

**APUNTES**

**ABSORCION GASEOSA**

**2023**

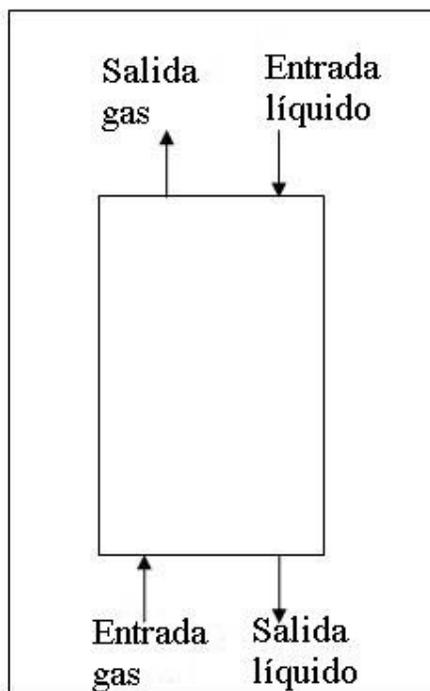
**Ing. Alfredo A Caballero**

## INTRODUCCIÓN

La absorción es una operación unitaria de transferencia de materia donde se pone en contacto una mezcla gaseosa con un disolvente líquido. De modo que se consigue la transferencia de uno o más componentes desde la fase gas hasta la fase líquida.

La absorción puede ser física, química o biológica, que dependerá de cómo se disuelva el gas en el líquido o de como reaccione dando a lugar nuevos productos químicos.

La circulación de los fluidos en este equipo suele ser a contracorriente aprovechando la diferencia de densidades. El líquido se introduce por la parte superior y desciende por el aparato, mientras que el gas entra por la base y sube por este, tal y como se muestra en la figura 1.1. El contacto entre los dos fluidos tiene lugar sobre platos (contacto discontinuo) o mediante un relleno (contacto continuo). La cantidad de platos y de relleno, dependerá de la altura de la columna y de las concentraciones que se quieran conseguir. Además, se puede relacionar la cantidad de platos con la altura del relleno mediante la HEPT (Height Equivalent to a Theoretical Plate).

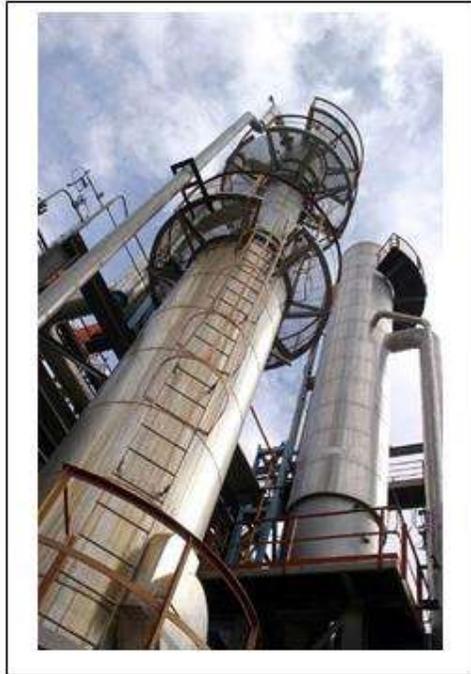


**Figura 1.1:** Esquema de una columna de absorción.

Los disolventes utilizados son generalmente caros, por lo cual deben ser recuperados. Su elección para realizar la extracción es un problema complejo. El disolvente ideal es aquél que reúne las propiedades siguientes:

- Solubilidad infinita del soluto con el líquido extractor.

- Que no sea volátil.
- Que no sea tóxico.
- Que no sea viscoso.
- Que no sea inflamable.
- Que no haga espuma.
- Que sea estable.
- Que no sea muy caro.



Ejemplo de una columna industrial de absorción.

## Tipos de mezclas a separar

La técnica de absorción de gases sirve tanto para mezclas gaseosas binarias como para multicomponentes.

### - Mezclas binarias.

Se considera en este punto que el gas se constituido por un inerte B (componente que no es transferido) y el soluto A, mientras que el líquido lo estará por otro inerte C (el disolvente) y el soluto A. La transferencia tendrá lugar desde la fase gas hasta a la fase líquida.

### - Mezclas multicomponentes.

Cuando son varios los componentes que se transfieren, el problema se complica desde el punto de vista del modelo matemático. Una dificultad adicional radica en la escasez de datos sobre este sistema. La dificultad se puede superar, en muchos casos, considerando ideal su comportamiento. Cuando esta hipótesis no sea aceptable, se deberá recurrir a procedimientos de estimación. En la absorción de multicomponentes se suele fijar la recuperación (separación) de uno de los compuestos (componente clave o de referencia). Para esta separación se realiza el cálculo del número de etapas (contacto discontinuo) o de la altura del relleno (contacto continuo) necesarias. Con estos datos se puede calcular la recuperación del resto de **componentes**.

## Relaciones de equilibrio

Las dadas de equilibrio y los balances de materia son utilizados para determinar el número de etapas de equilibrio, es decir, para encontrar los platos teóricos necesarios o las unidades de transferencia requeridas para obtener una separación determinada.

La ley de Dalton establece que en una mezcla gaseosa, cada gas ejerce su presión como si los otros gases no fueran presentes. Esta presión recibe el nombre de presión parcial ( $P_i$ ) como la que ejercería si ocupase todo el volumen de la mezcla a la misma temperatura, es decir:

$$P_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{V} \quad (1)$$

Donde:

$P_i$ : presión parcial del gas.

$n_i$ : moles del gas.

R: constante de los gases ideales.

T: temperatura.

Esta expresión tiene su utilidad ya que la presión total (P) de la mezcla es la suma de todas las presiones parciales.

$$P = \sum P_i \quad (2)$$

Por lo tanto, si se divide la ecuación (1) entre la ley de los gases ideales se obtiene :

$$\frac{P_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T}{V}}{P = \frac{n_T \cdot R \cdot T}{V}} = y_i = n_i / n_T = P_i / P \Rightarrow P_i = y_i \cdot P$$

Recordando la ley de Henry:

$$P_i = H \cdot x_i$$

Con estas dos leyes se puede concluir:

$$P \cdot y_i = H \cdot x_i$$

$$y_i = \frac{H \cdot x_i}{P}$$

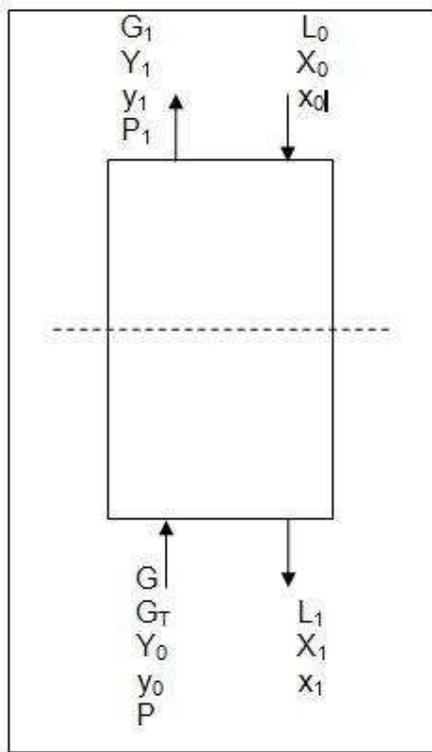
## Balances de materia

Este mecanismo de transferencia se da cuando un de los límites del sistema es permeable a un solo componente de la mezcla. Por ejemplo, en las operaciones de absorción, humidificación, extracción líquido-líquido, cuando las propiedades de la interface se pueden considerar que el régimen de circulación es laminar. En estos casos podemos suponer que la interface es impermeable.

### - FLUJO A CONTRACORRIENTE.

El corriente gaseoso en cualquier punto de la columna, ya sea de relleno o de platos, consta de un cabal ( $G$ ), que son los moles totales dividido por la unidad de tiempo; ya que se trata de una unidad de transferencia que pasa en continuo. Está constituida por un soluto A, el cual se difunde de fracción molar ( $y$ ) y la presión parcial ( $P$ ) o razón molar ( $Y$ ). Además, hay un gas que no se difunde porque es insoluble ( $G_s$ ), que son moles divididos por la unidad de tiempo.

A parte de contener un corriente gaseoso también hay un corriente líquido ( $L$ ), que son los moles divididos por la unidad de tiempo, donde contiene una fracción molar ( $x$ ) de un gas soluble o una razón molar ( $X$ ). La  $L_s$  son los moles divididos por la unidad de tiempo de un disolvente que básicamente no es volátil.



Esquema de una columna de absorción a contracorriente.

Las razones molares se calculan:

- Por la fase gas:

$$Y = \frac{y}{1-y}$$

- Por la fase líquida:

$$X = \frac{x}{1-x}$$

Por lo tanto, se tienen las relaciones siguientes:

- Para la fase gas:

$$G = G_T (1-y) = \frac{G_T}{1+Y}$$

- Para la fase líquida:

$$L = L_T (1-x) = \frac{L_T}{1+X}$$

A continuación se presentan los balances de materia tanto para una columna de platos como para una de relleno en la parte inferior:

- Para una columna de platos:

$$G \cdot (Y_{N_p+1} - Y_1) = L \cdot (X_{N_p} - X_1)$$

- Para una columna de relleno:

$$G \cdot (Y_1 - Y_0) = L \cdot (X_1 - X_0)$$

Donde :

N<sub>p</sub>: número de platos.

Estas ecuaciones anteriores son las que pertenecen a la línea de operación. Esta línea de operación es una recta sólo cuando se grafican en unidades de razón molar (Y y X), de modo que si se grafican en unidades de fracción molar lo que se obtiene es una curva en vez de una recta. Así, la ecuación es transformada en:

- Para una columna de relleno:

\* Para la fase gas:

$$G \left( \frac{y_1}{1-y_1} - \frac{y_0}{1-y_0} \right) = G \left( \frac{P_1}{P_T - P_1} - \frac{P}{P_T - P} \right)$$

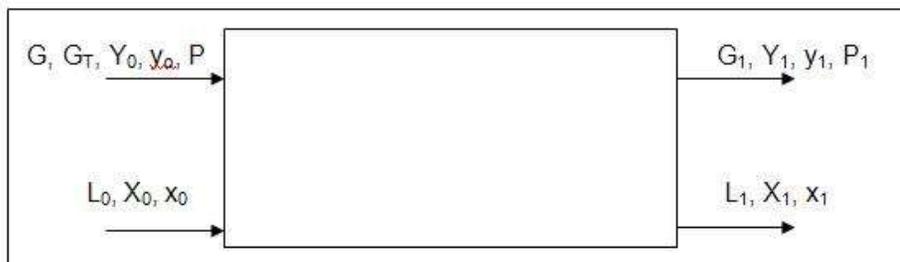
\* Para la fase líquida:

$$L \left( \frac{x_1}{1-x_1} - \frac{x_0}{1-x_0} \right)$$

Donde:

PT: presión que en cualquier punto de la columna se puede considerar constante.

- FLUJO EN PARALELO.



Esquema de una columna de absorción en paralelo.

En este caso la línea de operación tiene una pendiente, al contrario que las columnas a contracorriente, negativa (-L/G).

Este tipo de columnas pueden estar verticalmente o horizontalmente, y no son limitadas, eso implica que al ser infinitamente altas producen que el líquido y el gas a la salida estén en equilibrio.

Este flujo en paralelo se suele utilizar cuando una columna o torre es extremadamente alta, se construye con dos secciones. Con la segunda sección operando en flujo en corriente paralela, también se puede utilizar si el gas que se tiene que disolver en el líquido es una sustancia pura.

También se utiliza el sistema en paralelo cuando se den reacciones químicas rápidas y irreversibles, donde solo se necesita el equivalente a una etapa teórica.

## Columnas de platos

Generalmente la operación de absorción de gases, igual que en otras operaciones básicas, como pueden ser la desorción y la rectificación, se realizan en columnas que son iguales que en el caso de una torre o columna de absorción con relleno. Son cuerpos cilíndricos dispuestos en posición vertical. En su interior se pueden encontrar unos dispositivos (bandejas, platos, ...) El objetivo principal de estos platos es proporcionar una gran superficie de contacto entre las dos fases: la fase gaseosa y la fase líquida.

Los platos o bandejas se ponen en contacto con la fase líquida y el gas en contracorriente. Lo que transcurre es una transferencia de materia a causa del gradiente de concentración.

El diseño de las columnas de platos se basa en los principios de los cálculos para la determinación del número de platos teóricos, para conseguir una concentración determinada a partir de la técnica de absorción de gases.

La utilización de las columnas de platos se realiza básicamente en operaciones a gran escala.

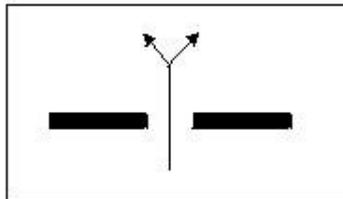
Las características de aplicación son :

- Tienen un contacto discontinuo con el gas.
- Gran diámetro del gas.
- Se utilizan cuando hay sólidos en suspensión.
- Se aplica en los casos que puedan haber cambios bruscos de temperatura.
- Se utilizan cuando de debe trabajar con presiones elevadas.

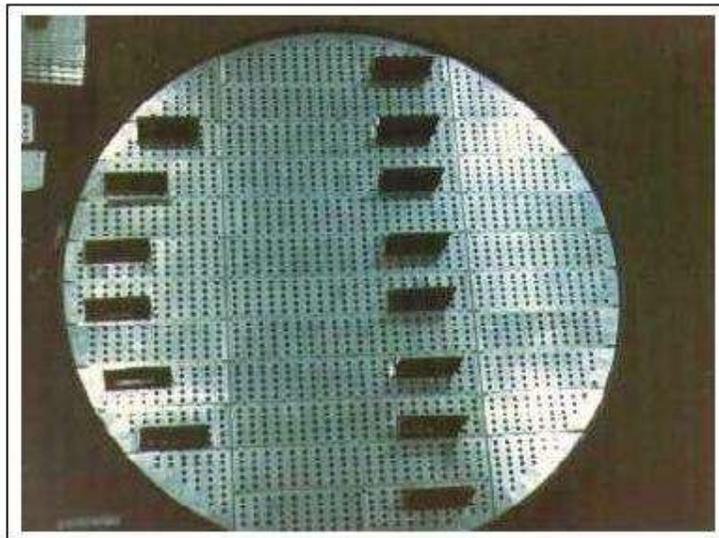
## Tipos de platos

### - Platos perforados:

Son placas con perforaciones que pueden ser de diferentes tamaños. Su construcción es la más sencilla de todas.



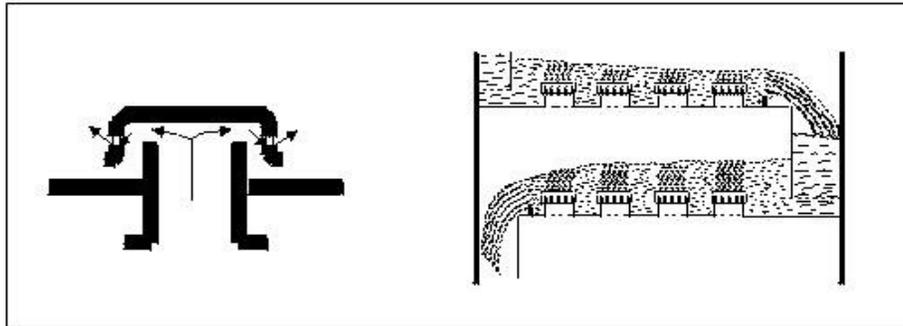
Esquema de un plato perforado.



Ejemplo real de un plato perforado.

### - Platos de "campana de barboteo":

Son los más utilizados a lo largo de la historia, i por lo tanto hay de muchas formas y tamaños. Las campanas están colocadas encima de unos conductos de subida.



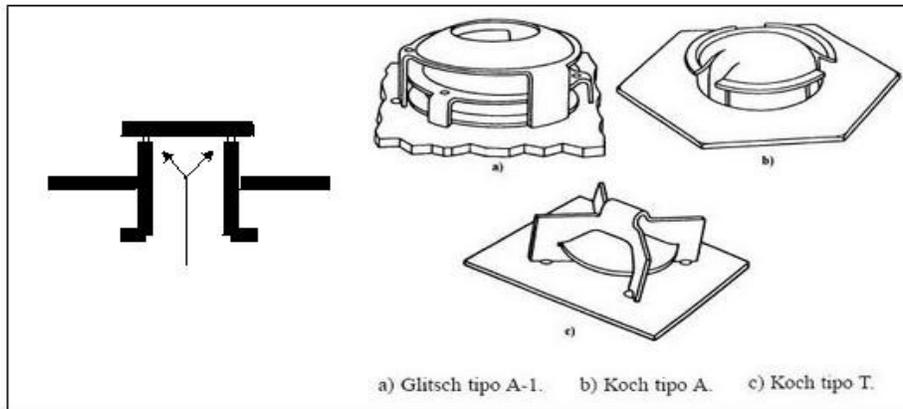
Esquema de un plato de barboteo.



Ejemplo real de un plato de campanas de barboteo.

- Platos de válvula:

Es un modelo que se encuentra en el medio de los dos tipos de platos anteriores. Su construcción consiste en un agujero donde encima hay una válvula, la cual se eleva con el paso del corriente líquido. Es muy similar al de campana de barboteo.



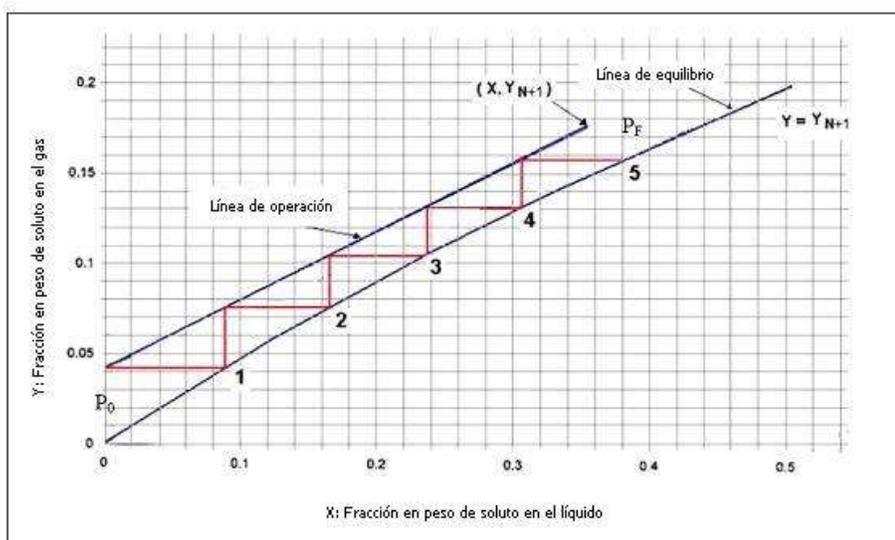
Esquema i tipos de platos de válvulas.

Aún que el más utilizado es el plato perforado, debido a su facilidad de construcción, si se requiere una mayor flexibilidad, se deben utilizar los otros tipos de platos. Los platos de barboteo se suelen utilizar para controlar el tiempo de residencia óptimo para conseguir determinadas reacciones químicas.

## Cálculo gráfico

Para realizar el cálculo del número de platos teóricos gráficamente se tiene que realizar una representación gráfica a partir de los diagramas de equilibrios, donde el diseño debe de ser una parte integrada que incluya una distribución de un solo suelto entre el disolvente y la fase gas inerte.

El número de platos teóricos se puede encontrar escalonando el diagrama de equilibrio siempre y cuando los datos de equilibrio sean las correctas y estén bien representadas en el diagrama.



Ejemplo del cálculo gráfico del número de platos teóricos.

En la figura anterior, se muestra un ejemplo de cálculo del número de platos teóricos que hacen falta, mediante una representación gráfica. En este ejemplo se tiene un sistema de 5 platos teóricos donde se puede observar el proceso de escalonamiento a partir del diagrama de equilibrio.

El punto inicial viene expresado por  $P_0$ , que representa las composiciones del líquido de entrada y del gas que sale por la parte superior de la columna. Al hacer el quinto escalonamiento, se llega al punto  $P_F$ , que representa las composiciones del gas de alimentación, donde es rico en soluto, y las composiciones del líquido, el cual también es rico en soluto.

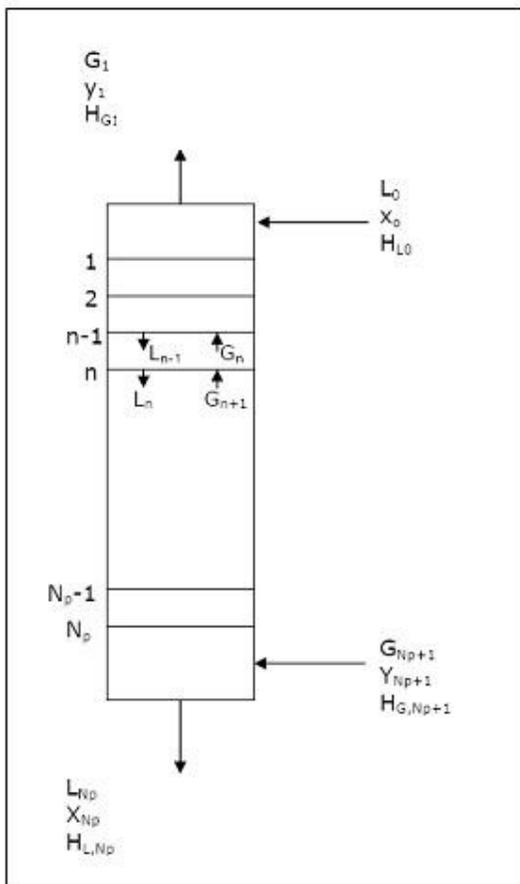
Una vez se tienen fijados el número de platos, para encontrar la composición del gas que sale y la temperatura de la parte superior de la columna, se encuentra por tanteo.

Este procedimiento es válido tanto si se tiene un gas insoluble inerte en la fase gaseosa o un disolvente inerte no volátil en la fase líquida.

### Cálculo analítico

El cálculo analítico nos permite determinar las cantidades de platos teóricos que necesitamos para obtener una separación determinada.

Los cálculos se empiezan por la parte inferior de la columna hasta llegar a la parte superior. Se utiliza el principio de plato ideal, en el cual los corrientes líquido y gas se encuentran en equilibrio respecto la temperatura y la composición.



Esquema de una columna de platos de absorción de gases.

A continuación se muestran los balances de materia total y parcial en el soluto hasta el plato  $n$ :

BALANCE TOTAL:

$$L_n + G_{Np+1} = L_{Np} + G_{n+1}$$

BALANCE EN EL SOLUTO:

$$L_n \cdot x_n + G_{Np+1} \cdot y_{Np+1} = L_{Np} \cdot x_{Np} + G_{n+1} \cdot y_{n+1}$$

A partir de un **balance de entalpía** se pueden encontrar  $L_n$  i  $x_n$  :

BALANCE EN EL SOLUTO:

$$L_n \cdot H_{L,n} + G_{Np+1} \cdot H_{G,Np+1} = L_{Np} \cdot H_{L,Np} + G_{n+1} \cdot H_{G,n+1}$$

Donde:

$L_n$ : moles totales/tiempo del corriente líquido en el plato n.

$G_{Np+1}$ : moles totales/tiempo en el plato  $Np+1$ .

$L_{Np}$ : corriente líquido de moles totales/tiempo en el plato n.

$G_{n+1}$ : corriente gaseoso en moles totales/tiempo en el plato  $n+1$ .

$x_n$ : composición molar del soluto (líquido) en el plato n.

$y_{Np+1}$ : composición molar en el componente gaseoso (soluto) en el plato  $Np+1$ .

$x_{Np}$ : composición molar del soluto (líquido) en el plato  $Np +1$ .

$y_{n+1}$ : composición molar en el componente gaseoso (soluto) en el plato  $n+1$ .

$H_{L,n}$ : entalpía del líquido en el plato n (energía /mol).

$H_{G,Np+1}$ : entalpía en el corriente gaseosos en el plato  $Np+1$  (energía/mol).

$H_{L,Np}$ : entalpía del líquido en el plato  $Np$  (energía /mol).

$H_{G,n+1}$ : entalpía en el corriente gaseoso en el plato  $n+1$  (energía/mol).

Mediante el corriente líquido en el plato n, ( $L_n$ ) se puede determinar cual es la temperatura de trabajo, de modo que el corriente gaseoso en el plato n ( $G_n$ ) se encuentra a la misma temperatura, que el corriente líquido en el mismo plato. Al mismo tiempo las composiciones de estos se encuentran en equilibrio. Por esta razón el balance de materia y el de entalpía se aplican desde plato  $n-1$  hasta el alto de la columna.

Inicialmente los datos que se suelen tener son las temperaturas de los corrientes  $L_0$  y  $G_{Np+1}$ , de modo que es necesario calcular la temperatura  $t_1$  del corriente gas  $G_1$ . Esta temperatura será la

misma que tendrá el plato de la zona superior. Con la ayuda del balance de entalpía total, se puede calcular la temperatura del líquido que sale por el fondo de la columna. La estimación de los cálculos se verifica cuando se llega al plato de la parte superior de la columna.

Para determinar el número de platos teóricos se puede realizar a partir de dos ecuaciones diferentes. Según los datos iniciales que se conozcan se utilizará una o la otra. La primera opción es la que se presenta a continuación:

$$N_{\text{Platos teóricos}} = \frac{\log \frac{y_1 - y_1^*}{y_0 - y_0^*}}{\log \frac{y_1 - y_0}{y_1^* - y_0^*}}$$

Donde:

$y_1^*$  y  $y_0^*$ ; son las concentraciones en el equilibrio, con una concentración del líquido saliente,  $x_n$ .

$y_1$  y  $y_0'$ : son las concentraciones del gas.

La segunda opción que hay para encontrar el número teórico de platos es a partir de la ecuación de Kremser-Brown-Souders y es la siguiente:

$$N_{\text{Platos teóricos}} = \frac{\log \left[ \left( \frac{y_{n+1} - Hx_0}{y_0 - y_0^*} \right) \cdot \left( \frac{A-1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\log A}$$

Donde:

A: es el factor de absorción.

Hx: es la constante de Henry.

Esta sólo se puede utilizar en el caso que se tengan mezclas de gases y líquidos que cumplan la ley de Henry.

## Eficacia de los platos y de los platos reales necesarios

Para poder determinar la eficacia se debe tener en cuenta las siguientes funciones:

- Diseño de los platos.
- Propiedades del fluido.
- Modelo de flujo.

Si los platos están bien diseñados y la velocidad del flujo esta aproximada al límite de la capacidad entonces la eficacia depende principalmente de las propiedades físicas de los fluidos.

Se suelen seguir los siguientes métodos para estimar la eficacia de una determinada columna:

- Por comparación de datos con otras columnas que se encuentren en operaciones en plantas industriales que contengan los mismos sistemas o que sean similares.
- Utilizando modelos empíricos obtenidos a partir de los datos obtenidos.
- Utilizando modelos semiteóricos basados en la transferencia de materia y de calor.

Por lo tanto la eficacia se puede definir como la aproximación fraccionaria etapa en el equilibrio que se obtiene con un plato real.

Se puede calcular la eficacia a partir de la eficacia global de una columna mediante la ecuación siguiente:

$$E_0 = \frac{N_t}{N_a} \cdot 100$$

Donde:

$N_t$ : es el número de platos teóricos.

$N_a$ : es el número de platos reales.

Otro método para calcular la eficacia es mediante la eficacia de todo el plato según Murphree, la cual se realiza con la siguiente ecuación:

$$E_{MV} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

Donde:

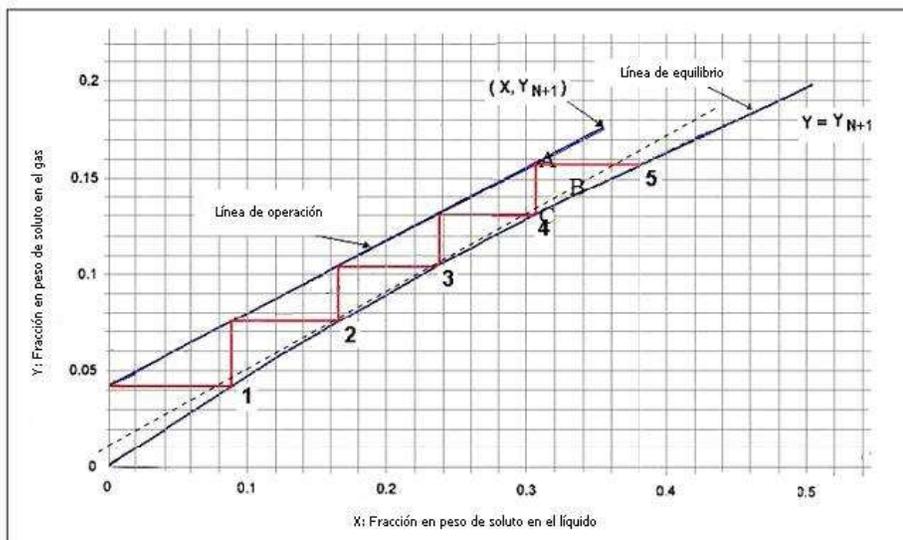
EMV: es la eficacia de Murphree para el vapor en la etapa n.

$y_n^*$ : es la composición del vapor en el equilibrio con el líquido que sale de la etapa n.

También existe la opción de calcular la eficacia de Murphree gráficamente. Para ello gráficamente es suficiente hacer estos cálculos en tres o cuatro puntos y entonces se traza una línea, entre la línea de operación y la de equilibrio, en la gráfica, a una distancia vertical fraccionaria desde la línea de operación que sea igual a la eficiencia de Murphree del gas predominante.

El valor de la eficacia del vapor, EMV, por el plato inferior es la relación entre las líneas AB / AC.

La nueva línea formada será la que se utilizará para calcular el número de platos reales, en vez de utilizar la línea de operación, como en el caso de los platos teóricos.



Ejemplo del cálculo gráfico para encontrar la eficacia de una columna de platos.

En el caso de que la eficacia de Murphree es constante en todos los platos y en condiciones en el que la línea de operación y las curvas en el equilibrio sean rectas, esta eficacia se puede calcular analíticamente mediante la ecuación:

$$E_0 = \frac{\log \left[ 1 + E_{MV} \left( \frac{1}{A-1} \right) \right]}{\log \left( \frac{1}{A} \right)} \cdot 100$$

Donde:

A: el factor de absorción.

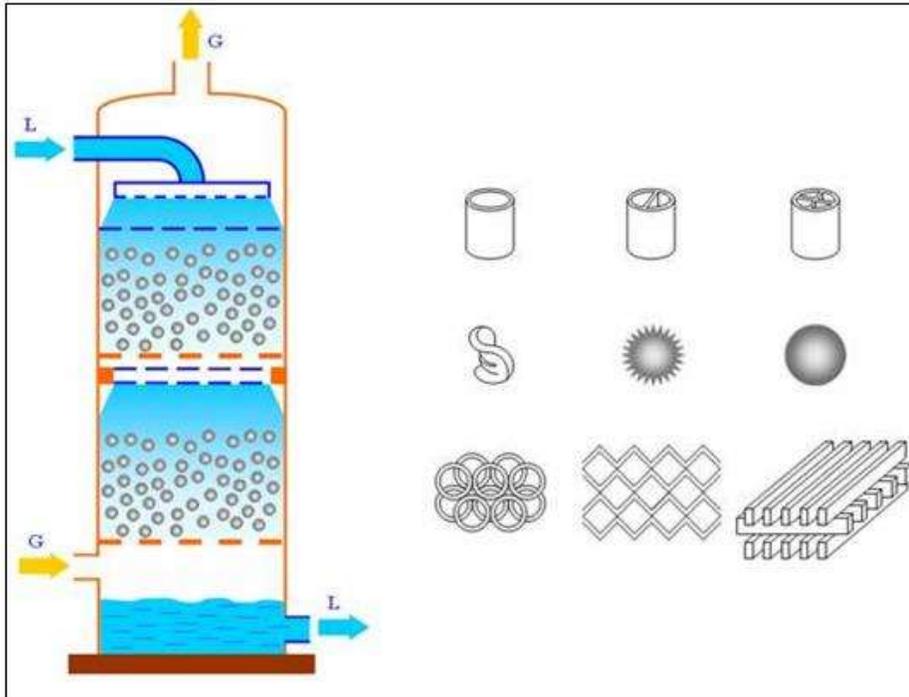
## Columnas de relleno

En las columnas de relleno la transferencia de materia se hace de forma continuada. Estas columnas también son llamadas columnas empaquetadas. La torre de relleno más común es la que consiste en una carcasa cilíndrica que contiene el material inerte en su interior. Este material inerte es el que recibe el nombre de relleno.

El objetivo principal del relleno es proporcionar una superficie de contacto más amplia entre el vapor y el líquido extractor, de esta manera aumenta su turbulencia y por tanto, mejora su eficacia.

Hay rellenos de muchas formas y dimensiones diferentes. Se pueden situar de forma ordenada, si el volumen del relleno es grande (5-20cm) o desordenada si el volumen del relleno es pequeño (5-50mm). Lo que suelen utilizar son los anillos Rasching mayores de 5-8cm de diámetro y se sitúan de forma ordenada. A medida que aumenta el tamaño del relleno, la eficacia de la transferencia de materia, va disminuyendo y por tanto aumentan las pérdidas de carga. En conclusión, para poder determinar cuál es el tamaño óptimo del relleno se deben tener en cuenta dos factores:

- La selección del material del relleno.
- La ordenación del material inerte, relleno.



Esquema de una columna de absorción de gases y rellenos

Las características de los rellenos son:

Deben ser químicamente inertes

Deben tener una cierta resistencia mecánica elevada.

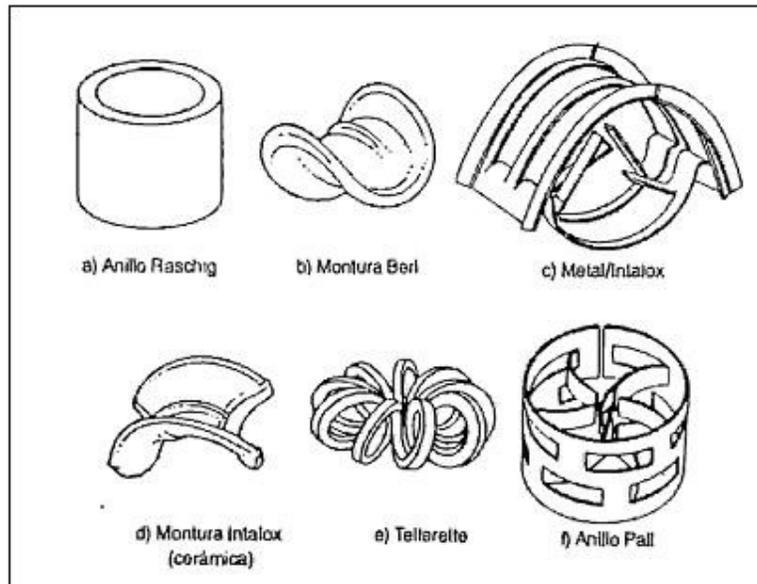
- Deben permitir el paso adecuado de las dos corrientes

Deben permitir un buen contacto entre las dos fases.

- Deben ser de costes bajos, es decir, económicos.

La mayoría de los rellenos son hecho de material barato, inerte y ligero.

Ejemplo: arcilla, grafito, porcelana ... tan se pueden utilizar las formas irregulares como las regulares. Los rellenos que están ordenados dentro de la columna y, por lo tanto, tienen unas dimensiones relativamente grandes, presentan canales interrumpidos a través de la cama y originan caídas de presión menores que las colocadas al azar, donde el gas se ve obligado frecuentemente a cambiar de velocidad y de dirección.



Rellenos de una columna

Las características de aplicación:

- Tienen un contacto continuo con el gas.
- Diámetro del gas.
- Se utilizan cuando hay compuestos corrosivos en la mezcla de gases. I también cuando hay líquidos espumosos.
- Se aplica en los casos que hayan cambios bruscos de temperatura. .
- Se utilizan cuando se trabaja con presiones bajas

## Eficiencia de una columna de relleno

La eficacia de una columna de relleno viene expresada a partir de la altura del relleno (AUT) que hace falta para llevar a cabo la transferencia de materia y el número de unidades de transferencia (NUT).

Por lo tanto, se puede expresar como:

$$Z = (AUT) \cdot (NUT)$$

Donde:

AUT: altura de una unidad de transferencia (m).

NUT: Número de unidades de transferencia.

Para calcular la altura de una unidad de transferencia se puede hacer mediante la ecuación siguiente:

$$AUT = \frac{L'}{K_x \cdot a \cdot S} \Rightarrow \text{Para el corriente líquido}$$

$$AUT = \frac{G'}{K_y \cdot a \cdot S} \Rightarrow \text{Para el corriente gas}$$

Donde:

$K_x \cdot a$  i  $K_y \cdot a$ : coeficientes globales de absorción ( $\text{mol/s} \cdot \text{m}^3$ ).

S: sección transversal de la columna ( $\text{m}^2$ ).

Para calcular el número de unidades de transferencia se puede realizar mediante la expresión siguiente:

$$NUT = \int_{x_1}^{x_0} \frac{dx}{x^* - x} = \int_{y_1}^{y_0} \frac{dy}{y^* - y}$$

Si se integra la expresión anterior se obtiene:

$$NUT = \frac{Y_0 - Y_1}{\frac{(Y_0 - Y_0^*) - (Y_1 - Y_1^*)}{\ln \frac{(Y_0 - Y_0^*)}{(Y_1 - Y_1^*)}}}$$

### Altura equivalente de un plato teórico

Mediante la altura equivalente de un plato teórico (HEPTA), se puede hacer una comparación entre una columna de relleno y una de platos. A partir de este dato, se puede determinar cuál es la altura del relleno mediante el número de platos teóricos. Esta magnitud se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$HEPT = \frac{Z}{N}$$

Donde:

Z: altura del relleno.

N: número de platos teóricos.

## Velocidad de inundación de una columna

La velocidad del flujo límite, es la carga de inundación. La fase gaseosa no puede tener una velocidad cualquiera, tiene un máximo que es la velocidad de inundación. Esta velocidad es la velocidad del flujo de gas que tiende a un límite superior. Hay que tener en cuenta ya que si se trabaja a velocidades extremadamente altas puede provocar una inundación en la columna, de esta forma se suele trabajar con una velocidad sobre un valor del 50% de la velocidad de inundación.

Las velocidades máscas del gas y del líquido influyen sobre la altura necesaria del relleno de tal manera que al aumentar esta velocidad disminuye la altura necesaria de relleno. Por este motivo se debería trabajar con las velocidades máximas siempre y cuando no sea un problema importante el gasto económico que producen las pérdidas de presión.

El cálculo de la velocidad de inundación se realiza a partir del gráfico de Lobo, en el eje de abscisas se representa:

$$\frac{L}{G} \sqrt{\rho_G / \rho_L}$$

l en el eje de las ordenadas:

$$\frac{G^2 (A_p / \epsilon^3) \mu_L^{0.2}}{g \cdot \rho_G \cdot \rho_L} = \frac{V^2 (a_p / \epsilon^3) \rho_G \cdot \mu_L^{0.2}}{g \cdot \rho_L}$$

Donde:

G: velocidad máscas del gas (kg/m<sup>2</sup>h).

$\rho_G$  i  $\rho_L$ : densidad del gas y del líquido (Kg/m<sup>3</sup>).

$\mu_L$ : viscosidad del líquido (centipoises).

g: aceleración de la gravedad (1,27·108 m/h<sup>2</sup>).

V: velocidad lineal del gas (m/s).

$A_p/\epsilon^3$ : superficie específica de relleno (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), sus valores son conocidos según los diferentes tipos de relleno.

A continuación se muestra la gráfica de Lobo:

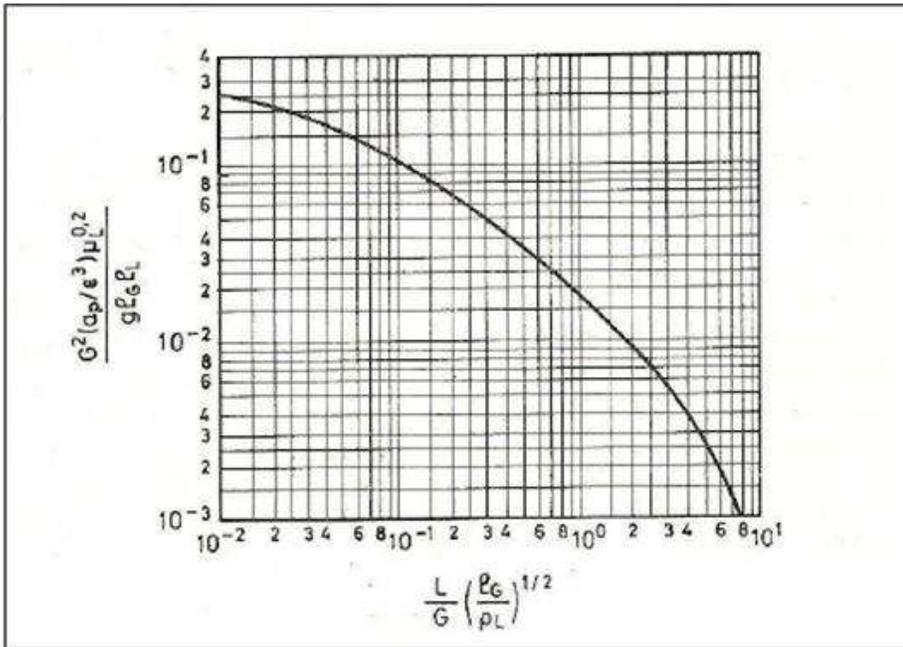


Gráfico de Lobo.