INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS - OEA
Representación en Colombia
PROGRAMA NACIONAL DE CAPACITACION AGROPECUARIA

Versión Preliminar

APUNTES SOBRE CONSERVACION DE GRANOS

Segunda Parte

La Carta Sicrométrica, construcción y manejo; su utilidad para determinar la humedad absoluta, la humedad relativa, el volumen específico y la entalpia de las mezclas de aire seco y vapor de agua

Por: César Rodríguez
Mercadólogo PNCA

Bogotá, Septiembre de 1974

PARTE SEGUNDA

Contenido | Pág.

PROLOGO

La capacidad física instalada en el país, para secamiento, almacenamiento y conservación de granos, se duplicó durante los últimos siete años; paralelamente, el adiestramiento del personal responsable de la ejecución técnica en las nuevas instalaciones se incrementó, aún en mayor proporción.

Como consecuencia, podría pensarse que la tecnología aplicada a los procesos mencionados se evaluaría -y si fuera necesario se modificaría- para finalmente adecuarla a las características de la nueva infraestructura en particular, y -en general- a las condiciones del sistema de comercialización.

Inexplicablemente esto no se realizó. Dicha tecnología permanece inmodificable; su identificación total con los métodos propuestos tentativamente en la década 1940/50, para secar, almacenar y conservar granos en zonas no tropicales, es preocupante.

Aun cuando el problema de la conservación de granos en nuestro medio está lejos de hallarse solucionado, y sus implicaciones son cada vez más complejas y frecuentes, se continúa aplicando principios tecnológicos anticuados, cuyos fundamentos teóricos no han sido investigados (o debidamente ratificados) en climas tropicales; los resultados obtenidos en el tratamiento del problema son dudosos a menudo y su evaluación definitiva no se lleva a cabo.

Es posible explicar la situación de diversas maneras, pero muy difícil justificarla. Mientras no se retorne al estudio de la aplicación de los principios teóricos en nuestro medio, mientras no se avalúen las bondades de los procesos vigentes, y mientras no se introduzcan las mejoras técnicas indispensables, el problema persistirá: los criterios tecnológicos inoperantes darán lugar -como hasta ahora- al criterio empírico, casuístico y poco racional. La operación inadecuada restará importancia y utilidad a los programas de ampliación y mejoramiento de la infraestructura. Si se modernizan las instalaciones, y se adquieren más y mejores equipos para tratamiento y conservación, en esa medida será más inadecuada la tecnología del /50; y si paralelamente con ese crecimiento y ese mejoramiento parcial de la infraestructura física, no se desarrollan programas para concebir la tecnología adecuada, los costos de operación de la nueva infraestructura, irán en aumento hasta traducirse en márgenes no tolerables por el sistema de comercialización.

En estas líneas se ha insistido en la necesidad de volver sobre el estudio del problema; sólo con ese ánimo se entregan estos "apuntes sobre conservación de granos" para conocimiento, estudio y discusión.

Se pretende iniciar una serie de entregas, que permitan conocer los aspectos teóricos importantes en la conservación de granos y plantear futuros estudios sobre el tema. De ser posible, esta labor debe

extenderse a la traducción y publicación de información técnica, editada por centros de investigación y universidades del extranjero, y a la difusión del material existente en el país. Sería deseable que en el asunto tomaran parte todos aquellos grupos técnicos adscritos a entidades -públicas o privadas- del sector agropecuario, y particularmente del subsector del mercadeo de granos.

En principio se editan estas tres cartillas, con numeración continuada; sus objetivos específicos son: suministrar al lector los elementos de juicio indispensables para comprender el problema (primera cartilla), adentrarlo en la definición de términos y de variables utilizados en el estudio de la materia (primera y segunda cartilla) y darle la oportunidad de analizar la relativa validez de algunos de los procesos, cuya interpretación es incorrecta en nuestro medio (tercera cartilla). Como complemento se anexan cálculos sobre mediciones de variables y soluciones matemáticas a casos específicos.

Muy seguramente el técnico, encontrará conceptos conocidos en su totalidad; el autor en ningún momento pretende explicar asuntos novedosos, sino explicar correctamente los procesos habituales, en su relación con los principios teóricos.

También es posible que se encuentren transcripciones de autores conocidos, sin la correspondiente cita; o uso de métodos ya difundidos. Al respecto se hace público reconocimiento y se da el crédito

en estas líneas, para no complicar la presentación didáctica del material con llamadas adicionales excesivas.

Tan solo en la medida que los conceptos expuestos en estas cartillas sean objeto de estudio, análisis y discusión, podrá decirse que se ha logrado el objetivo.

CESAR O. RODRIGUEZ O.
César Rodríguez
Mercadólogo PNCA

VI. LA CARTA SICROMETRICA - SU UTILIDAD PARA MEDIR LA HUMEDAD DEL AIRE - CONSTRUCCION Y MANEJO

En los apuntes anteriores se estudió la forma de medir y cuantificar la humedad del grano y la necesidad que existe de secarlo hasta lograr que su humedad sea menor, o por lo menos igual, a la que se requiere para un almacenamiento seguro; igualmente se determinó la forma de cuantificar el contenido de humedad del aire. Sin embargo, aún no se ha visto la forma de medir la humedad del aire, ni de diagnosticar respecto a la capacidad que tiene un aire dado para secar o enfriar una masa de grano.

A. Medida de la Humedad Absoluta - Importancia y Dificultad

Un método para determinar si un aire puede secar una masa dada de grano, consiste en hacer pasar el aire en cuestión a través del grano; obviamente si el aire tiene alguna capacidad para remover la humedad del grano, el contenido de humedad (del grano), luego del proceso, habrá disminuído; sin embargo, este método tiene el inconveniente de permitir que, cuando el aire no es el adecuado para secar, el grano se humedezca apreciablemente. Resulta más práctico forzar una masa de aire a través de la masa del grano, y establecer la capacidad secante del aire a partir del efecto que produce en la humedad del aire, su contacto con el grano.

Entonces, si el aire después de atravesar la masa del grano acusa una humedad absoluta mayor que la inicial, se deduce que el aire se humedeció, lo cual implica indirectamente que el grano le cedió vapor de agua y por lo tanto se secó.

La principal ventaja del método propuesto radica en la facilidad y rapidez con que se obtiene el resultado; con sólo 2 ó 3 minutos de circulación del aire a través de la masa del grano, es ya posible determinar la humedad absoluta del aire de entrada y de salida, y comparar y analizar el resultado; así, en caso que el aire esté humedeciendo al grano se suspenderá el proceso, y la cantidad de vapor de agua ganada por el grano, en tan corto tiempo, no afectará prácticamente su contenido de humedad.

Se deduce de lo anterior la necesidad de disponer de algún medio para determinar rápidamente la humedad absoluta del aire; desafortunadamente no existen medidores directos y rápidos que, a bajos costos, reporten la confiabilidad mínima deseada. No ocurre lo mismo cuando se trata de determinar la humedad relativa de una masa de aire, pues para el efecto sí se dispone de sistemas rápidos, confiables y relativamente baratos.

En vista de la situación planteada, se ha ideado, a partir de las leyes que predicen el comportamiento aproximado del aire, un método para calcular su humedad absoluta, en base a su humedad relativa y a su temperatura.

B. Qué es la Carta Sicrométrica

La carta sicrométrica es un gráfico que permite determinar la humedad absoluta de un aire dado, a partir de su humedad relativa y de su temperatura.

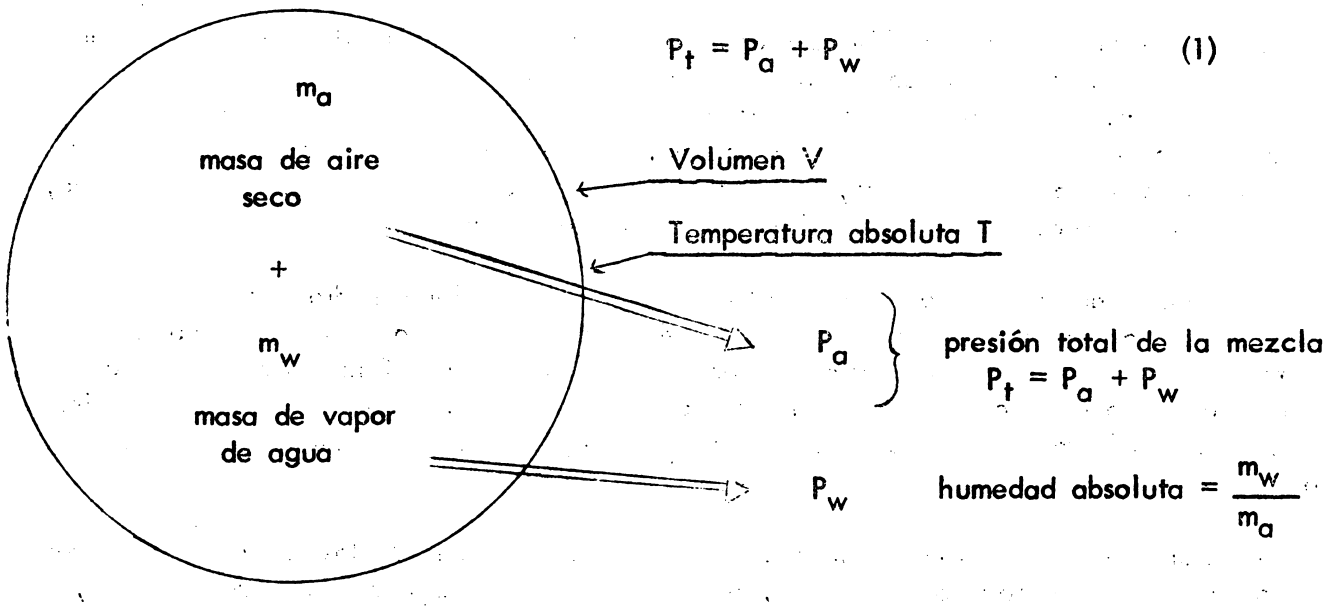
Mediante el gráfico sicrométrico es posible también precisar el volumen específico y el calor total de una masa de aire, de acuerdo a su temperatura, a su humedad relativa y a la presión barométrica del medio ambiente.

C. Las Curvas de Humedad Relativa

1. Cálculo de la humedad de saturación (HR = 100%). Supóngase una mezcla de aire seco y vapor de agua; adóptese que la mezcla contiene una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua; igualmente supóngase que la mezcla ocupa un volumen V, a una temperatura absoluta T. Naturalmente esta mezcla ejerce sobre las paredes del recipiente que la contiene una presión determinada, que en este caso se denomina P_t (presión total de la mezcla).

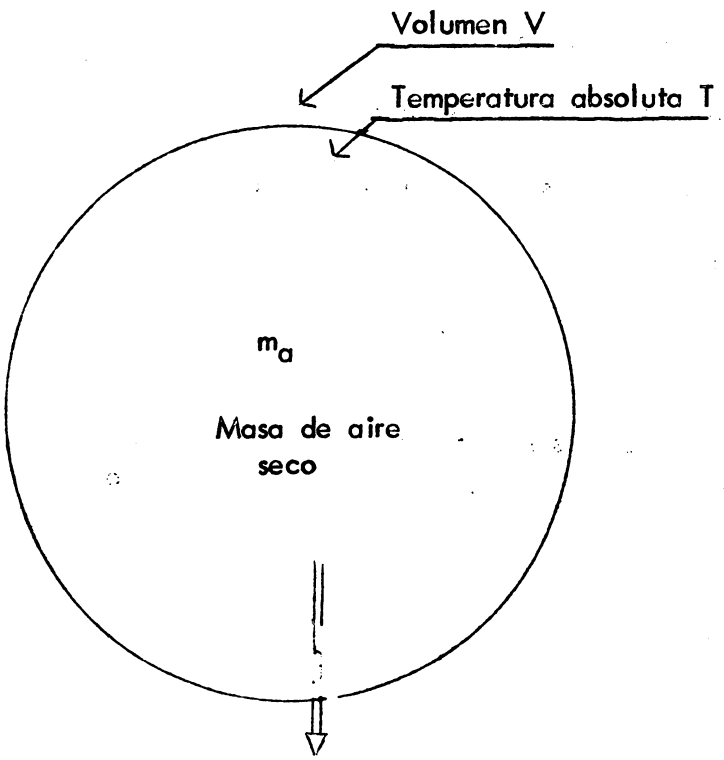
La presión total de la mezcla (P_t) es igual a la suma de las presiones parciales ejercidas por el vapor del agua y por el aire seco (respectivamente P_w y P_a). Ver Figura 1).

Figura 1



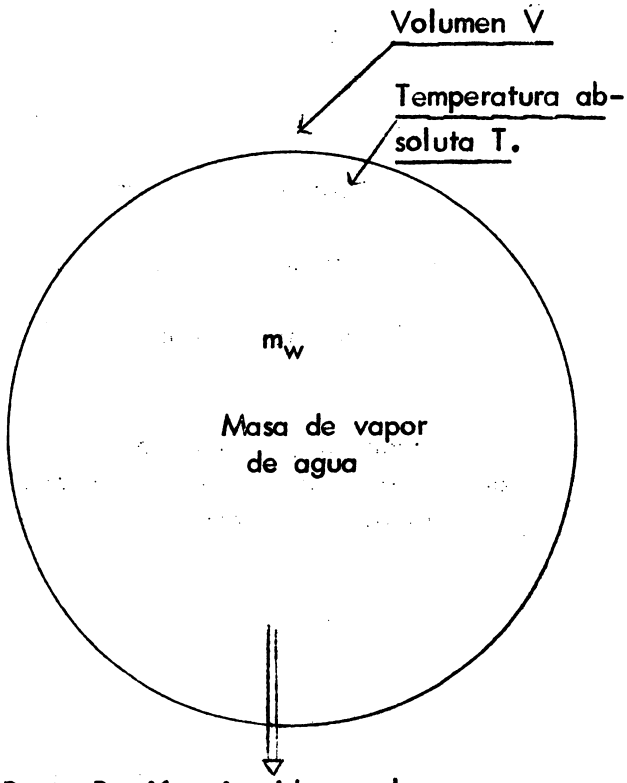
Por la ley de Dalton se sabe que la presión (P_g) ejercida por la masa (m_a) de aire seco presente en la mezcla es igual a la presión que ejercería esa misma masa de aire seco si ocupara sola el mismo volumen V, a la misma temperatura T; de igual forma se sabe que la presión (P_w) ejercida por la masa (m_w) de vapor de agua presente en la mezcla es igual a la que ejercería esa misma masa de vapor de agua si ocupase sola el mismo volumen V, a la misma temperatura T. (Ver Figuras 2 y 3).

Figura 2



P_a = Presión ejercida por la masa m_a de aire seco cuando ocupa un volumen V, a una temperatura absoluta T.

Figura 3



P_w = Presión ejercida por la masa m_w de vapor de agua cuando ocupa un volumen V, a una temperatura absoluta T.

Si se acepta que, dentro del rango de temperatura anotado, tanto el vapor de agua como el aire seco y las mezclas de aire seco con vapor de agua se comportan aproximadamente como gases perfectos, es correcto aplicar la ecuación de dichos gases ($PV = nRT$); así, volviendo sobre la Figura 2, aplicando la ecuación de los gases a la masa de aire seco que ocupa un volumen V, a una temperatura absoluta T y ejerce una presión P_a tendremos:

$$P_a V = n_a RT \qquad (2)$$

donde:

P_a = presión ejercida por la masa m_a de aire seco

V = Volumen ocupado por la masa de aire seco en las condiciones dadas

n_a = número de moléculas de aire seco presentes en el volumen dado

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta de la masa dada de aire seco

Análogamente, aplicando la ecuación de los gases perfectos a la masa m_w de vapor de agua que ocupa un volumen V, a temperatura T, y que ejerce una presión P_w (Figura 3) tendremos:

$$P_w V = n_w RT \qquad (3)$$

donde:

P_w = presión ejercida por la masa m_w de vapor de agua

V = volumen ocupado por la masa de vapor de agua en las condiciones dadas

n_w = número de moléculas de vapor de agua presentes en el volumen dado

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta de la masa dada de vapor de agua

dividiendo (2) en (3) se obtiene:

$$\frac{P_a V}{P_w V} = \frac{n_a RT}{n_w RT}$$

por lo tanto:

$$\frac{P_a}{P_w} = \frac{n_a}{n_w} \qquad (4)$$

teniendo en cuenta que el número n de moléculas presentes en una masa m de gas se puede establecer a partir del peso molecular M del gas en cuestión

$$n = \frac{m}{M} \qquad (5)$$

se concluye que

$$n_a = \frac{m_a}{M_a} \qquad (6)$$

donde M_a en el peso molecular aparente del aire seco (M_a = 29 aprox.)

Análogamente

$$n_w = \frac{m_w}{M_w} \qquad (7)$$

donde M_w es el peso molecular aparente del vapor de agua (M_w = 18 aprox.)
Reemplazando las relaciones establecidas en (5) y (6), en la ecuación (4) se concluye que

$$\frac{P_a}{P_w} = \frac{m_a/M_a}{m_w/M_w}$$

y por lo tanto

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{P_w M_w}{P_a M_a} \qquad (8)$$

recordando que $P_t = P_a + P_w$ (1) se deduce que $P_a = P_t - P_w$ y, reemplazando en la ecuación (8) se tiene:

$$\frac{m_w}{m_a} = \frac{P_w}{P_t - P_w} \times \frac{M_w}{M_a} \qquad (9)$$

Volviendo sobre la definición de humedad absoluta del aire puede observarse que m_w/m_a es simplemente la humedad absoluta de una mezcla de aire seco y vapor de agua (o, lo que es lo mismo, de un aire húmedo), pues indica la masa de vapor de agua presente en la mezcla por unidad de masa de aire seco (reparar Figura 1, página III-A-57).

$$\text{Humedad absoluta } H = \frac{m_w}{m_a} \qquad (10)$$

si en (9) se reemplaza la relación (10), y el valor de $M_w = 18$ y el de $M_a = 29$

$$H = \frac{18}{29} \times \frac{P_w}{P_t - P_w}$$

por lo tanto

$$H = 0{,}622 \frac{P_w}{P_t - P_w} \qquad (11)$$

La ecuación (11) permite calcular la humedad absoluta H de un aire dado, a partir de la presión barométrica (la presión total, P_t, de la mezcla de aire seco y vapor de agua en la atmósfera es equivalente a la presión atmosférica, más conocida como presión barométrica) y de la presión ejercida por el vapor de agua presente en la atmósfera.

Determinar la presión barométrica o presión total de la mezcla de aire seco y vapor de agua resulta sencillo mediante la utilización del barómetro; determinar la presión P_w ejercida por el vapor de agua presente en la mezcla es más complicado y se debe hacer teniendo en cuenta la temperatura de la mezcla. Existen tablas debidamente calculadas que indican P_w para las diversas temperaturas y húmedades relativas. Sin

embargo, para el caso que nos ocupa utilizaremos solamente una tabla que indique la presión que ejerce un vapor de agua saturado, a diversas temperaturas; esta presión es la misma que ejerce el vapor de agua en el aire cuya humedad relativa es de 100% y según su temperatura.

Tabla 1

Temperatura °C t	Presión del vapor de agua a saturación mm. de Hg. p_s
0	4,579
5	6,543
10	9,209
15	12,788
10	17,535
30	31,824
40	55,324
50	92,510
60	149,380

Si se observa que la ecuación (11) relaciòna la humedad absoluta del aire con la presión del vapor de agua que contiene, se concluye que la humedad absoluta será máxima (humedad de saturación) cuando la presión del vapor de agua sea máxima; entonces cuando, en la ecuación (11), P_w adopta el valor de presión de saturación, H-humedad absoluta- representa el valor de humedad absoluta máxima o humedad de saturación.

$$H_s = 0,622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \qquad (12)$$

donde H_s= Humedad de saturación de un aire, o masa máxima de vapor de agua que puede contener una mezcla de aire seco y vapor de agua, por unidad de masa de aire seco.

P_t= Presión barométrica, presión total, o presión atmosférica de la mezcla

2. Construcción de la curva de humedad de saturación (HR = 100%). Entonces si se desea establecer la humedad de saturación de un aire dado, basta con medir la presión barométrica (P_t), luego establecer (Tabla 1) mediante su temperatura, la presión de saturación (P_s) y reemplazar estos datos en la ecuación (12)

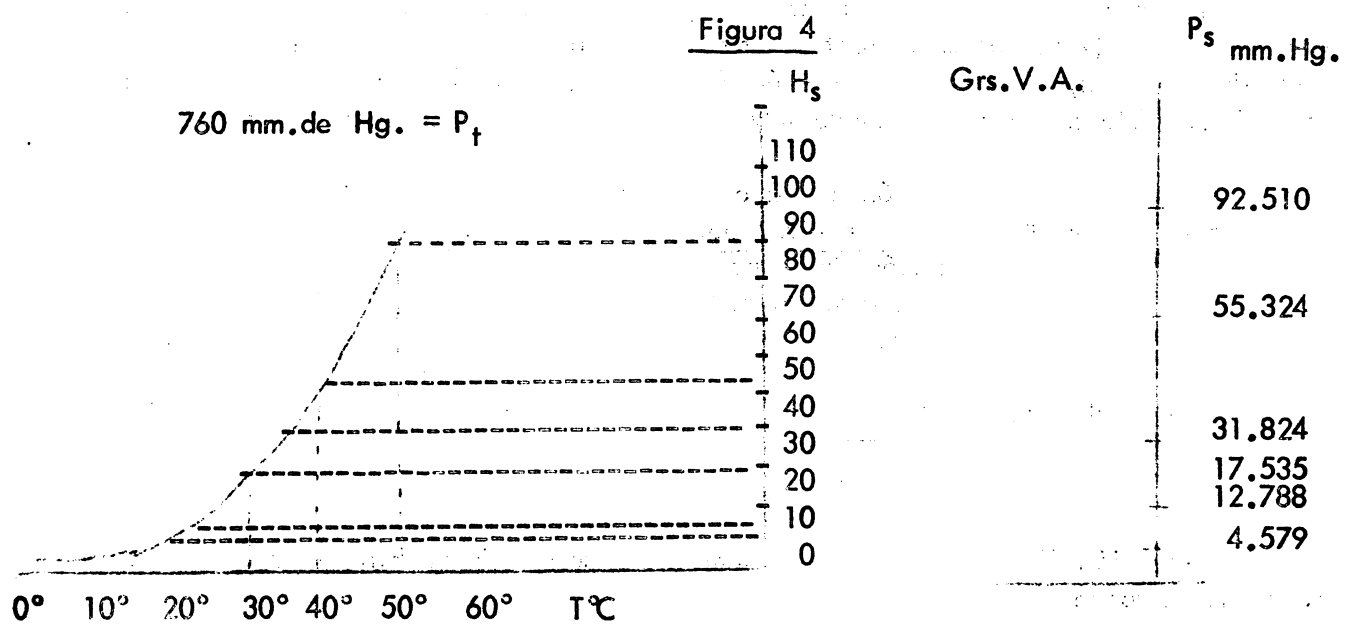
Ejemplo: Humedad de saturación, a diferentes temperaturas, para aire cuya presión barométrica es de 760 mm. de Hg.

Temperatura t°C	Presión de saturación P_s, mm. de Hg. (Tabla 1)	Humedad de saturación $H_s = 0,622 \frac{P_s}{P_t - P_s}$
0	4,579	0,00375
5	6,543	0,00538
10	9,209	0,00760
15	12,788	0,01060
20	17,535	0,01465
30	31,824	0,02710
40	55,324	0,04870
50	92,510	0,08610
60	149,380	0,15150

Obsérvese que la ecuación (12) se ha obtenido a partir de la ecuación de los gases perfectos donde se adoptó que la presión P se mediría en atmósferas, sin embargo, se ha trabajado en este caso con mm. de Hg.; ciertamente la relación $P_s/(P_t-P_s)$ tiene la característica de que tanto el numerador como el denominador están expresados únicamente en función de presiones y por lo tanto estas presiones pueden expresarse en cualquier unidad, siempre que se utilice la misma unidad para P_s y para P_t. Respecto a la humedad de saturación resultante H_s, su unidad de medida es de la forma masa de vapor de agua/masa de aire seco, esto es, que H_s puede ser expresada en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, o en gramos por gramos, o en libras por libras, sin que su valor mismo varíe; lo importante es tener en cuenta que tanto la masa de aire seco como la masa de vapor de agua estarán expresadas en la misma unidad de masa (por ejemplo, se calculó que cuando la temperatura es de 0°C, la presión de saturación, P_s es de 4,579 mm. de Hg., y por lo tanto H_s es 0,00375; se puede decir que H_s = 0,00375 kgr.V.A./Kgr. A.S. ó que H_s= 0,00375 Gr.V.A./Gr.A.S., o que H_s= 0,00375 lb.V.A./Lbr.A.S.) y que cuando se

quiera variar esta situación se debe tener en cuenta al aplicar el factor de reducción (por ejemplo es correcto decir que si $H_s = 0,00375$, entonces H_s, expresado en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco será $H_s = 3,75$ Gr.V.A./Kgr.A.S.). Aclaradas las posibles dudas respecto a las unidades de medida a utilizar, es posible construir una gráfica de temperatura contra humedad de saturación, en base a los datos calculados en el ejemplo, cuando la presión total o barométrica P_t es de 760 mm. de Hg. (Figura 4)

Figura 4



Obsérvese que en el extremo derecho del gráfico se ha colocado un eje adicional con las presiones de saturación correspondientes a las diferentes temperaturas y humedades de saturación. Así, conociendo solamente la temperatura de un aire saturado (humedad relativa 100%) y su presión barométrica, es factible determinar, a partir de esta gráfica, su humedad absoluta de saturación y la correspondiente presión de saturación del vapor de agua.

Si se tiene en cuenta que la curva presentada hace referencia solamente al aire cuya presión barométrica es de 760 mm. de Hg. (1 ats.) se ve la necesidad de construir curvas similares para las diferentes presiones atmosféricas (para cada presión barométrica puede construirse una carta sicrométrica).

3. Cálculo y construcción de las curvas de humedad relativa. Hasta el momento se ha graficado la curva de humedad V.S. temperatura para un aire saturado (cuya presión barométrica se conoce; en este caso 760 mm.Hg.); esto indica que cuando un aire está saturado de vapor de agua, esto es, cuando su H.R. = 100% , basta con conocer la temperatura de ese aire para determinar en la carta sicrométrica (correspondiente a la presión barométrica del aire en cuestión) su humedad absoluta de saturación y la presión de vapor de agua respectiva. Sin embargo, dado que el aire no siempre se halla saturado y que por lo tanto su humedad relativa no siempre es de 100%, resulta indispensable completar el gráfico sicrométrico, a fin de poder determinar la humedad absoluta del aire (y la correspondiente presión de vapor de agua) cualquiera que sea su humedad relativa, y siempre en función de la temperatura del aire y de su presión barométrica. Esto se logra retornando sobre el concepto de humedad relativa:

$$\text{Humedad relativa} = \frac{\text{Presión de vapor de agua en un aire dado}}{\text{Presión del vapor de agua en el aire saturado a la misma temperatura}} \times 100$$

$$\text{Humedad relativa} = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

De la ecuación (11) se tiene que la humedad absoluta de un aire en un momento dado es de la forma:

$$H = 0{,}622 \frac{P_w}{P_t - P_w} \qquad (11)$$

y de la ecuación (12) se desprende que la humedad de saturación para el mismo caso es de la forma:

$$H_s = 0{,}622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \qquad (12)$$

Ahora, dividiendo (11) en (12) se obtiene:

$$\frac{H}{H_s} = \frac{P_w}{P_s} \times \frac{P_t - P_s}{P_t - P_w}$$

donde es factible reemplazar en base a $HR = 100\,(P_w/P_s)$, así:

$$\frac{H}{H_s} = \frac{HR}{100} \times \frac{P_t - P_s}{P_t - \frac{P_s\,HR}{100}} \qquad (13)$$

donde:

H es la humedad absoluta del aire en un momento dado.
H_s es la humedad absoluta de saturación de ese aire a la misma temperatura.
HR es la humedad relativa del aire en porcentaje.
P_t es la presión total o barométrica del aire.
P_s es la presión ejercida por el vapor de agua a saturación.

Es claro que en la ecuación (13) se conoce H_s (se calculó en el punto anterior en función de (12) y se graficó), P_s también se conoce a partir de la temperatura, P_t es la presión barométrica, luego tan sólo resta conocer HR para calcular H. Esto indica que mediante la expresión (13) es calculable la humedad absoluta de un aire cuya humedad relativa y su temperatura se conoce, conocida previamente la presión barométrica de trabajo:

$$H = \frac{HR.Hs}{100} \times \frac{P_t - P_s}{P_t - (P_s.\ HR/100)}$$

Para graficar las curvas de humedad relativa constante, basta con calcular la humedad absoluta a las diversas temperaturas para cada una de las humedades relativas que se desee; a título de ejemplo se presenta el cálculo de algunas curvas de humedad relativa para una presión barométrica (P_t) de 760 mm.Hg.

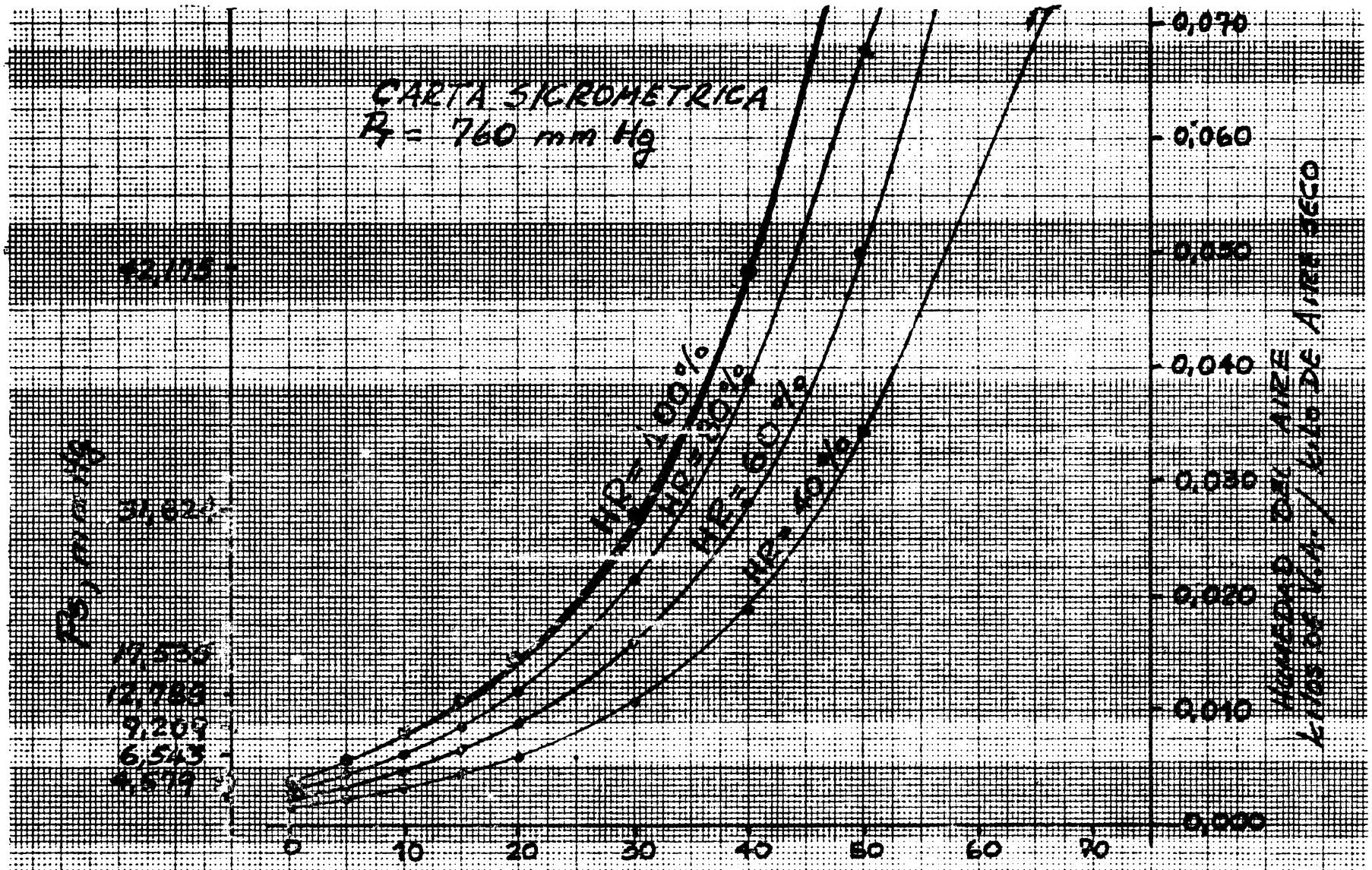
4. Uso de las curvas de humedad relativa. A partir de la carta sicrométrica en la Figura 5, es posible conocer la humedad absoluta de un aire -de presión barométrica de 760 mm. de Hg.- conociendo su temperatura (termómetro) y su humedad relativa (higrómetro o sincrómetro, etc.); a partir de la humedad absoluta (del aire) es fácil determinar rápidamente si un aire al atravesar una masa de grano lo seca (o lo humedece) igualmente será útil para precisar en qué medida seca (o humedece) y cuánto aire es necesario forzar a través de una masa dada de grano para llevarla desde una humedad inicial hasta una humedad final previamente determinada.

Ejemplo:

Supóngase que se tiene un aire cuya temperatura es de 30°C y su humedad relativa de 40%; este aire atraviesa una masa de 20 toneladas de arroz y a la salida tiene una

Humedades Absolutas correspondientes a las Diferentes Humedades Relativas y a las Diferentes Temperaturas. (Para presión Barométrica = 760 mm. Hg.)

T°C del aire	Presión de saturación Ps(mm Hg.)	Humedad de Saturación o Humedad absoluta del aire cuya HR = 100%	Humedad absoluta del aire con HR = 80%	Humedad absoluta del aire con HR= 60%	Humedad absoluta del aire con HR = 40%
Obtenida con termómetro	Obtenida de la tacla 1	$Hs = 0.622 \frac{Ps}{P_t - Ps}$ Kgr. vapor agua/ K.A.S.	$H = Hs \left(\frac{80}{100}\right) \frac{P_t \; Ps}{P_t - \frac{80\,Ps}{100}}$	$H = Hs \left(\frac{60}{100}\right) \frac{P_t \; Ps}{P_t - \frac{60\,Ps}{100}}$	$H = Hs \left(\frac{40}{100}\right) \frac{P_t \; Ps}{P_t - \frac{40\,Ps}{100}}$
0	4,579	0,00375	0,00299	0,00230	0,0015
5	6,543	0,00538	0;00429	0,00320	0,0021
10	9,209	0,00760	0,00606	0,00450	0,0030
15	12,788	0,01060	0,00845	0,00630	0,0042
20	17,535	0,01465	0,01166	0,00870	0,0058
30	31,824	0,02710	0,02149	0,01590	0,0106
40	42,175	0,04870	0,03834	0,02832	0,0186
50	55,324	0,08610	0,06782	0,05009	0,0345
60	71,880	0,15150	0,11872	0,08725	0,0570



- FIGURA 5 -

temperatura de 20°C y una humedad relativa de 80%. Se desea saber si el aire está secando al grano o no; y si lo está secando, cuántos kilos de aire deberán atravesar la masa del grano para secarla desde un contenido inicial de 18% de humedad hasta uno final del 15%. (Adóptese que se trabaja a 760 mm.Hg.)

a. Está, o no, secando el aire al grano? El aire antes de atravesar la masa de grano tiene una temperatura de 30°C y su humedad relativa es de 40% (se supone que estos datos se han establecido mediante el uso simple de termómetro y de alguno de los aparatos existentes para precisar la humedad relativa); por la carta sicrométrica de 760 mm. de Hg., Figura 5, se sabe que el aire a 30°C y 40% HR, tiene una humedad absoluta de 0.01084 kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco, o lo que es igual 10,84 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco.

Se tiene que el aire luego de atravesar la masa de grano sale con temperatura de 20°C y 80% de humedad relativa; a partir de la carta sicrométrica de 760 mm. Hg. (Página III-A-57) se determina que el aire a 20°C y 80% HR posee una humedad absoluta de 0,01172 kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (esto es 11,72 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco).

Comparando la humedad absoluta del aire de entrada con la del aire de salida:

Humedad absoluta inicial = 10,84 Grs.V.A./Kgr.A.S.
(antes de atravesar la masa del grano)

Humedad absoluta final = 11,72 Grs. V.A./Kgr.A.S.
(después de atravesar la masa de grano).

se observa que la humedad absoluta del aire aumentó al atravesar la masa del grano; esto indica que el aire se humedeció y por lo tanto parte del agua del grano salió y pasó al aire; se concluye de esta forma que el grano se ha secado.

b. Cuántos kilos de aire se requieren para que -sin variar las condiciones de humedad absoluta de entrada y salida- se logre llevar las 20 toneladas de grano desde el 18% de humedad hasta un 15%?. Comparando la humedad absoluta del aire de entrada (10,84 Grs. de vapor de agua por

kgs. de aire seco), con l[illegible]dad absoluta del aire de salida (11,72 Grs.V.A./Kgr.A.[illegible]), se concluye que cada kilo de aire seco que atraviese la masa del grano está ganando 0,88 gramos de vapor de agua.

$$HA_i - HA_f = 11,72 - 10,84 = 0,88 \text{ Grs.V.A./Kgr.A.S.}$$

Esto es que cada kilogramo de aire seco que atraviese la masa de grano remueve de ella, 0,88 gramos de vapor de agua.

Por otra parte, para llevar 20 toneladas de grano desde el 18% de humedad hasta el 15% es necesario remover 0,7059 toneladas de agua.

Peso de merma (peso de agua a remover) = $\dfrac{W_i\,(H_i - H_f)}{100 - H_f}$ $\quad W_i = 20$ toneladas, $H_i = 18\%$ $H_f = 15\%$

Peso de agua a remover = $\dfrac{20\,(18 - 15)}{100 - 15}$ $\quad \dfrac{20 \times 3}{85} = 0,7059$ ton.de agua

Relacionando la cantidad de vapor de agua que remueve de la masa del grano cada kilo de aire seco (0,88 grs.) con la cantidad de vapor de agua que se debe remover de las 20 toneladas para dejarlas con el 15% de humedad (0,7059 ton.= 705.900 gramos), se concluye que se requieren (705.900/0,88) en total 813.522 kilogramos de aire seco para llevar a cabo el secamiento deseado.

VI.14-74
mgm

VII. LA CARTA SICROMETRICA - SU UTILIDAD PARA ESTIMAR EL VOLUMEN TOTAL DEL AIRE REQUERIDO EN EL SECADO - CONSTRUCCION Y MANEJO DE LAS LINEAS DE VOLUMEN ESPECIFICO

En el capítulo anterior se determinó el peso del aire que debe atravesar una masa dada de grano para secarla desde un contenido inicial de humedad (H_i) hasta el contenido final deseado (H_f).

Entonces para determinar el tiempo total de secado es necesario establecer el peso de aire que atraviesa la masa de grano en la unidad de tiempo; si se tiene en cuenta que el aire se mueve -dentro del proceso que nos ocupa- mediante uso de ventiladores, se deduce la necesidad de establecer el peso de aire movido por el ventilador en la unidad de tiempo.

El problema radica en el aforo del ventilador: estos equipos mueven un peso mayor -o menor- de aire, según el peso del aire en particular; sin embargo, el asunto resulta fácil de solucionar si se tiene en cuenta que un mismo ventilador en condiciones constantes de R.P.M. de presión estática y de consumo de potencia mueve un mismo volumen de aire en la unidad de tiempo, entonces si se calcula de alguna forma cuanto pesa la unidad de volumen de aire es fácil saber cuánto pesa el aire movido por el ventilador en la unidad de tiempo*.

El dato buscado se denomina volumen específico del aire y se define como el volumen ocupado por la masa de mezcla que contiene la unidad de masa de aire seco. El volumen específico en el sistema métrico decimal se expresa por lo general en metros cúbicos por kilogramo de aire seco, e indica la cantidad de metros cúbicos que ocupa una mezcla de aire y vapor de agua en las condiciones dadas, cuando dentro de la mezcla hay un kilogramo de aire seco.

A. Cálculo del Volumen Específico

Se desea encontrar alguna relación que exprese el volumen específico del aire en términos de su humedad relativa y de su temperatura. Si se analiza la definición

---

* Dicho de otra forma: se sabe que un ventilador mueve X metros cúbicos de aire por minuto, si se desea saber cuánto pesan estos X m^3 es necesario saber cuántos m^3 ocupa un kilo de aire (este dato se denomina volúmen específico del aire), o cuántos kilos pesa 1 m^3 de aire (este dato se denomina densidad del aire en cuestión).

de volumen específico, se concluye que éste es igual a V/m_a, donde V es el volumen ocupado por una mezcla de aire seco y vapor de agua que contiene una masa m_a de aire seco; por todo lo anterior se puede decir que, en definitiva, se requiere expresar V/m_a en términos de variables cuyo cálculo ya conocemos (humedad relativa, temperatura absoluta, presión barométrica, etc.).

Supóngase que se tiene una masa m de aire húmedo que contiene una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua, donde $m=m_a + m_w$; adóptese que la masa m ocupa un volumen V, ejerce una presión total P y se halla a una temperatura absoluta T.

Entonces, aplicando la ecuación de los gases perfectos se tiene:

$$PV = n\,R\,T \tag{14}$$

donde n es en este caso el número total de moléculas, de vapor de agua y de aire seco, presentes en el volumen V.

Si llamamos n_a el número de moléculas de aire seco y llamamos n_w el número de moléculas de vapor de agua, presentes en el volumen V, se tiene

$$n = n_a + n_w \tag{15}$$

esto es, que el número total de moléculas en la mezcla es igual al número de moléculas de vapor de agua más el número de moléculas de aire seco que hay en el volumen V.

Si se tiene además en cuenta que el número de moléculas de gas presentes dentro de una masa dada es igual a la masa dada dividada por la masa molecular del gas en cuestión (ver ecuaciones 5, 6, y 7) se concluye:

$$n_a = \frac{m_a}{M_a} \qquad n_w = \frac{m_w}{N_w} \tag{16}$$

donde M_a es el peso o masa molecular del aire seco igual a 29,0 Grs./Mol., y M_w es la masa molecular del vapor de agua igual a 18,0 Grs/Mol. ; reemplazando (16) en (15):

$$n = \frac{m_a}{M_a} + \frac{m_w}{M_w} \tag{17}$$

y reemplazando a su vez (17) se llega a:

$$PV = RT \left(\frac{m_a}{M_a} + \frac{m_w}{M_w} \right) \qquad (18)$$

Recordando que humedad absoluta se definió como $H = m_w / m_a$, se encuentra que $m_w = H.m_a$, y esta expresión se lleva a la igualdad (18):

$$PV = RT \left(\frac{m_a}{M_a} + \frac{m_a.H}{M_w} \right) \qquad (19)$$

y por lo tanto:

$$\frac{V}{m_a} = \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{M_a} + \frac{H}{M_w} \right)$$

multiplicando por M_w/M_w se tiene:

$$\frac{V}{m_a} = \frac{RT}{M_w P} \left(H + \frac{M_w}{M_a} \right)$$

$$\frac{V}{m_a} = \frac{82,06\ T}{18,0\ P} \left(H + \frac{18,0}{29,0} \right)$$

y finalmente:

$$VE = \frac{V}{m_a} = \frac{4,5588\ T\ (H + 0,622)}{P} \qquad (20)$$

donde VE está dado en $Cmt^3/gr.$, pues V está dada en cmt^3, m_a en gramos; recuérdese además que H está expresada en unidades de masa/unidades de masa (masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco), T en grados absolutos (o Kelvin) y P en atmósferas. En base a la ecuación (20) es fácil determinar el volúmen específico, conociendo la humedad absoluta, la temperatura y la presión barométrica del aire (para el efecto se buscará en la carta sicrométrica correspondiente a la presión atmosférica dada, la humedad absoluta H para las condiciones de humedad relativa y temperatura anotadas); los valores se reemplazan en la ecuación (20), asi:

H será la humedad absoluta hallada en la carta sicrométrica, P la presión barométrica del lugar expresada en ats., y T la temperatura absoluta del aire.

B. Construcción de la Línea de Volumen Específico

Se ha visto cómo calcular el volumen específico del aire en un momento dado; sin embargo, en algunos casos resulta más práctico tener esta información tabulada, para usarla rápidamente. Por esta razón se acostumbra graficar dentro de la Carta Sicrométrica líneas que relacionen el volumen específico del aire, con su humedad absoluta, con su humedad relativa y/o con su temperatura.

Tomando la ecuación (20) y despejando H, se deduce que:

$$H = \frac{VE \times P}{4,5588T} - 0,622 \qquad (21)$$

y esta ecuación permite graficar la humedad absoluta del aire contra su temperatura en condiciones de volumen específico constante. Dicho de otra forma, si se desea, por ejemplo, construir la gráfica de humedad absoluta del aire contra su temperatura cuando el volumen específico del aire es de 800 cmts^3/gr., de aire seco, y la presión barométrica es de una atmósfera, basta con reemplazar en la ecuación (21), P por una atmósfera y VE por 800:

$$H = \frac{800 \times 1}{4,5588\ T} - 0,622$$

y es posible dar diferentes valores a T y para cada uno de dichos valores se obtendrá una H con lo cual finalmente se obtiene una serie de puntos cuyas coordenadas (T, H) se conocen y permiten ubicarlos sobre una Carta Sicrométrica, con la seguridad que esos puntos corresponden todos a aires húmedos con diversas temperaturas y humedades absolutas pero con el mismo volumen específico (800 en este caso); resta solamente unir los puntos y se tendrá -sobre la Carta- la curva de volumen específico constante igual a 800 cmts^3/gr. de aire seco.

Si se analiza un poco en detalle la ecuación (21) también se deduce que:

$$T = \frac{VE \times P}{4,5588\ (H + 0,622)} \qquad (22)$$

donde si H se adopta constante el denominador de la ecuación, se torna igualmente constante y T es de la forma:

$$T = \frac{VE \times P}{K} \qquad (23)$$

lo cual indica que no importa cuál sea el valor VE que se adopte, para una misma presión barométrica (Presión constante) y para una misma humedad absoluta del aire, las curvas de Volumen Específico tendrán la misma pendiente, analisis que permite concluir que todas las curvas de volumen específico que se grafican sobre la Carta Sicrométrica en función de la humedad absoluta del aire contra su temperatura serán paralelas, quedando de esta forma bastante simplificado el problema de su construcción.

Si se profundiza más sobre el problema matemático de la ecuación (21) se podrá igualmente demostrar que su curvatura es muy pequeña y que para la mayoría de los cálculos aproximados podría suponerse que es una recta.

Así se concluye que en la Carta Sicrométrica, para un volumen específico constante, la gráfica de temperatura contra humedad absoluta se aproxima a una línea recta. Esto implica que dentro de una carta sicrométrica, todos aquellos puntos que tienen un mismo volumen específico se encuentran sobre una misma recta aproximadamente.

El procedimiento utilizado para construir las rectas de temperatura contra humedad absoluta para los diferentes volúmenes específicos, se basa en los anteriores análisis matemáticos y consiste en:

1. Calcular el volumen específico para una temperatura y una humedad dadas y luego calcular la temperatura que tendrá otro aire con otra humedad absoluta -escogida arbitrariamente- pero con el mismo volumen específico; esto en definitiva determina dos puntos (correspondientes a aires diferentes) de igual volumen específico, por los cuales pasa una línea recta que ubica los diferentes aires que, en las condiciones de la carta, poseen el volúmen específico ya calculado.

2. Otro sistema que se utiliza con alguna frecuencia para el trazado de las rectas de volumen específico constante, consiste en escoger arbitratiamente un volumen específico cuya recta se desea trazar, y se localizan dos puntos que tengan ese volumen específico, con lo cual queda determinada la recta. A continuación se presenta un ejemplo para cada uno de los casos propuestos.

Caso A

Se supone que se conoce la humedad absoluta y la temperatura del aire en un momento determinado; igualmente se debe conocer la presión barométrica del lugar. Por ejemplo, adóptese un aire con 5 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (H. absoluta), 25°C. de temperatura, y 760 mm. de presión barométrica del lugar.

Tomando la ecuación (20) :

$$VE = \frac{4,5588\ T\ (H + 0,622)}{P}$$

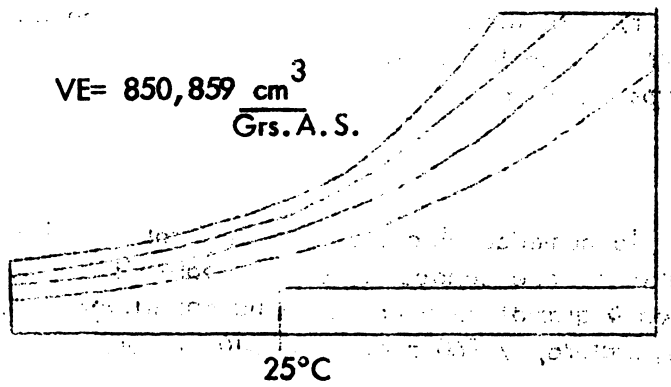
teniendo en cuenta que T es temperatura en grados Kelvin (luego 25°C = (273 + 25)°K. = 298°K), H es humedad absoluta en unidades iguales de masa (luego 5 grs. V.A./Kgr.A.S. se toman al igualar unidades en 0.005 Kgrs.V.A./ Kgrs.A.S.) y P es presión total de la mezcla, o sea la presión barométrica de ese aire, expresada en atmósferas (para este caso P = 760 mm. Hg. = 1 ats.) y reemplazando los valores dados, ya convertidos a las unidades requeridas:

$$VE = \frac{4,5588 \times 298\ (0,005 + 0,622)}{1} = 850,859\ cmts^3/Grs.A.S.$$

obsérvese que el VE así calculado se expresa en $cmts^3$/gr.A.S. (pues en la ecuación de los gases perfectos V está en $cmts^3$ y m en gramos).

El cálculo efectuado indica que cuando la presión barométrica es de 760 mm Hg., y la temperatura del aire de 25°C y su humedad absoluta de 5 grs.V.A./Kgr.A.S., el volumen específico de ese aire es de 850,859 $cmts^3$/gr.A.S. (ó 0,857 M^3/Kgrs.A.S.). Ver figura 9.

Figura 9



Hasta el momento se ha ubicado un punto correspondiente a la recta de VE 851, para trazar la recta total basta con determinar otro punto. Para esto supóngase un aire a la misma presión barométrica (760 mm Hg= 1 ats.) y que tiene el mismo volumen específico calculado (VE= 850,859 cmts^3/gr.A.S.) y una humedad absoluta cualquiera, determinada arbitrariamente y en lo posible menor que la original (en este caso menor que 5 Grs.V.A./kgr.A.S.): adóptese humedad absoluta cero, H=0. Ahora es posible utilizar la ecuación (20) para calcular qué temperatura tendrá un aire cuando H=0, VE 850,859 y P=1.

$$850,859 = \frac{4,5588\ T\ (0,000 + 0,622)}{1}$$

Luego T, despejando, es:

$$T = \frac{1 \times 850,859}{4,5588\ (0,000 + 0,622)} = 300,3955°K$$

y por tanto:

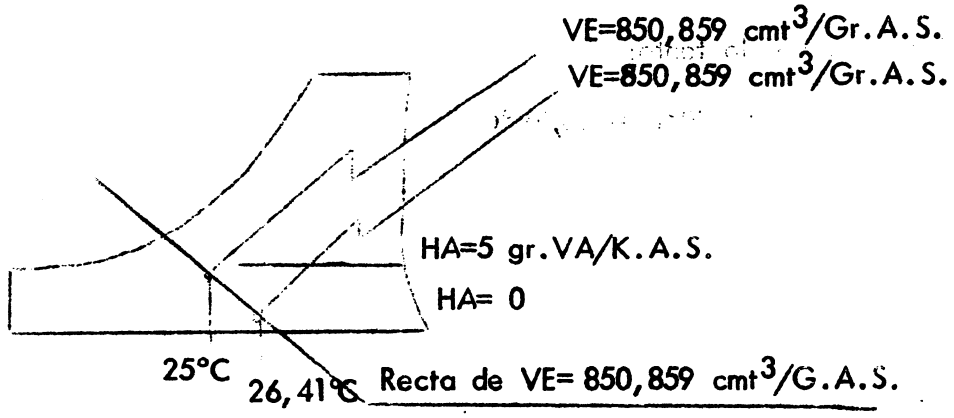
$$T = 27,3955°C$$

Ahora es correcto concluir que:

a. Cuando la presión barométrica es de 760 mm. Hg, tanto el aire que está a 25°C con humedad absoluta de 5 grs. V.A./Kgr.A.S., como el aire que está a 27,3955°C, con humedad absoluta cero, tienen el mismo volumen específico. (VE= 850,859 cmts^3/Gr.A.S.).

b. Dentro de la carta sicrométrica de 760 mm Hg., la recta de volumen específico 850,859 cmts^3/gr.A.S., pasa por los puntos mencionados anteriormente.

Figura 10



Caso B

Se supone que se quiere calcular la temperatura del aire, cuando se conoce la presión barométrica, la humedad absoluta, y su VE. Adóptese que se quiere construir la recta de VE= 900 cmts^3/ gr.A.S.; supóngase P=1 ats., ahora el procedimiento consiste en suponer 2 humedades absolutas diferentes escogidas arbitrariamente y determinar para cada una de estas humedades absolutas qué temperatura debe tener el aire para que su VE sea el dado.

Continuando con el ejemplo, escogemos arbitrariamente dos HA, 0,010 grs., V.A./ Gr.A.S. y 0,000 grs.V.A./Gr.A.S., así en las condiciones establecidas aplicamos la ecuación (20):

$$VE = \frac{(H + 0,622)\, 4,5588\, T}{P}$$

1. Si VE= 900 cmts^3/gr.A.S.

   Si P = 1 ats. y H= 0,010 grs.V.A./gr.A.S.

$$900 = \frac{(0,010 + 0,622)\, 4,5588\, T}{1}$$

   y por lo tanto:

   T = 312,72°K = 39,72°C

2. Cuando VE= 900 cmts^3/gr.A.S.

   Si P = 1 ats. y H= 0,000 grs.V.A./gr.A.S.

$$900 = \frac{(0,000 + 0,622)\, 4,5588\, T}{1}$$

   y por lo tanto:

   T = 317,79°K = 44,79°C

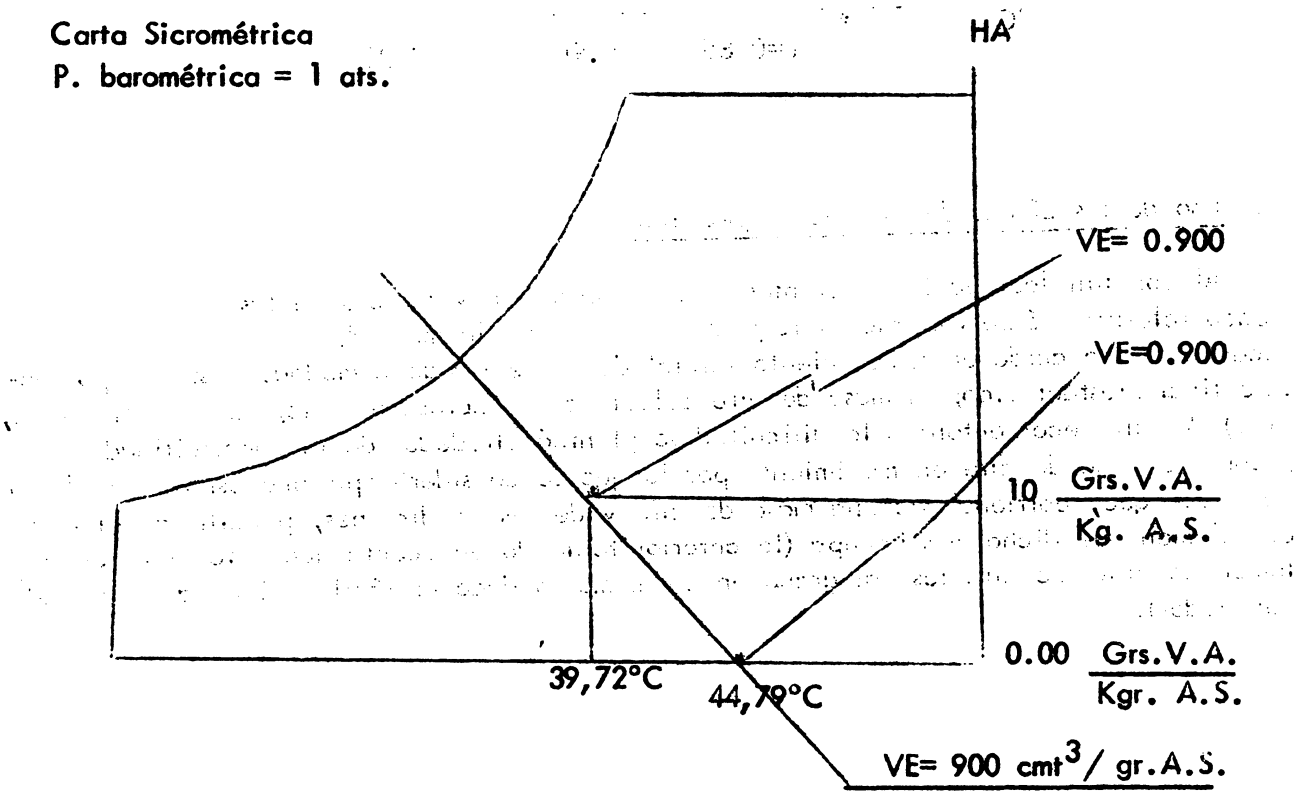
Del cálculo efectuado se concluye que, con presión barométrica de 1 ats., el aire con humedad absoluta de 10 gr. V.A./kgr.A.S. y 39,72°C tiene un volumen específico de 900 cmts^3/grs.A.S.; de igual forma se concluye que, con presión barométrica de 1 ats., el aire con humedad absoluta 0,000 (aire seco) y 44,79°C de temperatura tiene 900 cmts^3/gr.A.S. de volumen específico, también.

Por lo anterior queda determinado que en la carta sicrométrica de 1 ats., de presión barométrica, la recta de VE= 900 ctms^3/grs.A.S., pasa por los dos puntos hallados: (figura 11)

Punto 1: HA = 0,010 grs.V.A./gr.A.S. y T = 39,72°C

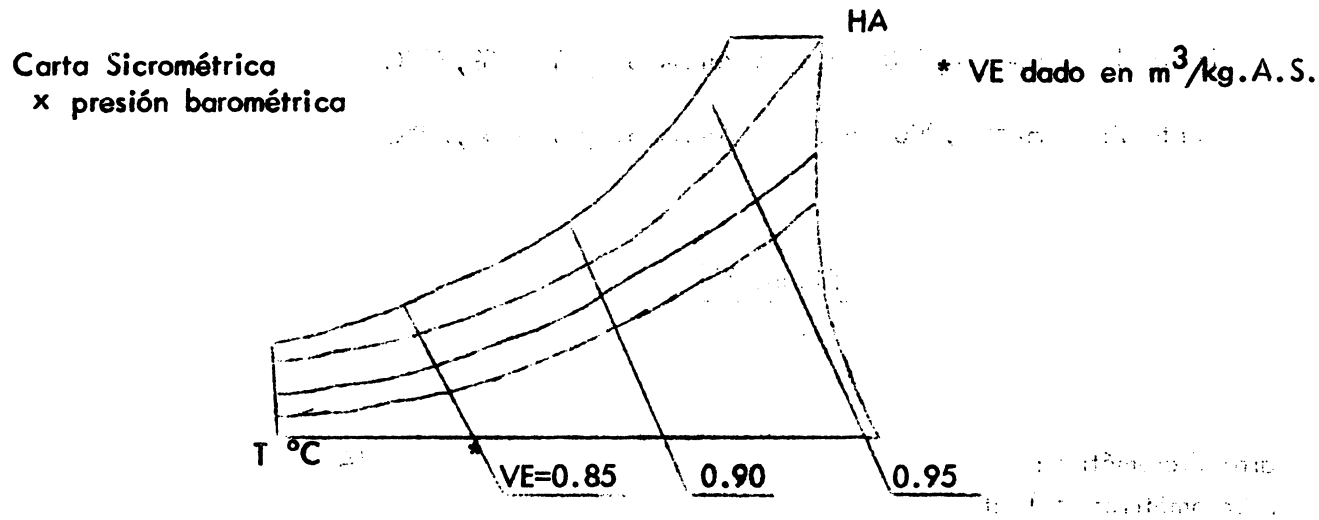
Punto 2: HA= 0,000 grs.V.A./gr.A.S. y T = 44,79°C

Figura 11



Con los anteriores ejemplos quedan aclaradas las dudas respecto al método utilizado para el trazado de una recta de VE. Resta indicar solamente que se acostumbra a trazar en cada carta sicrométrica un número reducido de rectas de VE, con el fin de no complicar el dibujo; sin embargo, si se desea, puede trazarse cualquier cantidad de ellas. (En la figura 12, carta sicrométrica con algunas líneas de VE).

Figura 12



C. Uso de las Líneas de Volumen Específico

Al concluir los apuntes referentes a la construcción y manejo de las curvas de humedad relativa (véase ejemplo al respecto) se averiguó la masa de aire necesaria para secar un grano desde un x por ciento inicial de contenido de humedad, hasta un porcentaje final prestablecido; la masa de aire calculada se expresa en kilogramos (o en libras, etc.) de aire seco; entonces la dificultad se planteó alrededor de la imposibilidad de pesar una masa de aire en movimiento por lo que se consideró oportuno establecer alguna constante que, partiendo de una masa de aire y de sus condiciones, permitiera calcular el volumen que dicha masa ocupa (lo anterior teniendo en cuenta que determinar el volumen de aire que atraviesa al grano en un momento dado es fácil en base al aforo del ventilador).

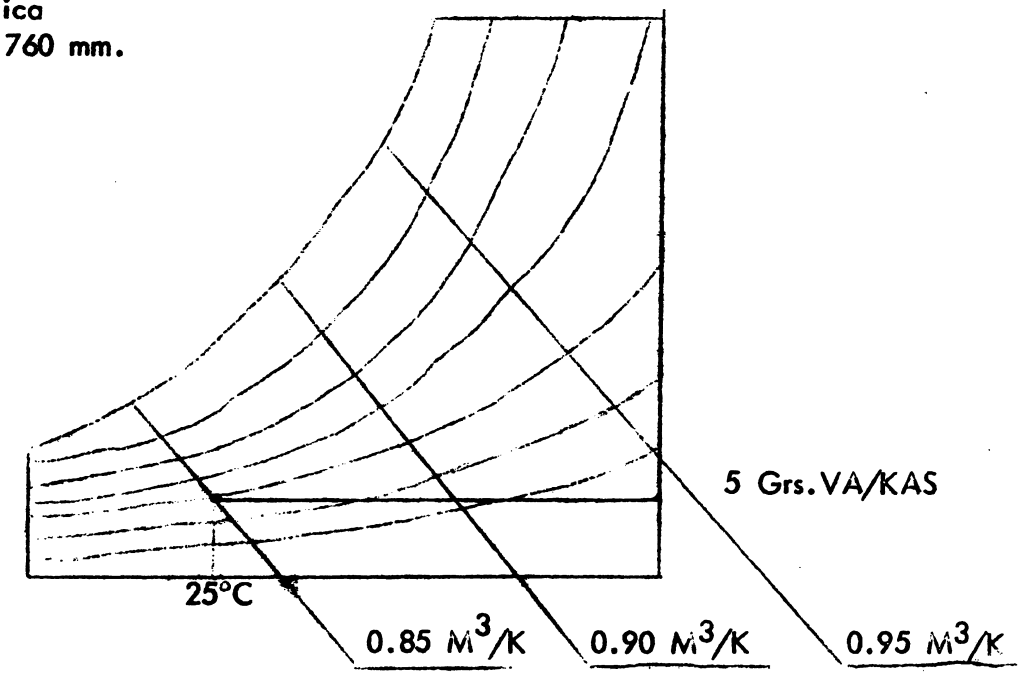
Ejemplo:

Trabajando con un aire ambiente de 760 mm.Hg. cuya humedad es de 5 grs. de vapor de agua por kilogramo de aire seco y su temperatura es de 25°C, se ha calculado que para secar una cantidad dada de un grano se requiere hacer pasar a través de la masa de grano un total de 200.000 kilogramos de aire seco: se desea saber cuántos metros cúbicos de aire deben atravesar la masa de grano; o lo que es lo mismo, cuántos metros cúbicos de aire seco pesan 200.000 kilógramos.

En la Carta Sicrométrica de 760 mm. Hg., ubicamos el aire con 5 grs.V.A./Kgrs. A.S., de humedad absoluta y 25°C y determinamos su volúmen específico* (Ver figura 13).

Figura 13

Carta Sicrométrica
P. barométrica 760 mm.



* Si el VE buscado en el problema se quiere establecer con la mayor precisión posible, basta con utilizar la ecuación (20):

$$VE = \frac{4,5588\ T\ (H + 0,622)}{P}$$

donde se adoptaría P = 1, T = 298°K (25°C, expresados en Kelvin) y H= 0,005 K.V.A./K.A.S.

Se concluye entonces que el aire dado tiene un volumen específico de 0,85 M^3/Kg.A.S., aproximadamente ; esto es que cada kilogramo de aire seco ocupa 0,85 M^3 y por lo tanto los 200.000 kilogramos de aire seco ocupan:

$$200.000 \times 0,85 = 170.000\ M^3$$

luego es correcto afirmar que para secar la masa de grano en cuestión, en las condiciones anotadas, se debe hacer pasar a través de ella un total de 170.000 M^3. Si se conoce, como es normal, los metros cúbicos que mueve por minuto el ventilador que se utiliza, es fácil calcular el tiempo total de secamiento.

VIII. LA CARTA SICROMETRICA, SU UTILIDAD EN EL ENFRIAMIENTO DE GRANOS -CONSTRUCCION Y MANEJO DE LAS LINEAS DE ENTALPIA-

En capítulos anteriores se ha solucionado el problema básico del secamiento, en cuanto hace referencia a la determinación de la capacidad de un aire para secar una masa de grano dada, y al cálculo de la cantidad de aire que se requiere en el proceso.

Ahora, resta estudiar el problema del enfriamiento de granos mediante corrientes de aire; resulta entonces preciso determinar si todo aire que atraviesa una masa de grano necesariamente la enfría, y -si no necesariamente la enfría- establecer las condiciones que debe reunir un aire para enfriar efectivamente la masa de grano.

Es claro que la manera más lógica de averiguar si un aire enfria o no un grano, consiste en forzar ese aire a través de la masa de grano y comparar el contenido de calor del grano antes y despues del proceso. Entonces si el calor del grano al final del proceso es mayor que su calor inicial, se concluye que el grano ha aumentado su contenido de calor y que por lo tanto el proceso de enfriamiento no se ha llevado a cabo. Si por lo contrario, el contenido de calor del grano despues del proceso resulta inferior a su contenido inicial, se concluye que el enfriamiento ha tenido lugar y que el aire usado si tiene capacidad para enfriar la masa de grano en cuestión.

Sin embargo, el proceso propuesto no tiene aplicación industrial, pues si lo prueba da resultado negativo, esto es si el calor final del grano resulta superior a su calor inicial, se habrá calentado y lejos de lograr el propósito inicial se han introducido nuevas dificultades -o, por lo menos, se han agravado los existentes- para la conservación del grano.

Si se tiene en cuenta que al atravesar el aire una masa de grano se sucede una trasferencia de calor, del grano hacia el aire, o bien del aire hacia el grano, se concluye que en aquellos casos en que el calor contenido por el grano aumenta, necesariamente el calor contenido por el aire circulante debe disminuir; mientras que si el calor del grano disminuye, el del aire circulante debe aumentar. De todo lo anterior se deduce que la mejor forma de establecer si un aire está o no en condiciones de enfriar un grano, consiste en forzar el aire a través de la masa de grano y comparar el contenido de calor del aire al final del proceso, con su contenido inicial. Sólo que, para el efecto, se debe establecer algún sistema que permita determinar rápidamente el contenido de calor de un aire, para así poder determinar ese contenido antes de que atraviese la masa de grano y después.

El establecimiento del sistema en cuestión se logra en base del análisis de las características termicas del aire, análisis que se presenta a continuación:

A. Entalpia

El calor es una forma de energía. Una clase de calor es perceptible por los sentidos, cuando éstos entran en contacto con materiales "calientes". Así, es posible definir la temperatura como el nivel del calor (energía calorífica) de un cuerpo; se utiliza para medir la acción más o menos directa del calor sobre los sentidos (para determinar cuándo un cuerpo se halla más "caliente" que otro).

Sin embargo, aumentar la temperatura de los cuerpos no es el único efecto del calor: es factible agregar calor a un cuerpo -y el cuerpo en cuestión puede absorberlo- sin que su temperatura cambie; ésto sucede durante el cambio de estado físico de los cuerpos. Así para lograr que el agua pase del estado líquido al estado de vapor (mediante el uso de calor), se debe ante todo agregar calor: como un primer efecto -dependiendo de su temperatura inicial- aumentará la temperatura del líquido hasta llegar a un punto en el cual la temperatura se estabiliza y permanece constante; entonces todo el calor que se le suministre al agua será utilizado para que ella se evapore y mientras dure el proceso de cambio de estado, la temperatura del agua y del vapor que de ella se desprende, permanecerá constante.

De lo anterior se deduce que un cuerpo puede absorber calor de dos formas diferentes: así, en un caso, el cuerpo recibe calor y lo utiliza para aumentar su temperatura física sin cambiar de estado; en el otro caso, un cuerpo puede recibir calor y utilizarlo para cambiar su estado, sin cambiar su temperatura.

El calor que utiliza un cuerpo para variar su temperatura -sin cambiar de estado- se conoce como calor sensible; por su parte, el calor que recibe un cuerpo y lo utiliza para cambiar de estado -sin cambiar su temperatura- se denomina calor latente.

La suma del calor latente y del calor sensible utilizado por un cuerpo para llegar a unas condiciones de estado y de temperatura, desde unas condiciones de estado y de temperatura previamente establecidas, se denomina calor total del cuerpo respecto a las condiciones iniciales; al calor total de un cuerpo se le denomina comunmente Entalpia.

A título de aclaración se analiza el siguiente ejemplo: supóngase que se tiene una masa de agua en estado líquido y a 0°C. Si esta masa se somete a la acción del calor, su temperatura irá aumentando contínuamente hasta llegar a un punto en el cual se estabiliza y comienza la ebullición del agua; si llamamos X_1 la cantidad de calor que ha recibido la masa desde el momento en que se inició la operación hasta que su temperatura se estabilizó, es correcto afirmar que X_1 es una cantidad de calor sensible, pues ha sido utilizada para aumentar la temperatura del agua sin que ella haya cambiado de estado. Si una vez estabilizada la temperatura

e iniciado el proceso de ebullición de la masa de agua, se continúa agregando calor, la temperatura del agua no variará hasta tanto no se evapore la totalidad del líquido; una vez concluído el proceso de ebullición, si se continúa agregando calor, la temperatura del vapor de agua irá aumentando; si suponemos que desde que se inició el proceso de ebullición hasta que concluyó, se utilizó una cantidad X_2 de calor, es correcto afirmar que X_2 es la cantidad de calor latente que requirió la masa de agua para ebullir. Finalmente, si una vez terminado el proceso de ebullición e iniciado el aumento de temperatura del vapor de agua se continúa agregando calor hasta que el vapor alcanza una temperatura T, se dirá que la cantidad de calor X_3 suministrada al vapor de agua para aumentar su temperatura es la cantidad de calor sensible absorbida por el vapor de agua.

Del mismo ejemplo se concluye que la entalpia del vapor de agua a T°C, respecto al agua en estado líquido con 0°C, es igual a la suma $X_1 + X_2 + X_3$; esto es, que la entalpia es igual a la suma del calor sensible más el calor latente utilizado en la totalidad del proceso mediante el cual se llevó el agua desde el estado líquido y 0°C, hasta el estado de vapor y T°C.

B. Medición del calor

Al hablar de entalpia se ha hecho mención de la cantidad de calor total; sin embargo, aún no se ha determinado cómo se mide esa cantidad de calor, ni en qué unidades se expresa.

1. Unidad de medida del calor. Para expresar el calor suministrado a un cuerpo -o suministrado por él- se hace uso de la unidad calorífica denominada caloría.

Para efectos de estos apuntes definiremos CALORIA, como la cantidad de calor que debe suministrarse a 1 gramo de agua para aumentar su temperatura en 1°C (existen varias definiciones, pero en el fondo indican lo mismo, con un grado mayor o menor de sofisticación conceptual, que en nada afecta a nuestro interés específico en este caso); con frecuencia se utiliza como unidad de calor la kilocaloría -equivalente a 1000 calorías- que es definible como la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1°C la temperatura de 1 kilogramo de agua.

Lógicamente la caloría es también equivalente a la cantidad de calor que pierde un gramo de agua cuando su temperatura disminuye en 1°C y la kilocaloría corresponde a la respectiva pérdida de calor cuando un kilogramo de agua rebaja su temperatura en 1°C.

Dentro del sistema americano de medidas, la unidad establecida para expresar la cantidad de calor, es el BTU que equivale al calor requerido por una libra de agua para aumentar su temperatura en 1°F (teniendo en cuenta que una libra equivale a 453 gramos y que un aumento de temperatura de 1°F equivale a un aumento de 5/9

de grado centígrado, se concluye que 1 BTU equivale aproximadamente a 252 calorías; o lo que es igual a 1 kilocaloría equivale a 3,96 BTU).

2. Calor específico de los cuerpos. En base a la definición de las unidades utilizadas para medir la cantidad de calor, es posible determinar qué cantidad de calor (en calorías o en BTU) sensible se debe suministrar a una masa de agua para que su temperatura aumente un número dado de grados (dentro del rango de temperaturas del agua en estado líquido).

Así, si se desea averiguar la cantidad de calor que debe suministrarse a 820 gramos de agua para que su temperatura aumente desde 10°C hasta 45°C, basta con tener en cuenta que por cada gramo de masa y por cada °C de temperatura que aumente, ha de suministrarse 1 caloría luego para los 820 gramos y los 35°C de aumento se debe agregar 820 x 35 x 1 = 28.700 calorías; se deducen entonces que la cantidad de calor que se debe agregar a una masa de agua en estado líquido para llevarla desde una temperatura hasta otra es:

$$Q = 1.m\ (T_f - T_i) \qquad (24)$$

donde: m = masa de agua

T_f = Temperatura final a la cual se desea llevar la masa m

T_i = Temperatura inicial a la cual se halla la masa m antes de ser calentada.

Q = Cantidad de calor necesario para calentar la masa, m, desde una temperatura T_i hasta otra temperatura T_f.

Obsérvese que en la ecuación (24) si T_f es menor que T_i, la masa de agua no se habrá calentado sino se habrá enfriado, y así Q será negativo e indicará la cantidad de calor sensible que ha perdido el agua al enfriarse desde T_i hasta T_f.

Sin embargo, si lo que se desea averiguar es la cantidad de calor que debe suministrarse a una masa m_a de aire seco para calentarla n grados, aún no disponemos de los datos suficientes para solucionar el problema. Para obviar esta dificultad se hace uso de una propiedad física de los cuerpos según la cual la cantidad de calor que requiere una misma masa de un material para aumentar su temperatura en n grados permanece constante aproximadamente para un mismo material.

Dicha propiedad o constante física, particular a cada material, se denomina CALOR ESPECIFICO, e indica la cantidad de calor que requiere 1 gramo de masa para aumentar su temperatura en 1°C; de la definición misma de caloría y de la de calor específico se concluye que el calor específico del agua es 1 cal/gr. °C.

Obsérvese que el calor específico de un cuerpo se expresa en el sistema métrico decimal en calorías por gramo y por °C, o en kilocalorías por kilo y por °C; en el sistema americano, el calor específico se expresa en BTU por libra y por °F. Si se analiza el problema dimensional se podrá observar que, en definitiva, el valor absoluto del calor específico de un material es el mismo no importa en cual sistema de los mencionados se exprese (para aclarar, supóngase que un material dado tiene un valor específico de X cal/gr. °C y que se quiere averiguar el calor específico equivalente en términos de BTU/lbr. °C y que se quiere averiguar el calor específico equivalente en términos de BTU/lbr. °F: el problema se reduce aconvertir calorías a BTU, gramos a libras y °C a °F:

Una caloría es la cantidad que requiere un gramo de agua para aumentar su temperatura en 1 °C, por su parte un BTU es la cantidad de calor que requiere 1 libra (453 gramos) de agua para aumentar su temperatura en 1°F (5/9 de °C), luego es fácil establecer el valor de un BTU en términos de calorías:

1 cal.	1 gr.	1°C
x	453 gr.	5/9 °C

por lo tanto, 1 BTU = 453 (5/9) calorías

Por otra parte, se sabe que 1 libra equivale a 453 gramos y que un aumento de 1°F equivale a un aumento de 5/9 de °C.

De lo anterior se deduce que para convertir calorías a BTU basta con dividir 453 (5/9), para convertir gramos al libras se logra dividiendo por 453 y para convertir temperatura aumentada en grados centígrados a temperatura aumentada en °F se dividirá por 5/9; luego para convertir X cal. gr. °C basta con dividir por los valores anotados).

$$X \frac{\text{cal}}{453\ (5/9)} : \frac{\text{gramos}\ \ ^{\circ}\text{C}}{453\ \ \ 5/9} = X\ \text{BTU/lbr.}\ ^{\circ}\text{F}$$

3. Cantidad de calor sensible. Conociendo el calor específico (Ce) de un cuerpo se ha determinado la cantidad de calor que requiere para aumentar la temperatura de la unidad de masa (gramo, o kilo, o libra) en un grado de temperatura (°C, °F); ahora, si es posible determinar

la cantidad de calor que requiere una masa m, de un material cuyo Ce se conoce, para aumentar su temperatura en N grados:

$$Q = Ce \cdot m. (T_f - T_i) \qquad (25)$$

donde:

Ce = calor específico del cuerpo que se desea "calentar"

m = masa del cuerpo que se desea calentar (expresada en gramos, o en kilogramos si las temperaturas se expresan en °C, en libras si las temperaturas se expresan en °F).

T_i = temperatura inicial de la masa antes de agregarle calor.

T_f = temperatura final de la masa, una vez "calentada".

Q = cantidad de calor requerido por la masa m para llevarla desde una temperatura T_i hasta otra T_f (Q se expresa en calorías, kilocalorías o en BTU según el sistema de unidades que se haya adoptado).

Cuanto T_f es menor que T_i; el material se habrá enfriado y Q será negativo, pues indica la cantidad de calor sensible perdido por el cuerpo al enfriarse desde T_i hasta T_f.

4. Cantidad de calor latente. Para medir la cantidad de calor latente suministrado a una masa durante un cambio de estado, se hace uso de las llamadas constantes caloríficas de cambio de estado; estas han sido establecidas para cada material en base a una de las propiedades físicas de los cuerpos que indica que para que cambien de estado -en condiciones dadas de temperatura y presión- cada unidad de masa requiere una cantidad constante de calor (calor positivo o negativo; esto es, que según el cambio de estado de que se trate, cada unidad de masa debe recibir o entregar esa cantidad constante de calor).

Para cada material en particular se ha determinado entonces una constante para cada cambio de estado; esta constante (en cada caso) indica la cantidad de calor que debe suministrarse (o quitarse) a una unidad de masa del material en cuestión para que esa unidad de masa cambie de estado, sin cambiar de temperatura.

Las constantes de cambio de estado más usadas son: (1) calor latente de solidificación (C_s); (2) calor latente de fusión (C_f); (3) calor latente de evaporación (C_{ev}); (4) calor latente de licuefacción (C_l). Estas constantes se expresan en el sistema decimal en calorías/gramo, e indican la cantidad de calorías que es necesario

agregar -o extraer, según el caso- de 1 gramo de un material dado para que cambie de estado sin variar la temperatura. En el sistema americano las constantes mencionadas se expresan en BTU/libra, e indican la cantidad de calor que es necesario agregar -o extraer, según el caso- de 1 libra de un material dado para que cambie de estado, sin variar la temperatura.

Conociendo la cantidad de calor que requiere 1 gramo (o 1 libra) de un determinado material para efectuar un cambio de estado dado, es fácil calcular el calor necesario para que una masa m del mismo material efectúe el mismo cambio de estado, así:

$$Q_f = m \cdot C_f \qquad (26)$$

$$Q_s = m \cdot C_s \qquad (27)$$

$$Q_{ev} = m \cdot C_{ev} \qquad (28)$$

$$Q_l = m \cdot C_l \qquad (29)$$

donde:

m = la masa de material que se desea cambiar de estado; se expresa en gramos o en libras, según las unidades usadas para definir la constante respectiva de cambio de estado

C_f, C_s, C_{ev}, C_l = calor latente de fusión, desolidificación, de evaporación y de licuefacción respectivamente. Se expresan en cal./gr., o en BTU/lbr.

Q_f, Q_s, Q_{ev}, Q_l = calor latente, consumido para lograr la fusión o la solidificación, o la evaporación o la licuefacción, respectivamente, de una masa m cuyas constantes de cambio de estado son, en el mismo orden C_f, C_s, C_{ev}, C_l.

Con las relaciones (26), (27), (28) y (29), es posible calcular la cantidad de calor latente que se consume para lograr que la masa m -cuya constante de cambio de estado se conocen- pase del estado sólido o líquido al de vapor (Q_{ev}), o del estado de vapor al estado líquido (Q_l).

C. Entalpía de las Mezclas de Aire Seco y Vapor de Agua

Adoptemos, como patrón de referencia, que el aire seco en estado de vapor y a 0°C tiene entalpía cero; igualmente adoptemos que el agua en estado líquido y 0°C de temperatura tiene entalpía cero. Entonces la mezcla de aire seco y vapor de agua

cuando se halla a una temperatura T°C, tiene una entalpia E que será igual a la suma de la entalpia del aire seco a T°C y de la entalpia del vapor de agua a T°C.

1. Entalpia del aire seco. En el aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua) la entalpia del aire seco a T°C será igual al calor sensible que ha requerido ese aire seco para aumentar su temperatura desde 0°C hasta T°C; obsérvese que para determinar la entalpia del aire seco, en las condiciones de referencia anotadas, no se tiene en cuenta el calor latente pues se ha supuesto como patrón de comparación, aire seco en estado de vapor y por lo tanto el aire no ha absorbido calor latente, pues no ha sufrido cambio alguno de estado:

E_{as} = calor sensible requerido por el aire seco para variar su temperatura desde 0°C hasta T°C.

Ahora bien, para calcular el calor sensible que ha requerido una masa m_a de aire seco para alcanzar a partir de 0°C la temperatura T°C, se usa la ecuación (28):

$$Q = Ce_a \cdot m_a (T_f - T_i) \qquad (30)$$

donde:

Q = calor sensible requerido para calentar la masa m_a de aire seco desde T_i = 0°C (32°F) hasta T_f.

Ce_a = calor específico del aire, 0.24 cal/gr. °C.

T_f = temperatura final del aire calentado

T_i = 0°C (punto de referencia)

si se tiene en cuenta que T_i para la referencia dada es 0°C, se concluye que la ecuación (30) cuando se trabaja en el sistema decimal se convierte en:

$$Q = 0.24\ m_a\ T_f \qquad (31)$$

donde Q está dado en calorías, m_a en gramos de aire seco y T_f en grados centígrados.

Si se tiene en cuenta que la entalpia del aire seco, en este caso, equivale a la cantidad de calor sensible del mismo, se concluye, igualando con la ecuación (31):

$$E_{as} = 0.24\ m_a\ T_f \qquad (32)$$

Donde E_{as} es la entalpia del aire seco cuando su temperatura es de T_f°C y se ha adoptado entalpia cero en 0°C; en la ecuación (32) E_{as} viene dado en calorías siempre que m_a se de en gramos y T_f en °C; E_{as} indica la cantidad total de calor que requirió la masa m_a de aire seco para venir desde 0°C y estado de vapor, hasta T_f °C y estado de vapor también.

2. Entalpia del vapor. Por otra parte, la entalpia del vapor de agua presente en una masa de aire húmedo será igual a la suma del calor latente que ha requerido la masa de vapor de agua para pasar de líquido a vapor, más el calor sensible que ha requerido el vapor de agua para aumentar su temperatura desde 0°C hasta la temperatura de la mezcla.

Si se supone una masa m de aire húmedo conformada por una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua (la humedad absoluta de la mezcla es $H = m_s / m_a$ y por lo tanto $m_w = H.\ m_a$), entonces la entalpia de la masa m_w cuando la mezcla está a T°C es igual a la suma del calor latente que se requirió para evaporarla a la temperatura en la cual la entalpia del agua es cero (en este caso se adoptó entalpia cero a 0°C), más la cantidad de calor sensible que es necesario para calentar la masa m_w de la temperatura de referencia hasta T°C, así:

-calor latente de la masa m_w respecto a 0°C se calcula por la ecuación (28) de calor de evaporación:

$$Q_{evw} = m_w \cdot C_{evw} \qquad (33)$$

donde:

Q_{evw} = calor necesario para evaporar a 0°C la masa m_w de agua

m_w = masa de agua evaporada y presente en una mezcla de aire seco y vapor de agua

C_{evw} = calor latente de evaporación del agua a la temperatura de referencia. El calor de evaporación del agua varía con la temperatura a la cual se efectue el cambio de estado. Para este caso específico en el cual la temperatura de entalpia cero se fijó en 0°C el calor latente de evaporación del agua es de 595 cal/gramo.

Analizando la ecuación (33), cuando se trabaja en el sistema decimal y se ha supuesto entalpia del agua cero para 0°C, se deduce que:

$$Q_{evw} = 595\ m_w \qquad (34)$$

y Q_{evw} está dado en calorías, y m_w en gramos; Q_{evw} es la cantidad de calor latente de la masa de vapor de agua.

-respecto al calor sensible de la masa m_w de vapor de agua, se calcula mediante la ecuación (25) y resulta:

$$Q = Ce_w \cdot m_w (T_f - T_i) \qquad (35)$$

donde:

Q = calor sensible requerido por la masa m_w de vapor de agua para aumentar su temperatura desde T_i hasta T_f; teniendo en cuenta que la temperatura de entalpia cero es 0°C se tiene que T_i = 0°C; por lo tanto, al trabajar la ecuación en el sistema decimal, y reemplazando Ce_w (calor específico del vapor de agua) por su valor de 0.44 cal/gr. se tiene:

$$Q = 0.44\ m_w \cdot T_f \qquad (36)$$

ahora: Q se expresa en calorías, m_w en gramos y T_f en grados centígrados; T_f es la temperatura de la mezcla de aire seco y vapor de agua en un momento dado.

Habiendo calculado ya el calor latente y el calor sensible del vapor de agua, cuando se halla T°C, es posible determinar la entalpia del vapor de agua a T°C respecto a las condiciones de referencia:

E_w = calor sensible de m_w a T°C + calor latente de m_w respecto a 0°C

y reemplazando las ecuaciones (34) y (36) de calor latente y sensible se tiene:

$$E_w = 595\ m_w + 0.44\ m_w\ T_f \qquad (37)$$

donde:

E_w = entalpia o cantidad total de calor, que requiere una masa m_w de agua para ser llevada desde 0°C y estado líquido, hasta el estado de vapor y T_f°C de temperatura; se expresa en calorías si m_w se da en gramos, o en kilocalorias si m_w se da en kilos.

m_w = masa de agua evaporada, o masa de vapor de agua cuya entalpia se busca; se expresa en gramos o en kilos.

T_f = temperatura del vapor de agua a la cual se desea establecer la entalpia o temperatura de la mezcla de vapor de agua y aire seco (aire húmedo) se da en °C.

3. Entalpia del aire húmedo. Finalmente, conociendo ya la entalpia del vapor de agua y del aire seco, es posible calcular la entalpia de un aire húmedo -esto es, de una mezcla de aire seco y vapor de agua- cuando se ha fijado la entalpia cero para agua a 0°C y para aire seco a 0°C. Basta recordar que la entalpia de la mezcla es igual a la suma de la entalpia del aire seco más la entalpia del vapor de agua a la temperatura de la mezcla.

Entonces la entalpia (para la referencia dada) de una mezcla que contiene una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua, a una temperatura T_f es:

$$E = E_{as} + E_w \qquad (38)$$

y reemplazando las relaciones (32) y (37):

$$E = 0.24\ m_a\ T_f + 595\ m_w + 0.44\ m_w\ T_f \qquad (39$$

En esta ecuación T_f es la temperatura del aire húmedo en grados centígrados; E es la entalpia, o calor total de la mezcla conformada por m_a masa de aire seco y m_w masa de vapor de agua, a T_f °C. La entalpia asi dada se expresa en calorías o en kilocalorías, según las masas se den en gramos o en kilos.

En vista de que el problema más frecuente, respecto a secamiento o a enfriamiento, que requiere para su solución del cálculo de entalpias se facilita cuando ésta se expresa en términos de la entalpia de la unidad de masa de aire seco, se acostumbra a expresarla en BTU/libra de aire seco, o en calorías/gr. A.S., o en kilocal./kgr. A.S., entonces se habla de la entalpia de una mezcla de aire seco y vapor de agua por gramo, o por kilo, o por libra, de aire seco presente en la mezcla. El cálculo correspondiente a la entalpia (en calorías) por gramo de aire seco, o por kilo de aire seco se efectúa así:

Si la mezcla tiene una masa m_a de aire seco y una masa m_w de vapor de agua, su humedad absoluta es:

$$H = m_w/m_a \text{ y } m_w = H\ m_a$$

y reemplazando en la ecuación (39):

$$E = 0.24\ m_a\ T_f + 595\ H\ m_a + 0.44\ H\ m_a\ T_f$$

y dividiendo a ambos lados por m_a:

$$E/m_a = 0.24\ T_f + 595\ H + 0.44\ H\ T_f \qquad (40)$$

Si en la ecuación (40) adoptamos que m_a = 1 kilogramo de aire seco, entonces E/m_a indica la entalpia por kilogramo de aire seco y ésta dada así (reemplazando m_a = 1 en la ecuación (40).

$$E \text{ por K.A.S.} = 0.24\ T_f + 595\ H + 0.44\ H\ T_f \qquad (42)$$

Esta ecuación nos indica la cantidad de calor total -sensible y latente- que ha requerido una mezcla de aire seco y vapor de agua cuya humedad absoluta es H, y contiene un kilogramo de aire seco, para llegar a una temperatura T_f cuando la entalpia cero corresponda a 0°C; normalmente se expresa el cálculo de la ecuación (42) en kilocalorías por kilo de aire seco, cuando T_f se da en grados centígrados, y H en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (humedad absoluta del aire).

D. Aplicación del Cálculo de la Entalpia

Ya es posible establecer mediante la ecuación (42) la entalpia de una mezcla de vapor de agua y aire seco, cuya temperatura T_f se conoce y cuya humedad absoluta H ya se ha determinado (la entalpia calculada en la ecuación anotada hace referencia a aire seco en estado de vapor y 0°C y a agua en estado líquido y 0°C); conociendo entonces la entalpia inicial de la mezcla basta con averiguar la entalpia final de la mezcla y por diferencia se determina la cantidad de calor que requiere el aire húmedo para ir desde las condiciones iniciales hasta las condiciones finales.

Un caso muy aplicable al secamiento lo constituye un aire húmedo cuya humedad relativa y su temperatura se conocen, y que se desea calentar hasta una temperatura previamente establecida para aire de secamiento; se trata de averiguar qué cantidad de calor ha de agregarse al aire dado para lograr que alcance la temperatura requerida para el secado.

Ejemplo:

Supóngase que el aire ambiente en el lugar de proceso tiene un sesenta por ciento deh humedad relativa y su temperatura es de 25°C; si la temperatura aconsejada para secar arroz en el equipo utilizado para este caso específico es de 43°C, se desea averiguar cuánto calor requiere cada M^3 de aire húmedo para alcanzar la temperatura de 43°C en las condiciones dadas. Adóptese que se está trabajando a 760 mm Hg de presión barométrica.

En la carta sicrométrica de 760 mm Hg se determina que el aire húmedo cuando su HR es de 60 por ciento y su temperatura de 25°C, tiene una humedad absoluta de 12,5 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco aproximadamente (o sea 0.012 kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco presente en la mezcla). Si se reemplaza en la ecuación (42)

$H = 0,012$ KVA/KAS y $T_f = 25°C$, se tiene:

$$E = 0,24\ T_f + 595\ H + 0,44\ HT_f$$

$$E = 0,24 \times 25 + 595 \times 0,012 + 0,44 \times 0,012 \times 25$$

$$E = 6,00 + 7,14 + 0.132 = 13,272 \text{ kilocal/KAS}$$

Esto es que el aire ambiente antes de ser calentado tiene una entalpia del orden de 13,272 kilocalorías por cada kilo de aire seco.

Si en la ecuación (42) reemplazamos $T_f = 43$ °C y H=0,012, se establece la entalpia del aire ya calentado (obsérvese que la humedad absoluta del aire -antes y después de calentarse- permanece constante pues se supone que en ningún momento se ha secado o humedecido el aire por sólo cambiar su temperatura).

$$E = 0,24 \times 43 + 595 \times 0,012 + 0,44 \times 0,012 \times 43$$

$$E = 10,75 + 7,14 + 0,227 = 18,117 \text{ kilocal./KAS}$$

Si se compara la entalpia del aire ambiente antes de ser calentado, con la entalpia de ese aire luego de calentarse (a la misma humedad absoluta) se concluye que la masa de aire ambiente requirió 4,845 kilocalorías por cada kilo de aire seco presente en la mezcla, para calentarse desde 25°C hasta 43°C:

Entalpia final - Entalpia inicial = 18,177 - 13.272 = 4,845 kilocal/KAS

Si se tiene en cuenta que el aire inicial ocupa 0,86 M^3 aproximadamente por cada kilo de aire seco presente en la mezcla (volumen específico del aire a 760 mm Hg si HR = 60 por ciento y T = 25°C, es VE = 0,86 M^3/KAS), y que por cada kilo de aire seco que contiene la mezcla requiere 4,845 kilocalorías para calentarse desde 25°C hasta 43°C, se concluye que por cada 0,86 M^3 de aire ambiente es necesario agregar:

$$\begin{array}{ll} 0,86\ M^3 & 4,845 \text{ kilocal.} \\ 1\ M^3 & x \end{array} = \frac{4,845 \times 1}{0,86} = 5,6337 \text{ kilocal}$$

E. Construcción de Las líneas de Entalpia

De lo anterior se deduce la importancia de disponer del cálculo de entalpia para un aire dado; igualmente aparece la necesidad de tener en lo posible tabulada esta información para las diversas clases de aire (temperaturas y humedades relativas o absolutas); por esto se han establecido dentro de las cartas sicreométricas las llamadas líneas de entalpia constante, que se basan en las siguientes consideraciones:

Tomando la ecuación (42)

$$E = 0,24\ T_f + 595\ H + 0,44\ H\ T_f$$

se tiene:

$$T_f = \frac{E - 595\ H}{0,24 + 0,44\ H} \qquad (43)$$

Si se tiene en cuenta que la humedad absoluta H dentro del rango de 0°C a 60°C no alcanza valores superiores a 0,100, se deduce que dentro del mismo rango el denominador de la educación (43):

$$D = 0,24 + 0,44\ H$$

varía entre 0,24 + 0,00 y 0,24 + 0,044, esto es, que D está entre 0,24 y 0,288 lo cual indica que si se desprecia el factor 0,44 H la variación en el denominador es mínima y (43) se puede expresar con poco error así:

$$T_f = \frac{E - 595\ H}{0,24} \qquad (44)$$

además si asumimos que H se exprese en gramos de vapor por kilogramo de aire seco entonces el factor 595 H se trasforma en 0,595 H con lo cual (44) se convierte en:

$$T_f = \frac{E - 0,595\ H}{0,24} \qquad (45)$$

Obsérvese que el valor calculado por (45) es idéntico al calculado por (44) pues mientras el H utilizado en (47) es 1000 veces más pequeño que el H usado en (45), el valor que lo multiplica -595 - en (44) es 1000 veces más grande que en (45) -0,595)-.

En la ecuación (45) es posible despejar H así:

$$H = \frac{E - 0,24\ T_f}{0,595} \qquad (46)$$

y la ecuación (46) se puede graficar en un sistema donde T_f tome el eje de las abcisas y H el eje de las ordenadas; la gráfica resultante será una recta cuya pendiente es -0,24/0,595 lo cual indica que formará un ángulo de aproximadamente 25 grados con el segmento izquierdo del eje de las abcisas; obsérvese que T_f se expresará en °C y H en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco y que para cada valor constante que se adopte de E existe una recta de T_f contra H; además obsérvese que las rectas asi resultantes son tan solo aproximadas pues la verdadera ecuación de T_f contra H es una curva (43).

La mecánica misma utilizada para la construcción de las rectas de entalpia constante consiste en suponer un E conocido expresado en kilocalorías por kilo de aire seco y localizar dos puntos que se hallen sobre la recta, con lo cual la recta misma queda determinada.

Ejemplo:

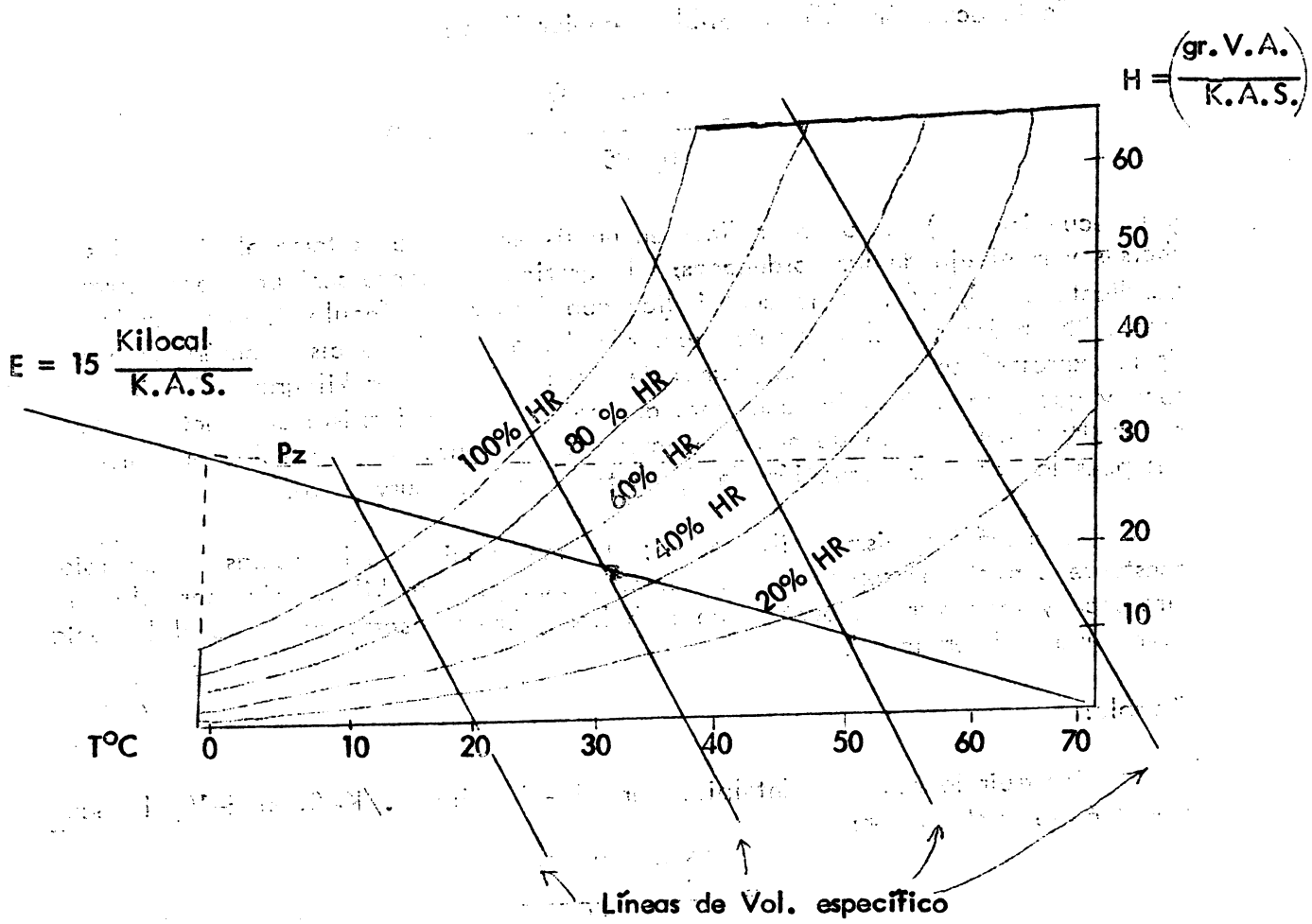
Construir la recta de Entalpia, para E = 15 kilocal./KAS. si E=15, la ecuación (46) se trasforma en:

$$H = \frac{15 - 0,24\ T_f}{0,595}$$

si se supone un primer punto en el cual H = 0, se deduce que en ese mismo punto T_f = 15/0,24 = 62,5°C; si se supone un segundo punto en el cual T_f = 0, se tiene en ese mismo punto H = 15/0,595 = 25,21 gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Así se concluye que la recta de entalpia constante en 15 kilogramos/KAS para por los dos puntos hallados:

1) H = 0,00 grs. V.A./K.A.S. y T_f = 62,5 °C

2) H = 25,21 grs. V.A./K.A.S. y T_f = 0 °C



En la figura 14 se presenta la carta sicreométrica, cuya construcción hemos venido desarrollando en los anteriores capítulos, con la línea de entalpia igual a 15 kilocal. /K.A.S.

Normalmente se trazan en cada carta sicrométrica las líneas de entalpia constante de kilocaloría en kilocaloría, a partir de entalpia cero. En el caso que nos ocupa trazaríamos líneas de entalpia desde E = 0,00 -avanzando de 1 en 1- hasta lograr que el gráfico quede parcialmente cubierto con líneas de entalpia en forma tal que fácilmente se determine la entalpia de cualquier punto dentro de la carta; así basta con conocer la Humedad relativa y la temperatura de un aire -o su humedad absoluta y temperatura- para buscar su entalpia respecto a las condiciones de referencia anotadas.

Finalmente, vale la pena recordar que cuando la exactitud requerida para un cálculo lo exija, es posible determinar la entalpia de un aire con solo conocer su temperatura y su humedad absoluta mediante la ecuación (42).

$$E = 0.24T + 5954 + 0,44\ HT$$

mdeb.
VIII-21-74

F. Uso de la Entalpia en Tratamientos de Granos

Dentro de los diferentes problemas que se solucionan con el cálculo de entalpia, hay dos particularmente importantes para el estudio de tratamientos de granos:

1. El primer problema es el cálculo del combustible necesario para efectuar un secamiento; se conoce el peso del grano a secar (W_i) y su humedad inicial (H_i); igualmente se dispone de la temperatura y la H.R. del aire ambiente a utilizar, y del dato de temperatura de secado aconsejable.

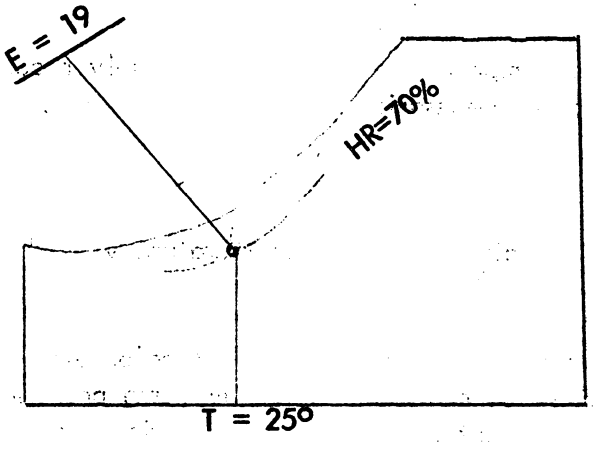
Ejemplo:

Se desea secar 10 toneladas de maíz desde el 18% de humedad hasta el 15%; se sabe que las condiciones del aire ambiente en el sitio de proceso son T = 25°C y HR = 70% y que la temperatura de secado de maíz aconsejable para el equipo disponible es de 53°C; se desea saber cuanto A.C.P.M. se requiere para el proceso de calentamiento del total del aire utilizado (Supóngase P = 760 mm Hg).

Ciertamente se trata de determinar primeramente la cantidad de A.C.P.M. necesaria para calentar 1 K.A.S.; luego se establece el total de K.A.S. necesarios para el secado (ver problema Capítulo VI, pág. 69 y 70) y se relaciona este resultado con el anterior; a continuación se calcula la primera parte del asunto:

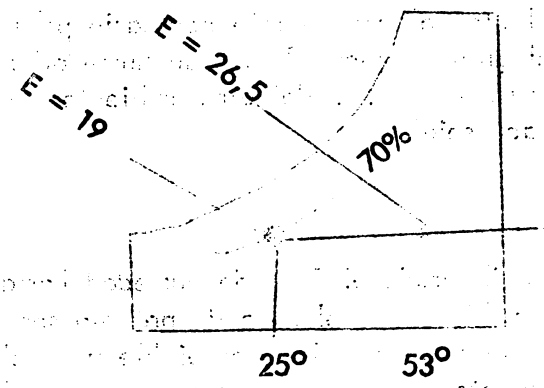
-Cálculo de la Entalpia del aire ambiente

Si HR = 70% y T = 25°C y P = 760 mm Hg, en la Tabla sicrométrica se ve



Que la Entalpia es de 19 kilocalorías por K.A.S.

-De la misma carta se concluye que cuando ese aire se calienta hasta 53°C (temperatura de secado) con humedad absoluta constante, su entalpia será de 26,5 kilocal/K.A.S.



-Como $E_F - E_i = 26,5 - 19$

$E_F - E_i = 7,5$ kilocal/K.A.S.

se deduce que para llevar 1 K.A.S. desde HR = 70% y T = 25°C, a T = 53°C (con H.A. constante) se requieren 7.5 kilocalorias.

Teniendo en cuenta que 1 galón de A.C.P.M. al combustir genera 34.000 kilocalorias (Poder calorífico del ACPM), tan solo resta averiguar los kilogramos d de aire seco necesarios para el secado, dato que dividido por 34.000 y multiplicado por 7.5 dará el total de galones de ACPM necesarios (un modelo del problema se estudia en el Anexo).

2. El segundo problema importante que se puede resolver con el cálculo de entalpia es la cantidad de aire necesaria para enfriar un grano.

Ejemplo:

Se tiene 2 toneladas de maíz a 35°C de temperatura y se desea calcular el aire necesario para enfriarlo hasta 30°C.

Para resolver la cuestión es necesario conocer el calor específico del grano, con lo cual se establece el total de calor que debe removerse para enfriarlo desde 35°C a 30°C* luego se averigua la entalpia del aire antes de entrar en contacto con el grano (HR y temperatura del aire ambiente y carta sicrométrica) y la entalpia del aire

* $Q = C_e \cdot m \ (T_i - T_f)$

al salir luego de atravesar la masa de grano (HR y temperatura del aire de salida y carta sicrométrica) y por diferencia entre la entalpia inicial y la final se establece cuantas kilocalorías extrae cada K.A.S que atraviese el grano.

Finalmente sabiendo cuanto calor remueve el K.A.S se relaciona con el total de calor a remover y se calcula los kilogramos de aire seco necesarios en el proceso (en el anexo se presenta un problema numérico).

IX. LA CARTA SICROMETRICA. EL PROCESO ADIABATICO.

En los capítulos anteriores se estudiaron los conceptos de humedad absoluta, humedad relativa, volumen específico y entalpia de las mezclas de vapor de agua y aire seco (aire ambiente) y, se ilustró acerca del cálculo y del uso de esa información.

Para concluir el estudio de la carta sicrométrica sólo resta introducir dos conceptos importantes en el análisis de procesos con aire; estos conceptos constituyen el tema de los próximos capítulos.

A. Proceso Adiabático. Definición

En páginas anteriores se definió el calor total o entalpia del aire ambiente (mezcla de aire seco y vapor de agua), como la suma de la entalpia del aire seco y la entalpia del vapor de agua presentes en la mezcla.

Además se definió calor total o entalpia, como la suma del calor sensible y del calor latente que ha requerido un cuerpo para alcanzar su estado y temperatura actual, desde un estado y una temperatura de referencia previamente establecidas.

Así se concluyó que la entalpia del aire ambiente se obtiene como sumatoria del calor sensible y latente del aire seco y del calor sensible y latente del vapor de agua presentes en la mezcla:

$$E = 0.24\,T + 595\,H + 0.44\,HT$$

donde: E = entalpia del aire ambiente cuya humedad absoluta es H y su temperatura T; respecto a entalpia cero para aire seco a 0°C y estado gaseoso y para agua en estado líquido a 0°C. E está dado en kilocalorías/Kg.A.S.

T = temperatura del aire ambiente en °C.

H = humedad absoluta del aire ambiente en Kg.V.A./Kg.A.S.

Analizando esta expresión se observa que es factible variar la temperatura del aire ambiente, variar simultáneamente su humedad absoluta en cierta medida y mantener la entalpia de la mezcla constante dentro del proceso.

Por ejemplo, si H aumenta y -simultáneamente- T disminuye en cierta medida es factible lograr que E permanezca constante; un caso particular al asunto resulta del siguiente esquema:

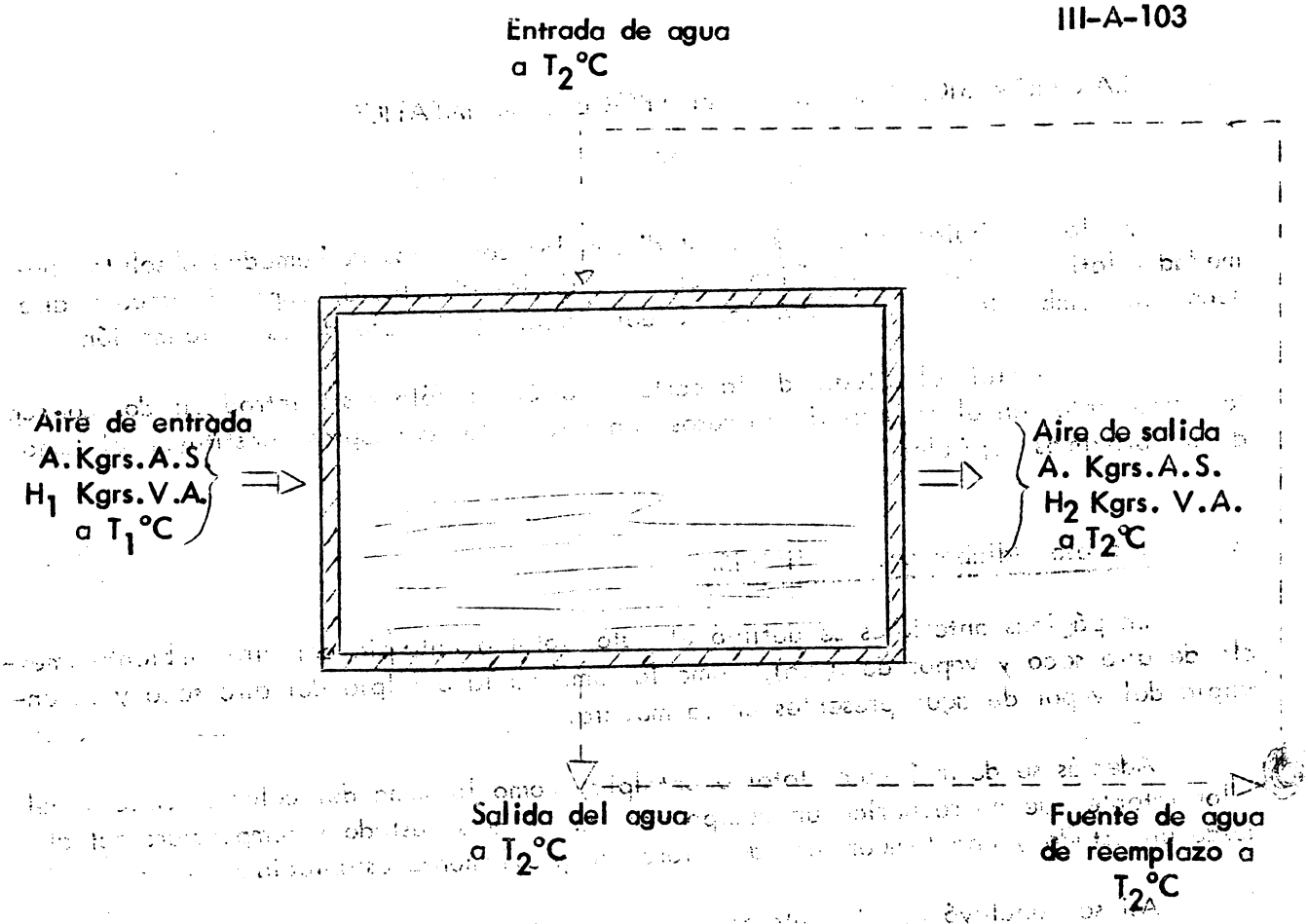


Figura No. 1

Nota: Adóptrese que la cantidad de agua evaporada se repone de tal forma que dentro del equipo la cantidad de líquido es constante.

Una mezcla de A Kg.A.S. y H_1 Kg. V.A., que no está saturada, se halla inicialmente a T_1°C de temperatura; esta mezcla se hace circular en el equipo que contiene agua en estado líquido a T_2°C.

Adoptando que T_2 es menor que T_1 debe esperarse que la temperatura de la mezcla inicial tienda a bajar, mientras que la temperatura del agua contenida en el equipo tiende a subir; entonces sería correcto predecir una temperatura de equilibrio final para el sistema, mayor que T_2 y menor que T_1.

Sin embargo se observa en el diagrama que la temperatura del agua del equipo mantiene constante su temperatura (esto es que su temperatura es la misma a la entrada del equipo, dentro del equipo y a la salida del mismo), aun cuando la temperatura del aire circulante si disminuye dentro del equipo hasta alcanzar T_2° a la salida.

El fenómeno presentado es perfectamente posible y se explica así:

1. La mezcla inicial se enfría desde T_1 hasta T_2°C, con lo cual pierde calor sensible así:

$$\text{Cantidad de calor sensible perdido por la mezcla inicial} = A.Cea(T_2-T_1) + H_1.Cew\,(T_2-T_1)^* \qquad (47)$$
$$= 0.24A(T_2-T_1) + 0.44H(T_2-T_1)$$

2. Si se acepta que dentro del equipo al menos teóricamente no existen fuentes de perdida o ganancia adicionales de calor, es correcto afirmar que todo el calor, existente en el proceso lo aportan la mezcla inicial y el agua contenida en el recipiente, y que sólo entre dichos elementos existe intercambio.

3. De la confrontación de los dos puntos anteriores se concluye que el calor sensible perdido por la mezcla inicial al enfriarse, fue trasferido al agua del recipiente.

4. Teniendo en cuenta que la temperatura del agua permanece constante en el proceso, se concluye que el calor perdido por el aire no fue utilizado por el agua en forma de calor sensible; y que, dado que ese calor necesariamente se trasfirió al agua, lo absorbio en forma de calor latente y lo utilizo para evaporarse.

5. Si se observa que la mezcla inicial tenía H_1 Kgs. V.A. y que la mezcla final tiene H_2 Kgs. V.A., se deduce que H_2 es mayor que H_1 y que por lo tanto la humedad del aire aumentó; igualmente se deduce que la masa de agua evaporada en el proceso equivale a la diferencia entre H_2 y H_1: (H_2-H_1) Kgs.V.A.

6. Conociendo la masa de agua evaporada y la temperatura a la cual se efectúo la operación (T_2), es fácil calcular la cantidad de calor latente utilizada:

$$= Cvap_{T_2} \cdot (H_2-H_1)\ ^{**} \qquad (48)$$

7. Dado que no hay fuentes adicionales de calor, se deduce que el calor latente que requirió el agua (para evaporarse) fue suministrado por el aire circulante (al enfriarse); y como no hay pérdidas adicionales de calor se concluye que el calor

* Cea = calor específico del aire seco, 0,24 cal./gr.°C
Cew = calor específico del vapor de agua, 0,44 cal./gr.°C

** $Cvap_{T_2}$ = calor de vaporización del agua a T_2 °C, dada en calorias/gramo o en kilocalorias por kilogramo.

entregado por el aire corresponde exactamente a la cantidad de calor utilizada por el agua para evaporarse. (47) = (48):

$$0.24A(T_2-T_1) + 0.44H_1(T_2-T_1) = Cvap_{T2}\ (H_2 - H_1) \qquad (49)$$

8. Solamente resta tener en cuenta que el agua evaporada se suma a la mezcla inicial que de este modo se humedece más:

Esta circunstancia permite concluir correctamente que el aire inicial, que había perdido calor sensible al enfriarse, gana una cantidad igual de calor latente, y que por lo tanto su contenido total de calor no ha variado. Todo lo anterior implica que la entalpia de la mezcla ha permanecido constante.

El proceso analizado se denomina comunmente proceso de enfriamiento adiabatico, o proceso de humedecimiento adiabatico del aire: se caracteriza por que el aire utilizado pierde calor sensible (se enfría), gana calor latente (se humedece) y conserva en todo momento la misma cantidad de calor total o entalpia.

Si mediante este tipo de proceso la mezcla sale finalmente saturada, se dice que T_2 es la temperatura de saturación adiabatica de la mezcla; con lo cual se quiere significar que la mezcla inicial con H_1 de humedad y T_1 de temperatura, humedecida adiabaticamente, se satura a T_2°C.

Análogamente, si mediante este tipo de proceso la mezcla sale finalmente saturada, se dice que H_2 es la humedad absoluta de saturación adiabatica de la mezcla; y con esto se quiere significar que si la mezcla inicial con H_1 de humedad y T_1 de temperatura se enfía adiabáticamente, se satura cuando su humedad absoluta sea H_2.

B. Importancia del Concepto en los Procesos con Grano

Mediante la ecuación (49) es posible graficar sobre la carta sicrométrica, lineas de enfriamiento adiabatico; para ello basta con despejar

$$H_1 = \frac{H_2 Cvap_{T2} - 0.24(T_1-T_2)}{Cvap_{T_2} + 0.45(T_1-T_2)} \qquad (50)$$

entonces adoptando una temperatura de saturación adiabatica se localiza en la carta la correspondiente humedad de saturación (se busca en la carta la humedad absoluta que corresponde a la temperatura escogida y 100% de HR) y se adopta que la temperatura escogida es T_2 y la humedad de saturación hallada es H_2; luego se escoge arbitrariamente una temperatura T_1, que sea menor que T_2, y se despeja en la ecuación H_1. Así se dispone de dos puntos sobre la carta, dados por sus coordenadas:

P_2 (T_2, H_2) y P_1 (T_1, H_1) y por estos puntos pasa una línea de proceso adiabatico. Supongase que se quiere construir la línea que pasa por el punto de HR 100% y 15°C. (Supongase 760 mm Hg).

1. Se halla la humedad de saturación, H_2, en la T_2 escogida (100% HR)

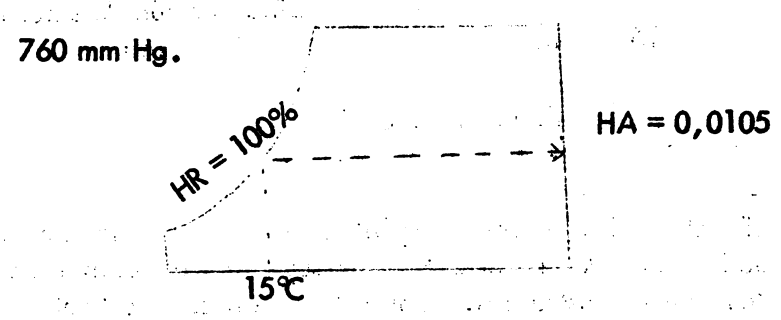


Figura No. 2

2. Se escoge una T_1 menor que T_2, por ejemplo 10°C

3. Se calcula H_1 en función de T_2=15°C, H_2 = 0,0105 K.V.A./K.A.S. (hallada en la carta), y T_1 = 10°C (arbitraria y menor que T_2) y el calor de vaporización a T_2:

$$\frac{0.0105\ Cvap_{T_2} - 0.24\ (15-10)}{Cvap_{T_2} + 0.45(15-10)} = H_1$$

y para calcular el calor de vaporización a T_2 se aplica la relación

$$Cvap._T = (598 - 0.6T)\ cal/gr.$$

luego si T_2 = 15°C, $Cvap_{15°}$ = (598 - 0.6 x 15) = 589 y

$$H_1 = \frac{0.0105 \times 589 - 0.24 \times 5}{589 + 0.45 \times 5} = 0.0085\ K.V.A./K.A.S.$$

4. Se concluye que por los puntos:

a) HA = 0.0105 y T = 15°C, y

b) HA = 0.0085 y T = 10°C, pasa una línea común de proceso adiabatico, sobre la carta sicrométrica de 760 mm Hg.

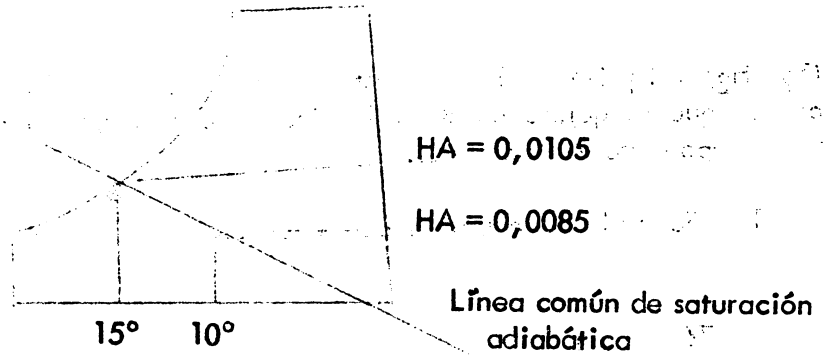


Figura No. 3

Las líneas así calculadas no son completamente rectas, sin embargo -con pequeño eror- se pueden considerar como tales y suponer que coinciden con las de entalpia constantes antes construidas. Por esta razón se acostumbra a aceptar dentro de los gráficos sicrométricos que las líneas de procesos adiabaticos coinciden con las de entalpias constantes.

El concepto de proceso adiabatico es particularmente importante en el secado de granos, pues -con un pequeño error que se puede despreciar dentro del rango de aproximación requerido- se supone que el aire utilizado en el secado se enfría y se humedece adiabaticamente, de tal forma que ese aire pierde temperatura (pierde calor sensible) pero gana humedad (gana calor latente) y en definitiva su entalpia permanece constante.

Esa circunstancia permite esperar que la entalpia del aire que entra en contacto con el grano sea la misma antes y después del proceso y que por lo tanto el aire de entrada (aire secante) y el de salida (aire exhausto) se hallen sobre una misma curva de entalpia constante en la carta sicrométrica.

C. Uso del Concepto

En el capítulo VI, se vió que para determinar la cantidad de aire requerida en un secamiento se debía establecer la humedad absoluta del aire de salida (HA_2), para compararla con la humedad absoluta del aire de entrada (HA_1) y determinar HA_2-HA_1 que indica la cantidad de vapor de agua removida del grano por cada kilogramo de aire seco utilizado en la operación.

El método utilizado para determinar tanto HA_1 como HA_2 hasta el momento ha consistido en establecer la humedad relativa del aire y su temperatura, para -en base a estos datos- ubicar el punto en la carta sicrométrica correspondiente a la presión barométrica respectiva y entonces hallar en el gráfico la humedad absoluta. Se supone

que este procedimiento exige el uso del higrómetro para medir directamente la humedad relativa del aire, y que la medición se lleva a cabo dentro del proceso mismo del secado, de tal manera que se dispone efectivamente de la presencia del aire a estudiar.

Sin embargo, en algunos casos se requiere del dato de HA y no es posible efectuar la medición en forma directa; un ejemplo clásico al respecto se halla cuando es necesario calcular teóricamente el rendimiento de un equipo secador próximo a instalarse.

Supóngase que se desea establecer el rendimiento teórico que se espera, en toneladas de arroz por hora, en una secadora que próximamente entrará en funcionamiento en El Espinal.

1. El primer problema consiste en determinar la humedad absoluta del aire ambiente en El Espinal; para resolverlo se hace uso de la humedad relativa promedio en esa zona y de la temperatura promedio. Conociendo HR y T, basta con ubicar el punto respectivo en la carta sicrométrica que corresponda a la presión barométrica de la zona (si se adopta para el Espinal P = 650 mm Hg, HR = 70% y T = 28 °C)

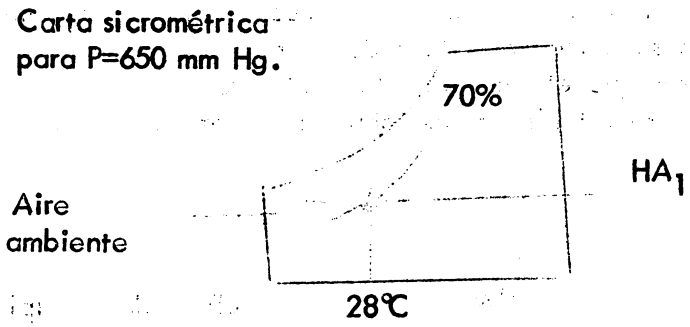


Figura No. 4

Determinación de la Humedad Absoluta del Aire Ambiente (HA_1)

2. El segundo problema consiste en ubicar el aire secante; para esto se hace uso de la temperatura de secamiento recomendada para el grano en particular y de acuerdo con las características del equipo; adóptese en este caso, que la temperatura de secado aconsejada para arroz es 45°C.

Entonces para ubicar el punto del aire secante basta con calentar el aire ambiente hasta 45 °C (temperatura de secamiento) con humedad absoluta constante:

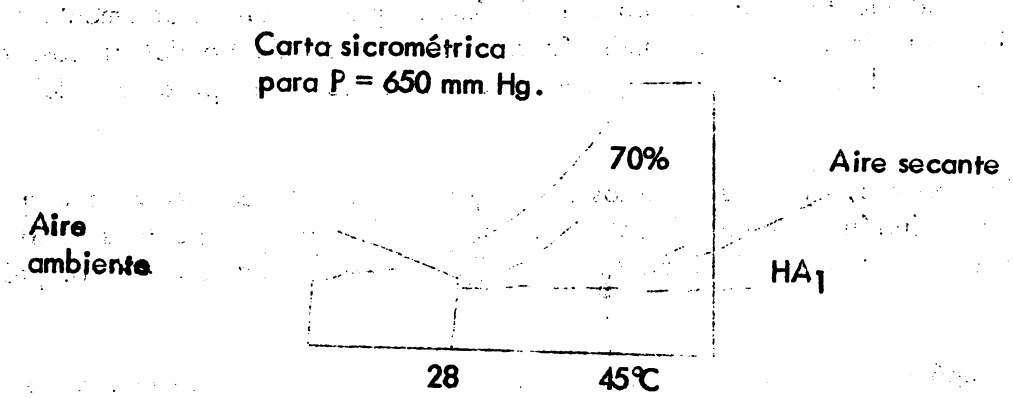


Figura No. 5

Ubicación del aire secante; el aire ambiente, manteniendo su humedad absoluta constante, se calienta hasta alcanzar la temperatura de secado.

3. Ya se conoce HA_1, ahora es necesario establecer HA_2 para poder calcular HA_2-HA_1; el problema radica en que se desconoce la HR y la temperatura del aire de salida, y no hay forma de medir directamente.

El asunto se soluciona teniendo en cuenta que el aire de secamiento, al entrar en contacto con el grano se enfría y se humedece, pero conserva constante su entalpia. Esto permite predecir que el aire secante y el aire de salida tienen la misma entalpia, y que por lo tanto estarán ambos sobre una misma línea de entalpia constante (Figura 6).

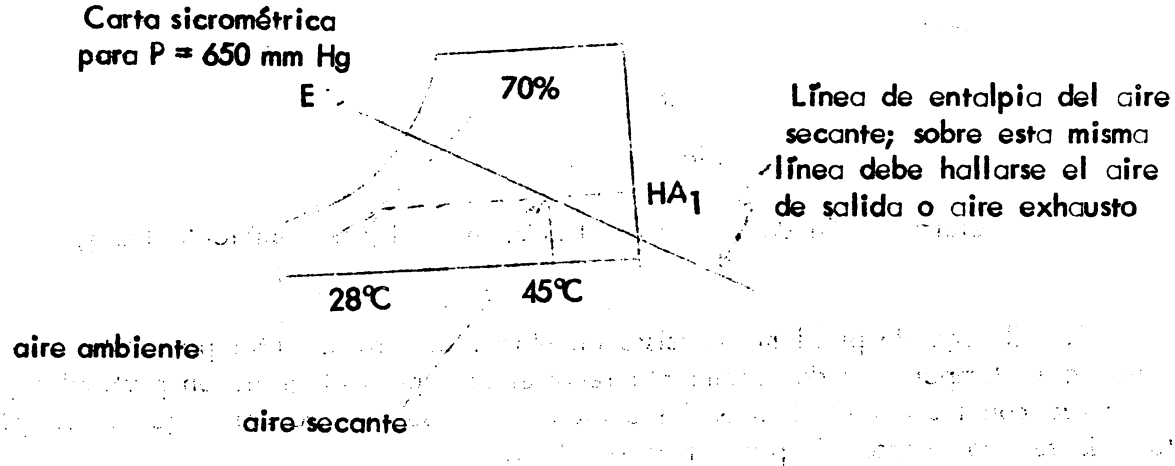


Figura No. 6

4. Ubicado ya el aire de salida sobre la línea de entalpia del aire secante, averiguar su HA_2 es sencillo. Supongase primeramente que la capacidad del aire secante para remover vapor de agua, se aprovecha totalmente; si esto sucede, entonces el aire saliente debe resultar saturado y su HR debe ser 100%; y la humedad absoluta del aire de salida corresponde a la humedad de saturación adiabatica del aire secante, que se obtiene enfriando el aire secante, con entalpia constante, hasta cortar la curva de HR = 100%.

Carta sicrométrica
para P = 650 mm Hg

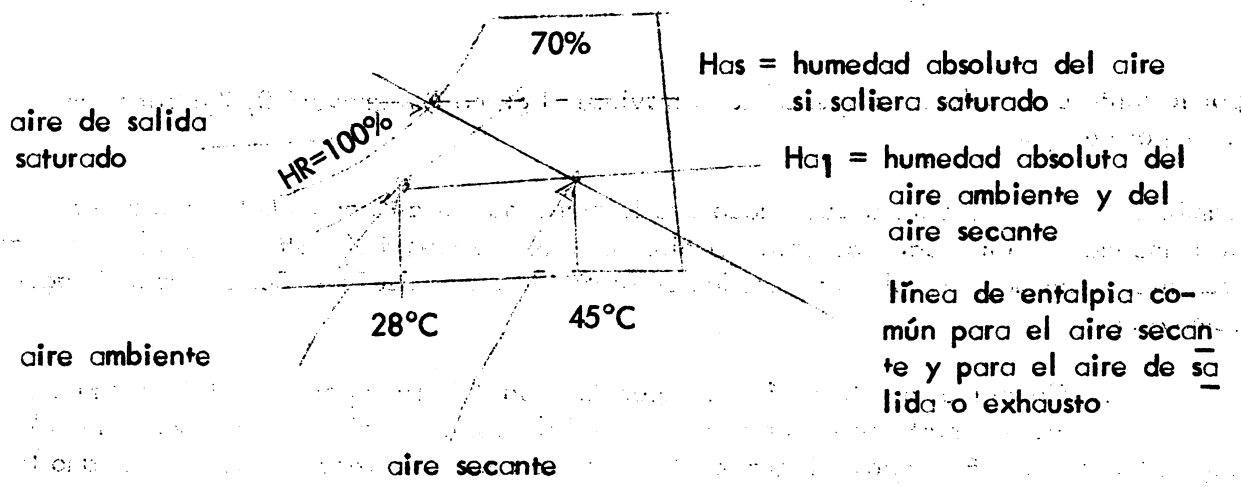


Figura No. 7

Si el aire saliera totalmente saturado, su HA de salida se hallaría frente al punto en que se corta la línea de entalpia del aire secante con la curva de HR=100%.

5. Teniendo en cuenta que HA_1 es la cantidad de vapor de agua del aire antes de entrar al proceso, y que HA_s es la máxima cantidad de vapor de agua con que puede salir, se concluye que la diferencia - (HA_s-HA_1) -es la maxima cantidad de agua que puede remover del grano, cada unidad de masa de aire seco que atraviese al grano.

Dicho de otra forma, (HA_s-HA_1) sería la masa de vapor de agua, que removería del grano, cada unidad de masa de aire seco utilizada, si el proceso tuviera una eficiencia de 100% en extracción.

6. Conocida ya la extracción de vapor de agua que efectuaría cada unidad de masa de aire de secado, si la eficiencia fuera de 100%, solo resta conocer la eficiencia real de extracción del equipo y relacionarla; por ejemplo si $HA_s - HA_1$ (dato hallado) fuera de 0,005 Kg.V.A./Kg.A.S. y si la eficiencia real de extracción del equipo fuera solamente de 80%* se tendría:

con 100% de eficiencia la extracción es de 0,005, luego

con 80% de eficiencia la extracción será X, donde:

$$X = \frac{0{,}005 \times 80}{100} = 0{,}004 \text{ Kg. V.A./Kg.A.S.}$$

por lo tanto cada kilo de aire seco que atraviese al grano le removerá 0,004 kilogramos de vapor de agua.

También es correcto afirmar que, dado que la humedad del aire antes del proceso era HA_1, la humedad absoluta real esperable del aire de salida es $HA_1 + X$; esto es, que la humedad del aire de salida es igual a la humedad absoluta del aire de secado mas el vapor de agua removido.

7. Conocida la extracción de vapor de agua del grano por unidad de masa de aire seco en el proceso, basta con averiguar cuántos kilogramos de aire seco mueve la secadora por hora y se tendrá cuantos kilogramos de vapor de agua del grano extrae en el mismo tiempo; y este dato, relacionado con la cantidad de vapor de agua que debe extraer para secar una tonelada, permite calcular las toneladas secadas por hora. (En el anexo se ofrece el ejemplo completo).

---

* La eficiencia en extracción varía según el equipo, y el sistema de secado; es mayor para el secamiento en flujo y para aquellos secadores con mínimo escape de aire. Además la eficiencia varía para las diferentes etapas del secado y tiende a disminuir en la medida que disminuye la humedad del grano; por esta razón se acostumbra mencionar la eficiencia promedio y utilizar este dato en los cálculos.

X. LA CARTA SICROMETRICA: LA TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO

En este capítulo se estudia el concepto de temperatura del bulbo húmedo. El análisis del asunto se ofrece primordialmente con el fin de explicar el principio del sicrómetro y su funcionamiento.

Resulta oportuno dejar constancia que algunas de las consideraciones que se plantean no son totalmente correctas a la luz de la teoría térmica; no obstante es conveniente utilizar estas aproximaciones conceptuales, dado que simplifican bastante el estudio del problema y permiten aplicar el resultado para la mayoría de los efectos prácticos, con un margen de error pequeño al menos dentro del rango de temperaturas y humedades absolutas de los procesos de nuestro interés.

A. El Sicrómetro

1. Que es y cual es su uso. Es un aparato usado como complemento de la carta sicrométrica; mide la temperatura de las mezclas de aire seco y vapor de agua (aire ambiente) y la denominada temperatura de bulbo húmedo de las mismas; y, mediante estos dos datos, permite ubicar en la carta sicrométrica, la mezcla en particular.

2. Conformación. El sicrómetro consta fundamentalmente de dos termómetros comunes. El primero de ellos tiene su bulbo expuesto al aire libre, de forma tal que indique la temperatura ambiente; se le denomina termómetro de bulbo seco. El otro tiene su bulbo recubierto por una muselina humedecida y se le denomina termómetro de bulbo húmedo.

El aparato posee sademás algún mecanismo mediante el cual se forza el aire a circular, a una rata constante, alrededor del bulbo húmedo.

3. Funcionamiento. Cuando el sicrómetro entra en contacto con un aire ambiente determinado (mezcla de aire seco con vapor de agua) no saturado, se observa lo siguiente:

   a. El termómetro del bulbo seco indica simplemente la temperatura de ese aire ambiente.

   b. Por su parte, la temperatura indicada por el termómetro del bulbo húmedo empieza a disminuir, y al cabo de un tiempo de estar circulando el aire a su alrededor, la lectura se estabiliza; a la lectura así obtenida se la denomina temperatura del bulbo húmedo del aire ambiente en cuestión.

B. Que indica la Temperatura del Bulbo Húmedo

Analizando el fenómeno registrado en el termómetro de bulbo húmedo con la limitación teórica anotada se puede concluir que:

1. La muselina húmeda que recubre el bulbo entra en contacto con el aire ambiente (mezcla de vapor de agua y aire seco) no saturado, cuya temperatura física se conoce por el bulbo seco.

2. Entonces, dado que la mezcla no se halla saturada, puede aumentar su humedad: este fenómeno realmente ocurre, pues parte del agua de la muselina se evapora y pasa a humedecer el aire circulante.

3. Es lógico que el aumento de la masa de vapor de agua presente en el aire implica aumento de calor latente de la mezcla; luego es correcto afirmar que, en la medida en que la humedad del aire circulante aumente, aumenta su contenido de calor latente.

4. También es lógico afirmar que el agua de la muselina para poder evaporarse (cambiar de estado) requirió calor; y que, si se desprecian fuentes adicionales, ese calor debió ser suministrado por el aire circulante, lo cual explica la pérdida de calor sensible de esa mezcla y la disminución en su temperatura.

5. Si se supone que el proceso es aproximadamente adiabatico, es correcto afirmar que la pérdida de calor sensible experimentada por el aire circulante (al enfriarse) se compensa con su ganancia de calor latente (al humedecerse), y que por lo tanto su entalpia no ha sufrido cambios.

6. Si el proceso se le da el tiempo suficiente, hasta que se estabilice la temperatura del bulbo húmedo, se puede suponer que el aire que está en contacto con la muselina se halla aproximadamente saturado (adiabaticamente), entonces la temperatura de la mezcla saturada será la que indique el termómetro del bulbo húmedo, y puede suponerse que su humedad relativa es de 100%.

7. De todo lo anterior -continuando con la aproximación conceptual- se puede concluir que la temperatura del bulbo húmedo indica la temperatura a la cual se satura adiabaticamente la mezcla analizada.

C. Utilidad del Concepto

Supóngase que las temperaturas leidas en el sicrómetro para una mezcla dada fueron:

temperatura de bulbo seco = T_s = 35°C

temperatura de bulbo húmedo = T_h = 30°C

Se desea averiguar la humedad absoluta, la humedad relativa, el volumen específico y la entalpia de la mezcla, disponiéndose de la carta sicrométrica correspondiente a la presión barométrica respectiva.

Entonces, aplicando el concepto, es correcto afirmar que la mezcla a analizar tiene 35°C de temperatura (termómetro de bulbo seco) y que si se somete a enfriamiento adiabatico, tendrá 100% de humedad relativa (estará saturada) cuando su temperatura haya disminuido así hasta alcanzar los 30°C.

Esto equivale a afirmar que, en la carta sicrométrica correspondiente, el punto del aire analizado debe encontrarse sobre la misma línea de entalpia constante que pasa por 100% de HR y 30°C de temperatura; y como se conoce que la temperatura real de la mezcla es 35°C, se concluye que el punto del aire analizado está en el corte de la línea de 35°C, con la línea de entalpia que pasa por 100% de HR y 30°C.

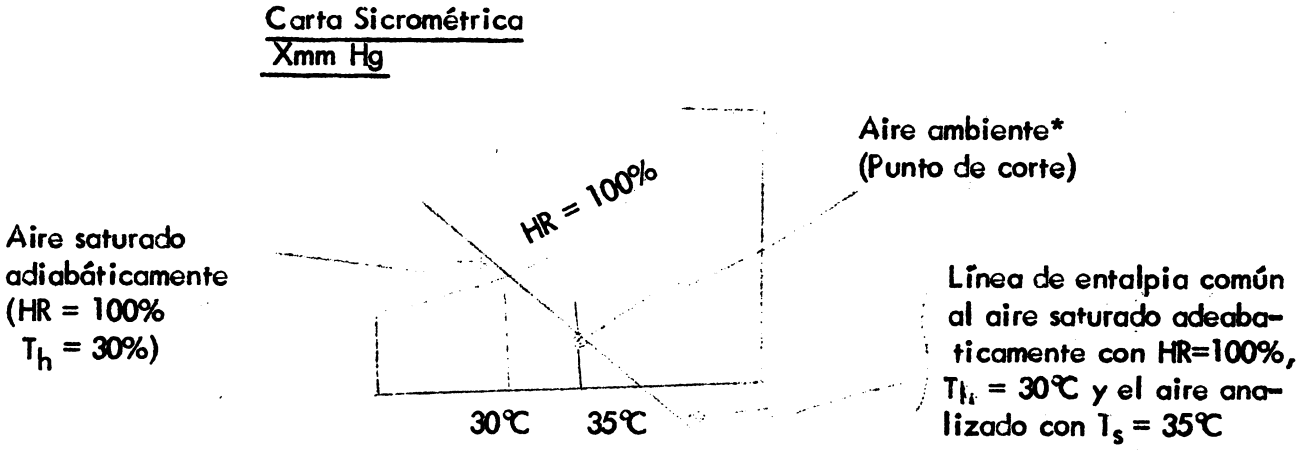


Figura No. 1

Para concluir es conveniente tener en cuenta que siempre que la temperatura del bulbo húmedo permanezca igual a la del bulbo seco, se debe a que el aire analizado está saturado y su HR es 100%; esto es lógico, pues si la temperatura de la mezcla no sufre cambio al entrar en contacto con la muselina húmeda, indica que el aire no pierde calor sensible, por lo tanto el agua de la muselina no dispone de calor para evaporarse y la humedad del aire circulante no aumenta pues ya está saturado.

* Es obvio que una vez ubicada la mezcla en la carta sicrométrica la HA_1 HR_1 VE_1 Entalpia, etc. quedan determinados.

mdeb
IX-4-74