




 **Universidad de Los Andes**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Química**  
**Dpto. de Operaciones Unitarias y Proyectos**

---

**OPERACIONES UNITARIAS IV**  
Clase introductoria

Prof. Yoana Castillo  
yoanacastillo@ula.ve



**CONTENIDO**

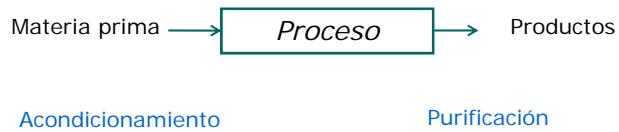
---

- Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.
- Procesos de Separación.
- Contenido del curso Operaciones Unitarias IV.
- Transferencia de Masa.
- Introducción a la Humidificación.
- Repaso de definiciones de Humedad y Diagrama Psicrométrico.

2

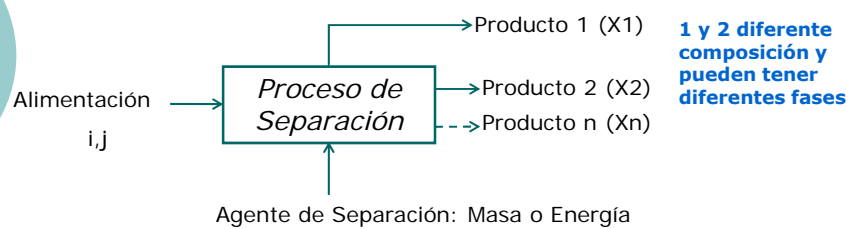
## OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

- Ingeniería Química



3

## PROCESOS DE SEPARACIÓN



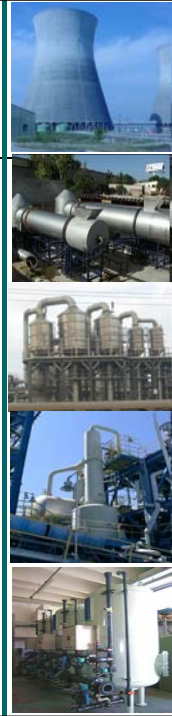
- Agente de Separación:** Promueve la separación
- Principio de Separación:** Propiedad física o química inherente a los componentes de la mezcla que permite que se efectúe la separación.

Separación: Transferencia de masa: Fuerza, dirección? **Termodinámica**  
 Grado de Separación: Limitado por el Equilibrio Termodinámico

4

## CONTENIDO DEL CURSO OPERACIONES UNITARIAS IV

- Humidificación.
- Secado.
- Evaporación.
- Cristalización.
- Intercambio Iónico. Adsorción



## TRANSFERENCIA DE MASA



Para que haya transferencia de masa, debe existir un gradiente impulsor.

Para un componente "i", el flujo transferido de ese soluto ( $N_i$ ) se puede escribir:

$$N_i = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} = K_y \cdot A \cdot \Delta C$$

**$K_y$**  es el Coeficiente de transferencia de masa.

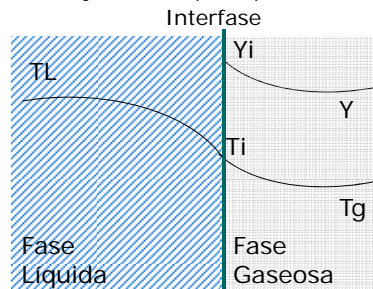
$$K_y [=] \frac{\text{masa}}{\text{área} \cdot \text{tiempo} \cdot \text{unidades del gradiente impulsor}}$$

**A** es el área donde se lleva a cabo la transferencia, interfase [=] l<sup>2</sup>

**$\Delta C$**  es el gradiente de concentración, la transferencia de masa va desde el mayor valor hacia el menor. En el caso de humidificación corresponde a diferencia de humedades.

## TEMA 1: HUMIDIFICACIÓN

- Implica la transferencia de masa y energía de una fase líquida a una mezcla gaseosa de aire y vapor.
- Cuando un líquido relativamente caliente se pone en contacto directo con un gas que no esté saturado, parte del líquido se vaporiza. La temperatura del líquido disminuye debido principalmente al calor latente de evaporación.



▪ **Evaporación superficial del líquido sin fuente externa de calor.**

**Aplicaciones:**

▪ **Enfriamiento de aguas de proceso.**

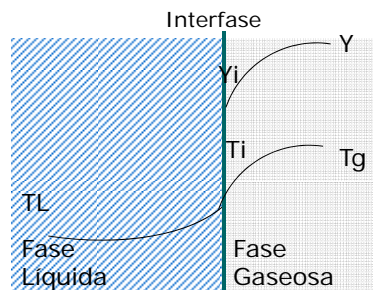
▪ **Acondicionamiento de aire**

- Transferencia de masa
- Transferencia de calor sensible
- Transferencia de calor latente

7

## DESHUMIDIFICACIÓN

- Implica la transferencia de masa y energía de un vapor que se transfiere desde la fase gaseosa a la fase líquida.
- Transferencia inversa de la humidificación.



▪ **Condensación del vapor sin fuente externa de calor**

**Aplicaciones:**

▪ **Deshumidificación del aire**

- ← Transferencia de masa
- ← Transferencia de calor sensible
- ← Transferencia de calor latente

8

## REPASO DE DEFINICIONES

---

- Diferencia entre los términos: Vapor y Gas.
- Presión de Vapor:  $P_v^*$
- Presión Parcial del vapor:  $P_v$
- Terminología para operaciones de contacto Gas-Líquido.

9

## TERMINOLOGIA PARA OPERACIONES DE CONTACTO G-L

---

- HUMEDAD MOLAR:  $Y_m$

$$Y_m = \frac{n_v}{n_g} = \frac{p_v}{p_g} = \frac{p_v}{P - p_v}$$

- HUMEDAD ABSOLUTA:  $Y$

$$Y = Y_m \cdot \frac{PM_v}{PM_g}$$

- HUMEDAD RELATIVA

$$\phi = \frac{p_v}{p_v^*}$$

10

## ▪ HUMEDAD PORCENTUAL

$$\varphi_p = \frac{Y}{Y^*} = \frac{p_v}{p_v^*} \cdot \left( \frac{P - p_v^*}{P - p_v} \right)$$

## ▪ VOLUMEN HÚMEDO: $V_h$

$V_h$  = Volumen del gas húmedo/masa de gas seco

$$V_h = \left( \frac{1}{PM_g} + \frac{Y}{PM_v} \right) \cdot \frac{R \cdot T}{P}$$

$PV = nRT \rightarrow V = \frac{nRT}{P}$   
 $n = n_g + n_v$   
 Tomando Base: 1 Kg de gas  $\rightarrow n = \frac{1}{PM_g} + \frac{Y}{PM_v}$

Sustituyendo

11

## ▪ CALOR ESPECÍFICO

$$C = \hat{C}_v \cdot m_v + \hat{C}_g \cdot m_g \quad m_v = Y \cdot m_g$$

$$C = \hat{C}_v \cdot Y \cdot m_g + \hat{C}_g \cdot m_g$$

$$\frac{C}{m_g} = \hat{C}_v \cdot Y + \hat{C}_g$$

$$\hat{C} = \hat{C}_g + \hat{C}_v \cdot Y$$

Para el sistema Aire-Vapor de Agua en el SI

$$C_g = 0.24 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$C_v = 0.46 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\hat{C} = 0.24 + 0.46 \cdot Y [=] \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$$

12

## ▪ ENTALPÍA ESPECIFICA

$$\Delta H = \Delta H_v + \Delta H_g$$

$$\Delta \hat{H} = \Delta \hat{H}_v \cdot Y + \Delta \hat{H}_g$$

$$\Delta \hat{H} = [\hat{C}_v \cdot (T - T_{ref}) + \lambda_{vap}] \cdot Y + \hat{C}_g \cdot (T - T_{ref})$$

$$\text{Si } T_{refg} = T_{refv} = T_{ref}$$

$$\Delta \hat{H} = [\hat{C}_g + \hat{C}_v \cdot Y] \cdot (T - T_{ref}) + \lambda_{T_{ref}} \cdot Y$$

$$\Delta \hat{H} = [\hat{C}] \cdot (T - T_{ref}) + \lambda_{T_{ref}} \cdot Y$$

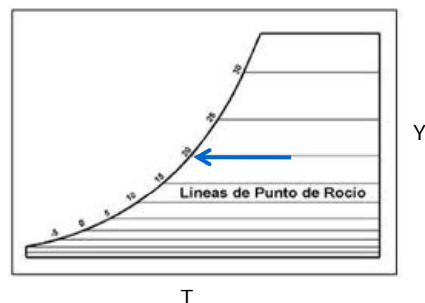
Para el caso de Aire-agua y tomando  $T_{ref} =$  agua líquida a  $0^\circ\text{C}$

$$\Delta \hat{H} = [0.24 + 0.46 \cdot Y] \cdot T + 597.2 \cdot Y \left[ = \right] \frac{\text{Kcal}}{\text{KgAS}}$$

13

## ▪ TEMPERATURA DE ROCIO

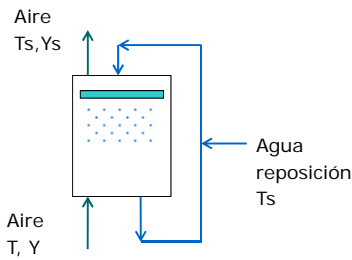
- Temperatura a la cual la mezcla aire-vapor de agua estará saturada, cuando la mezcla se enfría a presión y humedad absoluta constante.
- $P_v^* = P_v$



14

▪ TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA, Ts

Temperatura alcanzada por una mezcla de gas cuando se pone en contacto con un líquido en condiciones adiabáticas.



- El agua entra y sale a Ts.
- El aire se humidifica  $Y_s > Y$  y se enfría hasta Ts.
- El equipo es adiabático:  $Q=0$

Balance de energía:

$$mg \cdot \underbrace{\hat{C}}_{\text{Calor que pierde el aire}} \cdot (T - T_{ref}) = mg \cdot \underbrace{(Y_s - Y)}_{\text{Calor latente evaporación del agua}} \cdot \lambda_{T_{ref}}$$

Calor que pierde el aire

Calor latente evaporación del agua

Tomando  $T_{ref} = T_s$

$$(Y_s - Y) = \frac{\hat{C}}{\lambda_{T_s}} \cdot (T - T_s)$$

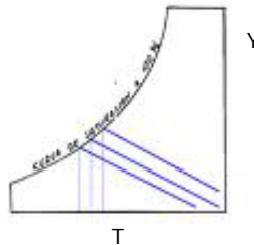
**ECUACION DE TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA**

15

▪ TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA, Ts

En un diagrama Psicométrico, de coordenadas Y vs T, la ecuación de la temperatura de saturación adiabática es una recta de pendiente negativa:

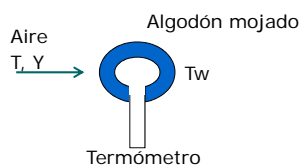
$$\frac{(Y_s - Y)}{(T_s - T)} = - \frac{\hat{C}}{\lambda_{T_s}}$$



16

## TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO, $T_w$

Temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo



La velocidad de transferencia calórica de G a L se iguala a la velocidad de calor requerida para la evaporación del agua y T permanece constante en  $T_w$

Balance de energía:

$$(hc + hr).A.(T - T_w) = Ky.A.(Y_w - Y).\lambda_{T_w}$$

Calor que cede el aire al algodón húmedo

Calor latente evaporación del agua

Considerando que  $hr \ll hc$

$$(Y_w - Y) = \frac{hc}{\lambda_{T_w} Ky} \cdot (T - T_w)$$

**ECUACION DE TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO**

17

## TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO, $T_w$

El cociente  $hc/Ky$  se conoce como **RELACIÓN PSICROMETRICA DE LEWIS**, y puede estimarse mediante:

$$\frac{hc}{Ky} = \hat{C} \cdot \left( \frac{Sch}{Pr} \right)^{0.567}$$

- Sch es el número adimensional de Schimdt
- Pr es el número adimensional de Prandtl

Para el sistema Aire-Agua, se cumple que **Sch=Pr**

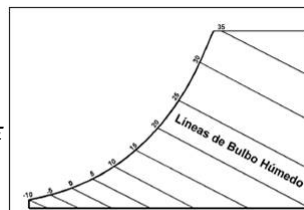
$$\frac{hc}{Ky} = \hat{C}$$

- Para otros sistemas existen valores tabulados. [1]

Finalmente, sustituyendo la relación de Lewis en la ecuación de T bulbo húmedo y arreglando, queda

$$\frac{(Y_w - Y)}{(T_w - T)} = - \frac{\hat{C}}{\lambda_{T_w}}$$

**ECUACION DE TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO**



▪ **RELACIÓN ENTRE Ts y Tw**

$$\frac{(Y_s - Y)}{(T_s - T)} = -\frac{\hat{C}}{\lambda_{Ts}}$$

**ECUACION DE TEMPERATURA DE SATURACIÓN ADIABÁTICA**

$$\frac{(Y_w - Y)}{(T_w - T)} = -\frac{\hat{C}}{\lambda_{Tw}}$$

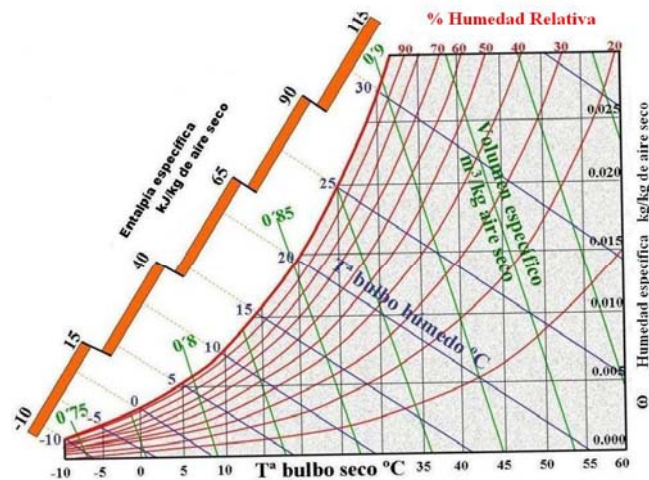
**ECUACION DE TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO**

Para el sistema Aire-agua:

Las pendientes son exactamente IGUALES, se ubican en la misma recta

▪ **DIAGRAMA PSICROMÉTRICO**

Representación gráfica de las ecuaciones analíticas anteriores, dibujadas para una presión P.



## Referencias

---

- [1] OCON; TOJO. "Problemas de Ingeniería Química". Capítulo 4. Aguilar. Madrid. 1974.
- [2] COULSON, J; RICHARDSON. "Chemical Engineering". Capítulo 11. Volumen 1. 1983.
- [3] TREYBAL, R. "Operaciones de Transferencia de Masa". Capítulo 7. Mc Graw Hill. Capítulo 7. México. 1988.
- [4] FOUST, A. "Principios de Operaciones Unitarias". Capítulo 17. Continental S.A. México. 1997.

Palabras claves: Humidificación