

# DESTILACIÓN

Procesos Industriales  
Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional San Rafael.

Gustavo David Ferreyra  
3 de diciembre de 2017



# Índice general

<b>1. DESTILACIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Diagrama de puntos de ebullición . . . . .	3
1.3. Ley de Raoult . . . . .	4
1.4. Ley de Henry . . . . .	6
1.5. Mezclas de punto de ebullición constantes . . . . .	7
1.6. Equilibrio de composición . . . . .	7
1.7. Métodos de destilación . . . . .	7
1.7.1. Destilación de equilibrio o relámpago . . . . .	8
1.7.2. Destilación simple . . . . .	9
1.7.3. Destilación fraccionada o rectificación . . . . .	9
1.8. Columnas de destilación . . . . .	9
1.8.1. Columnas de relleno . . . . .	10
1.8.2. Columnas de plato . . . . .	10
1.9. Cálculo de columna de fraccionamiento . . . . .	11
1.9.1. Balance de materia y calor . . . . .	11
1.9.2. Plato teórico . . . . .	13

# Capítulo 1

# DESTILACIÓN

## 1.1. Introducción

**Definición 1 (Destilación)** *La destilación es un proceso que consiste en calentar una mezcla líquida, hasta que sus componentes más volátiles pasen a la fase de vapor y a continuación, enfriar el vapor para recuperar dichos componentes en forma líquida por medio de la condensación.*

El objetivo principal de la destilación es separar una mezcla de varios componentes aprovechando sus distintas volatilidades, o bien separar los materiales volátiles de los no volátiles.

En los procesos de evaporación y secado, normalmente el componente más volátil es agua que se desecha, porque el objetivo es obtener el componente menos volátil. Por el contrario, en la destilación la finalidad principal es obtener el componente más volátil.

Por ejemplo, la eliminación de agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación de agua del alcohol, evaporando el alcohol se llama destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

El proceso de destilación, consta de dos fases:

1. El líquido pasa a vapor.
2. El vapor se condensa, volviendo a estado líquido en un matraz distinto de donde se produjo la evaporación.

La diferencia entre destilación y evaporación es la siguiente:

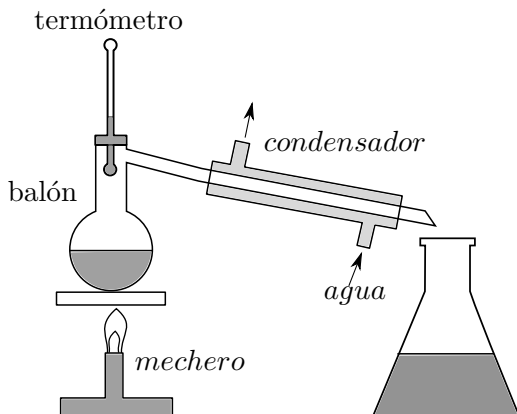


Figura 1.1: Destilación

**Destilación:** La destilación es el procedimiento más utilizado para la separación y purificación de líquidos, se utiliza siempre que se pretende separar un líquido de sus impurezas no volátiles. La exigencia básica para la separación de los componentes de una mezcla por destilación es que la composición del vapor sea diferente a la composición del líquido con el cual se encuentra en equilibrio. Si la composición de ambos es igual, nunca podrá separarse por destilación.

**Evaporación:** Consiste en calentar la mezcla hasta el punto de ebullición de uno de los componentes, y dejarlo hervir hasta que se evapore totalmente. Se emplea si no tenemos interés en utilizar el componente evaporado. Los otros componentes quedan en el envase.

## Ejemplos

**Desalinización del agua,** la desalinización es un proceso que utiliza el principio de destilación para extraer la sal del agua de mar. El agua se calienta y se bombea a un tanque de baja presión, donde se evapora parcialmente. A continuación, se condensa el vapor formado por esta “evaporación súbita” y se extrae como agua pura.

Si la diferencia entre las temperaturas de ebullición o volatilidad de las sustancias es grande, se puede realizar fácilmente la separación completa en una sola destilación. Es el caso de la obtención de agua destilada a partir del agua marina. Esta contiene aproximadamente el 4% de distintas materias sólidas en disolución.

**La separación de agua y alcohol**, es un ejemplo de proceso de destilación. Cuando se lleva a ebullición una disolución de alcohol, la mayor parte del vapor inicial es de alcohol, pues alcanza su punto de ebullición antes que el agua, el vapor se recoge y se condensa varias veces para obtener la mezcla de alcohol más concentrada. Veamos en detalle, donde el agua hierve a  $100^{\circ}\text{C}$ , y el alcohol, que hierve a  $78,5^{\circ}\text{C}$ . Si se hierve una mezcla de estos dos líquidos, el vapor que sale es más rico en alcohol y más pobre en agua que el líquido del que precede, pero no es alcohol puro. Con el fin de concentrar una disolución que contenga un 10 % del alcohol (como la que puede obtenerse por fermentación) para conseguir una disolución que contenga un 50 % de alcohol. (frecuentemente en whisky), el destilado ha de volver a destilarse una o dos veces mas, y si se desea alcohol industrial (95 %) son necesarias varias destilaciones.

**Solución de glicerina diluída:** si se desea obtener glicerina, se separa por evaporación hasta la concentración de 80 % de glicerina (se genera vapor de glicerina) donde se inicia la destilación.

## 1.2. Diagrama de puntos de ebullición

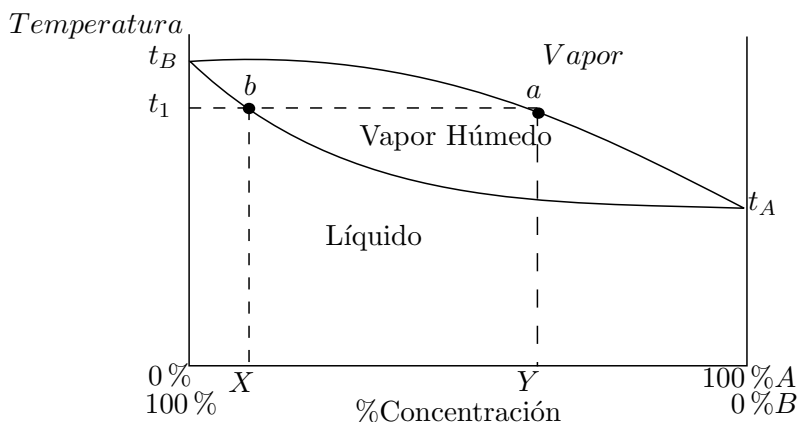


Figura 1.2: Relación entre el punto de ebullición y la composición de equilibrio a presión constante para todas las mezclas de un líquido A (más volátil) y otro B, con puntos de ebullición  $t_A$  y  $t_B$ .

La concentración  $X$  de un componente A de una mezcla se calienta,

comienza a hervir a  $t_1$  y, la concentración del primer vapor será  $Y$ , por lo que el líquido tiene una composición menor del componente más volátil. La mezcla representada en el diagrama de punto de ebullición sigue la ley de Raoult.

### 1.3. Ley de Raoult

En algunos casos es posible obtener el diagrama de los puntos de ebullición a partir de los datos de la presión de vapor de los componentes puros. Esta ley establece que:

**Definición 2 (Ley de Raoult)** *A temperatura constante la presión parcial de un componente de la mezcla es igual a su fracción molar multiplicada por la presión del vapor del mismo componente en estado puro a la temperatura considerada.*

La presión del vapor o más comúnmente presión de saturación es la presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico, su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

Según esto la presión parcial de un componente varía linealmente desde cero hasta el valor de su presión de vapor puro a medida que su fracción molar varía de cero a la unidad.

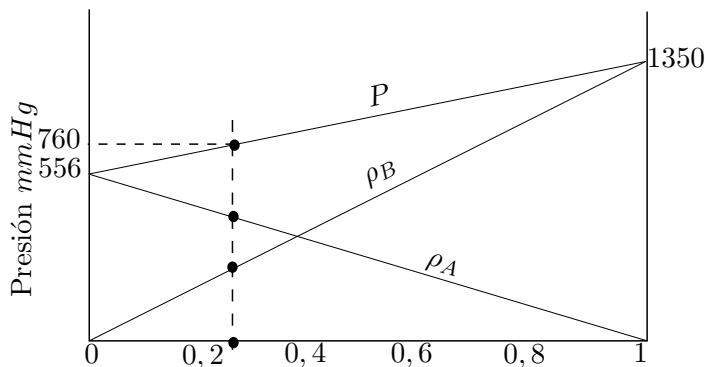


Figura 1.3: Diagrama benceno-tolueno

Consideramos el sistema benceno-tolueno. A la temperatura de  $t_A = 100^\circ\text{C}$  el tolueno tiene una presión de vapor de  $P_A = 556\text{mmHg}$ . La

gráfica en función de la composición será una recta. A ésta misma temperatura el benceno tiene una presión de  $P_B = 1350mmHg$ , y su presión de vapor varía de 0 para el tolueno puro hasta  $P_B = 1350mmHg$  de benceno puro. La presión vapor total para cualquier composición será la suma de las dos rectas.<sup>1</sup>

En el punto en el que la presión total es  $P = 760mmHg$  se encuentra que las fracciones molares en el líquido son  $X = 0,263$  para el benceno  $1 - X = 0,737$  para el tolueno. La composición para el vapor se determina por medio de la ley de Dalton. Aquí  $P_A = 351mmHg$  y la presión total  $P = 760mmHg$ , por lo tanto la composición del vapor y fracción molar del benceno es  $Y_A = P_A/P = 351mmHg/760mmHg = 0,46$ .

Se puede expresar la ley de Raoult:

$$\rho_A = P_A X \quad (1.1)$$

donde:

$\rho_A$  = Presión parcial del componente  $A$  sobre la solución con fracción molar  $X$ .

$P_A$  = Presión de vapor componente puro  $A$ .

$P_B$  = Presión de vapor componente puro  $B$ .

Para el segundo componente de la mezcla:

$$\rho_B = P_B(1 - X) \quad (1.2)$$

En la línea trazada en la figura anterior podemos saber las presiones parciales de los diferentes componentes por medio de la ley de Raoult:

$$\rho_A = 0,263 \cdot 1350mmHg = 355mmHg$$

$$\rho_B = 0,737 \cdot 566mmHg = 409mmHg$$

$$P = 355mmHg + 409mmHg = 764mmHg \text{ Si } P \text{ es la presión total:}$$

$$P = \rho_A + \rho_B = P_A X + P_B(1 - X) \quad (1.3)$$

como  $Y$ : fracción molar de  $A$  en el vapor es igual al cociente de la presión parcial de  $A$  a la presión total:

$$Y = \frac{\rho_A}{\rho_A + \rho_B} = \frac{P_A X}{P_A X + P_B(1 - X)} = \frac{P_A X}{P} \quad (1.4)$$

---

<sup>1</sup>Si son rectas es aplicable la ley de Raoult.



La ley de Raoult se aplica únicamente a las mezclas de sustancias que son químicamente muy similares y cuando las moléculas de las dos sustancias no tienen acción alguna entre si. Ejemplo de la divergencia de la ley de Raoult, consideramos la mezcla de sulfuro de carbono-acetona.

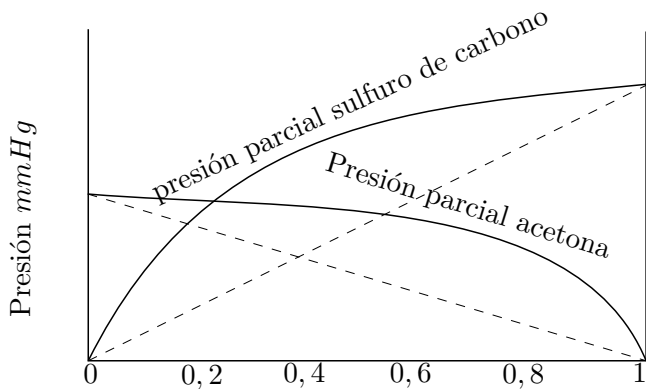


Figura 1.4: Diagrama sulfuro de carbono - acetona

## 1.4. Ley de Henry

Análoga a la ley de Raoult. La presión parcial de un componente en la solución es proporcional a su fracción molar en el líquido.

$$p_A = cX \quad (1.5)$$

Donde:

$p_A$  = Presión parcial de un componente  $A$  sobre una mezcla líquida.

$c$  = Constante a temperatura constante.

$X$  = Fracción molar de  $A$ .

La figura anterior muestra una curva de presión parcial para cada uno de los componentes de la mezcla, la cual es sustancialmente una línea recta en el final de la curva, en que el componente en cuestión está en pequeñas cantidades.

## 1.5. Mezclas de punto de ebullición constantes

Diagrama correspondiente a cloroformo-acetona. La composición de **a** tiene el punto de ebullición más elevado.

El diagrama tiene el mismo punto de ebullición y corresponde a la temperatura **b** y la composición **a**. En ambos diagramas *las curvas de líquido y vapor son tangentes* al punto de ebullición mínimo o máximo. La composición de vapor que se desprende de una mezcla de punto de ebullición máximo o mínimo es la misma que la del líquido hirviendo; es decir el punto de ebullición es constante. Estas mezclas no se pueden separar por destilación.

Si la presión sobre las mismas varía, se puede cambiar el punto de ebullición constante y esto puede utilizarse para efectuar separaciones, bien a presión o vacío.

## 1.6. Equilibrio de composición

La forma simplificada de los diagramas anteriores (Cloroformo y Benceno) y reciben el nombre de diagramas de equilibrio líquido vapor (reacción entre composición del líquido y el vapor a presión constante)

El segundo diagrama de equilibrio se respresenta la mezcla cloroformo-acetona, en donde la curva de equilibrio corta a la diagonal trazada por el origen, la intersección corresponde al punto de ebullición constante.

La construcción de la curva líquido-vapor es fácil cuando se dispone del diagrama punto de ebullición. Primer se elige una composición, se traza una vertical hasta cortar con la línea inferior o de líquido; desde ese punto trazar la horizontal hasta cortar la línea superior o de vapor y desde aquí una vertical hacia abajo, obteniéndose la composición del vapor que está en equilibrio con el líquido de partida.

## 1.7. Métodos de destilación

Hay dos métodos principales:

1. Cuando se produce un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se quiere separar, condensando esos vapores.

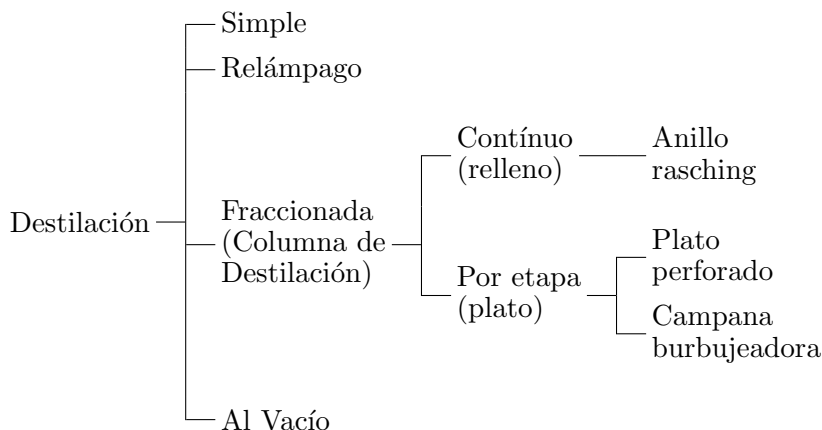


Figura 1.5: Métodos de destilación

2. Cuando se envía parte del condensado al calderín (columna de destilación) y este retorno se pone en íntimo contacto con los vapores que se desprenden en contracorriente y van hacia el condensador (rectificación).

### 1.7.1. Destilación de equilibrio o relámpago

En este método se realiza la vaporización de una fracción determinada de una carga de líquido, manteniendo tanto el líquido como el vapor formado en íntimo contacto hasta el final de la operación, retirando el vapor y condensándolo.

Si tenemos un sistema formado por los componentes  $A$  y  $B$ , siendo  $A$  el más volátil se puede decir que:

El número de moles contenidos en la carga  $W_o$  y la composición de  $A$  es  $X_o$ , si suponemos que se vaporizan  $V$  moles, quedando en el líquido  $(W_o - V)$  moles. La composición del líquido es  $x$  y la del vapor en equilibrio con el es  $y$ .

$$W_o X_o = Vy + (W_o - V)x \quad (1.6)$$

Este método es utilizado con sistemas multi-componentes.

### 1.7.2. Destilación simple

Es una operación en la cual se produce la vaporización de un material por la aplicación de calor. Los vapores que se desprenden se eliminan continuamente, se condensan y se recolectan sin permitir que tenga un lugar ninguna condensación parcial ni retorno al recipiente en donde se lleva a cabo el calentamiento y la ebullición. el destilado puede recolectarse en varios lotes separados (fracciones) en función de su grado de pureza.

Este método se aplica en industrias de capacidad moderada y pequeña.

### 1.7.3. Destilación fraccionada o rectificación

En este proceso, la mezcla líquida a separar (alimentación) se lleva al fondo de la columna (calderín) y se pone allí en ebullición. El vapor generado sube por la columna, sale de ella por la parte superior y se condensa (serpentin). Una parte del condensado se separa como producto de cabeza (destilado) y la otra vuelve como reflujo a la columna, por la que desciende como fase líquida.

En el interior de la columna se pone en contacto el vapor ascendente con el líquido descendente. En un nivel dado de la columna estas dos corrientes no se encuentran en equilibrio por lo que hay una transferencia de materia pasando los componentes más volátiles del líquido al vapor, y los componentes menos volátiles del vapor al líquido. Por lo que el vapor se enriquece de los elementos más volátiles a medida que asciende por la columna.

## 1.8. Columnas de destilación

Los distintos tipos de destilación se suelen llevar a cabo en columnas de destilación.

Estos recipientes cilíndricos verticales con una entrada de la corriente de alimentación a destilar por un punto dado de la columna, y una salida por la parte superior o cabeza para extraer los vapores a condensar. Estos pueden volver en parte a la columna como reflujo a través de otra entrada por la parte superior.

Para asegurar un adecuado contacto entre el vapor y el líquido (esencial para la transferencia de materia) se han diseñado varios dispositivos

basados en dos criterios distintos:

1. Columnas de contacto continuo entre el vapor y el líquido o columnas de relleno.
2. Columnas de contacto por etapas, o columnas de platos o pisos.

### 1.8.1. Columnas de relleno

Se diferencian de las anteriores por tener su interior ocupado por un relleno de anillos llamados anillos de rashing o de material perforado. En estas columnas lo más importante es la mayor superficie de contacto ofrecida por el relleno. En las columnas se produce habitualmente un movimiento a contracorriente entre el líquido que desciende y el vapor que asciende. Y es durante este movimiento cuando se purifican los componentes hasta la calidad deseada en el diseño.

#### Anillos de rashing

Son piezas de geometría tubular cuyo diámetro es aproximadamente igual a su longitud y que se emplean como relleno para columnas en procesos de destilación. Generalmente se fabrican con material cerámico o metálico y poseen una elevada superficie de contacto, lo que facilita la interacción entre una fase líquida estacionaria y una fase móvil gaseosa.

#### Funcionamiento

En la columna de destilación, el reflujo o vapor condensado gotea sobre el interior de la columna, recubriendo los anillos de Rasching. Por otro lado, el vapor producido por la calefacción del dispositivo asciende por la columna. De esta forma, el vapor generado y el líquido condensado interactúan en contracorriente en el interior de los anillos de Rashing, tendiendo a establecer un equilibrio. Los componentes menos volátiles se desplazan con el líquido condensado y los más volátiles se desplazan con el vapor generado, es decir siguen sentidos opuestos.

### 1.8.2. Columnas de plato

Los platos son superficies planas que dividen la columna en una serie de etapas. Tienen por objeto retener una cierta cantidad de líquido en

la superficie a través del cual se hace burbujear el vapor que asciende de la caldera, consiguiendo así un buen contacto entre el vapor y el líquido. El líquido de un plato cae al plato siguiente por un rebosadero situado en un extremo del plato. Según la forma del dispositivo que permite el paso del vapor a través del líquido, se distinguen entre: platos perforados con simples agujeros, platos de campana, de válvulas y otros. El vapor que llega a un plato por debajo, y el líquido que llega por encima, no están en equilibrio. En el plato tiene lugar la mezcla íntima de ambas corrientes, produciéndose allí la transferencia de materia. El vapor que abandona el plato hacia arriba es más rico en el componente más volátil, y en el líquido que cae del plato es más rico en el componente menos volátil.

-completar-

## 1.9. Cálculo de columna de fraccionamiento

Cálculo para el dimensionamiento de columna de fraccionamiento por destilación. Ingres a una mezcla  $F(AYB)$  componente binario. Que contiene una fracción de peso  $X$ , del componente  $A$ . La columna trabaja a una presión  $P$ . El producto de cabeza o destilado ha de contener  $X_o$  y el de cola o residuo  $X_w$  (fracciones en peso) del componente  $A$ .

### 1.9.1. Balance de materia y calor

Los caudales de las corrientes terminales  $D$  y  $W$  se pueden calcular por los balances de materia (en estado de régimen).

#### Balance de materia

$$F = D + W \quad (1.7)$$

$$FX_F = DX_D + WX_W \quad (1.8)$$

La ecuación 1.7 es de balance total y la ecuación 1.8 balance por componentes. Reemplazando 1.7 en 1.8:

$$FX_F = DX_D + (F - D)X_W$$

$$D = F \frac{X_F - X_W}{X_D - X_W} \quad (1.9)$$

$$W = F \frac{X_D - X_F}{X_D - X_W} \quad (1.10)$$

La ecuación 1.9 corresponde a la cantidad de destilado y la ecuación 1.10 corresponde a la cola o residuo del destilado.

### Balance de energía

$$Fh_F + q_r = Dh_D + Wh_W + q_c \quad (1.11)$$

$q_r$  = Calor entregado en el hervidor ( $kcal/h$ ).

$q_c$  = Calor eliminado en el condensador ( $kcal/h$ ).

### Balance de materia y energía para el condensador

$$V_1 = L_0 + D \text{ (Balance de materia.)}$$

$$V_1 Y_1 = L_0 x_0 + D X_D \text{ (Balance de un componente)}$$

$$V_1 h_1 = q_c + L_0 h_0 + D h_0 \text{ (Balance de energía)}$$

Si se condensa totalmente todo el vapor que entra, entonces

$$Y_1 = X_0 = X_D \text{ Despejando } q_c \text{ del balance de energía. } q_c = V_1 h_1 - (L_0 + D)h_D$$

$$\text{sustituyendo } V_1 = L_0 + D$$

$$q_c = (L_0 + D)h_1 - (L_0 + D)h_D = (L_0 + D)(h_1 - h_D)$$

Dividiendo por  $D$

$$q_c/D = (L_0/D + D/D)(h_1 - h_D) = (L_0/D + 1)(h_1 - h_D)$$

La relación  $L_0/D$  se denomina *relación de flujo externo* y al fijar este valor es equivalente a fijar  $q_c$ . Puede calcularse el calor entregado en el hervidor por medio de  $Fh_F + q_r = Dh_D + Wh_W + q_c$ . En este punto tenemos fijadas todas las condiciones terminales y los valores desconocidos se han calculado por medio de los balances de materia y energía.

## Cálculo plato a plato

Para efectuar una separación es necesario saber el número de platos en la columna. Uno de los métodos consiste en el cálculo plato a plato partiendo de datos terminales conocidos. Cualquiera de los dos extremos de la columna puede elegirse para comenzar los cálculos. Si se empieza por la cabeza de la columna, se mantiene para el primer plato.

Balance de materia (total):  $L_0 + V_2 = L_1 + V_1$

Balance del componente A:  $L_0X_0 + V_2Y_2 = L_1X_1 + V_1Y_1$

Balance de energía:  $L_0h_0 + V_2Y_2 = L_1h_1 + V_1H_1$

Cantidades conocidas  $L_0, X_0, h_0$  (reflujo) y  $V_1, Y_1, H_1$  (vapor)

En consecuencia existen 6 incógnitas y 3 ecuaciones, haciendo necesario conocer más datos adicionales, se introducen en el concepto de plato teórico.

### 1.9.2. Plato teórico

**Definición 3** *Se define como un plato que está cargado de cierta cantidad de líquido, del cual se desprende un vapor cuya composición media está en equilibrio con un líquido cuya composición es la media de la del líquido que sale del plato.*

Utilizando estos conceptos se puede hacer el cálculo del número de platos teóricos.

La composición del vapor que sale del plato se conoce, por lo tanto la composición de la corriente  $L_1$  puede determinarse por la relación de equilibrio a la presión  $P$ . La composición  $X_1$  de la corriente  $L_1$  es conocida ahora, lo cual fija su entalpía. Además la corriente  $V_2$  es vapor saturado por lo que su entalpía queda definida por su composición. De esta forma se conocen  $X_1, h_1, H_2$  y el número de variables desconocidas queda reducido a tres ( $L_1, V_2, Y_2$ ) el sistema puede resolverse. Al llegar a este punto las composiciones y entalpías de las corrientes  $V_2$  y  $L_1$  han quedado determinadas y se dispone de datos suficientes para empezar los cálculos del segundo plato teórico. Es posible proceder de esta manera hasta el plato de la alimentación, pero el cálculo es pesado.



Una solución más rápida de los balances de materia y energía puede obtenerse gráficamente utilizando los diagramas entalpía-composición.