

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

APUNTES DE

**HUMIDIFICACION**

**CÁTEDRA DE OPERACIONES UNITARIAS**

## HUMIDIFICACIÓN

Esta operación comprende transferencia simultánea de materia y energía, y el caso más común es el sistema líquido-gas, por ejemplo: aire – vapor de agua.

Esta transferencia simultánea tiene lugar cuando se pone en contacto un líquido puro y un gas, siendo este último prácticamente insoluble en el líquido.

Para el sistema aire -agua, el único componente que se transfiere es el agua, que puede evaporarse e incorporarse en la corriente gaseosa o condensarse y volver a la fase líquida.

Por lo tanto debemos analizar las condiciones de equilibrio correspondiente, pero además como hay evaporación o condensación se hará necesario recurrir a balances entálpicos.

### 1. Definiciones

a) Gas húmedo: es la mezcla de gas y líquido en estado de vapor, como ejemplo más universal podemos citar el aire y vapor de agua. A este sistema se lo considera como un gas perfecto, y se justifica dado que el aire está alejado de las condiciones críticas y el vapor de agua está en pequeñas proporciones. Particularmente el aire húmedo tiene importancia tecnológica en refrigeración, acondicionamiento de aire y secado. Desde el punto de vista industrial podemos encontrar las siguientes necesidades:

- enfriar un gas caliente
- humidificar un gas
- deshumidificar un gas
- enfriar un líquido

Para qué:

- para acondicionar aire para confort humano
- para acondicionar aire para uso industrial
- para control de medio ambiente en agricultura
- para procesamiento y almacenamiento de agua de uso industrial
- para crear atmósferas humidificadas para uso medicinal

Sin embargo el tema no se limita al sistema aire – vapor de agua. El estudio es válido para cualquier sistema de gas permanente y vapor condensable. Como el gas en la mezcla permanece inalterable (se lo suele llamar gas fijo), resulta conveniente referir todos los valores a 1 kg de gas permanente en nuestro caso particular 1 kg de aire seco.

b) Humedad absoluta: es la masa de vapor por unidad de masa de aire seco:

$$H = \text{kg vapor/kg aire seco}$$

Si expresamos en masas molares (donde P es la presión total)

$$H' = \text{humedad absoluta molar} = \text{moles de vapor/moles de aire seco} = P_v/(P-P_v) = P_v/P_g$$

La humedad absoluta la obtenemos multiplicando por el peso molecular

$$H = \text{kg vapor / kg aire seco} = \frac{M_v}{M_a} \frac{(P_v)}{(P - P_v)}$$

Para nuestro caso aire-vapor de agua

$$H = \frac{18}{29} \frac{(P_v)}{(P - P_v)} = 0,62 \frac{(P_v)}{(P - P_v)}$$

c) Humedad de saturación es la máxima humedad que puede tener un gas a una temperatura dada. Llamando  $P_{vs}$  a la presión del vapor saturado:

$$H^* = 0,62 \frac{(P_{vs})}{(P - P_{vs})}$$

Recordemos que la presión parcial del vapor de un gas saturado es igual a la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas.

d) Humedad relativa: es la relación entre  $P_v$  y  $P_{vs}$  a una determinada temperatura

$$\phi = P_v/P_{vs} \quad (\phi \leq 1)$$

Si lo multiplicamos por 100 tenemos el porcentaje de humedad relativa

$$\phi (100) = (P_v/P_{vs}) * 100$$

e) Grado de saturación: es la relación entre la humedad absoluta y la de saturación. Suele llamarse Grado Higrométrico o Humedad Porcentual:

$$\psi = H'/H^* = \frac{P_v (P - P_{vs})}{(P - P_v) P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \frac{(P - P_{vs})}{(P - P_v)} = \phi \frac{(P - P_{vs})}{(P - P_v)}$$

Observemos que cuando  $P_v$  y  $P_{vs}$  son pequeños, (lo que normalmente ocurre)

$P - P_{vs} \approx P$  y  $P - P_v \approx P$  por lo que

$$\psi \approx \phi$$

f) Calor específico del aire húmedo: también llamado “calor húmedo”, es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura en 1 °C a 1 kg de aire seco y su vapor asociado.

$$C_h = C_a + H C_v$$

Donde:  $C_a$  = calor específico del aire seco,  
 $C_v$  = calor específico del vapor

Para una aproximación se suele poner generalmente que  $C_a$  y  $C_v$  son independientes de la temperatura, por lo que en nuestro sistema:

$$C_h = 0,24 + H \cdot 0,46 \text{ [kcal/kg aire seco } ^\circ\text{C]}$$

g) Entalpía del aire húmedo

Es la entalpía de 1 kg de aire seco y el vapor de agua que lo acompaña.

$$i_h = i_a + i_v$$

Aquí para calcular  $i$  hacen falta dos estados de referencia: uno para el aire y otro para el vapor. La entalpía del aire se calcula a partir de  $0^\circ\text{C}$  y una atmósfera de presión (32 ° F y 14,7 psig). Para el vapor se elige el estado de referencia correspondiente al líquido a  $0^\circ\text{C}$ .  
 Luego:

$$i = C_a t + H (\lambda_0 + C_v t)$$

$$i = (C_a + H C_v) t + H \lambda_0$$

$$i = C_h t + H \lambda_0$$

Si  $\lambda_0$  es el calor latente del agua a  $0^\circ\text{C} = 595 \text{ kcal/kg}$  reemplazando este valor y el de  $C_h$

$$i = (0,24 + 0,46 H) \cdot t + 595 H \quad \text{Kcal/kg aire seco}$$

h) Volumen húmedo: es el volumen ocupado por 1 kg de aire seco y el vapor de agua que lo acompaña. Aplicando la ecuación de los gases:

$$P_a \cdot V_h = 1/29 \cdot RT$$

$$P_v \cdot V_h = H/18 \cdot RT$$

---


$$(P_a + P_v) \cdot V_h = RT (1/29 + H/18) \quad \text{si } R = 62,2 \text{ (mm Hg} \cdot \text{m}^3) / (\text{°K} \cdot \text{kgmol})$$

$$V_h = (2,15 + 3,46 H) T/P$$

Para el aire seco sólo:  $H = 0 \rightarrow V_h = 2,15 T/P$

Para el aire saturado  $H = H^* \rightarrow V_h = (2,15 + 3,46 H^*) T/P$

DIAGRAMA PSICROMETRICO

Es como se vió en Termodinámica, un diagrama en el que se pueden representar las humedades absolutas en función de la temperatura. La curva de equilibrio es la correspondiente a  $H^* = 0,67 \cdot P_{vs} / (P - P_{vs})$  llamada curva de saturación. Si la presión  $P$  se mantiene constante, entonces  $H^*$  es función de la Temperatura  $T$ , y se representa por una curva en un diagrama  $H$ - $T$ , donde para cada  $T$  corresponde una  $H^*$ .

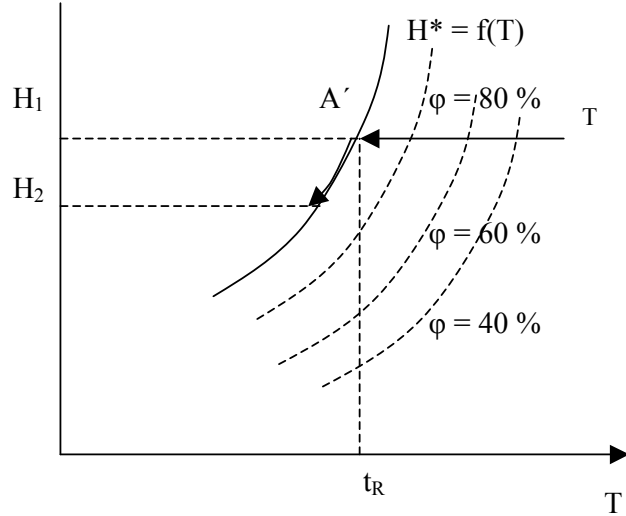
En este mismo diagrama se presentan las líneas de humedad relativa, las de volumen específico del aire seco que varía linealmente con  $T$ .

Observamos que también se representa el volumen específico del aire saturado ( $V_h$ ) aumentando este rápidamente con la  $T$ .

También se encuentra en este diagrama el calor latente de vaporización del agua y el calor húmedo ( $C_h$ ) que varía linealmente con  $H$ .

Temperatura de rocío ( $t_R$ )

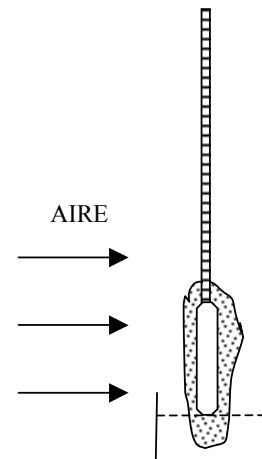
Si enfriamos el aire húmedo, a humedad constante, evoluciona según una horizontal en el diagrama psicrométrico. (A-A'), cortando líneas de humedad relativas crecientes (la  $P_{vs}$  disminuye con la T), hasta llegar a la curva de saturación, (A'), obteniéndose una temperatura  $t_R$ , llamada de rocío puesto que un estado ulterior de enfriamiento irá acompañado de condensación. La cantidad de agua condensada por kg de aire seco se lee directamente con el eje de ordenadas ( $H_1 - H_2$ ) observemos la determinación de la  $t_R$



permite medir la humedad del aire. La determinación práctica de la de la  $t_R$  es muy sencilla: con una superficie metálica pulida que se va enfriando (y registrando las temperaturas), cuando aparece el comienzo del empañamiento del metal se está en la  $t_R$ . Teniendo el valor de  $t_R$ , del diagrama podemos entonces sacar  $H^*$  (humedad de saturación del aire) y si se sigue por una horizontal hasta cortar la temperatura ambiente, desde donde se partió con la experiencia, obtendremos la curva  $\phi$  de humedad relativa correspondiente. La ordenada de esta horizontal nos da la humedad absoluta H.

Temperatura de bulbo húmedo

Si se cubre el bulbo de un termómetro con un paño mojado y se coloca en una corriente de aire no saturado tendremos una pequeña cantidad de agua en un gran volumen de aire que además se remueva constantemente de tal manera que nos asegura que las propiedades del mismo no varían, observamos que el agua del paño comienza a evaporarse y la temperatura indicada por el termómetro comienza a bajar por extraerse del paño calor de vaporización. Se establece entonces un gradiente de temperatura, entre el ambiente y el bulbo húmedo, dando lugar a una transferencia de calor del aire al bulbo. Al cabo de un tiempo se llega al equilibrio dinámico entre el calor recibido y perdido por el bulbo húmedo. Este momento es cuando el termómetro indica la  $t_{bh}$



La  $t_{bh}$  depende de la humedad del aire, que es la fuerza impulsora para la transferencia de materia y de la temperatura ambiente (temperatura del bulbo seco,  $t_{bs}$ ) que es la fuerza impulsora para la transferencia de calor ( $\Delta Y, \Delta t$ ).

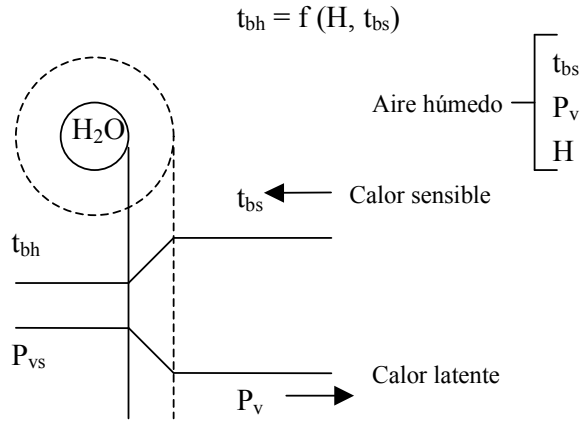
Esquemáticamente, esta transferencia de masa y calor la representamos como se ve en la figura:

En el análisis del fenómeno sólo despreciamos el calor sensible para calentar el agua, por ser muy pequeño frente al de vaporización. Luego, para la transferencia de materia, o sea la cantidad de materia, o sea la cantidad de materia transferida por unidad de área y tiempo será:

$$N_v \text{ (moles/h.m}^2\text{)} = k (P_{vs} - P_v)$$

Siendo  $k$  = coeficiente de transferencia de materia, teniendo como potencial de difusión la presión del vapor.

El calor requerido para evaporar esta cantidad será:



$$q_L \text{ (kCal/h.m}^2\text{)} = N_v \text{ (moles/h.m}^2\text{)} \cdot M^v \text{ (kg/mol)} \cdot \lambda \text{ (kCal/kg)} = k \cdot M_v \cdot \lambda (P_{vs} - P_v)$$

Considerando que la presión de vapor  $P_v$  y la presión de vapor saturado  $P_{vs}$  son despreciables frente a  $P$ .

$$P - P_v \approx P - P_{vs} \approx P_a \text{ luego:}$$

$$H = M_v/M_a \cdot (P_v/(P - P_v)) \rightarrow H \approx M_v/M_a \cdot (P_v/P_a) \rightarrow P_v = H \cdot M_a/M_v \cdot P_a \text{ y}$$

$$H^* = M_v/M_a \cdot (P_{vs}/(P - P_{vs})) \rightarrow H \approx M_v/M_a \cdot (P_{vs}/P_a) \rightarrow P_{vs} = H^* \cdot M_a/M_v \cdot P_a$$

De estas deducimos :

$$P_{vs} - P_v = M_a/M_v P_a (H_b - H) \text{ donde } H_b \text{ es la } H^* \text{ a la } t_{bh}$$

El calor latente  $q_L$  queda expresado por:

$$q_L = k \cdot \lambda \cdot M_a \cdot P_a \cdot (H_b - H) = K' \cdot \lambda (H_b - H)$$

observemos que  $K' = k M_a \cdot P_a$

$$K' = 29 k \text{ ( } P_a = 1 \text{ atm)}$$

La ecuación de transferencia de calor será:

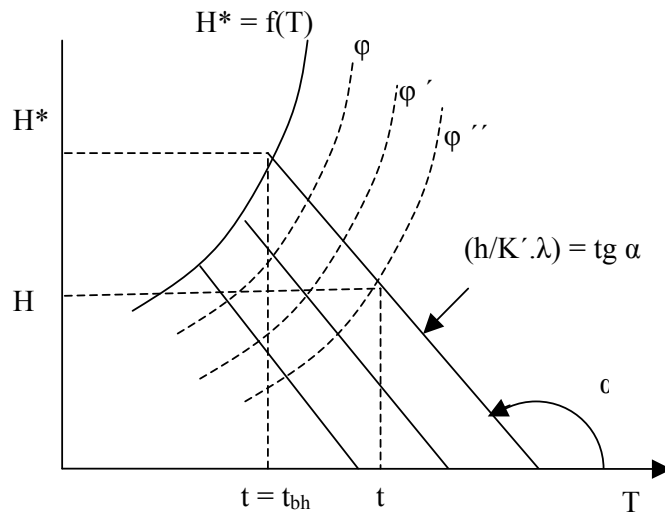
$$q_s = h (t - t_{bh})$$

( $h$  = coef. Transferencia de calor)

en el equilibrio  $q_L = q_s$

$$\text{luego } H_b - H = -h/K' \lambda (t_{bh} - t)$$

Esta ecuación es la que vincula la



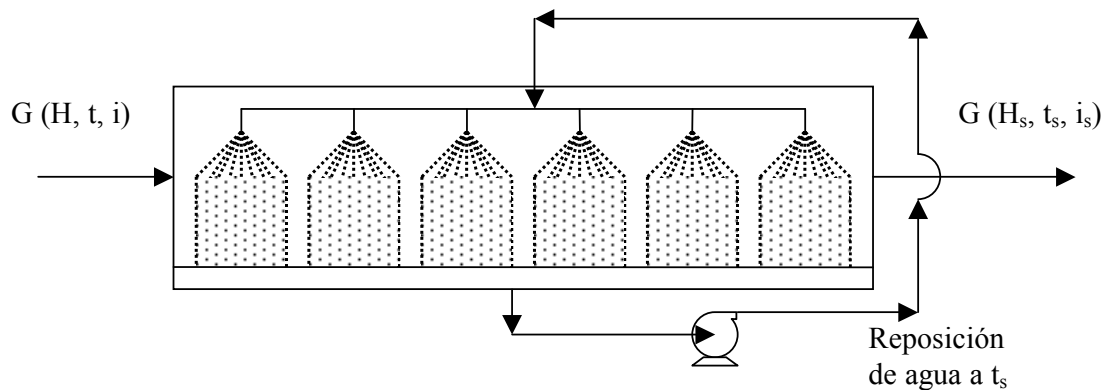
tbh con las condiciones de ambiente. En el diagrama psicrométrico representan rectas que pasan por los puntos (  $H^*$  , tbh) y (H, t), su pendiente es :  $- h/K'\lambda$

Se las conoce como líneas psicrométricas o isoterms de bulbo húmedo. Luego veremos que relación tienen estas líneas con las de saturación adiabática.

Determinando las tbs y tbh disponemos de otro método para determinar la humedad ambiente, que se encuentra en la intersección de ambas isoterms..

### Temperatura de saturación adiabática

Analizaremos que ocurre si se pone en contacto una cantidad de líquido en una cámara térmicamente aislada, de modo que no haya intercambio de calor con el ambiente. Supongamos que el aparato es lo suficientemente largo como para que el aire salga saturado, es decir que esté en equilibrio con el agua que se recircula constantemente. En estas condiciones el aire y el agua alcanzan una temperatura estacionaria, llamada temperatura de saturación adiabática:  $t_s$



El gran caudal líquido que recircula constantemente, no varía sus condiciones, pero el aire se ha enfriado y humidificado. El calor sensible que perdió el aire se ha enfriado y humidificado. El calor sensible que perdió el aire en su recorrido, se destinó a evaporar agua que lo saturó. El mecanismo será el siguiente balance energético, por kg de aire seco:

Calor sensible = Calor latente

$$C_h (t - t_s) = (H_s - H) \cdot \lambda$$

Luego  $H_s - H = - C_h / \lambda (t_s - t)$

Donde  $C_h$  se lo considera aproximadamente constante, lo que es válido para pequeños intervalos de humedad.

La última expresión  $- C_h / \lambda (t_s - t)$  ¿corresponde a una recta en el diagrama psicrométrico (H-T)?  
 ¿ Con pendiente  $- C_h / \lambda$ ? Tengamos presente que  $C_h = f(H)$ . Luego las líneas de saturación adiabáticas no son rectas, ni paralelas.

### Isoentálpicas:

El balance másico de la figura anterior para el agua:

$$G \cdot H + L = G \cdot H_s \rightarrow L/G = (H_s - H)$$

La cantidad de agua evaporada que pasó al aire

El balance entálpico será:

$$G \cdot i + L \cdot C_L \cdot t_s = G \cdot i_s \quad (C_L = \text{calor especif. del líquido})$$

$$\text{Por lo tanto } i + \underbrace{L/G \cdot C_L \cdot t_s}_{\text{Despreciable}} = i_s \rightarrow i \approx i_s$$

Despreciable  
frente a los demás

Por lo que las líneas de saturación adiabáticas son prácticamente isoentálpicas. Por eso en el diagrama psicrométrico figura una escala de entalpías para aire saturado y curvas para la corrección de entalpías para aire saturado y curvas para la corrección de entalpía para aire no saturado.

## RELACION DE LEWIS

Es una relación entre la  $t_{bh}$  y la  $t_s$

Habíamos visto

$$(H_b - H)/(t_{bh} - t) = -h/(K'\lambda) \quad (\text{isoterma de bulbo húmedo})$$

$$(H_s - H)/(t_s - t) = -C_h/\lambda \quad (\text{línea de saturación adiabática})$$

Los valores  $h$  y  $K'$  son peliculares en el sentido que ambos dependen en igual medida de las condiciones de flujo. Por ello se considera que  $h/K'$  es constante.

Para el sistema particular aire-agua:

$$h/K' = 0,26$$

$$\text{y como habíamos definido } C_h = 0,24 + 0,46 H$$

Se dice que ambas pendientes son iguales (aproximadamente) cuando  $H = 0,043$  y difieren considerablemente a humedades y temperaturas elevadas (que raramente se dan en los problemas reales). Luego en el sistema aire-agua

$$h/K' \approx C_h \rightarrow h/(K' C_h) = Le = 1 \quad (Le = \text{N}^\circ \text{ de Lewis})$$

En este caso la  $t_{bh}$  resulta igual a  $t_s$  y las líneas psicrométricas coinciden con las de saturación adiabática. El número de Lewis para otros sistemas no es igual a 1. El intervalo en que varía:  
 $1,3 < Le < 2,5$ .

Resumiendo: las líneas de saturación adiabática prácticamente coinciden con las isoentálpicas (se corrigen con la desviación entálpica) y ahora vemos que también coinciden en las condiciones antes señaladas.

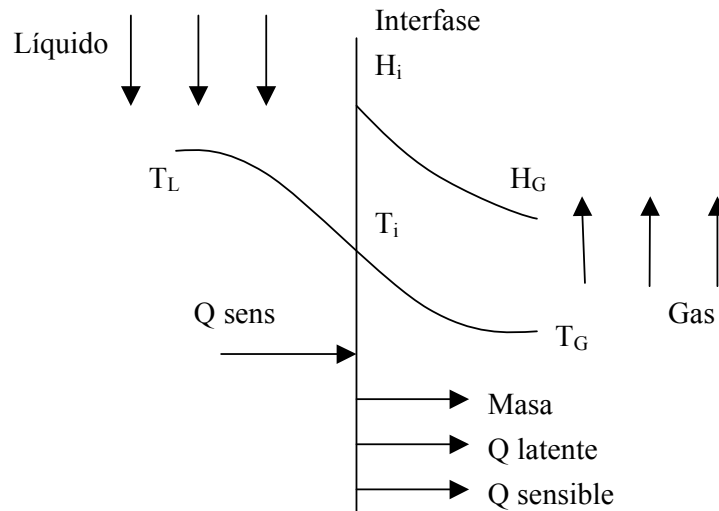
## HUMIDIFICACION

Ya hemos dicho que es un proceso de evaporación de un líquido dentro de un gas y consiste en la transferencia de masa por DIFUSION y CONVECCION de moléculas de vapor procedentes de la capa de gas en contacto con el líquido y que tienen una presión de vapor igual a la de este. El vapor pasa del líquido al gas por efecto de un gradiente de presión parcial pero el gas puede



estar más frío o caliente que el líquido por lo que el calor sensible puede fluir en uno u otro sentido en la interfase:

- a) Cuando el líquido está más caliente que el gas, el calor total transmitido procede del líquido. Esto lo podemos esquematizar en el siguiente modelo, donde debe entenderse que la interfase líquido-gas es la línea vertical central del esquema y sobre la cual se representan como ordenadas (de escala arbitraria) los valores de H y T correspondientes.



- b) Cuando el gas está más caliente que el líquido, se transmite calor sensible del gas al líquido, mientras que se quita calor latente.  
 c) Un caso especial es el humedecimiento adiabático. Este se da cuando la temperatura del gas es muy poco mayor que la del líquido, por lo que el calor latente es exactamente el calor sensible transferido, y luego no se transmite ningún calor por intermedio del líquido.

### CAMBIOS EN LA CONDICION DEL AIRE

Tanto los cambios en humidificación o dehumidificación, modifican la condición del aire desde la representada por un punto inicial en el ábaco, hasta una condición diferente, representada por un segundo punto en el ábaco. Hay cinco procesos posibles:

- 1) Proceso a calor sensible constante o sea a  $t_{bs} = \text{constante}$
- 2) Proceso a calor latente constante, indicados por  $H = \text{cte}$  y  $t_r = \text{cte}$
- 3) Procesos de entalpía constante o adiabáticos  $\rightarrow t_{bh} = \text{cte}$
- 4) Procesos de humedad relativa constante (todos los demás parámetros varían, salvo  $\phi = \text{cte}$ )
- 5) Una modificación en las condiciones del aire que representa una combinación cualquiera de las anteriores de los anteriores y que no procede a lo largo de las líneas de los procesos anteriores.

Por otra parte en el contacto de un gas con un líquido pueden ocurrir operaciones adiabáticas y no adiabáticas. Dentro de las adiabáticas tenemos las señaladas en la página uno (al final)

Entre las no adiabáticas citamos dos:

- 1) Enfriamiento por evaporación
- 2) Deshumidificación de un gas

## Enfriamiento por evaporación

De todas estas operaciones, cuyo desarrollo, cálculo, selección de equipos, etc., pueden encontrarse en manuales de acondicionamiento de aire o gases, nosotros vamos a ver la operación adiabática de enfriamiento de un líquido, que industrialmente se lo conoce como torre de enfriamiento.

Para evaporar 1 kg de agua hacen falta aproximadamente 600 kcal, que visto de otra manera bastan para enfriar 100 kg de agua un  $\Delta t = 6^\circ\text{C}$ .

Así podemos decir que por cada  $6^\circ\text{C}$  de efecto refrigerante se pierde aproximadamente un 1 % de agua. La pérdida por rociado es de alrededor de un 0,2 %. Debemos tener presente que el agua no puede enfriarse por debajo de la temperatura de bulbo húmedo ( $t_{bh}$ ) del aire que entra.

Luego la temperatura de saturación adiabática ( $t_s$ ) será la mínima que podrá alcanzar el agua, cuando el tiempo de contacto sea infinito. La necesidad de enfriar el agua para uso industrial es común en cualquier planta.

Tengamos presente que a veces es necesario, además de enfriar al agua, disminuir el contenido de sólidos totales en suspensión, lo que se logra con un filtrado total o parcial del agua en recirculación.

## Deshumidificación del aire

Si una mezcla templada de vapor – aire se enfría con un líquido frío, y ocurre que la humedad del gas, es mayor que la interfase gas-líquido, el vapor se difunde hacia el líquido y se deshumidifica el gas. Como ejemplo tenemos de esto el acondicionamiento de aire.

Teóricamente, se enfría primero la mezcla de aire-vapor de agua (es decir se elimina calor sensible), a lo largo de una línea de saturación.

La posterior eliminación del calor resulta de la condensación del vapor de agua, extrayéndose agua del aire, al mismo tiempo que sigue reduciéndose la temperatura de bulbo seco ( $t_{bs}$ ) y el proceso se aleja de la línea de saturación en su segunda fase.

La refrigeración puede obtenerse haciendo pasar el aire a través de las aletas de un serpentín por el que circula agua fría, o de una lluvia de agua pulverizada cuya temperatura esté muy por debajo del punto de rocío del aire que se quiere acondicionar. El equipo para refrigeración y deshumidificación presupone que debe lograr disminuir tanto la  $t_{bs}$  como el contenido de humedad del aire. Aquí hay que extraer calor sensible y latente y hay dos métodos para lograrlo:

- 1) Adsorción de la humedad, por medio de un agente químico deshidratador, tal como la sílica-gel, seguido de una extracción de calor sensible por medio de un serpentín del tipo expansión directa, o de agua enfriada.
- 2) Extracción simultánea de calores sensibles y latente, haciendo pasar el aire por una superficie fría, o a través de una pulverización de agua fría cuya temperatura está bien por debajo de la  $t_R$  del aire.

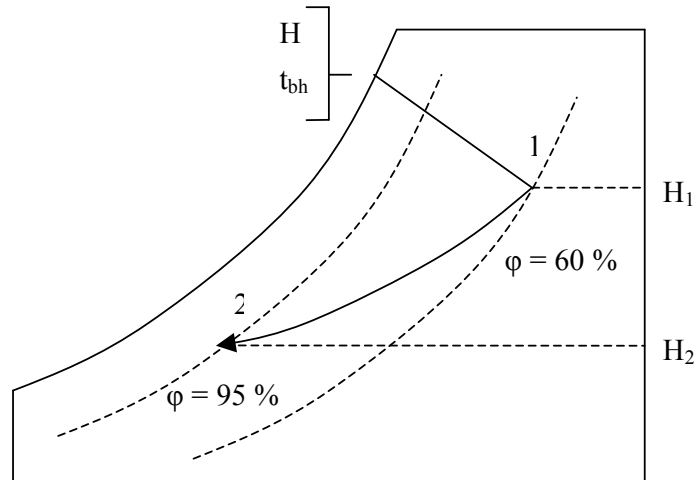
El primer método sólo se utiliza en ciertas aplicaciones industriales en las que se necesita un control exacto de la humedad, y la cantidad de aire necesario es pequeña, por cuanto el costo del deshidrante y la dificultad para reactivarlo es alto.

El segundo método, es de aplicación casi universal, pero no es fácil representarlo en el ábaco psicrométrico por cuanto el camino recorrido depende del tipo de equipo utilizado (serpentín o pulverización) y de la temperatura de funcionamiento del equipo.

El aire entra en el serpentín o pulverizador en el punto 1 del diagrama psicrométrico, y se extrae calor sensible por conducción a la superficie fría. La línea del proceso puede ser como la de la figura, pero coincidentemente con la extracción del calor sensible y dado que la temperatura del

serpentín o del agua fría pulverizada se mantiene por debajo de la  $t_R$  del aire de entrada, la humedad se condensa sobre la superficie fría es decir se extrae calor latente del aire.

Se usan serpentines de tubos con aletas que pueden tener hasta 25 m<sup>2</sup> por m<sup>2</sup> de área frontal por fila de tubos, en la dirección del flujo del aire. Los más comunes son los serpentines de 6 filas, pero pueden llegar hasta 10 (acá se consigue la saturación completa), pero esto último es antieconómico. La velocidad del aire suelo oscilar entre 90 a 250 m/min, siendo lo común alrededor de 130 m/min.



## TORRE DE ENFRIAMIENTO

### INTRODUCCION

Cuando un líquido caliente se pone en contacto con un gas no saturado, parte del mismo se evapora y se enfría.

En las plantas de proceso se requiere disponer de agua de enfriamiento para distintas etapas de la producción. La temperatura debe ser baja dentro de los límites razonables (no es necesario utilizar agua a 4 ° C) y la calidad del agua es importante para evitar incrustaciones, corrosión, ensuciamiento y proliferación de microorganismos que atacan las instalaciones.

Para estos usos se recurre a una fuente de agua dulce (no potable), o si no se logra disponer de la misma; agua salada que debe ser desalinizada previamente. Una vez utilizada el agua no conviene desecharla por varios motivos a saber:

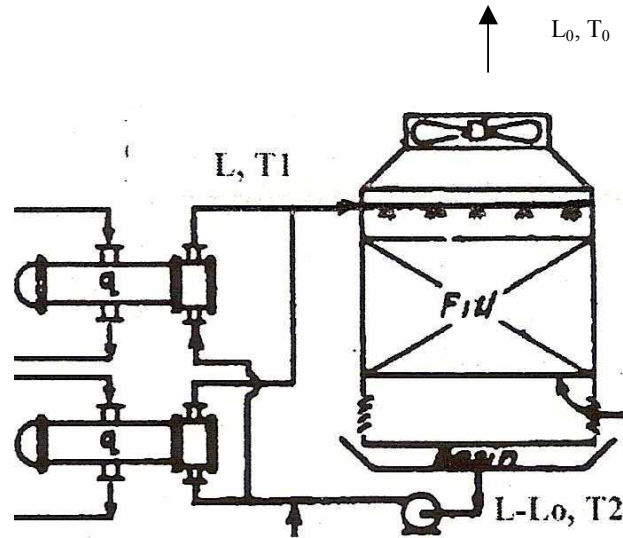
- Evitar el uso indiscriminado de fuentes de agua dulce, ya que se utiliza un recurso natural, en algunos casos no renovable, como algunos tipos de acuíferos.
- Evitar la contaminación de suelos, cursos y espejos de agua dulce o salados con agua industrial caliente que lleva en solución muchas sustancias tóxicas que se usaron para el tratamiento de la misma (biocidas, secuestrantes de oxígeno, aditivos, etc).
- Reducir costos de pretratamiento de agua.
- Reducir el volumen de aguas residuales de proceso y el costo de tratamiento de las mismas para alcanzar los estándares solicitados por la legislación.

En base a esto es conveniente enfriar el agua y recircularla al proceso. Para ello se utilizan las torres de enfriamiento que ayudan a mantener dentro de la planta un ciclo cuasi cerrado de agua, no se puede mantener un ciclo cerrado debido a que las torres producen el enfriamiento por evaporación (se pierde agua) y además pueden producirse pérdidas dentro del proceso.

### ESQUEMA GENERAL DE PROCESO

En la figura puede observarse el esquema general de proceso de una industria en donde se ubica una torre de enfriamiento. En este caso asiste a una batería de intercambiadores de calor. El agua enfría un líquido dentro de ellos y por lo tanto se calienta a temperatura  $T_I$ . Con el objeto de volver a utilizada ya que está tratada, se envía a la torre de enfriamiento en donde se pone en

contacto con aire cuya entalpía es  $H_2$ . El agua cae desde la parte superior de la torre y se enfría hasta la temperatura  $T_2$ . Existe una cantidad de agua  $L_0$ , que debe adicionarse al sistema para contrarrestar las pérdidas por evaporación y arrastre fuera de la torre. Esta cantidad  $L_0$  ingresa a  $T_0$ , lógicamente distinta de  $T_1$  y  $T_2$ . La cantidad de agua  $L$ , vuelve a circular por los equipos de transferencia de calor para completar el ciclo. Veamos algunos conceptos referentes a las torres de enfriamiento.



Disposición general de la torre de enfriamiento

### CLASIFICACIÓN DE LA TORRES DE ENFRIAMIENTO

Las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo con los medios por los que se les suministra aire. Todas emplean hileras horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre el aire y el agua.

Se pueden dividir en:

a) Tiro mecánico:

a.1. Tiro inducido: el aire se suministra de la forma que se muestra en la Fig. 1., Si el aire se hace circular a través de la torre mediante un ventilador que succiona desde la parte superior de la torre. Las torres de plástico constituyen un tipo particular de torres de tiro inducido. Un esquema explicativo de las mismas se indica en la Figura 2e y la tabla de diseño al final

a.2. Tiro forzado: el aire se fuerza por medio de un ventilador ubicado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior (Fig.2b).

b) De circulación natural

b.1. Atmosféricas: aprovecha las corrientes atmosféricas de aire. En la Fig. 2c, se indica una torre atmosférica en la que el aire penetra a través de los rompevientos en una sola dirección, cambiando con la estación del año y las condiciones atmosféricas.

b.2. Tiro natural: operan de la misma manera que una chimenea en un horno (Fig. 2d). El aire se calienta en la torre al ponerse en contacto con el agua caliente, de manera que su densidad baja, La diferencia entre la densidad del aire en la torre y en el exterior origina un flujo natural de aire frío en la parte inferior y una expulsión del aire caliente menos denso en la parte superior.

Las torres de tiro mecánico son las más comunes y de éstas la gran mayoría son de tiro inducido. La preferencia hacia este tipo de torres se debe a que tienen ventajas que superan a las desventajas en la mayor parte de los casos. Analicemos las características de cada tipo:

En las torres de tiro forzado, el aire entra a través de una abertura circular mediante un ventilador y debido a esto se debe suministrar una altura de torre adicional ya que este ventilador tiene cierta inefectividad por debajo del mismo. Además el aire debe girar 90° a gran velocidad. En las torres de tiro inducido, en este sentido, el aire puede entrar a lo largo de una o más paredes de la torre y como resultado, la altura requerida para la zona de ingreso de aire puede ser bastante más pequeña.

Además, en las torres de tiro forzado, la descarga del aire por la parte superior se produce a baja velocidad a través de una abertura de gran tamaño en la parte superior. En estas condiciones el aire posee un frente de velocidad pequeño y tiende a descender cercano a la toma de entrada, con lo cual, se contamina el aire que rodea la torre con aire parcialmente saturado que ya ha pasado a través de la torre con anterioridad. Esto se conoce como recirculación y reduce la capacidad de trabajo de las torres de enfriamiento. En las torres de tiro inducido el aire se descarga a través del ventilador a alta velocidad, de manera que se proyecta hacia arriba hacia las corrientes naturales de aire que evitan su descenso cercano.

Las torres de tiro inducido, por el contrario, presentan mayor caída de presión en la toma del ventilador, lo que aumenta los requerimientos totales de energía. Por otro lado, la alta velocidad de descarga causa también mayor arrastre de gotas de agua y por lo tanto las pérdidas de agua son mayores.

Torres de circulación natural: En los lugares expuestos que tienen vientos con velocidades de 8 a 10 km/hr, la torre atmosférica puede ser la más económica y donde los costos de energía son altos puede aún ser preferible a velocidades de aire tan bajas como 4 a 5 km/hr.

Como las corrientes atmosféricas penetran a todo el ancho de la torre, las torres se hacen muy angostas en comparación con otros tipos, y deben ser muy largas para una capacidad equivalente. Entre las desventajas que se encuentran es que cuando existe calma el rendimiento cae abruptamente. Las pérdidas por arrastre se manifiestan a todo lo largo de la misma y son mayores que en otros tipos de torre. Pero tiene la gran ventaja que el costo de operaciones muy bajo. En general, en lugares de velocidad promedio baja, los costos fijos contrarrestarán la ventaja y dejan de ser convenientes. Un promedio de velocidad que exceda lo indicado, no es indicación suficiente de que la torre atmosférica es la mejor. Con un promedio de velocidad de viento de 8 km/hr, la torre operará a menos de su capacidad de diseño parte del tiempo. La ubicación de la torre en una localidad debe ser de modo tal que se encuentre libre de obstrucciones para aprovechar completamente las corrientes existentes.

Las torres de tiro natural deben ser altas para promover el efecto chimenea y deben también tener sección transversal grande debido a la baja velocidad con que el aire circula comparada con las torres de tiro mecánico. Las torres de tiro natural consumen más fuerza para el bombeo. Sin embargo, eliminan el costo de la potencia del ventilador y pueden ser más aconsejables en algunas localidades que las torres atmosféricas.

Muy relacionadas con las torres de circulación natural están las fuentes, pozas o piletas de rocío, consistentes en cierto número de boquillas verticales, que proyectan el agua al aire sin inducir corrientes de éste. Estas no operan con un flujo ordenado de aire y por consiguiente no son capaces de producir enfriamientos que se aproximen a la temperatura de bulbo húmedo tan

efectivamente como las torres de enfriamiento. Pero donde el agua deba enfriarse un rango corto, suelen ser la solución más económica.

En todos los casos los rompevientos y la cubierta se construyen de tablillas corrugadas de fibrocemento.

Partes internas de las torres de enfriamiento y función del empaque

Si el agua pasa a través de una boquilla capaz de producir pequeñas gotas, se dispondrá de una gran superficie para el contacto de aire-agua. Puesto que la interfase agua-aire es también la superficie de transferencia de calor, el uso de la boquilla permite alcanzar buenos niveles de eficiencia por pie cúbico de aparato de contacto. Este es el principio de la fuente de rocío.

Tomando en cuenta la Fig.5, el líquido que se alimenta desciende por gravedad. Si la torre tiene 16 pies de alto y no se le imparte velocidad inicial a la gota, ésta caerá en un tiempo aproximado de acuerdo con la ley de caída libre,

$$z = \frac{1}{2} g \cdot \theta^2 \quad \text{donde } z \text{ es la altura, } g \text{ la aceleración de la gravedad y } \theta \text{ el tiempo de caída.}$$

Si el líquido se alimenta a razón de una gota por segundo y no hay obstrucción, siempre habrá presente una gota en la torre y se eliminará continuamente una gota por segundo. La superficie efectiva de la torre es la superficie de una gota.

Supongamos ahora que introducimos algunas formas geométricas en las que la gota puede tropezar o desviarse, es posible hacer que la gota tarde cuatro segundos en recorrer la altura de la torre. Entonces, como se muestra en la Fig. 6, se alimenta una gota por segundo en la parte superior y una gota se elimina en el fondo en el mismo lapso, pero en la torre quedan cuatro gotas. Luego la superficie efectiva en esta última es la de cuatro gotas o mejor dicho cuatro veces más respecto de la superficie de caída libre. La función de empaque es aumentar la superficie disponible en la torre, ya sea distribuyendo el líquido sobre una gran superficie o retardando la caída de la gotas a través del aparato.

Para demostrar la efectividad de estos tipos de empaque, el análisis de caída libre puede extenderse aún más. De acuerdo con la ecuación de la caída libre, la gota descenderá 16 pies en un segundo. En  $\frac{1}{2}$  seg. una gota con velocidad cero en la parte superior, desciende aproximadamente 4 pies y su velocidad promedio es 8 pies/seg. En la mitad siguiente del mismo segundo desciende los restantes 12 pies con una velocidad promedio de 24 pies por seg. (pps). Las gotas atraviesan las últimas tres cuartas partes de la torre a tal velocidad que el tiempo de contacto en esta parte de la torre iguala únicamente al de la primera cuarta parte. La ventaja de la caída interrumpida se hace entonces evidente. Cada vez que la caída se interrumpe es como si una gota con velocidad cero empezara a caer de nuevo y la equivalencia de la torre interrumpida es igual a-la

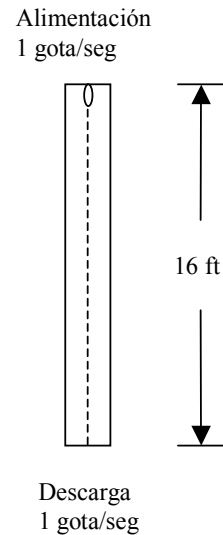


Fig. 5 Torre de caída libre

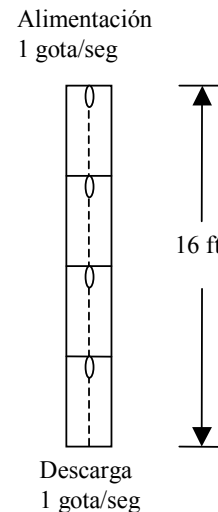


Fig. 6 Torre de caída interrumpida

efectividad del primer cuarto. o sea cuatro torres en serie.

En las torres de difusión tales como los absorbedores químicos, el empaque se introduce en formas especiales, tales como los anillos raschig, etc. que son muy compactos y que proveen una superficie en la que el líquido se extiende y expande una película grande. Esto se llama superficie de película.

En la torre de enfriamiento, debido a los requerimientos de grandes volúmenes de aire y pequeñas caídas de presión permitidas, es costumbre usar largueros de madera de sección rectangular o triangular, que dejan la torres sustancialmente sin obstruir.

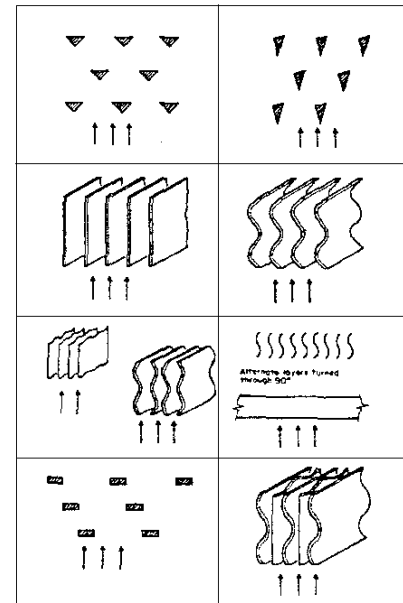
La superficie de los lados de los largueros es comparable con la superficie de película en los absorbedores empacados. Hay además un gran cantidad de superficie de gota. Consecuentemente el método de producir gotas en la parte superior de la torre es de menor consecuencia en la formación de la superficie total siempre que exista una distribución uniforme del líquido en toda la sección transversal de la torre.

En la Fig. 7 puede observarr distintos tipos de empaque utilizados en las torres que se construyen en la actualidad (4).

#### MECANISMO DE ENFRIAMIENTO

Para enfriar agua en la torre de enfriamiento se pone en contacto una corriente líquida de agua con aire ambiente (generalmente en contracorriente según el tipo de torre) de modo que se consigue vaporización parcial del agua con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente con el aire.

En la parte superior de la torre, por donde ingresa el agua y cae en forma de lluvia, se transfiere calor del agua caliente al aire. Este calor sensible perdido por el agua, aparece como calor sensible y latente ganado, por la mezcla agua-aire. Veamos gráficamente que sucede en la interfase en la Fig. 8. El agua caliente se pone en contacto con el aire de salida que es más frío que el agua. A diferencia del experimento del bulbo húmedo, en este caso la presión parcial del agua fuera del líquido es mayor que la del aire de salida, mientras que la temperatura del agua es también mayor que la del aire de salida. Ambos potenciales sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando por lo tanto, la entalpia del aire. En esta forma, dependiendo de la cantidad de aire y del monto de la evaporación, es posible que la temperatura del agua descienda debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada antes de alcanzar el fondo de la torre por el que entra el aire. El hecho de que ambos potenciales pueden operar adiabáticamente en la misma dirección mientras saturan el aire hace posible que las torres de enfriamiento sean tan efectivas para enfriar el agua.



En el fondo de la torre, el agua puede poseer una temperatura igual o menor que la temperatura de bulbo seco del aire con que se pone en contacto. En la Fig. 9 se indica las transferencias de calor sensible y latente puestas en juego. La transferencia de calor sensible y de masa están en direcciones opuestas, idénticas con el experimento del bulbo húmedo. El límite al que la

temperatura del agua de salida puede llegar en una torre de enfriamiento, es el que está adiabáticamente en equilibrio con el aire de entrada, es decir, el bulbo húmedo

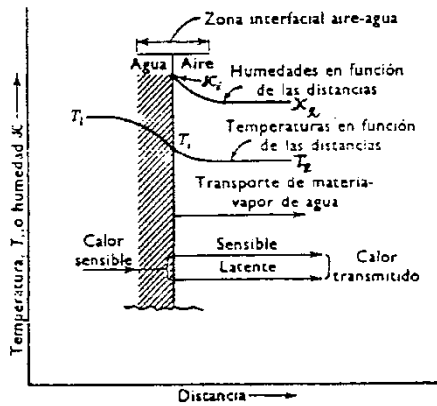


Fig. 8: situación en la cabeza de la torre.

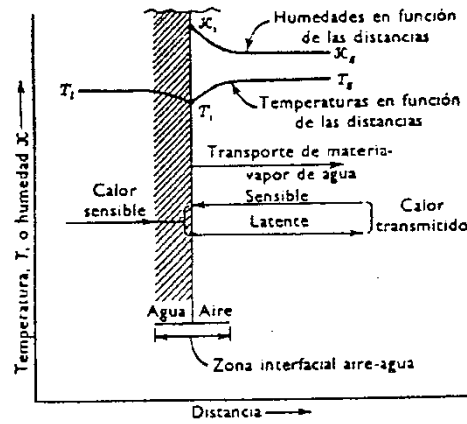


Fig. 9: situación en el fondo de la torre

En el fondo de la torre, la temperatura del agua y de la interfase pueden ser inferiores a la del aire, y ese calor sensible y perdido por el agua y el aire lo consume el agua como calor latente de vaporización. De esta manera se enfría agua por contacto con, aire que está a mayor temperatura.

Se puede observar en el diagrama psicrométrico que la transformación que ocurre en el aire en el interior de la torre de enfriamiento es de un calentamiento y humidificación. Sin embargo; lo que nos interesa en este caso, es reducir la temperatura del agua, no las condiciones del aire.

Las pérdidas de agua por evaporación son bajas. Hay que tener en cuenta que se requieren 600 cal para evaporar 1 gr. de agua. Si 100 gr. deben enfriarse 6 ° C, será suficiente evaporar 1 gr. de agua para disminuir la temperatura 6 ° C. Esta evaporación implica pérdidas, en este caso del 1 %. Además existen pérdidas por arrastre mecánico de gotas, pero en una torre bien diseñada, esta cantidad no sobrepasa al 0,2 % y en total las pérdidas no deberían ser mayores al 2 %, a esto se le llama "agua de recambio".

#### TEORIA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Analizando la figura se tienen los siguientes conceptos: la carga de aire se toma como el flujo de gas seco por unidad de área  $G$  [lb/h pie<sup>2</sup>].

La "carga de agua" o "concentración de agua" en la parte superior de la torre es el flujo de agua por unidad de superficie  $L$  [lb/h pie<sup>2</sup>] y el agua de compensación es  $L_0$  [lb/hr pie<sup>2</sup>].

La carga total de calor por hora por pie<sup>2</sup> de piso ( $q$ ) es la cantidad de calor por hora referida al área de piso. Usando el suscrito 1 para la entrada y 2 para la salida, el balance de la torre en función de gas para un plano de referencia de 0 ° C, es:

$$q + L_0 C_p T_0 = G (H_2 - H_1)$$

donde  $C_p$  es el calor específico del agua y  $H$  la entalpía del gas. En función de la carga de agua, el balance total de calor es:



$$q = L C_p (T_1 - T_2) + L_0 C_p (T_2 - T_0)$$

Combinando ambas ecuaciones:

$$G (H_2 - H_1) = L C_p (T_1 - T_2) + L_0 C_p T_2$$

La cantidad de agua de compensación requerida por evaporación es:

$$L_0 = G (X_2 - X_1)$$

donde:  $X_i$  = humedad absoluta del aire en la posición i.

Operando entre las ecuaciones últimas se tiene:

$$L_0 = \frac{q}{(H_2 - H_1)/(X_2 - X_1) - C T_0}$$

Esta última ecuación da la cantidad de agua de compensación correspondiente a cualquier condición terminal fija. La entalpía para el aire saturado aparece en las cartas psicrométricas ordinarias. Se sugiere cautela en el uso de estas cartas, ya que invariablemente tienen diferentes planos de referencia. Algunas emplean 0 ° F Y 32 ° F para vapor de agua por lo que se corre peligro de tomar datos de distintas cartas.

La derivación del comportamiento de una torre de enfriamiento que se da es esencialmente la de Merkel F, 1925. Puesto que la transferencia total de calor en una torre de enfriamiento es el paso de calor por difusión y convección del agua al aire,

$$q = q_d + q_c$$

donde  $q_d$  es la cantidad de calor cedida por difusión del vapor de agua desde la interfase al seno del aire y  $q_c$  es la cantidad de calor cedida por convección en virtud de la diferencia de temperatura entre ambos.

Tomando las expresiones para  $q_c$  y  $q_d$  se alcanza la expresión:

$$L C_p dT = G dH = K_x (H' - H) a dV$$

donde:

$K_x$  = Es el término de la tasa de transferencia total análogo a  $U_c$  en los intercambiadores y debe recordarse que no hay factor de obstrucción para la transferencia de calor por contacto directo.

$a$  = Superficie de interfase (ft<sup>2</sup>).

$dV$  = Volumen diferencial de enfriamiento (ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>)

$H$  = Entalpía del gas.

Esta ecuación es la clave para el cálculo del diseño y el análisis del comportamiento de las torres de enfriamiento.  $K_x$  es el término de la tasa de transferencia total análogo a  $U_c$  en los intercambiadores y debe recordarse que no hay factor de obstrucción para la transferencia de calor por contacto directo. Sin embargo, en los intercambiadores tubulares la superficie de transferencia de calor usualmente se conoce o puede fácilmente calcularse. En las torres de enfriamiento de agua el valor de  $a$  no puede determinarse directamente, ya que está compuesto

de disposiciones al azar de gotas y superficie de película. La superficie de película es casi independiente del espesor de la misma, mientras que la superficie de las gotas depende tanto de la porción del líquido que forman las gotas como del tamaño promedio de las mismas. La imposibilidad de calcular a se obvia determinando experimentalmente el producto de (Kx a) como un solo factor para un tipo particular de empaque a flujos específicos para los fluidos que componen el sistema. Normalmente se encuentra entre 100 y 600 lb/hr. ft<sup>3</sup>

Reacomodando la ecuación:

$$\int \frac{dH}{H' - H} = Kx a V/L$$

Esta ecuación no es muy conveniente para usarse en el cálculo de torres de enfriamiento donde el interés principal se sitúa en la temperatura del agua producida. Si se multiplica por la razón G/L y recordando que C = 1 para el agua. Se puede alcanzar la siguiente ecuación:

$$nd = \int \frac{dH}{H' - H} = Kx a V/L$$

Se debe tener en cuenta que V es el volumen de enfriamiento activo (ft<sup>3</sup>/ft<sup>2</sup> de área plana o de piso) y L (carga o concentración de agua). Esta ecuación nos da el número de unidades de difusión nd para evitar confusión con el número de unidades de transferencia nt. Si se conoce la altura de una unidad de difusión HDU, para un tipo dado de empaque, puede entonces calcularse la altura total necesaria de la torre para un servicio dado.

La recta de operación se obtiene teniendo en cuenta que:

- 1- Se desprecia el cambio de L con la altura.
- 2- Tornando la entalpía del agua como:  $i_x = C_p (t_x - t_0)$
- 3- Tomando T<sub>0</sub> la temperatura de referencia para cuantificar la entalpía, se tiene:

$$G. dH = L C_p dT$$

$$dH = L/G C_p dT$$

Integrando la ecuación anterior:

$$H1 - H2 = L/G. C_p (T1 - T2)$$

Teniendo en cuenta que C<sub>p</sub> para el caso del agua es 1:

$$H2 - H1 = L/G (T1 - T2)$$

La ecuación anterior representa la línea de operación que marca las condiciones en el seno del gas.

La integral:

$$\int \frac{dT}{(H' - H)} = K.a. V / L$$

se la llama característica de la torre y representa el área de la zona ubicada entre la curva de saturación (interfase) y la recta de operación (correspondiente a la situación en el seno del gas). La Fig. 8 se representa la ubicación de tal zona y su construcción es fundamental para determinar la altura de la torre de enfriamiento.

Una vez conocido el valor de la integral, el volumen de enfriamiento puede colocarse como  $V = Z \cdot 1$  donde  $Z$  es la altura de la torre y 1 es la unidad de área. Luego puede despejarse  $Z$  para obtener:

$$Z = nd.L/K.a$$

En la Fig.8 se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo de agua. La comprensión de este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de la torre de enfriamiento. La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire comienza en C, verticalmente por debajo de B; y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo con que ingresa el aire. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial ( $H' - H$ ). La relación líquido/gas ( $L/G$ ) es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre las abscisas. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire exterior. La característica de la torre se representa por medio del área ABCD de este diagrama.

Puesto que la temperatura  $T$  del agua no es una función simple de  $H'$  y  $H$  es más conveniente efectuar la integración de la ecuación por métodos gráficos o numéricos.

Una vez integrada el área ABCD ya sea por métodos gráficos (como lo veremos más adelante) o ya sea por métodos numéricos (ver (2)), se calcula la altura  $Z$  de la torre como se indicó más atrás.

### Ejercicio

Se desea calcular una torre de enfriamiento para una planta que se mantendrá conectada a una serie de intercambiadores de calor. El caudal másico que circula es de 1500 gal/min. El agua sale de los enfriadores con 120 ° F y deberá ser enfriada en la torre hasta 86 ° F. Teniendo en cuenta que la misma será instalada en la Ciudad de San Carlos, Mendoza, calcular:

- 1- Area de piso necesaria.
- 2- Flujo necesario de aire.
- 3- Altura de la torre.
- 4- Cantidad de agua de recambio.

Los datos necesarios para resolver el cálculo de la torre son los siguientes:

- Flujo de agua a enfriar y temperaturas de entrada y salida.
- Condiciones reinantes del aire del lugar.