo húmedo y bulbo seco para determinar las características del aire en cada punto después de haber pasado por alguna operación unitaria.

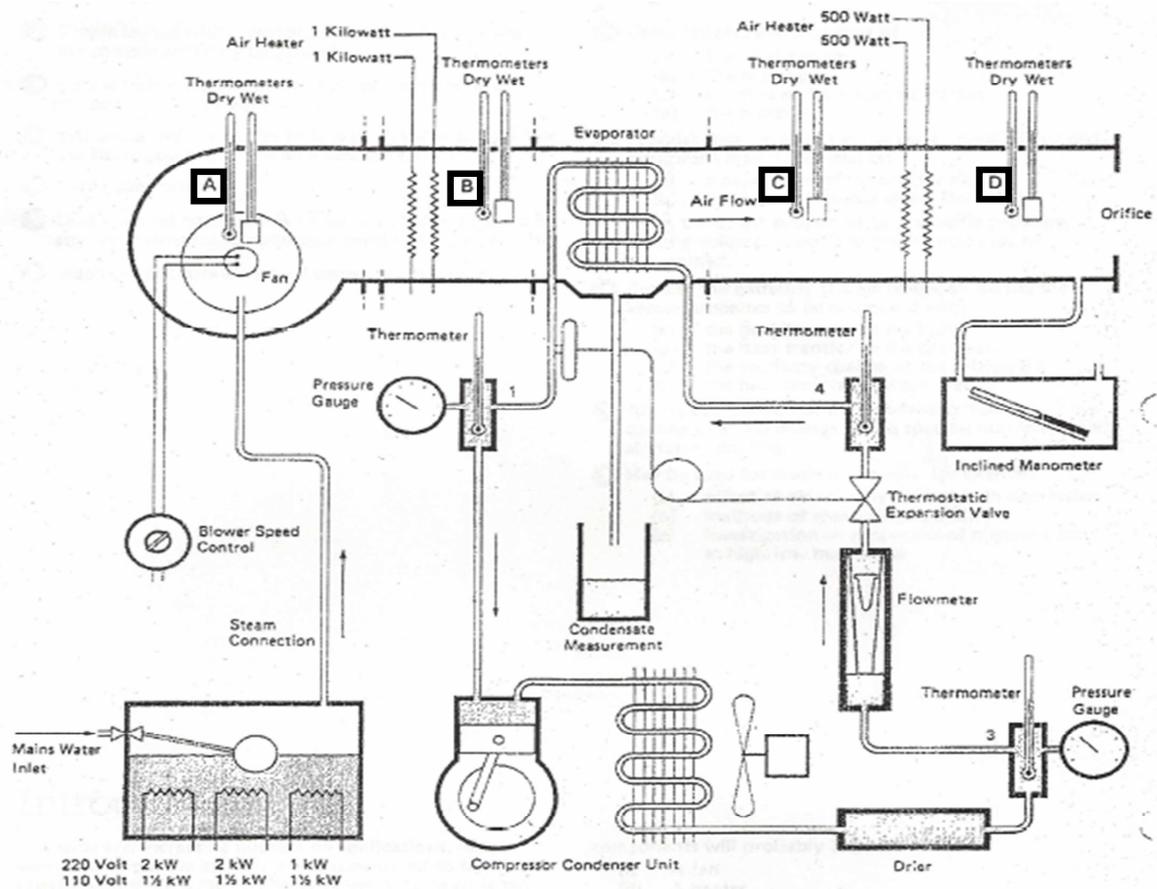


FIGURA II-8. Acondicionamiento de aire. Unidad A572 para laboratorio.

Proceso A-B: (inyección de vapor, precalentamiento y ventilador) Rendimiento teórico de la evaporación en la caldera.

Proceso B-C: (Refrigeración y deshumidificación) Tasa de cambio de entalpía de la corriente de aire.

Proceso C-D: (Recalentamiento) Velocidad de transferencia de calor.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Es una unidad de aire acondicionado para laboratorio, construido por la P.A. Hilton LTD. Engineers Inglaterra. Está provisto de instrumentación y controles que permiten una amplia variedad de pruebas para entender el diseño y la operación de un equipo de aire acondicionado. Todos los componentes se llevan sobre una estructura de acero que ha sido fijada al suelo del laboratorio. Ésta unidad contiene una caldera (para la producción de vapor) y una unidad de compresor/condensador cargado con gas refrigerante freón 12, comúnmente llamado R12, (para las funciones de enfriamiento de aire) están alojadas en la parte inferior del bastidor, mientras la red de conductos de aire acondicionado y los componentes están montados encima. Figura III-1.



FIGURA III-1. Equipo para acondicionamiento de aire

3.1. UNIDAD DE AIRE ACONDICIONADO PARA LABORATORIO P.A. HILTON LTD.

El equipo consta de los siguientes componentes y secciones:

3.1.1. Sistema de aire.

- a) Ventilador con control de velocidad (reóstato) en la sección A.
- b) Resistencias para calentamiento de aire en las secciones B y F, de 1kW y 0.5kW respectivamente. Cuentan con voltímetro y amperímetro en la parte posterior del equipo.
- c) Humidificación con vapor en la sección C.
- d) Medición de flujo de aire en la sección G con placa de orificio y manómetro inclinado de agua. El manómetro inclinado tiene una desviación de 0.25.
- e) Orificios para colocar termómetros de bulbo húmedo y seco en las secciones D y G.
- f) Manguera para agua condensada.
- g) El ducto es de sección cuadrada de 255mm de lado.

3.1.2. Sistema de refrigeración:

- a) Sección I; zona de condensación. Consta de las siguientes partes: ventilador, secador, manómetro, rotámetro y termopozo.
- b) Sección II; zona de expansión. Consta de las siguientes partes: válvula de solenoide, válvula termostática de expansión y termopozo.
- c) Sección III; zona de evaporación. Consta de las siguiente partes: sección E del ducto de aire, manómetro y termopozo.
- d) Sección IV; zona de compresión. Equipo compresor-condensador en la sección H de 0.5 HP.
- e) El refrigerante utilizado es Freón 12.

3.1.3. Vaporizador.

- a) Cuenta con tres resistencias de inmersión de 1.5kW, de 200V y 60Hz.
- b) Tanque de alimentación de agua.
- c) Flotador para el nivel del agua.
- d) Sección de alimentación de agua y sección de generación de vapor.

El diagrama del equipo se encuentra en el anexo G.

3.2. FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

3.2.1. Circuito de aire

Al aire de la atmósfera se le mide la temperatura con termómetros de bulbo húmedo y seco y entra en un ventilador de velocidad centrífuga variable que desemboca en el conducto (Figura III-2A). Si se desea, el vapor puede ser inyectado en el aire inmediatamente después de pasar por el ventilador, lo que aumenta el contenido de humedad (Figura III-2B). De esta manera se asegura una mezcla homogénea de aire y de vapor en el conducto. Desde el ventilador, el aire fluye entre dos resistencias eléctricas de 1kW usadas como calefacción y que pueden ser encendidas individualmente. El aire calentado entra entonces en una sección de estabilización, donde se determina su condición por termómetros de bulbo húmedo y seco.

A continuación, el aire fluye a través del evaporador de la unidad de refrigeración donde se puede enfriar (Figura III-2C), y de acuerdo con las condiciones, se deposita algo de su contenido de humedad como líquido. El condensado formado se drena y puede ser medido (Figura III-2D).

El aire frío y seco pasa por otras dos resistencias eléctricas de 0.5kW de encendido individual para recalentar el aire y llega a otra sección de estabilización (Figura III-2E). El estado del aire recalentado se determina con otros termómetros de bulbo húmedo y seco para después regresarlo a la atmósfera a través de una placa de orificio (Figura III-2F).

Para el aire que fluye a través del conducto, cualquiera o todos los procesos de calefacción, refrigeración y humidificación pueden ser operados. Sin embargo, si el aire entrante es fresco, la cantidad de vapor que aceptará al mismo tiempo de precalentamiento, es limitada.



A



B



C



D



E



F

FIGURA III-2. A) Ventilador de velocidad variable. B) Suministro de vapor. C) Zona de enfriamiento de aire. D) Recolección del condensado. E) Zona de recalentamiento de aire. F) Salida del aire acondicionado por la placa de orificio

3.2.2. Caldera

La caldera suministra el vapor para procesos de humidificación a presión atmosférica y tiene tres calentadores de inmersión de encendido individual de modo que la tasa de producción de vapor puede variar. El nivel de agua en la caldera se controla por un flotador y el nivel en el tanque de alimentación de agua puede ser visto a través de una mirilla de vidrio. Figura III-3.



FIGURA III-3. Zona de la caldera: alimentación de agua para generar vapor y humidificar el aire

3.2.3. Refrigeración

El circuito frigorífico está cargado con refrigerante R 12. El vapor formado en el evaporador es arrastrado a un compresor hermético que desemboca en un condensador refrigerado por aire. El R 12 líquido pasa entonces a través de un medidor de flujo y una válvula termostática de expansión para llegar al evaporador. Tiene puntos de medición de temperatura y presión para facilitar la medida del cambio de entalpía del R 12 a medida que fluye a través del evaporador. Figura III-4.

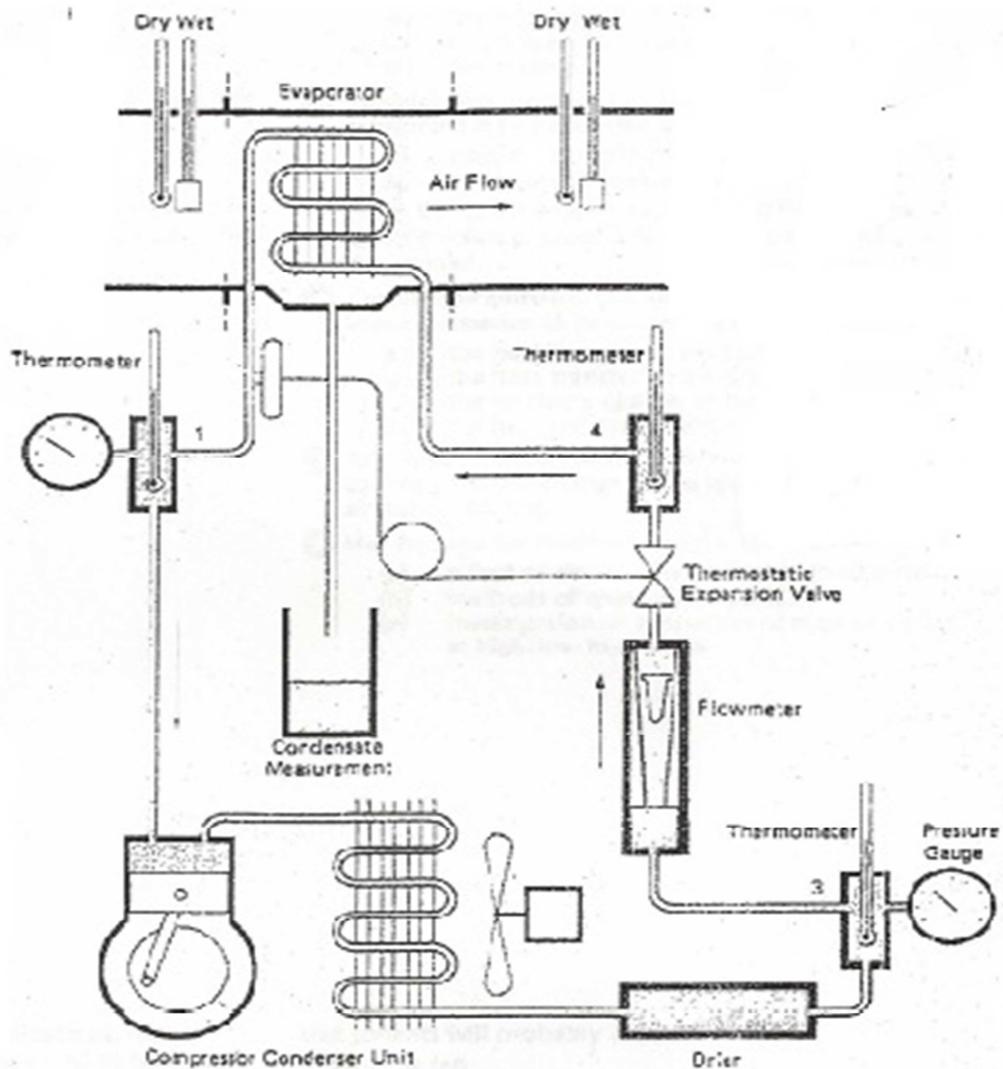


FIGURA III-4. Circuito de refrigeración

3.2.4. Controles. (*Imagen III-5*)

3.2.4.1. Flujo de Aire

La velocidad del ventilador se puede variar mediante un transformador giratorio montado en el panel de control.

Un manómetro inclinado, en conjunción con las condiciones del aire atmosférico y de descarga, permite determinar el flujo másico del aire.

3.2.4.2. Calentadores

Todos los calentadores son operados por los interruptores del panel de control. Cada interruptor cuenta con un indicador de neón para saber cuando esta encendido.

3.2.4.3. Refrigeración

Una vez que comenzó a partir de un interruptor en el panel, la tasa de flujo de refrigerante está bajo el control de la válvula de expansión termostática.

3.2.4.4. Inyección de vapor

La tasa de inyección de vapor está determinada por la velocidad de entrada de calor a la caldera. Esto es controlado por interruptores con indicadores de neón que están en el panel de control.



FIGURA III-5. Panel de control para encender y ajustar la velocidad del ventilador, encender los calentadores de inmersión, las resistencias eléctricas y el circuito de refrigeración

3.3. OPERACIÓN DEL EQUIPO

Primero se debe asegurar que el equipo está recibiendo energía eléctrica.

Ya que el equipo tiene energía, se debe encender el ventilador antes que cualquier otro control y fijar un porcentaje del reóstato para controlar el flujo de aire de entrada al equipo.

Después de haber activado el ventilador y ajustar su velocidad para dar el flujo de aire deseado, se pueden hacer funcionar cualquiera de los controles del panel para comprobar una variedad de procesos de aire acondicionado, sin olvidarse de quitar el tapón del manómetro inclinado para obtener la medición de la caída de presión y poder realizar los cálculos necesarios.

Si sólo se va a calentar el aire se puede encender el primer par de resistencias eléctricas o el segundo par de resistencias o bien los dos pares de resistencias, sólo hay que tener cuidado con el termómetro de bulbo seco situado en la sección G porque si su escala de temperatura es baja puede llegar a quebrarse por el exceso de calor que recibe.

Si sólo se va a enfriar (sin la deshumidificación), el aire de la sección que está antes del evaporador debe tener una humedad relativa baja. Esto se puede lograr por pre-calentamiento (sin inyección de vapor).

Para realizar una humidificación es necesario encender las resistencias de inmersión para generar el vapor, como ya se mencionó antes la generación de vapor se puede controlar dependiendo del número de resistencias que se enciendan.

Cuando la deshumidificación es demostrada, se recomienda disponer de una alta humedad en la sección que está antes del evaporador, es decir, primero humidificar para poder deshumidificar ya que en ocasiones el contenido de humedad del aire atmosférico no es suficiente para medir bien el condensado que se genera.

También se puede realizar una combinación de estos procesos siguiéndolos en una carta psicrométrica y hacer los balances de materia necesarios.

Cuando se terminó de hacer algún proceso se deben apagar todos los instrumentos en el panel de control excepto el ventilador y el reóstato, esto es lo último que se apaga para evitar que el equipo tenga un mal funcionamiento o se llegue a descomponer alguna resistencia eléctrica.

Ya que todo esta apagado se corta la energía eléctrica que permite el encendido del equipo y se vuelve a tapar el manómetro inclinado.

CAPÍTULO IV. TRABAJO EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos de éste equipo es aplicar los balances de materia y energía en las diversas operaciones que están implícitas en el acondicionamiento de aire.

Lo primero que se debe hacer es fijar el porcentaje de velocidad del aire circundante mediante el control del reóstato que tiene el equipo. Ver la figura IV-1A y se obtiene una caída de presión en mm de H₂O. Ver la figura IV-1B.



A



B

FIGURA IV-1A) Reóstato. 1B) Manómetro inclinado

El fluido del manómetro inclinado es petróleo y su densidad es de 0.784 g/cm³ a 20°C. Se usa un fluido de baja densidad para poder tener una medida precisa de la caída de presión.

Para convertir los mm de H₂O en Pascales ó en mm de Hg se utilizan las siguientes expresiones:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 * (9.8)^{\&1} \quad 40$$

$$\Delta P = \frac{\Delta P_2}{13.6} \quad 41$$

Con esa caída de presión se puede conocer la velocidad del aire a la salida del equipo, que sale por una placa de orificio en la sección "G". Ver la figura IV-2.

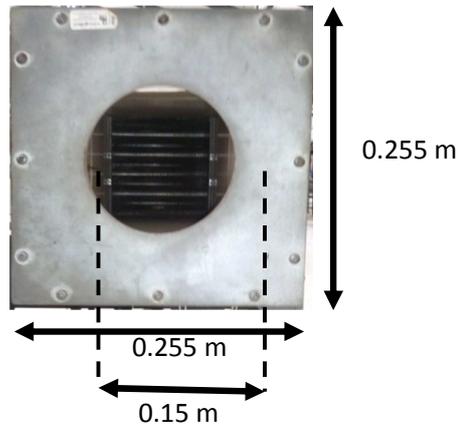


FIGURA IV-2. Dimensiones de la placa de orificio

$$D_0 = 0.15 \text{ m}$$

$$A_0 = (0.15)^2 * \frac{\pi}{4} = 0.018 \text{ m}^2$$

$$A_f = (0.255)^2 = 0.065 \text{ m}^2$$

4.1. VELOCIDAD DEL AIRE DE SALIDA

Hay dos formas de conocer el valor de la velocidad de salida del aire:

- 1.- Utilizando un anemómetro que mide la velocidad del aire circundante en m/s.
Ver la figura IV-3



FIGURA IV-3 Anemómetro

2.- Calculándola con la siguiente ecuación

42

$$U_0 = C_0 * \sqrt{\frac{2 * \Delta P_1}{\rho (1 - \beta^4)}}$$

Donde:

$$\rho = \frac{1}{V_H}$$

$$D_E = 4r_H = \frac{A_f}{P_m}$$

$$P_m = 4 * 0.255m = 1.02 m$$

$$r_H = \frac{A_f}{P_m} = 0.064 m$$

$$D_E = 4 * r_H = 0.255 m$$

$$\beta = \frac{D_0}{D_E} = 0.588$$

4.1.1. Coeficiente de orificio obtenido experimentalmente

Para determinar este valor se empleo un método iterativo con el fin de igualar la velocidad obtenida con el anemómetro y la calculada con la ecuación.

Velocidad del reóstato en %	Velocidad de salida del aire en m/s		ΔP en mm Hg
	Medida	Calculada	
40	7	6.8	2.4
50	9.3	9.19	4.6
60	10.7	10.65	6.4
70	12	11.74	7.5
80	12.4	12.32	8.2
90	12.6	12.57	8.6

$$C_0 = 0.8763$$

Como podemos observar en cada porcentaje de velocidad del reóstato la velocidad calculada y la medida son muy parecidas, por lo que de ahora en adelante el valor que se tomará para la salida del aire será el medido con el anemómetro por ser más práctica su obtención.

Para seguir con los balances también es necesario tener los datos de las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco para conocer el contenido de humedad que hay en el aire

4.2. HUMEDAD ABSOLUTA

La humedad absoluta del aire se puede obtener por tres métodos.

4.2.1. Por medio de las ecuaciones

Con la temperatura de bulbo húmedo se puede conocer la presión de vapor quitando el logaritmo de la ecuación 1. La temperatura debe estar en grados Celsius. Las constantes A, B y C se dieron en el capítulo I.

$$P^{\circ} = 10^{A - \frac{B}{(C + T_{bh})}} = \text{en mm Hg} \quad 43$$

Teniendo la presión de vapor y con la temperatura de bulbo húmedo y seco se puede calcular la presión parcial con la ecuación 33:

$$\tilde{P} = P^{\circ} - 0.5(T_{bs} - T_{bh}) = \text{en mm Hg}$$

Ya teniendo todos los datos por último se calcula la humedad absoluta del aire con la siguiente ecuación 37:

$$Y = 0.62 * \frac{\tilde{P}}{P_T - \tilde{P}} = \text{en } \frac{Kg H_2O}{Kg AS}$$

$$P_T = 585 \text{ mmHg}$$

4.2.2. Con la carta psicrométrica

Teniendo la temperatura de bulbo húmedo y seco se observa la humedad correspondiente como se muestra en la figura IV-4.

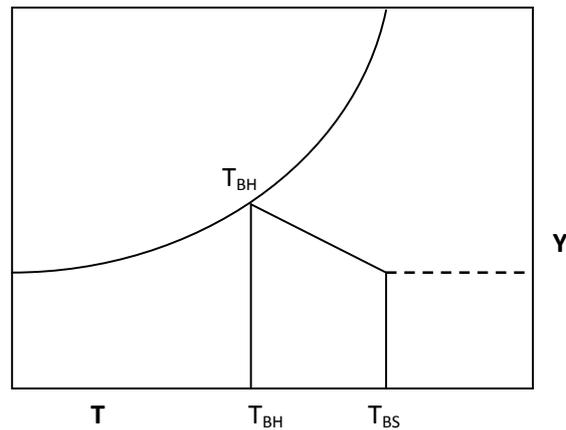


FIGURA IV-4. Obtención de la humedad del aire mediante la carta psicrométrica

4.2.3. Programa de cálculo de humedad

Existe un programa para computadora llamado “Vaisala Humidity Calculator” en el cuál solo necesitas saber la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire para que el programa nos indique la humedad absoluta, el punto de rocío y otras propiedades más.

El link de descarga así como la explicación del manejo del programa se pueden ver en el anexo H.

En éste trabajo la obtención de la humedad absoluta se hará utilizando la secuencia de cálculo explicada en el primer método.

4.3. ECUACIONES UTILIZADAS PARA REALIZAR EL BALANCE

Volumen Húmedo (ecuación 38).

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right) \frac{0.082 * T}{P}$$

P en atm y T en K

Calor Húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * Y$$

Caudal.

$$Ca = U_0 * A_0 [=] \frac{m^3}{s} \quad 44$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (C_H * T_{bs}) + (597 * Y)$$

Flujo másico.

$$G_s = \frac{Ca * 3600}{V_H} [=] \frac{Kg}{hr} \quad 45$$

Calor transferido.

$$Q = G_s(\Delta H) [=] \frac{Kcal}{hr} \quad 46$$

Ya que se ha especificado la manera en que se harán las mediciones y algunos cálculos a continuación se llevarán a cabo las diferentes operaciones que se pueden realizar en el acondicionamiento de aire.

4.4. CALENTAMIENTO DE AIRE

En el equipo de acondicionamiento de aire del laboratorio la operación unitaria del calentamiento se hace mediante dos pares de resistencias eléctricas colocadas en las secciones "B" y "F" como se muestra en la figura IV-5.

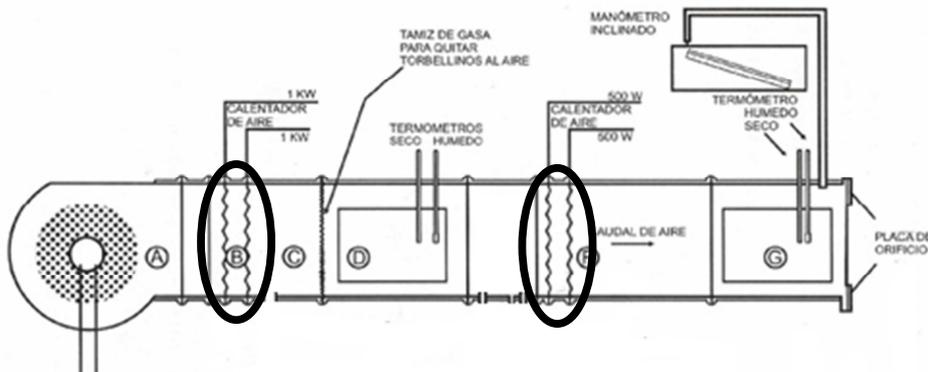


FIGURA IV-5. Calentamiento con cuatro resistencias, en la sección B son 2 de 1kW y en la sección F son 2 de 0.5kW

El aire circundante entra por la sección "A" mediante un ventilador a ciertas condiciones de temperatura y humedad y sale por la sección "G" con el mismo contenido de humedad pero a mayor temperatura ya que ha sido pasado a través del conjunto de resistencias para elevar su temperatura. Es decir, se ha calentado a humedad y presión constante.

Se puso a funcionar el equipo de acondicionamiento de aire prendiendo el ventilador y los dos pares de resistencias para calentar el aire a presión y humedad constante. La temperatura se midió a la entrada y a la salida, es decir, en las secciones "A" y "G" respectivamente. Figura IV-6

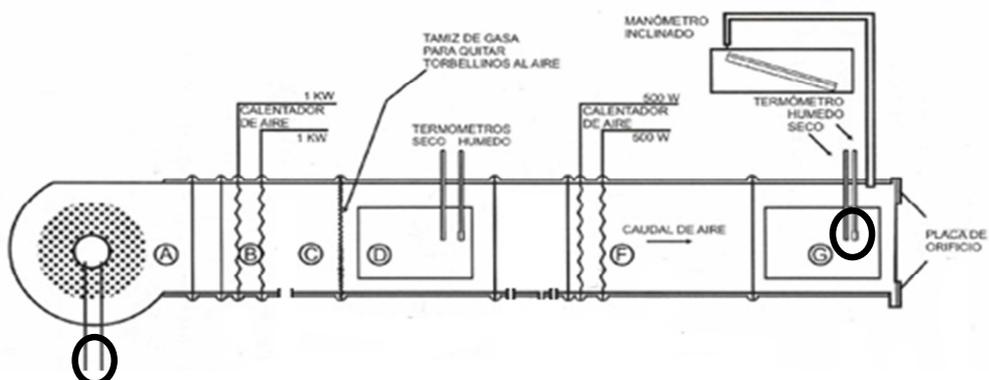


FIGURA IV-6. Medición de las condiciones del aire a la entrada en la sección A y a la salida en la sección G

La posición del reóstato que controla el ventilador se fijo en 60% obteniendo los siguientes datos después de 10 minutos.

Tiempo min	Entrada			Salida			ΔP mm H ₂ O	Uo m/s
	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)		
10	23	16	0.011	48	24	0.011	6.1	11.7

En la carta psicrométrica el proceso se lleva a cabo como se muestra en la figura IV-7

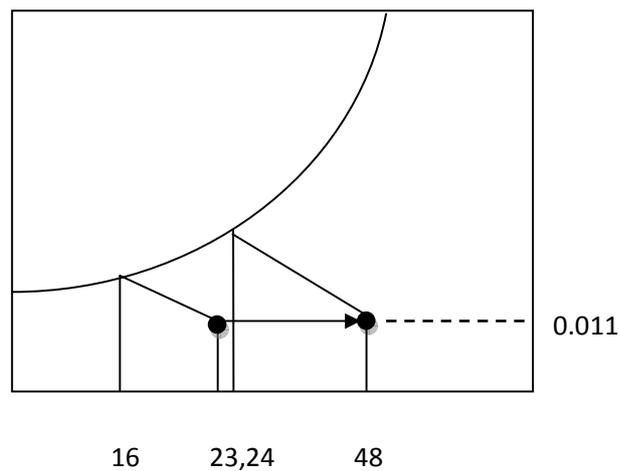


FIGURA IV-7. Calentamiento a humedad y presión constantes

Con estos datos la humedad relativa a la entrada es del 58% y a la salida es del 12% aproximadamente.

Cálculos

$$\Delta P_1 = 59.607 \text{ Pa}$$

$$P = 0.77 \text{ atm} = 585 \text{ mmHg}$$

$$T_{bs} = 321 \text{ K}$$

$$R = 0.082 \frac{\text{m}^3 * \text{atm}}{\text{Kmol} * \text{K}}$$

ENTRADA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^\circ = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{16+235}} = 13.627 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 13.627 - 0.5(23 - 16) = 10.127 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{10.127}{585 - 10.127} \right) = 0.011 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg } AS}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.011 = 0.245 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } AS \text{ } ^\circ C}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.245 * 23) + (597 * 0.011) = 12.163 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } AS}$$

SALIDA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^\circ = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{24+235}} = 22.376 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 22.376 - 0.5(48 - 24) = 10.376 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{10.376}{585 - 10.376} \right) = 0.011 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg AS}}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.011 = 0.245 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS } ^\circ\text{C}}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.245 * 48) + (597 * 0.011) = 18.459 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS}}$$

Volumen húmedo (ecuación 38).

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.011}{18} \right) * \frac{0.082(48 + 273)}{0.77} = 1.2 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg AS}}$$

Caudal (ecuación 44).

$$Ca = 11.7 * 0.018 = 0.211 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Flujo másico del aire (ecuación 45).

$$G_s = \frac{0.211 * 3600}{1.2} = 631.553 \frac{\text{Kg AS}}{\text{hr}}$$

Balance de Energía (ecuación 46).

$$Q = G_s(H_{Salida} - H_{Entrada})$$

$$Q = 631.553(18.459 - 12.163) = 3.976 \times 10^3 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

El balance de energía sale positivo porque estamos calentando el aire, es decir, es el calor ganado por el aire.

4.5. ENFRIAMIENTO DE AIRE

En el equipo de acondicionamiento de aire del laboratorio la operación unitaria del enfriamiento se hace mediante el ciclo de refrigeración por compresión del gas freón 12. Ver la figura IV-8.

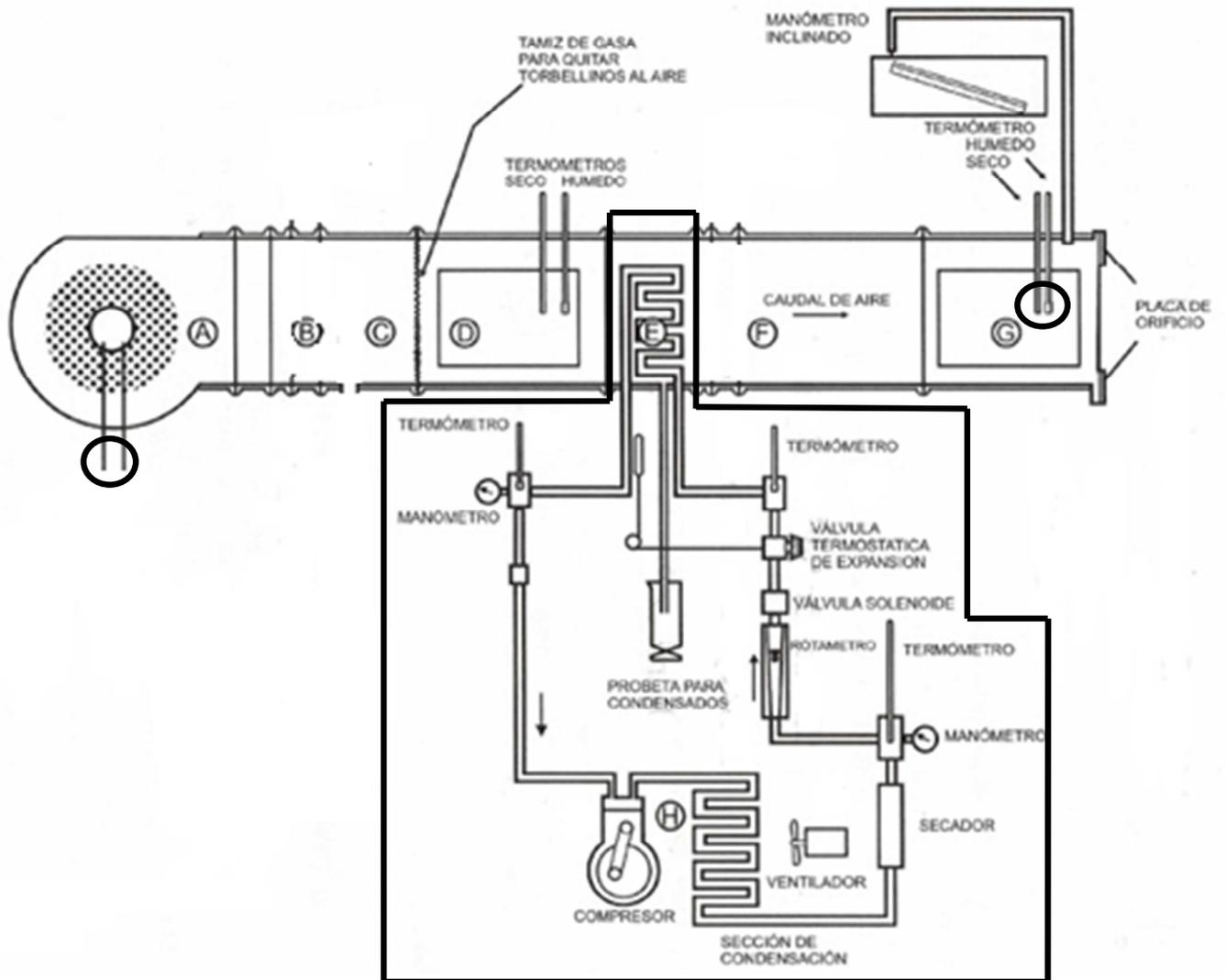


FIGURA IV-8. Circuito de refrigeración con 3 puntos de medición de temperatura y dos de presión

Al igual que en el caso anterior se pone a funcionar el equipo y se miden las temperaturas en los mismos puntos de entrada y salida. Se va a enfriar el aire a presión y humedad constante.

La posición del reóstato que controla el ventilador se fijo en 60% obteniendo los siguientes datos después de 10 minutos.

Tiempo	Entrada			Salida			ΔP	U_o
	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Y (Kg H2O/Kg AS)	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Y (Kg H2O/Kg AS)		
10	21	15	0.011	15	13	0.011	6.3	11.3

El proceso se puede seguir en la carta psicrométrica como se muestra en la figura IV-9.

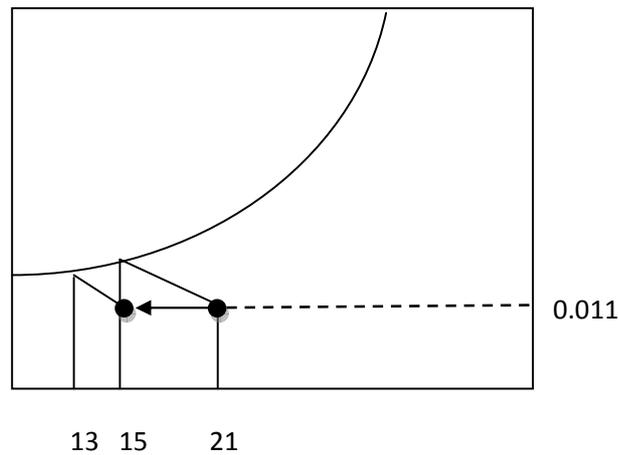


FIGURA IV-9 Enfriamiento a humedad y presión constantes

Con estos datos la humedad relativa a la entrada es del 60% y a la salida es del 80% aproximadamente.

Cálculos

ENTRADA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^{\circ} = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{15+235}} = 12.779 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 12.779 - 0.5(21 - 15) = 9.779 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{9.779}{585 - 9.779} \right) = 0.011 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg AS}}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.011 = 0.245 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS } ^{\circ}\text{C}}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.245 * 21) + (597 * 0.011) = 11.442 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS}}$$

SALIDA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^{\circ} = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{13+235}} = 11.221 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 11.221 - 0.5(15 - 13) = 10.221 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{10.221}{585 - 10.221} \right) = 0.011 \frac{Kg H_2O}{Kg AS}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.011 = 0.245 \frac{Kcal}{Kg AS ^\circ C}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.245 * 15) + (597 * 0.011) = 10.266 \frac{Kcal}{Kg AS}$$

Volumen húmedo (ecuación 38).

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.011}{18} \right) * \frac{0.082(15 + 273)}{0.77} = 1.077 \frac{m^3}{Kg AS}$$

Caudal (ecuación 44).

$$Ca = 11.3 * 0.018 = 0.203 \frac{m^3}{s}$$

Flujo másico del aire (ecuación 45).

$$G_s = \frac{0.203 * 3600}{1.077} = 680.036 \frac{Kg AS}{hr}$$

Balance de Energía (ecuación 46).

$$Q = G_s(H_{Salida} - H_{Entrada})$$

$$Q = 631.553(10.266 - 11.442) = -799.61 \frac{Kcal}{hr}$$

El balance de energía sale negativo porque estamos enfriando el aire, es decir, es el calor perdido por el aire.

4.6. HUMIDIFICACIÓN

En el equipo de acondicionamiento de aire del laboratorio la operación unitaria de la humidificación se hace con la adición de vapor de agua generado en un contenedor de agua que la calienta mediante 3 resistencias de inmersión de 1.5kW, ese vapor generado se mezcla con el aire que entra al equipo, esto se realiza como se muestra en la figura IV-10.

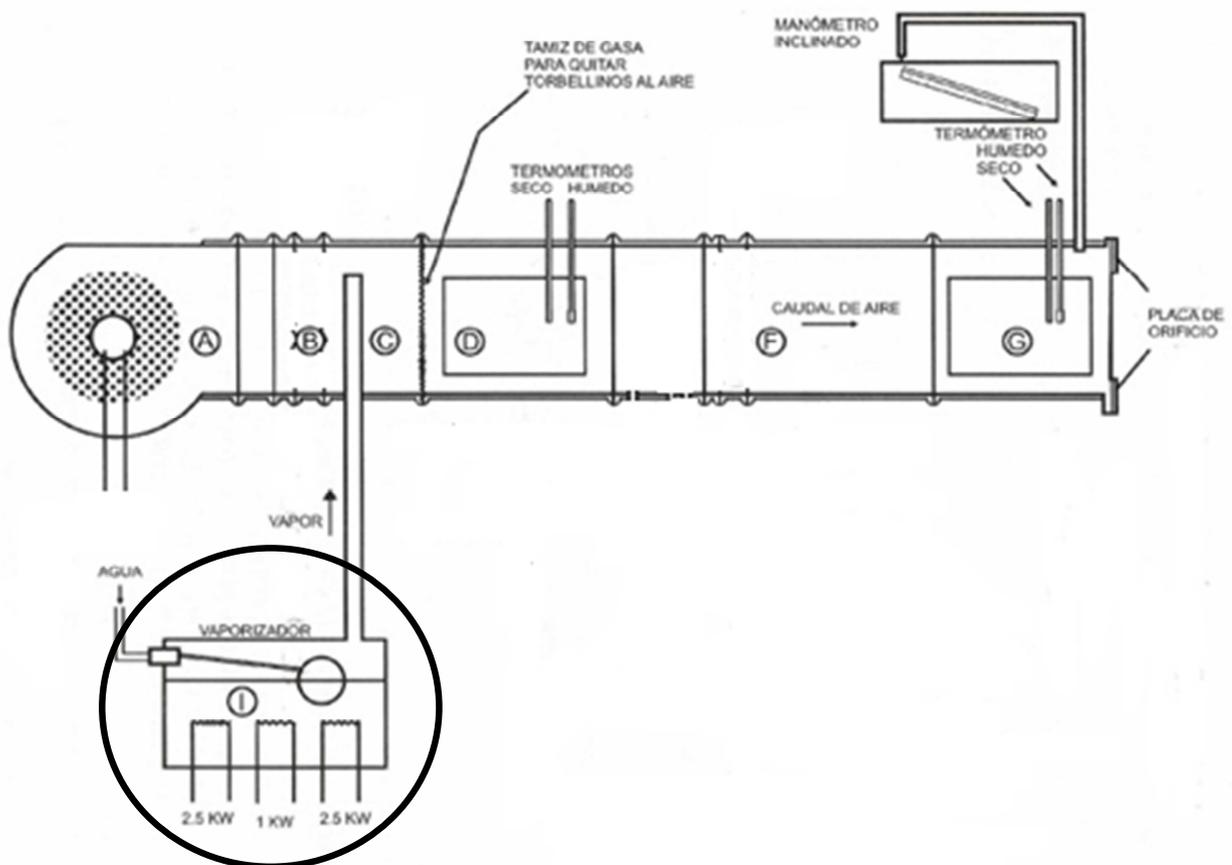


FIGURA IV-10. Generación de vapor para la humidificación

El aire circundante entra por la sección "A" mediante un ventilador a ciertas condiciones de temperatura y humedad y sale por la sección "G" con un mayor contenido de humedad y a mayor temperatura ya que para humidificar se adiciona vapor. Y nuevamente se midieron las temperaturas de entrada y salida en esos puntos mencionados para conocer la humedad del aire de entrada y salida.

La posición del reóstato que controla el ventilador se fijo en 60% obteniendo los siguientes datos después de 10 minutos.

Tiempo	Entrada			Salida			ΔP	Uo
	min	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Y (Kg H2O/Kg AS)	Tbs (°C)	Tbh (°C)		
10	21	14	0.009	25	22	0.02	6.3	11.4

En la carta psicrométrica el proceso se lleva a cabo como se muestra en la figura IV-11.

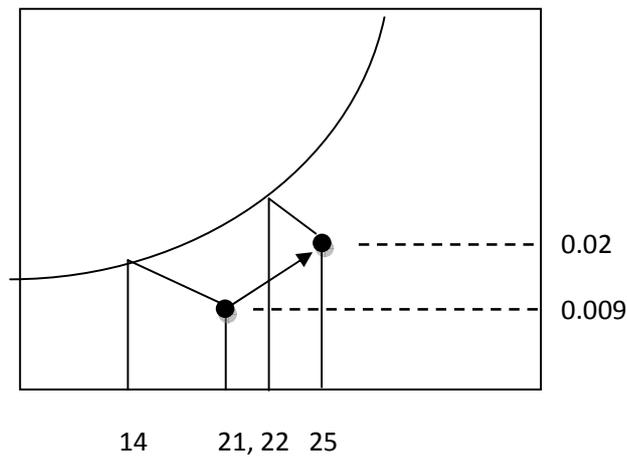


FIGURA IV-11. Humidificación con vapor de agua saturado

Con estos datos la humedad relativa a la entrada es del 45% y a la salida es del 75% aproximadamente.

Cálculos

ENTRADA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^{\circ} = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{14+235}} = 11.978 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 11.978 - 0.5(21 - 14) = 8.478 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{8.478}{585 - 8.478} \right) = 9.128 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg AS}}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 9.128 \times 10^{-3} = 0.244 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS } ^{\circ}\text{C}}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.244 * 21) + (597 * 9.128 \times 10^{-3}) = 10.577 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg AS}}$$

SALIDA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^{\circ} = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{22+235}} = 19.824 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 19.824 - 0.5(25 - 22) = 18.324 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{18.324}{585 - 18.324} \right) = 0.02 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg AS}}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.02 = 0.249 \frac{Kcal}{Kg AS ^\circ C}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.249 * 25) + (597 * 0.02) = 18.213 \frac{Kcal}{Kg AS}$$

Volumen húmedo (ecuación 38).

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.02}{18} \right) * \frac{0.082(25 + 273)}{0.77} = 1.13 \frac{m^3}{Kg AS}$$

Caudal (ecuación 44).

$$Ca = 11.4 * 0.018 = 0.205 \frac{m^3}{s}$$

Flujo másico del aire (ecuación 45).

$$G_s = \frac{0.205 * 3600}{1.13} = 653.658 \frac{Kg AS}{hr}$$

Agua evaporada

$$G_v = G_s(Y_{Salida} - Y_{Entrada})$$

47

$$G_v = 653.658(0.02 - 9.128 \times 10^{-3}) = 7.153 \frac{Kg H_2O}{hr}$$

Balance de Energía

Calor que recibe el aire (ecuación 46)

$$Q = G_s(H_{Salida} - H_{Entrada})$$

$$Q = 653.658(18.213 - 10.577) = 4.991 \times 10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Calor latente de vaporización del agua

$$\lambda = 636 \frac{Kcal}{Kg H_2O}$$

Calor proporcionado por el vapor

$$Q_v = G_v * \lambda$$

48

$$Q_v = 7.153 * 636 = 4.55x10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Calor de las resistencias para generar el vapor (son 3 resistencias de 1.5kW = 4.5kW)

$$Q_r = 4.5 * (860.4)^{&2} = 3.871x10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Calor que cede el vapor

$$Q_c = Q_v + Q_r$$

49

$$Q_c = Q_v + Q_r = 4.55x10^3 + 3.871x10^3 = 8.421x10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Calor que se pierde por los alrededores del generador de vapor por no estar aislado

$$Q_a = Q_c - Q = 8.421x10^3 - 4.991x10^3 = 3.43x10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

4.7. DESHUMIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

En el equipo de acondicionamiento de aire del laboratorio la operación unitaria de la deshumidificación sólo se puede realizar quitando agua del aire mediante una condensación lo cuál requiere que se enfríe el aire. Como el aire ambiental no es tan húmedo es conveniente humidificarlo antes de hacer este experimento.

Primero se humidifica el aire adicionando vapor y en la sección "D" se tomaran los datos de temperatura para fijar ahí nuestro aire de entrada y a la salida seguirá siendo la sección "G".

Ese aire que esta húmedo debe llevarse a condiciones de saturación para obtener la condensación, es decir, se enfriará con el circuito de refrigeración hasta el punto de rocío para deshumidificarlo.

Esta operación se muestra en la figura IV-12.

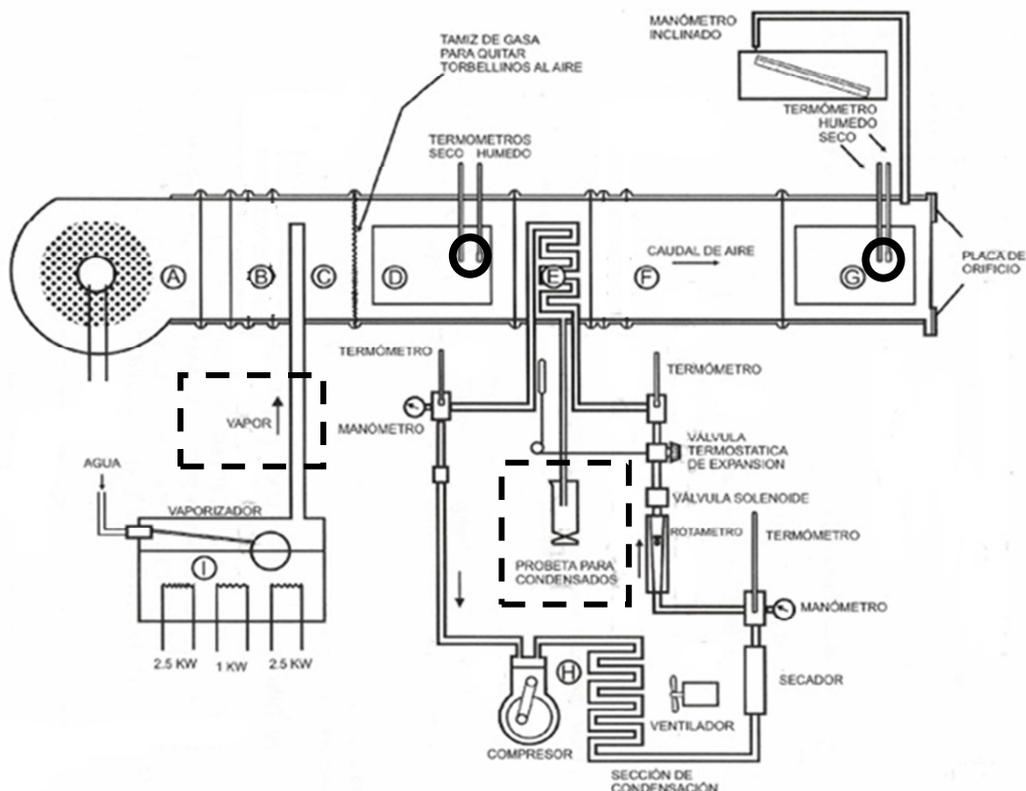


FIGURA IV-12. El aire de entrada es un aire humedecido previamente en la sección C y se deshumidifica en la sección E

La posición del reóstato que controla el ventilador se fijo en 30% obteniendo los siguientes datos después de 10 minutos.

Tiempo min	Entrada			Salida			ΔP (mmH ₂ O)	U (m/s)
	T _{bs} (°C)	T _{bh} (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)	T _{bs} (°C)	T _{bh} (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)		
10	34	28	0.028	20	20	0.019	0.8	4.1

En la carta psicrométrica el proceso se lleva a cabo como se muestra en la figura IV-13

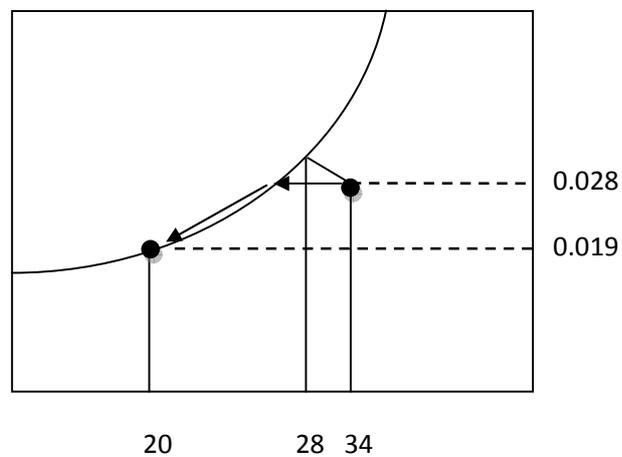


FIGURA IV-13. Enfriamiento y deshumidificación

Con estos datos la humedad relativa a la entrada es del 65% y a la salida es del 100% aproximadamente.

Cálculos

ENTRADA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^{\circ} = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{28+235}} = 28.351 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 28.351 - 0.5(34 - 28) = 25.351 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{25.351}{585 - 25.351} \right) = 0.028 \frac{Kg H_2O}{Kg AS}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.028 = 0.253 \frac{Kcal}{Kg AS ^\circ C}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.253 * 34) + (597 * 0.028) = 25.385 \frac{Kcal}{Kg AS}$$

SALIDA

Presión de vapor (ecuación 43).

$$P^\circ = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{20+235}} = 17.53 \text{ mmHg}$$

Presión parcial (ecuación 33).

$$\tilde{P} = 17.53 - 0.5(20 - 20) = 17.53 \text{ mmHg}$$

Humedad (ecuación 37).

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{17.53}{585 - 17.53} \right) = 0.019 \frac{Kg H_2O}{Kg AS}$$

Calor húmedo (ecuación 39).

$$C_H = 0.24 + 0.46 * 0.019 = 0.249 \frac{Kcal}{Kg AS ^\circ C}$$

Entalpía (ecuación 40).

$$H = (0.249 * 20) + (597 * 0.019) = 16.423 \frac{Kcal}{Kg AS}$$

Volumen húmedo (ecuación 38).

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{0.019}{18} \right) * \frac{0.082(20 + 273)}{0.77} = 1.11 \frac{m^3}{Kg AS}$$

Caudal (ecuación 44).

$$Ca = 4.1 * 0.018 = 0.074 \frac{m^3}{s}$$

Flujo másico del aire (ecuación 45).

$$G_s = \frac{0.074 * 3600}{1.11} = 239.444 \frac{Kg AS}{hr}$$

Agua condensada

$$L = G_s(Y_{Entrada} - Y_{Salida})$$

50

$$L = 239.444 (0.028 - 0.019) = 2.141 \frac{Kg H_2O}{hr}$$

Condensado que se midió

$$vol = 100 mL$$

$$t = 175 s$$

$$L_m = \frac{vol}{t}$$

51

$$L_m = \frac{vol}{t} \left(\frac{3600}{1000} \right) = 2.057 \frac{L}{hr}$$

Diferencia del condensado medido y teórico

$$\Delta L = L - L_m = 0.084 \frac{L}{hr}$$

Balance de energía (ecuación 46).

$$Q = G_s(H_{Salida} - H_{Entrada})$$

$$Q = 239.444 (16.423 - 25.385) = -2.146 \times 10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

4.8. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN

En el ciclo de refrigeración por compresión existen dos fenómenos:

- 1.- Al evaporarse un refrigerante líquido, éste absorbe calor, fenómeno que hace bajar la temperatura del ambiente que lo rodea.
- 2.- Al condensarse el vapor refrigerante, cede calor que elevará la temperatura del ambiente que lo rodea.

La figura IV-14 representa un ciclo de refrigeración por compresión donde el refrigerante líquido, a la presión P_2 se expande a través de una válvula de estrangulamiento; esto trae como resultado que parte del líquido se evapore y la substancia que entra en el evaporador es una mezcla de líquido y vapor a la presión P_1 . P_2 es mayor a P_1 .

En el evaporador, el calor se absorbe de la región que desea enfriarse y el líquido que entró en el mismo experimenta la vaporización a la temperatura t_1 .

Los vapores se comprimen a una P_2 y se condensan a la temperatura t_2 con cesión de calor

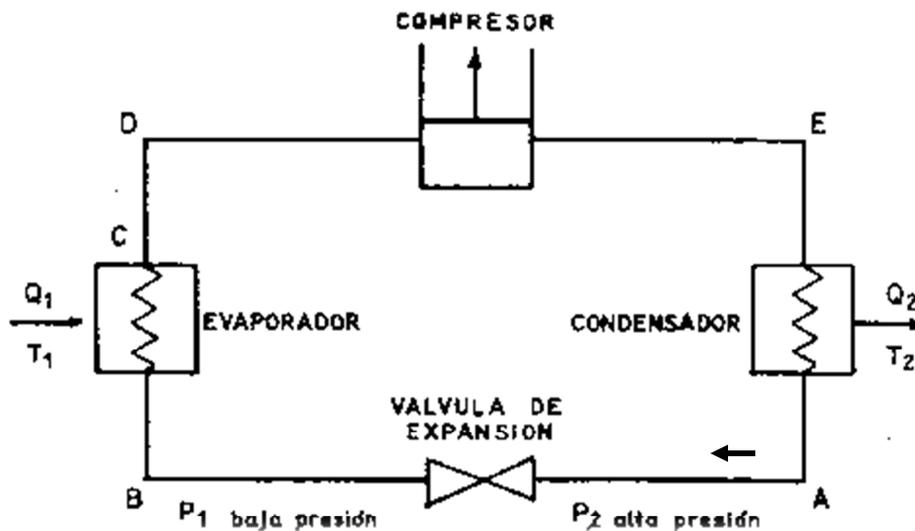


FIGURA IV-14. Ciclo de refrigeración por compresión

En la figura IV-15 podemos observar el ciclo de refrigeración con el que cuenta el equipo de acondicionamiento de aire que tiene tres puntos de medición para temperatura y dos puntos de medición para la presión

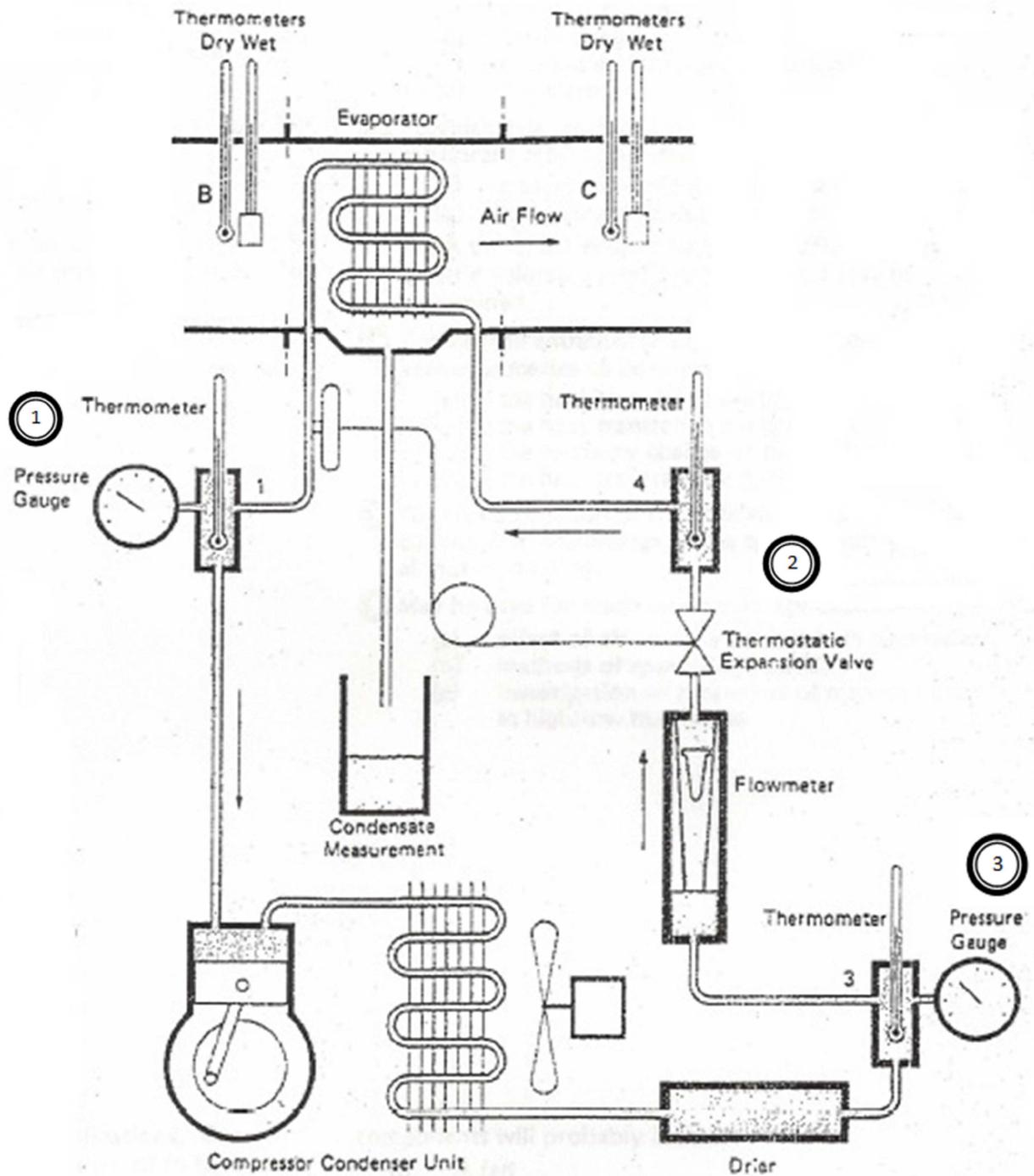


FIGURA IV-15. Circuito refrigerante del gas freón 12

REFRIGERACION					
T1 (°C)	P1 (KN)	T2 (°C)	T3 (°C)	P3 (KN)	Flujo (Kg/h)
-5	195	-4	30	890	42

Cálculos

Flujo másico del refrigerante

$$M = 42 \frac{Kg}{hr} = 92.4 \frac{lb}{hr}$$

Presión alta

$$P_A = 890 * (0.1450)^{0.83} = 129.535 \frac{lb}{in^2}$$

Presión baja

$$P_B = 195 * (0.1450)^{0.83} = 28.381 \frac{lb}{in^2}$$

En la figura IV-16 se muestra el ciclo de refrigeración y el diagrama P vs H del gas refrigerante con el cual se obtuvieron los datos de temperatura, presión y entalpía para hacer el balance de energía y calcular la potencia del compresor que debe ser de 0.5 Hp de acuerdo a la especificación del equipo.

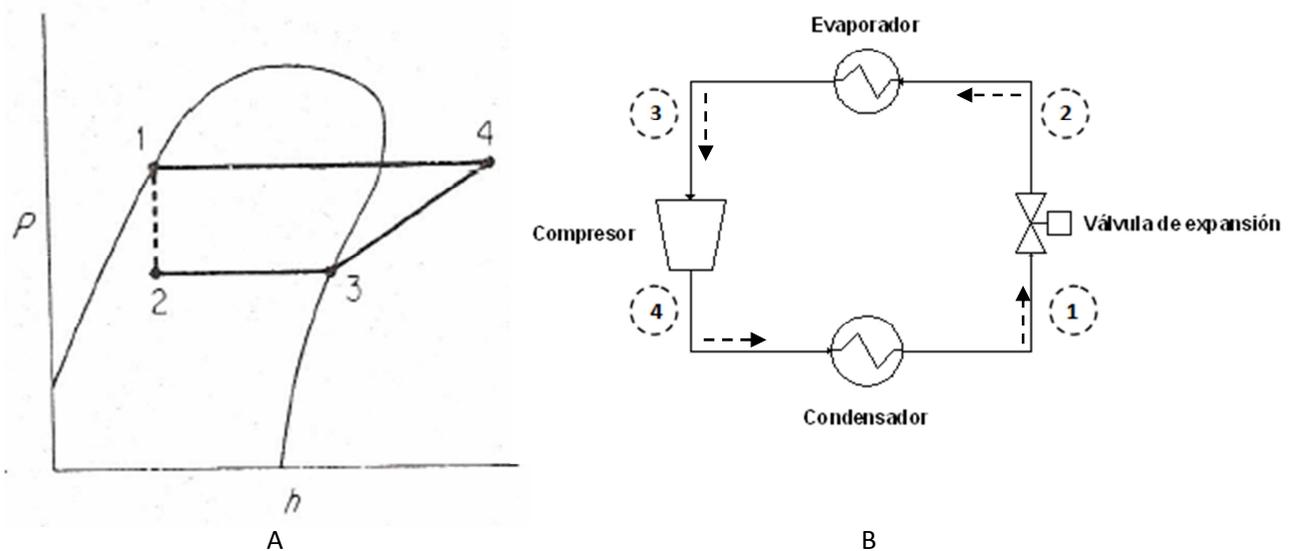


FIGURA IV-16. A) Diagrama presión entalpía. B) Representación del ciclo de refrigeración

De acuerdo al diagrama de Mollier para el gas refrigerante freón 12 (ver el anexo I) se obtuvieron los siguientes datos.

PUNTO	P (lb/in ²)	T (°C)	H (Btu/lb)
1	129	37	30
2	28	-6	30
3	28	-6	80
4	129	60	94

Cálculos

Calor del evaporador

$$Q_E = M(H_3 - H_2) \quad 52$$

$$Q_E = M(H_3 - H_2) * (0.252)^{\&4} = 92.4(80 - 30)(0.252) = 1.164 \times 10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Calor del condensador

$$Q_C = M(H_4 - H_1) \quad 53$$

$$Q_C = M(H_4 - H_1) * (0.252)^{\&4} = 92.4(94 - 30)(0.252) = 1.49 \times 10^3 \frac{Kcal}{hr}$$

Potencia del compresor

$$P = M(H_4 - H_3) \quad 54$$

$$P_C = M(H_4 - H_3) * (0.252)^{\&4} = 92.4(94 - 80)(0.252) = 325.98 \frac{Kcal}{hr}$$

$$P_C = 325.98 * (0.001557)^{\&5} = 0.508 Hp$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Éste trabajo tiene por objetivo implementar nuevamente el uso del equipo de acondicionamiento de aire que esta en el Laboratorio de Ingeniería Química. Éste equipo tiene varios años sin ser usado debido a la falta de un guión experimental y mi trabajo consistió en hacer varios experimentos para comprobar que el equipo, a pesar de tener muchos años sigue dando buenos resultados que son útiles para el aprendizaje de los alumnos y se pueda entonces validar un guión experimental.

Implementando éste guión experimental como una práctica más para el curso de Laboratorio de Ingeniería Química I (ver el anexo J) ó Laboratorio de Ingeniería Química III (ver el anexo K). El equipo puede ser usado en la enseñanza de las operaciones unitarias, procesos de separación, operaciones aire – agua, transferencia de masa, balances de materia y balances de energía aplicados a procesos prácticos que en el equipo de acondicionamiento de aire se pueden realizar.

Éste trabajo posiblemente sea un incentivo para darle uso al equipo de acondicionamiento de aire, porque considero que ya fue probado su buen funcionamiento en el Laboratorio de Ingeniería Química (ver el anexo L).

En el caso exitoso de mi tesis en el que se apruebe el guión experimental recomiendo el uso de un psicrómetro digital para obtener las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo porque en muchas ocasiones no se puede hacer una buena lectura con el termómetro de mercurio ya que el mercurio se queda entre 2 valores y no podemos decir con seguridad la temperatura real y entonces es cuando se hace un redondeo en el valor de la temperatura que afecta todos los cálculos y que al final se reflejan en el balance.

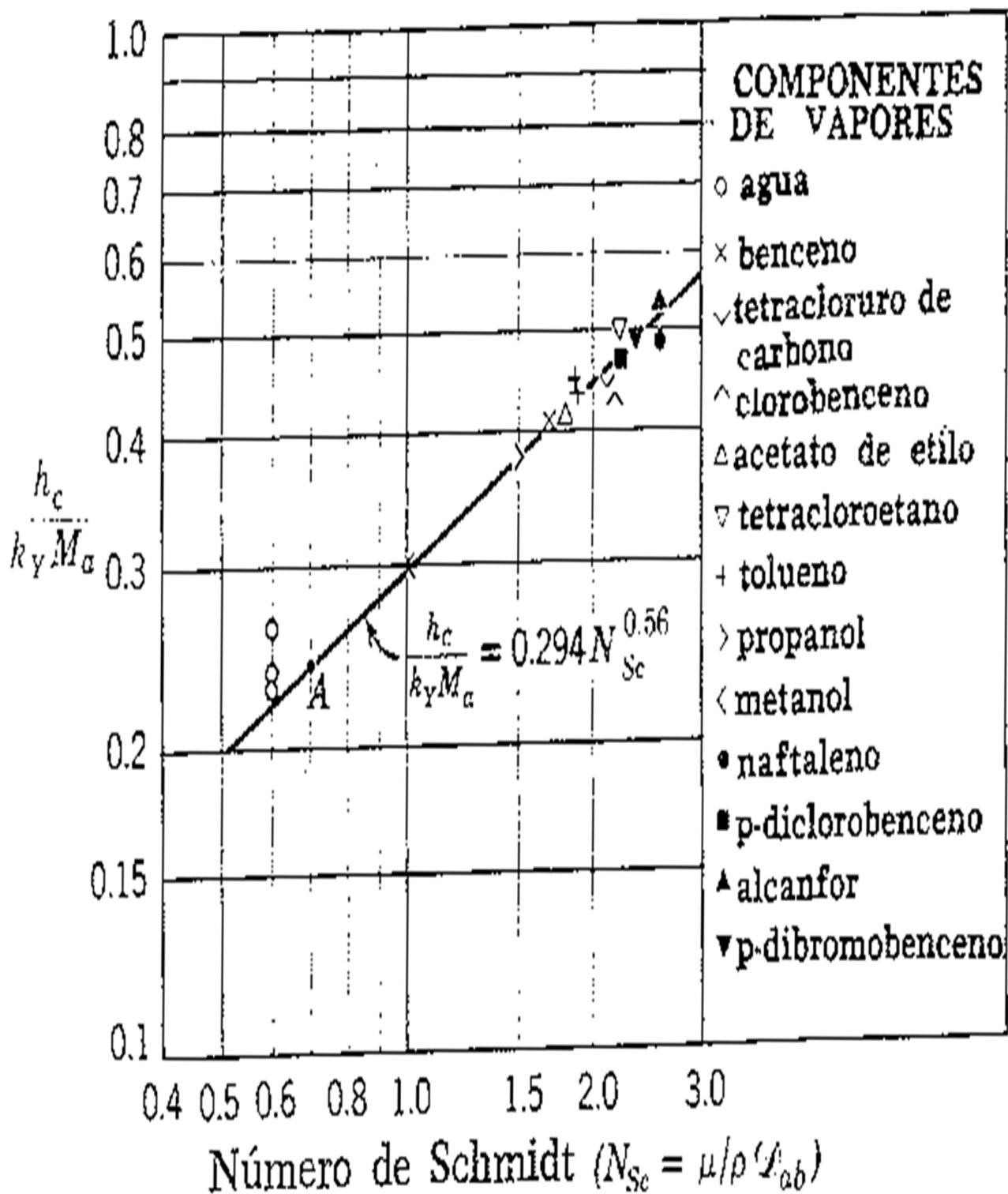
De igual manera pasa con la carta psicrométrica, solo nos proporciona un valor cercano de humedad absoluta por eso recomiendo que la humedad absoluta sea obtenida mediante los cálculos de presión de vapor y presión parcial para tratar de disminuir los errores en los cálculos para que así el balance sea correcto.

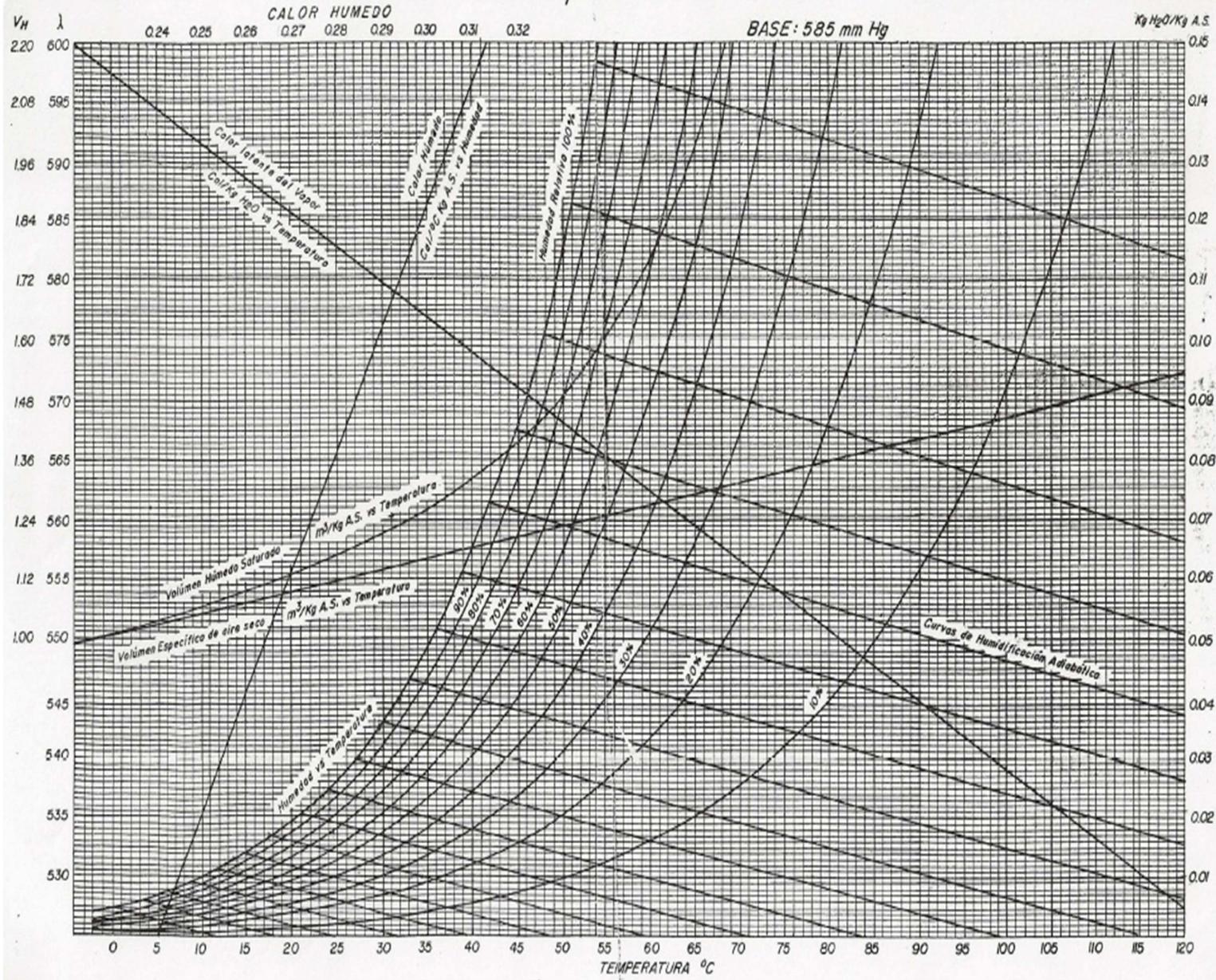
ANEXOS

ANEXO A. TABLA DE PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA

<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg	<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg	<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg
-15	1,436	38	49,692	91	546,05
-14	1,560	39	52,442	92	566,99
-13	1,691	40	55,324	93	588,60
-12	1,834	41	58,345	94	610,90
-11	1,987	42	61,504	95	633,90
-10	2,149	43	64,80	96	657,62
-9	2,326	44	68,26	97	682,07
-8	2,514	45	71,882	98	707,27
-7	2,715	46	75,65	99	733,24
-6	2,931	47	79,60	100	760,00
-5	3,163	48	83,71	101	787,57
-4	3,410	49	88,02	102	815,86
-3	3,673	50	92,511	103	845,12
-2	3,956	51	97,20	104	875,06
-1	4,258	52	102,09	105	906,07
0	4,579	53	107,20	106	937,92
1	4,926	54	112,51	107	970,60
2	5,294	55	118,04	108	1 004,42
3	5,685	56	123,80	109	1 038,92
4	6,101	57	129,82	110	1074,56
5	6,543	58	136,08	111	1111,20
6	7,013	59	142,60	112	1148,74
7	7,513	60	149,38	113	1187,42
8	8,045	61	156,43	114	1227,25
9	8,609	62	163,77	115	1267,98
10	9,209	63	171,38	120	1 489,14
11	9,844	64	179,31	125	1 740,93
12	10,518	65	187,54	130	2 026,10
13	11,231	66	196,09	135	2 347,26
14	11,987	67	204,96	140	2 710,92
15	12,788	68	214,17	145	3 116,76
16	13,634	69	223,73	150	3 570,48
17	14,530	70	233,71	175	6 694,08
18	15,477	71	243,9	200	11 659,16
19	16,477	72	254,6	225	19 123,12
20	17,535	73	265,7	250	29 817,84
21	18,650	74	277,2	275	44 580,84
22	19,827	75	289,10	300	64 432,8
23	21,068	76	301,4	325	90 447,6
24	22,377	77	314,1	350	124 001,6
25	23,756	78	327,3	360	139 893,2
26	25,209	79	341,0	365	148 519,2
27	26,739	80	355,11	366	150 320,4
28	28,349	81	369,7	367	152 129,2
29	30,043	82	384,9	368	153 960,8
30	31,824	83	400,6	369	155 815,2
31	33,695	84	416,8	370	157 692,4
32	35,663	85	433,62	371	159 594,8
33	37,729	86	450,9	372	161 507,6
34	39,898	87	468,7	373	163 468,4
35	42,175	88	487,1	374	165 467,2
36	44,563	89	506,1	374,11	165 808,0
37	47,067	90	525,76		

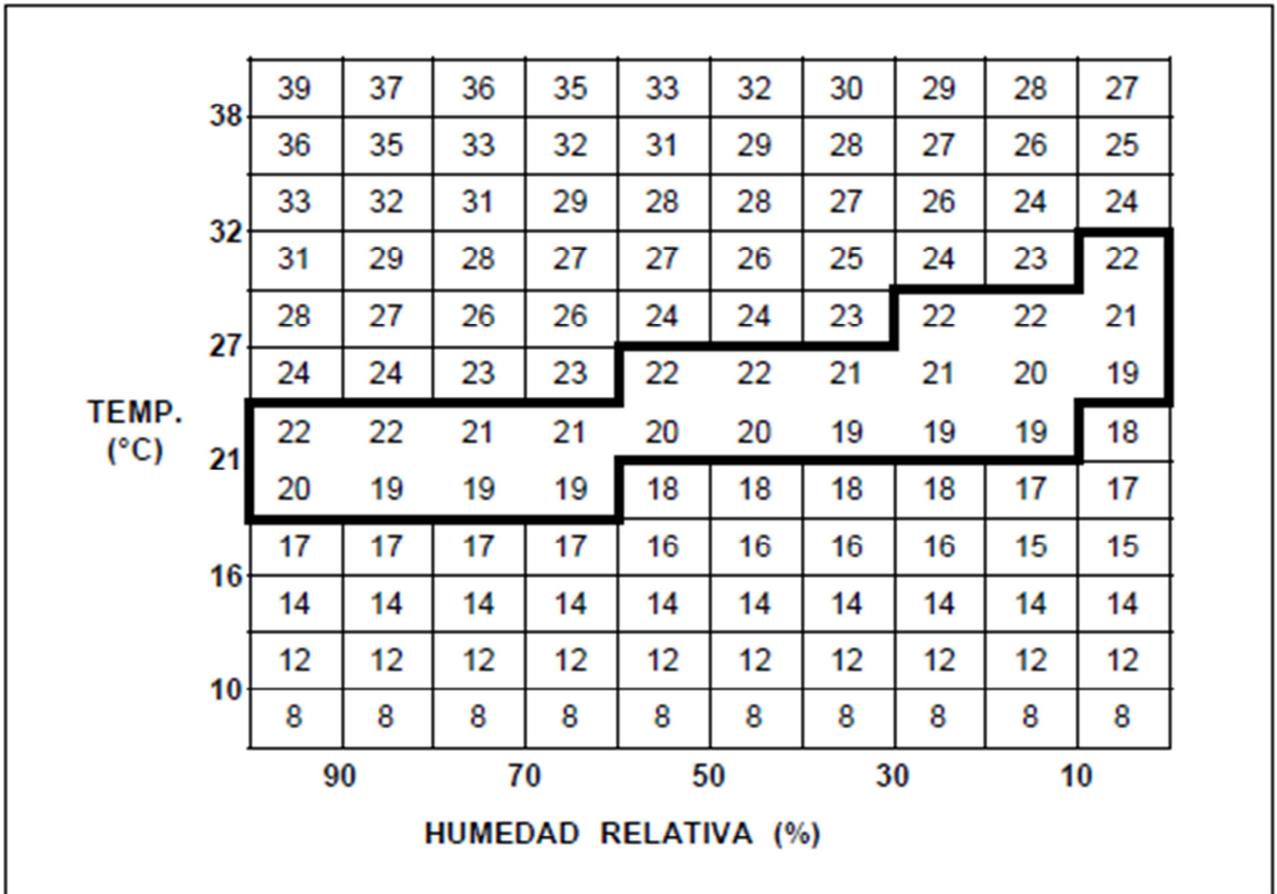
ANEXO B. OBTENCIÓN DE LA RELACION DE LEWIS





ANEXO C. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO AIRE-AGUA P = 585mmHg

ANEXO D. CARTA DE TEMPERATURA EFECTIVA

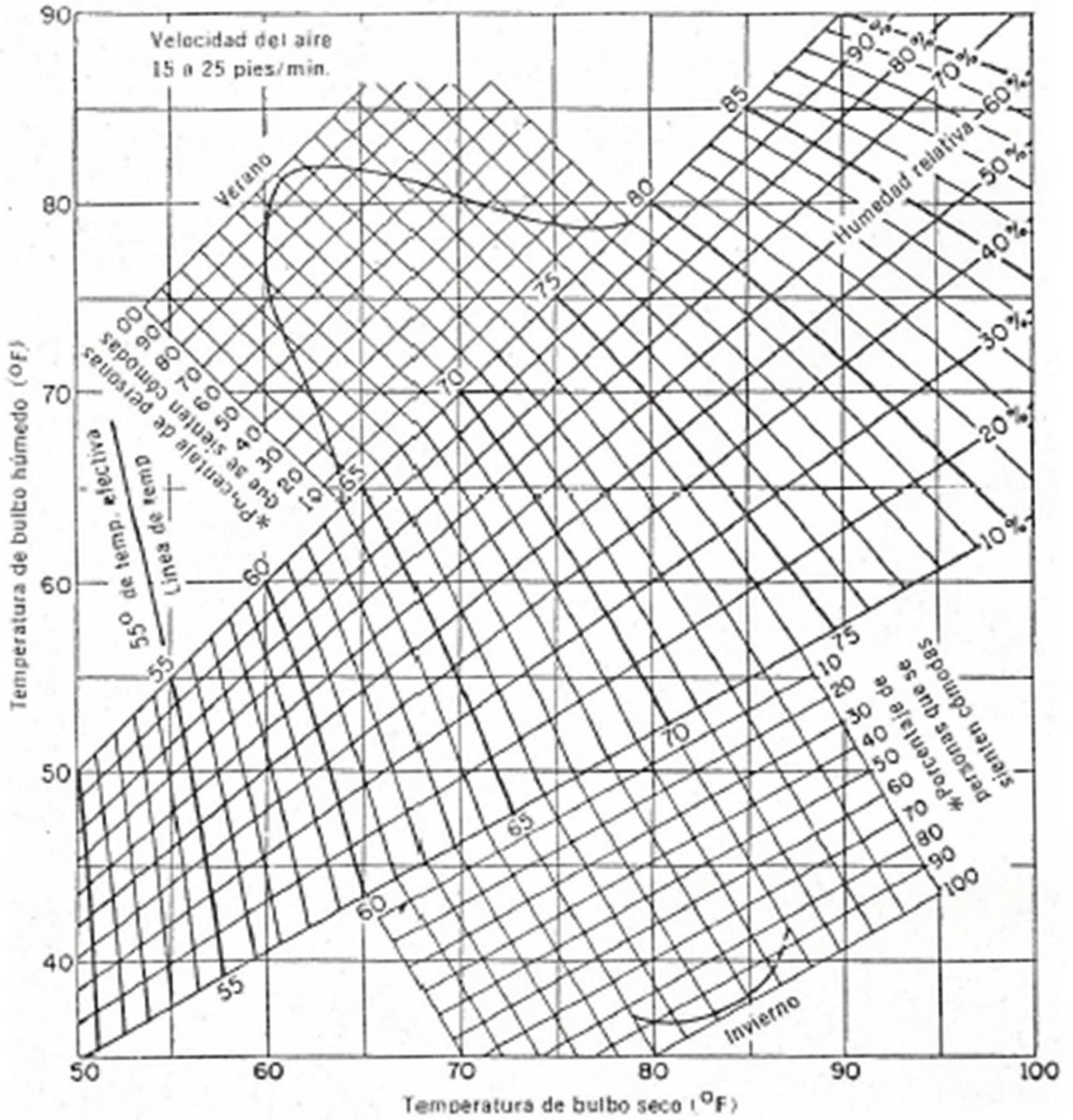


Nótese la zona de confort. El área delineada, indica el rango usual de temperaturas y humedades, en el cual la mayoría de la gente se siente confortable. Nótese también, que con una alta humedad relativa, uno está confortable a menor temperatura, que a una temperatura deseada a condiciones de baja humedad relativa.

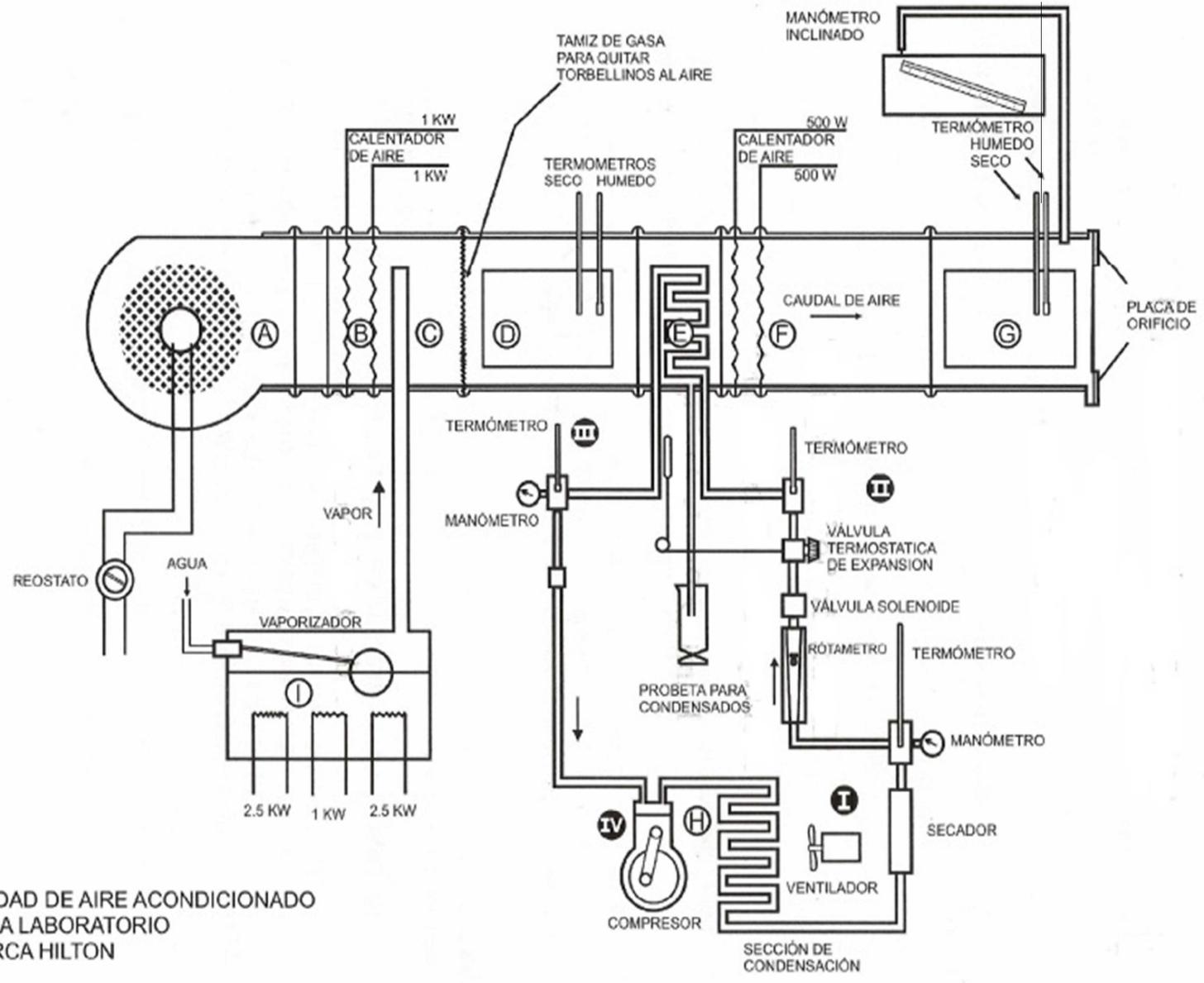
ANEXO E. VENTILACIÓN RECOMENDADA PARA DIFERENTES LUGARES

APLICACION	Humo de cigarros	M³/min por persona	M³/min mínimos de aire por m² de techo
Departamentos	poco	0.85	0.1
Bancos	poco	0.3	0.1
Peluquerías	considerable	0.4	0.1
Salones de belleza	ocasional	0.3	0.1
Bares	mucho	0.85	0.1
Salas de juntas	excesivo	1.5	0.1
Corredores			0.075
Tiendas de departamento		0.2	0.015
Garajes			0.3
Fábricas	nada	0.3	0.03
Cafeterías	Considerable	0.3	0.1
Habitaciones de hotel	Mucho	0.85	0.1
Cocinas de restaurantes			1.2
Quirófanos de hospitales	Nada	0.85	0.6
Laboratorios	Nada	0.6	0.1
Restaurantes	Considerable	0.85	0.075
Teatros	Nada	0.2	
Salones de clase	Poco	0.3	0.1
Oficinas generales	Poco	0.4	0.07
Oficinas privadas	Considerable	0.8	0.075
Tocadores (baños públicos)			0.6
Salones de reunión	Mucho	1.4	0.4
Funerarias(salones)	Nada	0.3	0.1

ANEXO F. CARTA DE COMODIDAD



**ANEXO G. DIAGRAMA DEL EQUIPO DE
ACONDICIONAMIENTO DE AIRE**



UNIDAD DE AIRE ACONDICIONADO
PARA LABORATORIO
MARCA HILTON

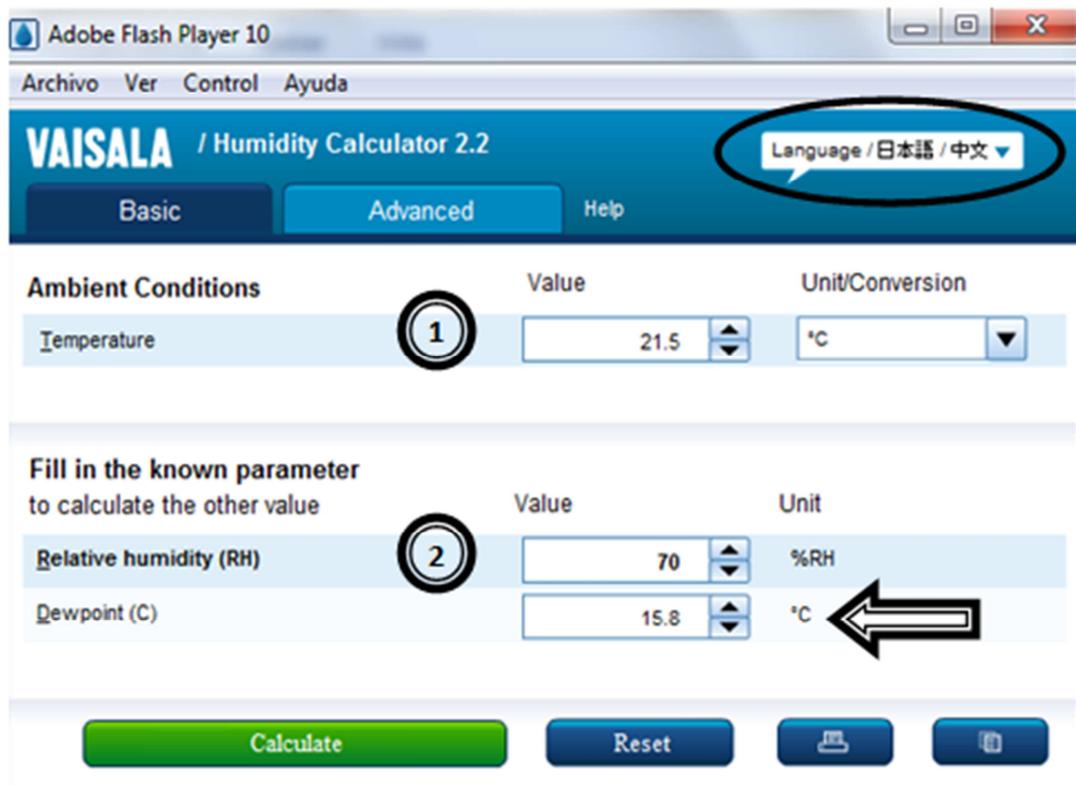
ANEXO H. VAISALA HUMIDITY CALCULATOR

El enlace de descarga es:

http://lib.giveawayoftheday.com/Vaisala_Humidity_Calculator_166763/download/

Una vez que ha sido instalado el programa lo abrimos y aparece la siguiente ventana, lo primero es seleccionar el idioma; por ejemplo inglés.

En la pestaña “básico” podemos establecer las condiciones ambientales especificando: 1) El valor de la temperatura y su unidad. 2) La humedad relativa. Después apretamos “enter” y las celdas se ponen de color verde lo cual indica que los valores se guardaron en la memoria de cálculo del programa y al apretar nuevamente “enter” nos proporciona el cálculo de la temperatura de rocío en °C. Si queremos cambiar de valores podemos dar reiniciar y se borran los datos de la memoria de cálculo.



En la pestaña “avanzado” es donde podemos conocer la humedad absoluta de la mezcla que tenemos para ello debemos especificar: 1) Temperatura de bulbo seco y su unidad. 2) Presión atmosférica y su unidad. 3) El tipo de gas con el que esta mezclado el vapor de agua. 4) El tipo de psicrómetro. 5) la humedad relativa. Nuevamente apretamos “enter” dos veces y obtenemos una serie de datos. La que dice humedad absoluta (a) es la cantidad de vapor de agua que esta contenida en cierto volumen de gas y la proporción de la mezcla (x) es la humedad másica que en este trabajo fue definida como humedad absoluta pero el programa solo nos da las unidades de gramos de vapor por kilogramo de aire seco; solamente hay que dividir este valor entre mil para obtener las unidades que manejamos de humedad absoluta que son Kg vapor/Kg A.S.

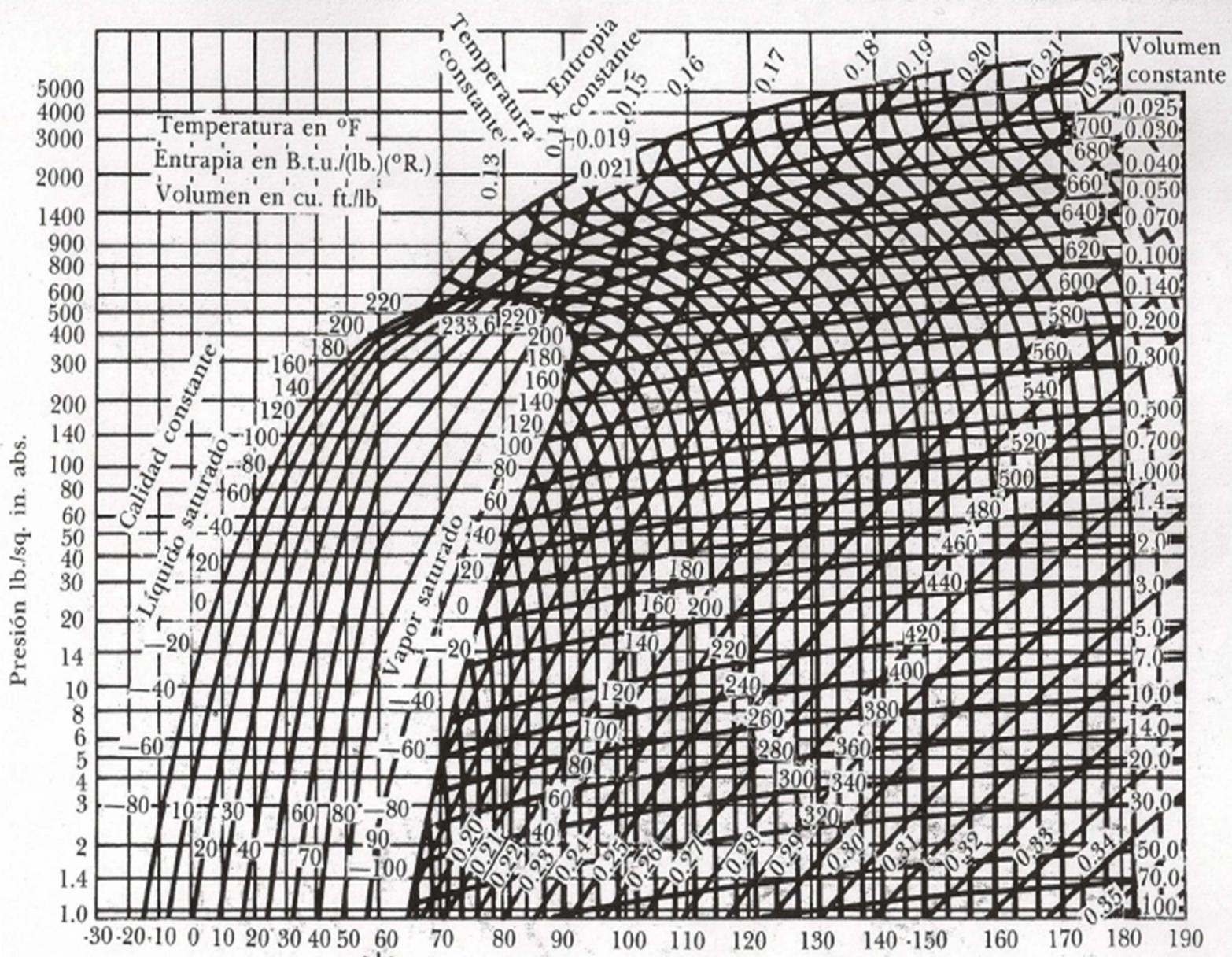
VAISALA / Humidity Calculator 2.2 Language / 日本語 / 中文

Basic **Advanced** Help

Ambient Conditions	Value	Unit/Conversion
Temperature	22	°C
Pressure	585	mmHg/torr
Gas type	Air	Add new
Psychrometer	Standard	Add new

Fill in the known parameter to calculate other values	Value	Unit/Conversion
Relative humidity (RH)	60	%RH
Dewpoint (°C)	13.883	Tdew/Tfrost
Parts per million (ppm)	20818.24	PPMvol
Absolute humidity (a)	11.67689	g/m ³
Mixing ratio (x)	12.94875	g/kg
Water content (w)	968.19	lb/MMscf
Vapor pressure (pw)	15.90572	mbar
Wet bulb	16.457	°C
Saturation vapor pressure (pws)	26.51	mbar

Calculate Reset



ANEXO I. DIAGRAMA DE MOLLIER PARA EL FREÓN 12

ANEXO J. GUIÓN EXPERIMENTAL DE MARIA LUISA GALICIA PINEDA

Balances de Materia y Energía en un equipo de acondicionamiento de aire.

(Psicrometría)

Objetivo Académico

Que el alumno aplique los balances de materia y energía en operación de humidificación, calentamiento y enfriamiento implícitas en una operación de acondicionamiento de aire.

Adquirir la capacidad en el manejo de las variables involucradas en el acondicionamiento de aire en la resolución de problemas específicos.

1. PROBLEMA

En un laboratorio de microbiología se desea una corriente de aire con una humedad relativa del 40% a una temperatura de 28°C. Encuentre las condiciones de operación del equipo de aire acondicionado que cumplan estas características.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Medidas de higiene y seguridad

- Trabajar con una caída de presión mínima de 5 mmH₂O en el manómetro inclinado.
- Mantener encendido el ventilador durante toda la operación del equipo, siendo el último en apagarse.
- Una vez funcionando el vaporizador, tener cuidado de no acercarse mucho o tocar el contenedor de agua, ya que puede provocar quemaduras.
- Mantener los termómetros de bulbo húmedo siempre húmedos con agua destilada.

2.2 Materiales

- Cronómetro
- Psicrómetro
- Carta psicométrica a 585mmHg.
- 5 termómetros de bulbo seco
- 2 termómetros de bulbo húmedo
- 4 tapones de hule
- Probeta de 1L
- Probeta de 100ml

2.3 Sustancias

- Piseta con agua destilada.

2.4 Servicios Auxiliares

- Corriente eléctrica.

2.5 Descripción del equipo

Unidad de aire acondicionado para laboratorio P.A. Hilton LTD.

El equipo consta de las siguientes secciones:

1. Sistema de aire.

1.1. Ventilador con control de velocidad (reóstato) en la sección A.

1.2. Resistencias para calentamiento de aire en las secciones B y F, de 1kW y 0.5kW respectivamente. Cuentan con voltímetro y amperímetro en la parte posterior del equipo.

1.3. Humidificación con vapor en la sección C.

1.4. Medición de flujo de aire en la sección G con placa de orificio y manómetro inclinado de agua. El manómetro inclinado tiene una desviación de 0.25.

1.5. Orificios para colocar termómetros de bulbo húmedo y seco en las secciones D y G.

1.6. Manguera para agua condensada.

1.7. El ducto es de sección cuadrada de 254mm de lado.

2. Sistema de refrigeración:

2.1. Sección I, zona de condensación. Consta de las siguientes partes: ventilador, secador, manómetro, rotámetro y termopozo.

2.2. Sección II, zona de expansión. Consta de las siguientes partes: válvula de solenoide, válvula termostática de expansión y termopozo.

2.3. Sección III, zona de evaporación. Consta de las siguientes partes: sección E del ducto de aire, manómetro y termopozo.

2.4. Sección IV, zona de compresión. Equipo compresor-condensador en la sección H de 0.5 H.P.

2.5. El refrigerante utilizado es Freón 12.

3. Vaporizador.

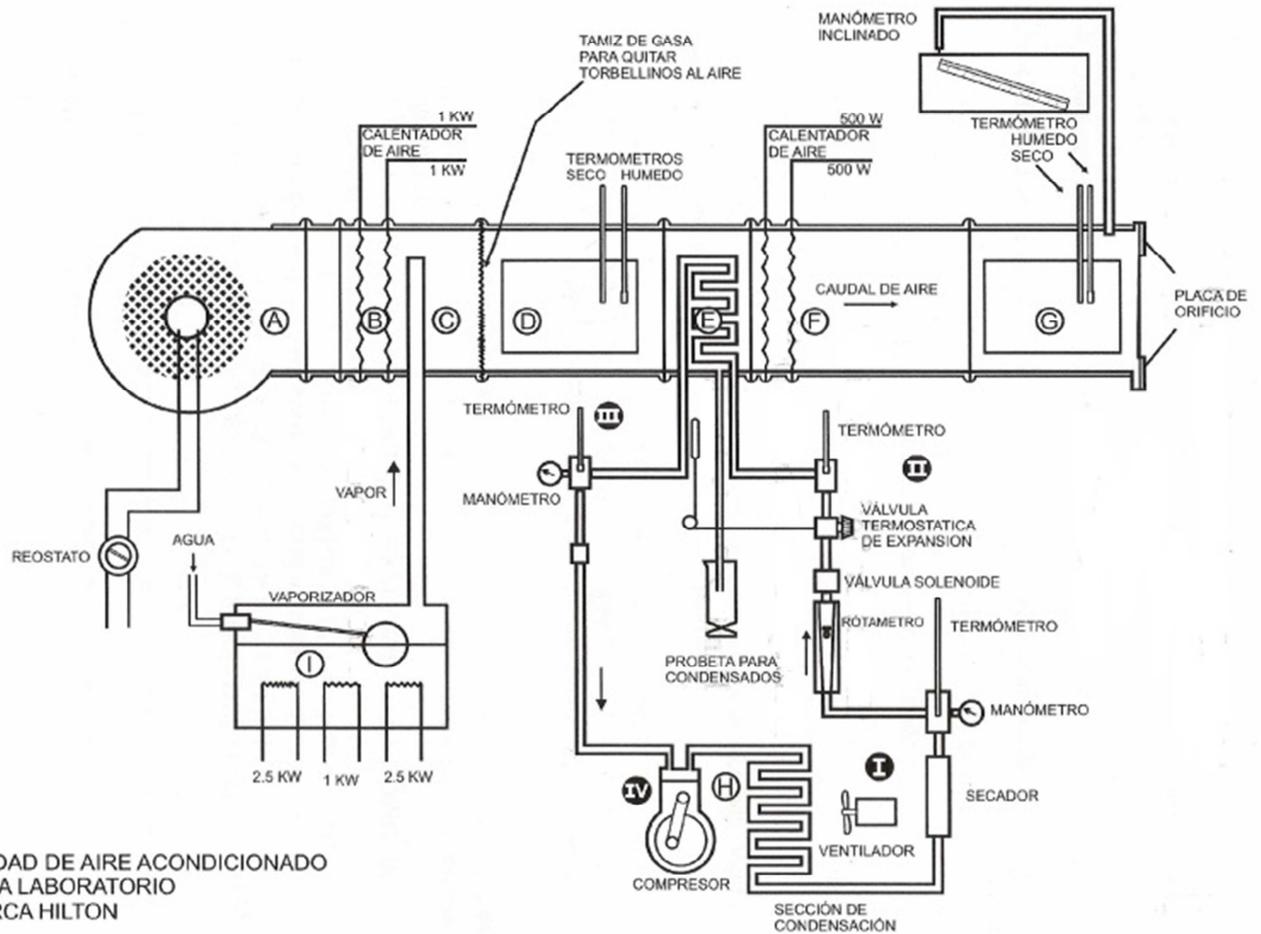
3.1. Con tres resistencias de inmersión de 1.5kW, de 200V y 60Hz.

3.2. Tanque de alimentación de agua.

3.3. Flotador para el nivel del agua.

3.4. Sección de alimentación de agua y sección de generación de vapor.

2.6 Diagrama del equipo



2.7 Desarrollo experimental

Preparación del equipo

1. Verificar que el vaporizador y el tanque de suministro tengan suficiente agua, de lo contrario llenar con agua destilada.
2. Colocar los tres termómetros del sistema de refrigeración.
3. Colocar dos termómetros de bulbo seco y dos termómetros de bulbo húmedo en las secciones D y G.

4. Humedecer la funda de los termómetros de bulbo húmedo antes de colocarlos en el equipo.
5. Colocar la probeta de 1L debajo de la manguera de agua condensada.
6. Conectar el interruptor general de corriente y luego el interruptor del equipo.
7. Quitar el tapón que conecta a la atmósfera al manómetro inclinado.

Operación

Primera Corrida. Flujo de vapor constante

1. Encender el botón del ventilador y mover el reóstato a la posición deseada. Verifique que la lectura en el manómetro inclinado este entre 5 y 9 mmH₂O.
2. Encender los tres botones de las resistencias de inmersión y esperar a que ascienda el flujo de vapor. Esto se comprueba por un cambio de la medición de bulbo húmedo y seco en la sección D. Se recomienda trabajar con 2 o 3 resistencias de inmersión durante toda la experimentación.
3. Opera el equipo manipulando el reóstato del ventilador a las condiciones de caída de presión recomendadas en la tabla 2. A cada posición realiza las mediciones indicadas y completa la tabla.

Nota: Dejar estabilizar el equipo 10 min antes de tomar cualquier medición.

Segunda Corrida. Flujo de aire constante y calentamiento variable

4. Mover el reóstato del ventilador hasta tener una caída de presión entre 6-7 mmH₂O.
5. Encender los botones de resistencias de calentamiento de aire como indica la tabla 3.

Realizar las mediciones indicadas y completar la tabla.

Tercera Corrida. Flujo de aire variable y sistema de enfriamiento.

6. Apagar todas las resistencias de calentamiento de aire.
7. Encender el sistema de refrigeración.
8. Opera el equipo manipulando el reóstato del ventilador a las condiciones de caída de presión recomendadas en la tabla 4. A cada posición realiza las mediciones indicadas y completa la tabla.

Paro del equipo

1. Asegúrate que todas las resistencias de calentamiento de aire estén apagadas.
2. Apagar el sistema de enfriamiento.
3. Apagar las resistencias de inmersión.
4. Dejar encendido el flujo de aire durante 10-15 min, una vez terminados los pasos anteriores.
5. Regresar la posición del reóstato a cero y apagar el botón de encendido del ventilador.
6. Poner el tapón que conecta a la atmósfera del manómetro inclinado.
7. Desconectar el interruptor del equipo y luego el interruptor general de corriente.

2.8 Información experimental

Tabla 1. Condiciones ambientales

Condiciones ambientales		
T_{BH} (°C)	T_{BS} (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)

Tabla 2. Variación de flujo de aire

Posición del reóstato	ΔP (mm H ₂ O)	D		G	
		T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)	T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)
	5				
	6				
	7				
	8				

Tabla 3. Variación de número de resistencias de calentamiento de aire y caída de presión constante

Resistencias encendidas	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Posición del reóstato	ΔP (mm H ₂ O)	D		G	
					T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)	T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)
1-B				5				
2-B				6				
2-B, 1-F				7				
2-B, 2-F				8				

Tabla 4. Sistema de enfriamiento

Posición del reóstato	ΔP (mm H ₂ O)	D		G		P1 (lb/in ²)	P2 (lb/in ²)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	Flujo del refrigerante (Kg/hr)
		T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)	T _{BH} (°C)	T _{BS} (°C)						
	5										
	6										
	7										
	8										

3. Cuestionario

1. Defina los siguientes términos para una corriente de aire: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de rocío, humedad relativa, humedad absoluta, calor húmedo, volumen húmedo.

2. Para cada corrida calcula con las ecuaciones proporcionadas en el anexo y con una carta de humedad, las humedades relativas en %, las humedades absolutas en Kg agua/kg AS y el flujo de aire seco.
3. Para la tabla 2, calcula cuánto vapor de agua gana el aire para cada flujo de aire seco.
4. Elabora las siguientes gráficas para la primera corrida en la sección G:
 - a) humedad absoluta vs flujo de aire de entrada
 - b) humedad relativa vs flujo de aire entrada
 - c) temperatura de bulbo seco vs flujo de aire de entrada
5. Elabora las siguientes gráficas para la segunda corrida en la sección G
 - a) humedad absoluta vs número de resistencias de calentamiento de aire
 - b) humedad relativa vs número de resistencias de calentamiento de aire
 - c) temperatura de bulbo seco vs número de resistencias de calentamiento de aire
6. Elabora las siguientes gráficas para la tercera corrida en la sección G:
 - d) humedad absoluta vs flujo de aire de entrada
 - e) humedad relativa vs flujo de aire de entrada
 - f) temperatura de bulbo seco vs flujo de aire de entrada
7. Calcula la humedad absoluta y humedad relativa de la zona para la tercera corrida y compáralas con los resultados obtenidos en la zona G. ¿Qué diferencias encuentras entre esas dos zonas? Explícalo.
8. Explique el comportamiento que se observa en cada una de las graficas anteriores. ¿A qué se debe este comportamiento?
9. Para la tabla 3, calcula cuánta energía total en kJ/h gana la corriente de aire en la sección D y G.

10. Calcula la potencia W que suministra las resistencias de calentamiento en kJ/h.
11. Calcula mediante un balance de energía cuánta energía es suministrada por el vapor de agua en kJ/h. También calcula la energía suministrada por el vapor de agua con el mismo flujo de aire de la tabla 2. Compara los resultados.
12. Con los resultados obtenidos de la pregunta anterior calcula cuánta energía se pierde al ambiente.
13. Para la tabla 4, calcule la energía que gana el refrigerante utilizando el diagrama de Mollier para el freón 12 en kJ/h.
14. Explica las 4 etapas de un sistema de refrigeración.
15. En el diagrama de Mollier para el freón 12 y con los datos obtenidos en la tabla 4, traza las etapas del sistema de refrigeración.
16. Calcular cuanta energía pierde el aire en kJ/h entre la sección D y G.
17. Compara la energía que gana el refrigerante con respecto a la que pierde al aire. ¿Existe una diferencia? Explica a que se debe.
18. ¿Cuáles son las condiciones de operación del equipo de acondicionamiento de aire que satisfacen el problema? Con los resultados obtenidos de este experimento, ¿puedes proponer otra operación del equipo con la que se encuentre la solución del problema? Explique su razonamiento.
19. En una carta psicrométrica, represente gráficamente las condiciones del aire a través del equipo de acondicionamiento, según lo contestado en la pregunta 18.
20. Si para las condiciones de operación propuestas en la pregunta 18, si se necesitara una temperatura menor manteniendo la humedad absoluta constante, que ajustes haría a las condiciones de operación del equipo. Explique su razonamiento.

21. Si para las condiciones de operación propuestas en la pregunta 18, si se necesitara una humedad absoluta mayor manteniendo la temperatura constante, que ajustes haría a las condiciones de operación del equipo. Explique su razonamiento.

4. Nomenclatura

T_{BS} - Temperatura de bulbo seco.

T_{BH} - Temperatura de bulbo húmedo.

ΔP - Caída de presión.

H_A - Entalpia del aire de entrada

Y_A -Humedad absoluta del aire de entrada

5. Bibliografía

1. Valiente, Antonio. Problemas de Balances de Energía. Primera Edición. Editorial Alhambra.
2. Perry, Robert. Manual del Ingeniero Químico. Sexta Edición. Tomo 1. Me Graw Hill. 1992.
3. Himmelblau, David. Balances de Materia y Energía. Cuarta Edición. Prentice Hall. 1988.
4. Henley, Ernest. Calculo de Balances de Materia y Energía. Editorial Reverté. 1993.
5. Foust, Alan. Principios de Operaciones Unitarias. Segunda Edición. Editorial Continental.

6. Anexo

6.1 Calculo del flujo de aire seco AS

$$Q = 181.65\sqrt{\Delta P\rho_G}$$

$$Q = \text{flujo másico total en Kg/h}$$

ρ_G = Densidad de la corriente de aire a las condiciones de la sección G en Kg/m³

$$\Delta P = \text{Caída de presión del manómetro inclinado en mmH}_2\text{O}$$

Utilizando esta ecuación se calcula el flujo de aire a las condiciones de la sección G.

Para calcular el flujo de aire seco en la sección G es necesario corregir con la humedad.

$$AS = \frac{Q}{1 + Y_G}$$

$$AS = \text{Flujo de aire seco en Kg/h}$$

$$Y_G = \text{Humedad absoluta en la sección G en Kg agua /KgAS}$$

6.2 Ecuaciones para el sistema aire - agua

$$y_1 = \text{Fracción mol del vapor de agua en el aire}$$

$$(y_1)^{sat} = \text{Fracción mol del vapor de agua en el aire a condiciones de saturación}$$

$$Y = \text{Humedad (absoluta) = Kg de vapor de agua en el aire /Kg de aire seco}$$

$$Y^{sat} = \text{Humedad (absoluta) a condiciones de saturación}$$

$$P = \text{Presión total absoluta (presión atmosférica)}$$

$$P^\circ = \text{Presión de vapor del agua}$$

$PM_2 = \text{Masa molar (peso molecular) del aire} = 29$

$PM_1 = \text{Masa molar (peso molecular) del agua} = 18$

Aire saturado:

$$(y_1)^{sat} = \frac{P^\circ}{P}; \quad y^{sat} = \frac{(PM_1)P^\circ}{(PM_2)(P - P^\circ)}$$

$Y_R = \text{Humedad relativa en \%}$:

$$Y_R = 100 \frac{Py_1}{P^\circ} = 100 \frac{y_1}{(y_1)^{sat}} = 100 \left(\frac{P}{P^\circ} \right) \left(\frac{(PM_2)Y}{(PM_1) + (PM_2)Y} \right)$$

Propiedades

Aire: $Cp_{aire} = 1.005 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$

Agua: $Cp_{agua}^V = 1.888 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$ $Cp_{agua}^L = 4.191 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$

$\lambda_{T_0} = 2501.7 \text{ KJ/Kg}$ $T_0 = 0^\circ\text{C}$

CONSTANTES DE ANTOINE (Ecuación de presión de vapor del agua)

	273 K < T < 353 K	353 K < T < 423 K
A	12.0426	11.7201
B	4030.178	3841.0929
C	-38.043	-45.049

Presión de vapor $\ln P^\circ = A - \frac{B}{T+C};$ $P^\circ \text{ en bar, } T \text{ en K}$

6.3 Línea de humidificación adiabática o línea de bulbo húmedo

(T, Y) son las condiciones iniciales del aire.

(T^{sat}, Y^{sat}) son las condiciones del aire cuando se sigue una humidificación adiabática hasta saturación y deben cumplir la ecuación de saturación.

T^{sat} es igual a la temperatura de bulbo húmedo para el caso del sistema aire – agua

$$(Cp_{aire} + Y Cp_{agua}^V)(T^{sat} - T) = (\lambda_0 + [Cp_{agua}^V - Cp_{agua}^L][T^{sat} - T_0])(Y - Y^{sat})$$

Despejando la humedad Y de la ecuación anterior se obtiene:

$$Y = \frac{Y^{sat}(\lambda_0 + [Cp_{agua}^V - Cp_{agua}^L][T^{sat} - T_0]) + Cp_{aire}(T^{sat} - T)}{(\lambda_0 + [Cp_{agua}^V - Cp_{agua}^L][T^{sat} - T_0]) + Cp_{agua}^V(T - T^{sat})}$$

Despejando la temperatura se obtiene:

$$T = T^{sat} + \frac{(Y^{sat} - Y)(\lambda_0 + [Cp_{agua}^V - Cp_{agua}^L][T^{sat} - T_0])}{Cp_{aire} + Y Cp_{agua}^V}$$

ANEXO K. GUIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTO

OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN PRESENTE EN UN EQUIPO DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Objetivo

Que el alumno aprenda de manera práctica el funcionamiento que tiene cada equipo presente en un ciclo de refrigeración por compresión con el que cuenta un equipo de acondicionamiento de aire. Además del manejo adecuado de un diagrama presión vs entalpía.

1. Problema

El proveedor del equipo de acondicionamiento de aire asegura que el compresor del ciclo de refrigeración opera con una potencia de medio caballo de fuerza. Compruebe que el proveedor tiene razón sin importar las condiciones de operación que se tengan en el equipo de acondicionamiento de aire.

2. Parte experimental

2.1 Materiales

- 5 Termómetros de bulbo seco.
- 2 Termómetros de bulbo húmedo.
- 1 Anemómetro.
- 1 Psicrómetro.
- 1 Cronómetro.
- 1 Probeta de 100mL.
- 1 Probeta de 1L
- 1 Pisseta con agua destilada.

2.2 Descripción del sistema de refrigeración por compresión

Sección I, zona de condensación. Consta de las siguientes partes: ventilador, secador, manómetro, rotámetro y termopozo.

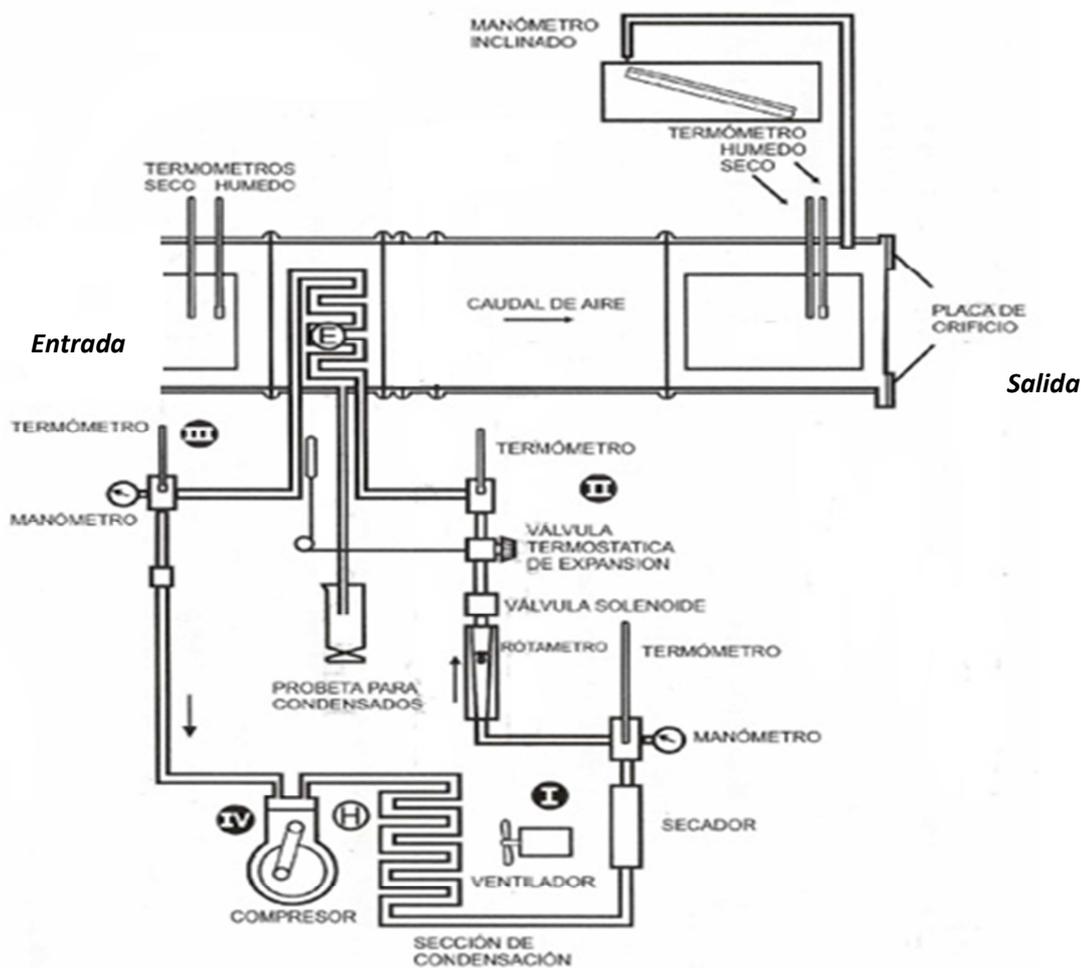
Sección II, zona de expansión. Consta de las siguientes partes: válvula de solenoide, válvula termostática de expansión y termopozo.

Sección III, zona de evaporación. Consta de las siguientes partes: sección de enfriamiento de aire, manómetro y termopozo.

Sección IV, zona de compresión. Equipo compresor-condensador de 0.5 H.P.

El refrigerante utilizado es Freón 12.

2.3 Diagrama del ciclo de refrigeración



3. Desarrollo experimental

3.1 Preparación del equipo

- 1.- Colocar los 3 termómetros del ciclo de refrigeración.
- 2.- Humedecer con agua destilada los termómetros de bulbo húmedo.
- 3.- Colocar dos termómetros de bulbo seco y dos termómetros de bulbo húmedo antes y después de la sección de enfriamiento de aire como lo muestra el diagrama anterior.
- 4.- Coloque la probeta de 1L para recolectar el agua condensada como lo indica el diagrama anterior.
- 5.- Quitar el tapón que conecta a la atmósfera al manómetro inclinado.
- 6.- Conectar el interruptor general de corriente eléctrica y luego el interruptor del equipo.

3.2 Operación del equipo

- 1.- Encender el ventilador del equipo de acondicionamiento de aire y mover el reóstato a la posición deseada.
- 2.- Encender el sistema de refrigeración.
- 3.- Esperar 10 minutos para que se estabilice el sistema y llenar las tablas 2 y 4.
- 4.- Si es posible, medir el flujo del condensado para cada corrida.
- 5.- Medir la velocidad del aire en la placa de orificio con el anemómetro.

3.3 Paro del equipo

- 1.- Apagar el sistema de refrigeración.
- 2.- Esperar 10 minutos antes de regresar el reóstato a cero.
- 3.- Apagar el ventilador.
- 4.- Tapar el manómetro inclinado.
- 5.- Apagar el interruptor de la corriente eléctrica del equipo y después el interruptor general.

4. Información experimental

Tabla 1. Condiciones ambientales.

Condiciones ambientales		
T_{BH} (°C)	T_{BS} (°C)	Y (Kg H ₂ O/Kg AS)

Tabla 2. Ciclo de refrigeración.

Posición del reóstato	P I (lb/in ²)	P III (lb/in ²)	T I (°C)	T II (°C)	T III (°C)	Flujo R12 (Kg/hr)
40%						
50%						
60%						
70%						
80%						

Con los datos obtenidos en la tabla 2, llenar la tabla 3 para cada posición del reóstato con ayuda del diagrama presión vs entalpía del refrigerante R12.

Tabla 3. Diagrama de Mollier.

Posición del reóstato			%
Punto	P (lb/in ²)	T (°C)	H (Btu/lb)
1			
2			
3			
4			

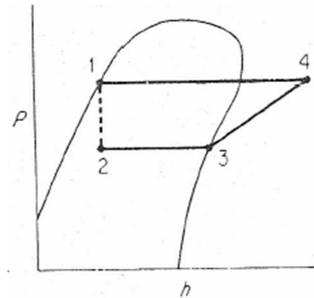


Tabla 4. Enfriamiento de aire.

Posición del reóstato	Entrada		Salida		ΔP (mm H ₂ O)	Uo (m/s)	Y (calculada) (Kg H ₂ O/Kg AS)
	Tbh (°C)	Tbs (°C)	Tbh (°C)	Tbs (°C)			
40%							
50%							
60%							
70%							
80%							

5. Cuestionario

- 1.- Explique como funciona el ciclo de refrigeración por compresión.
- 2.- Dibuje un diagrama presión vs entalpía en el que represente los equipos que conforman el ciclo de refrigeración.
- 3.- Para cada corrida, con los datos de la tabla 2 y 3 calcule el flujo de calor en el evaporador en Kcal/hr con las ecuaciones proporcionadas en el anexo.
- 4.- Para cada corrida, con los datos de la tabla 2 y 3 calcule el flujo de calor en el condensador en Kcal/hr con las ecuaciones proporcionadas en el anexo.
- 5.- Calcule las humedades absolutas en Kg H₂O/Kg AS pedidas en las tablas 1 y 4 mediante las ecuaciones del anexo.
- 6.- Calcule el calor húmedo y la entalpía a la entrada y a la salida con las ecuaciones del anexo.

7.- Calcule el volumen húmedo, el caudal y el flujo másico del aire seco a la salida con las ecuaciones del anexo.

8.- Calcule el agua que se debió condensar con las ecuaciones del anexo y si le fue posible medir el condensado compare los dos resultados y explique sus resultados. En caso de no haber podido medir el condensado explique por que.

9.- Calcule el flujo del calor perdido por el aire en Kcal/hr mediante las ecuaciones del anexo.

10.- Calcule la potencia del compresor en Hp para cada corrida mediante las ecuaciones del anexo.

6. Nomenclatura

ΔL = Diferencia del agua condensada

ΔP = Caída de presión en mm de H_2O

Ca = Caudal en m^3/s

C_H = Calor húmedo en Kcal / Kg AS $^{\circ}C$

G_s = Flujo másico del aire seco en Kg AS/hr

H = Entalpía húmeda en Kcal / Kg AS

L = Flujo másico de agua condensada en Kg H_2O /hr

L_m = Flujo volumétrico de agua condensada que se midió en L/hr

M = Flujo másico del freón 12 en lb/hr

\tilde{P} = Presión parcial en mm Hg

P° = Presión de vapor a la temperatura de bulbo húmedo en mm Hg

P_C = Potencia del compresor

Q_P = Flujo de calor perdido en Kcal/hr

Q_C = Flujo de calor en el condensador en Kcal/hr

Q_E = Flujo de calor en el evaporador en Kcal/hr

T_{bs} = Temperatura de bulbo seco en $^{\circ}C$

T_{bh} = Temperatura de bulbo húmedo en $^{\circ}C$

U_0 = Velocidad en la placa de orificio en m/s

V_H = Volumen húmedo en $m^3 / KgAS$

Y = Humedad absoluta en Kg $H_2O / KgAS$

Anexo

$$\Delta L = L - L_m$$

$$Ca = U_0 * 0.018$$

$$C_H = 0.24 + 0.46 * Y$$

$$G_s = \frac{Ca * 3600}{V_H}$$

$$H = (C_H * T_{bs}) + (597 * Y)$$

$$L = G_s(\Delta Y)$$

$$P^\circ = 10^{8.10765 - \frac{1750.286}{T_{bh} + 235}}$$

$$\tilde{P} = P^\circ - 0.5(T_{bs} - T_{bh})$$

$$P_C = M(\Delta H)(0.252)(0.001557)$$

$$Q_E = M(\Delta H)(0.252)$$

$$Q_C = M(\Delta H)(0.252)$$

$$Q_P = G_s(\Delta H)$$

$$V_H = \left(\frac{1}{29} + \frac{Y}{18} \right) * \frac{0.082(T_{bs} + 273)}{0.77}$$

$$Y = \frac{18}{29} \left(\frac{\tilde{P}}{585 - \tilde{P}} \right)$$

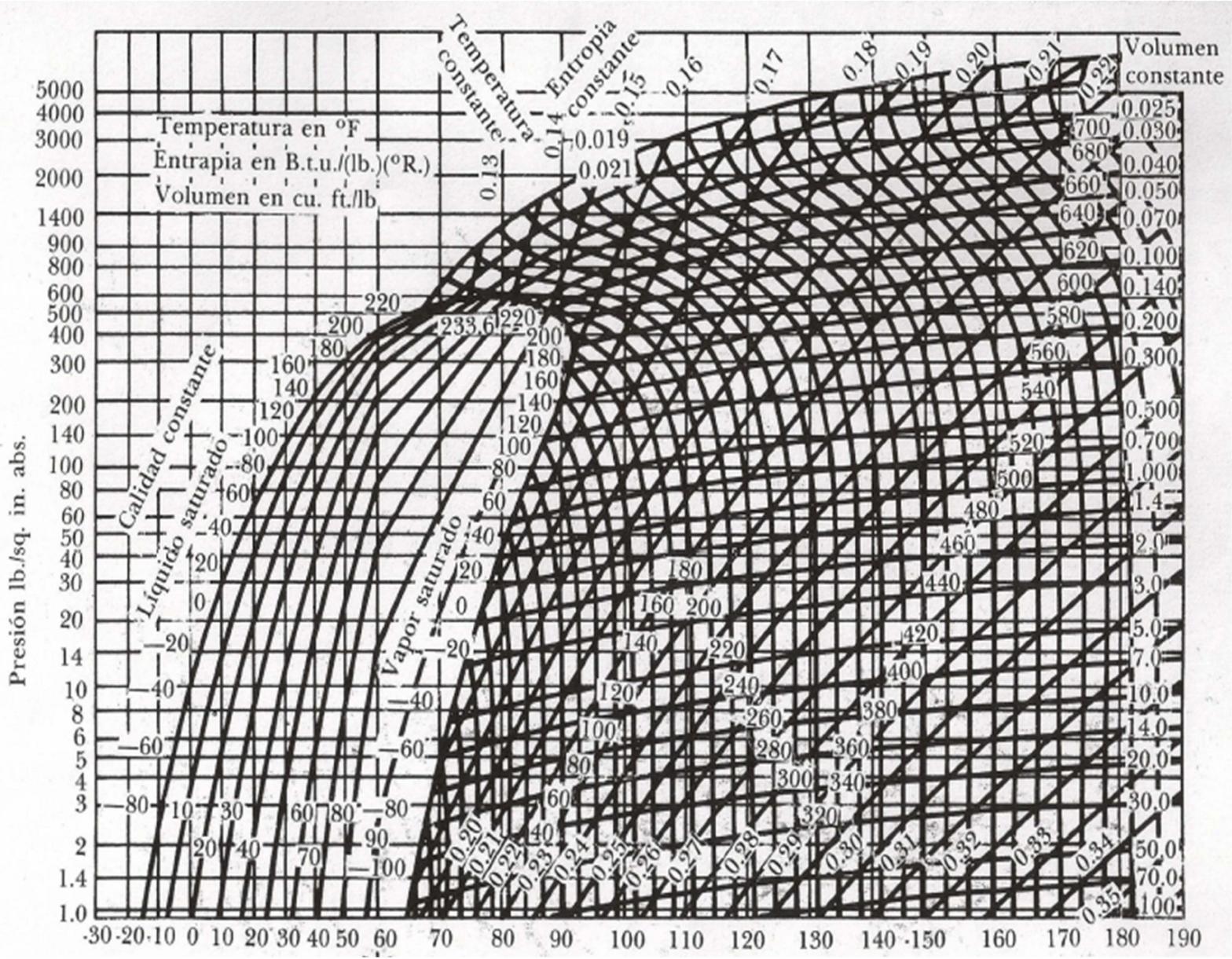


Diagrama presión vs entalpía para el freón 12.

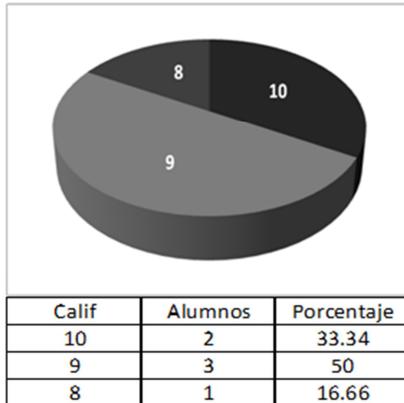
ANEXO L. ESTANCIA CORTA

En el equipo de acondicionamiento de aire se pueden realizar una gran diversidad de experimentos, se puede realizar desde un simple calentamiento de aire hasta el acondicionamiento de un aire con ciertas características de temperatura y humedad deseadas.

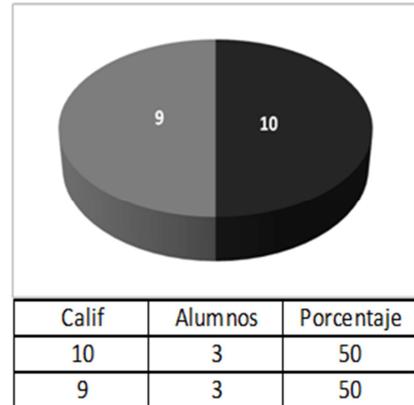
Durante el período intersemestral 2013-2 tuve el honor de impartir una estancia corta sobre acondicionamiento de aire a la que asistieron seis alumnos para conocer las operaciones unitarias que se pueden realizar en éste equipo y se probó que el equipo está en buenas condiciones para el aprendizaje de los alumnos. Al término de ésta estancia les apliqué un cuestionario para conocer el grado de satisfacción que tuvieron durante ésta estancia corta evaluando los aspectos que implicó el curso como: la importancia del acondicionamiento de aire, el equipo de acondicionamiento usado, las prácticas y los cálculos realizados, el uso de gráficas, la importancia del ciclo de refrigeración, el aprendizaje que adquirieron y mi desempeño como instructor. Se les pidió que evaluaran del 1 al 10 como calificación de acuerdo al grado de satisfacción que tuvieron con cada aspecto que se tomó en cuenta, con el fin de saber si los alumnos están interesados en el aprendizaje del acondicionamiento de aire para reforzar la idea de que es necesario contar con un guión experimental que se implemente en la asignatura experimental del LIQ I ó LIQ III según sea el caso.

Los resultados los grafiqué y los presento a continuación:

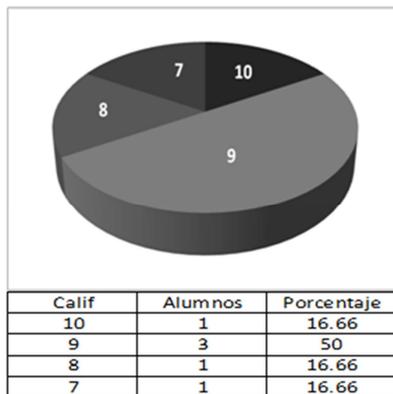
1.- El curso lleno sus expectativas.



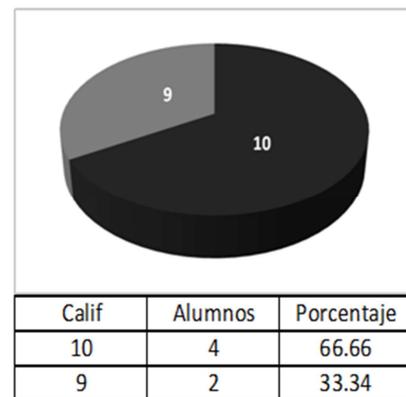
2.- La importancia del acondicionamiento de aire.



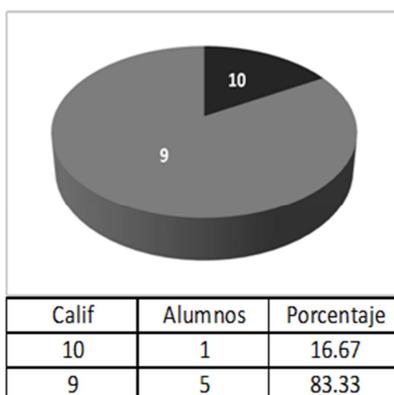
3.- El equipo de acondicionamiento de aire empleado.



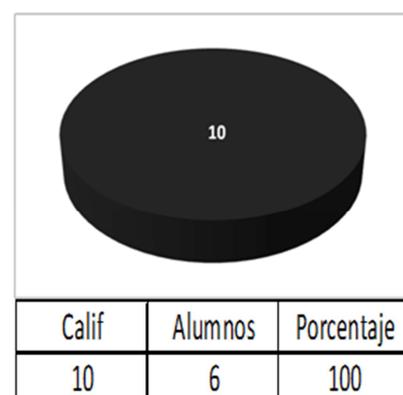
4.- ¿Cómo evalúa al instructor?



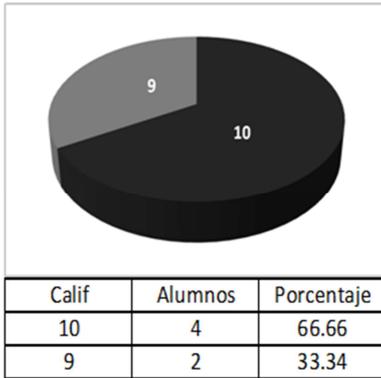
5.- ¿Cómo evalúa las prácticas realizadas?



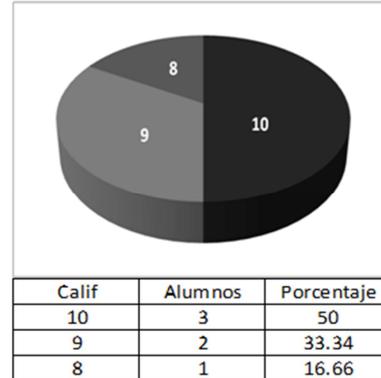
6.- La importancia de realizar los cálculos.



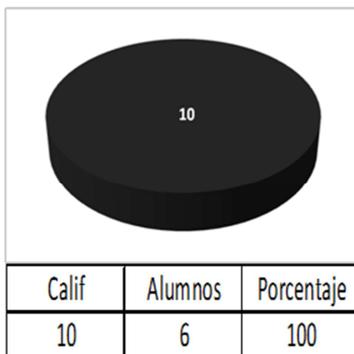
7.- Su aprendizaje adquirido.



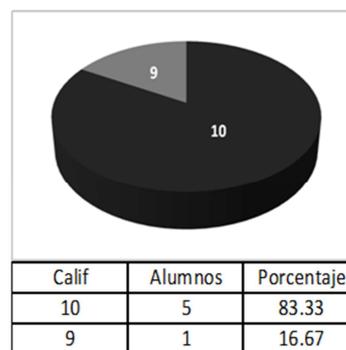
8.- La importancia del uso de gráficas para determinar las condiciones del aire.



9.- La importancia de la operación de refrigeración



10.- Recomendaría el acondicionamiento de aire para una estancia corta.



Como podemos observar el resultado de la evaluación en términos generales es que los alumnos sí están interesados en realizar esta práctica porque les dejará un aprendizaje sobre las operaciones aire – agua que se pueden aplicar en un proceso de acondicionamiento de aire y algunos principios básicos del ciclo de refrigeración.

Aparte de eso también tuve el honor de dar una clase del ciclo de refrigeración a dos profesores de la facultad de química, es decir, el equipo de acondicionamiento de aire no solo sirve para el aprendizaje de los estudiantes sino también para el de profesores y con esto me refiero a que en el Laboratorio de Ingeniería Química estamos desperdiciando un equipo que ha sido probado que sirve para los fines que fue construido y esto es el aprendizaje mediante una forma didáctica como lo es la experimentación.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Operaciones aire – agua. Antonio Valiente Barderas. Facultad de Química. UNAM. México D.F. 2010.
- 2) Problemas de flujo de fluidos. Antonio Valiente Barderas. Segunda edición. Editorial Limusa. México 2007.
- 3) Fundamentos de aire acondicionado y refrigeración. Ing. Eduardo Hernández Goríbar. Primera edición. Editorial Limusa. 1973.
- 4) Refrigeración y acondicionamiento de aire. Wilbert F. Stoecker. Tercera edición. Mc Graw Hill. 1965.
- 5) Tesis: Diseño de una práctica de acondicionamiento de aire para el Laboratorio de Ingeniería Química. Mario Alberto Meza Gómez. 1981.
- 6) Ingeniería del ámbito térmico. James L. Threlkeld. Primera edición. Editorial Prentice Hall Internacional. 1973.
- 7) Procesos de transporte y operaciones unitarias. Christie J. Geankoplis. Segunda edición. Compañía editorial Continental S.A. de C.V. México 1995.
- 8) Operaciones de transferencia de masa. Robert. E. Treybal. Segunda edición. Mc Graw Hill. 1980.
- 9) Psicrometría, métodos de humidificación y dehumidificación y sus aplicaciones en el diseño arquitectónico. Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa. Centro de investigación en energía. UNAM. 2002.