

Programa de la asignatura:

Operaciones unitarias I

U4 | Operaciones unitarias de transferencia
de cantidad masa y calor



DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Índice

Presentación de la unidad.....	2
Propósitos de la unidad.....	2
Competencia específica.....	3
4.1. Fundamentos.....	3
4.1.1. Introducción.....	5
4.1.2. Equilibrio líquido–vapor.....	9
4.2. Destilación de mezclas binarias.....	20
4.2.1. Destilación simple.....	20
4.2.2. Balance de materia.....	23
4.2.2. Balance de Energía.....	26
4.3. Rectificación continua.....	31
4.3.1. Número de platos.....	33
4.3.2. Eficiencia de platos.....	35
4.3.3. Problemas resueltos.....	37
Actividades.....	39
Autorreflexiones.....	40
Cierre de la Unidad.....	40
Para saber más.....	41
Fuentes de consulta.....	42



Presentación de la unidad

En esta unidad se desarrollan las razones y principios primordiales que intervienen en el diseño de columnas de destilación de componentes múltiples y mezclas binarias.

La destilación es una operación unitaria donde se separa una mezcla de líquidos homogéneos. Este proceso es muy difundido en la industria, ya que es económico y el más desarrollado tecnológicamente, ya que emplea el calor como medio de separación.

Como ejemplo se puede mencionar la destilación de mezclas binarias, donde los balances de masa, entalpia y equilibrios vapor-líquido son utilizados para el cálculo de las etapas de equilibrio. Los equilibrios entre fases son mucho más complejos que para sistemas binarios, debido al número de componentes ya que los equilibrios dependen de la temperatura que varía de una etapa a otra. En los sistemas binarios se ven influenciados por variables tales como la temperatura y el equilibrio, estos también cambian de una etapa a otra. Cabe señalar que durante la destilación de mezclas multicomponentes uno de los componentes pueden ser más volátil, es muy importante tomarlo en cuenta.

Actualmente, para la realización de los cálculos para cuantificar las variables de ingeniería en el diseño y operación, es necesario apoyarse en computadoras y software especializado.

Propósitos de la unidad



Al término de la unidad dos podrás:

- Distinguir la importancia de los equipos de destilación en los procesos industriales, entre los que destacan las plantas productoras de bebidas alcohólicas, el procesamiento de gas natural y la obtención de aceites esenciales a partir de materias aromáticas.



- Identificar la destilación simple y la destilación de mezclas binarias, así como la rectificación continua y sus características para diseñar y aplicar el balance de materia y energía y determinar el número de platos teóricos desarrollando problemas.
- Deducirlos coeficientes de trasmisión de calor en la evaporación.

Competencia específica



Resuelve ecuaciones de los fenómenos y procesos involucrados en la transferencia o transporte de masa y energía a través del cálculo de sus modelos matemáticos, sus parámetros y variables para determinar resultados aplicables a situaciones reales de operaciones unitarias.

4.1. Fundamentos

La **destilación** es una técnica muy utilizada hoy en día, su descubrimiento se debe a los alquimistas en el año 300 a.C. Esta operación unitaria es muy empleada en la industria química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica y cosmética, es empleada para la separación de los componentes que forman mezclas líquidas miscibles e involucra la transferencia de masa.

Se puede definir como la operación cuyo fin es la separación de dos o más líquidos miscibles mediante la ebullición, en donde los vapores obtenidos se recuperan y se condensan como producto deseable; dichos vapores son más ricos en el líquido o líquidos más volátiles, mientras que los fondos o líquidos remanentes son ricos en las sustancias menos volátiles.



Existen en la industria diversos tipos de destilación entre las que podemos mencionar los siguientes:

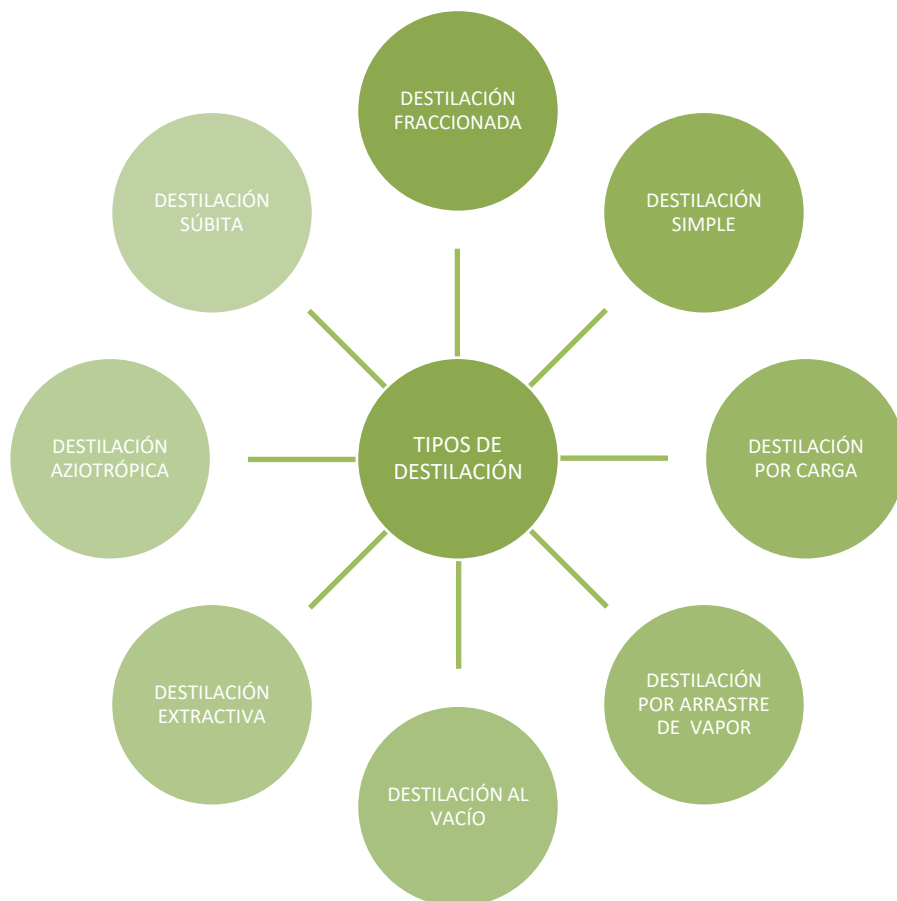


Figura 1. Tipos de destilación.



Para conocer más sobre el tema de separaciones de líquidos miscibles, te invito a que leas el artículo titulado “Destilados de agave en México y su denominación de origen” de Carrillo Trueba, L.A (2007). Este material de apoyo te ayudara a ampliar los conceptos básicos de los componentes del sistema de destilación.



4.1.1. Introducción

En otros sistemas similares como la evaporación o el secado, normalmente el objetivo es obtener el componente menos volátil en forma pura; el componente más volátil (casi siempre agua) se desecha. Por ejemplo, la eliminación del agua de la glicerina evaporando el agua, se llama evaporación, pero la eliminación del agua del alcohol evaporando el alcohol recibe el nombre de destilación, aunque se usan mecanismos similares en ambos casos.

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 de agua marina. Esta contiene aproximadamente el 4% de distintas materias sólidas en disolución.

Un variable muy importante es el punto de ebullición de algunos componentes, ya que este provoca que no se realice una separación completa en una sola operación de destilación, por lo que suele realizarse en dos o más destilaciones. Un ejemplo que podemos mencionar es en la mezcla del alcohol etílico y el agua: el alcohol tiene un punto de ebullición de 78.5°C y el agua de 100°C , por lo que al hervir esta mezcla se desprenden vapores de ambas sustancias en diferentes concentraciones.

Otro ejemplo es la destilación simple, la cual es utilizada para la separación de líquidos con un punto de ebullición inferior a 150°C con una presión atmosférica o de otros líquidos miscibles que presentan un punto de ebullición al menos de 25°C superior al primero de ellos. Recordemos que el agua, al llegar al punto de ebullición, genera burbujas y comienza a desprender vapor, tal y como se observa en la **figura 2**.

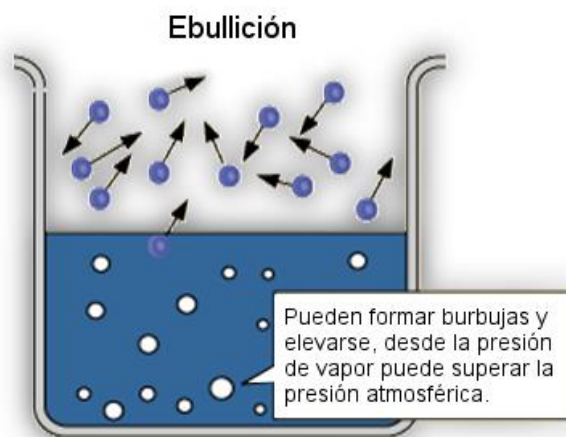


Figura 2. Destilación en laboratorio (Marques R. 2012).



Es importante que la ebullición de la mezcla sea homogénea y no se produzcan proyecciones. Para evitar estas proyecciones suele introducirse en el interior del aparato de destilación nódulos de materia que no reaccione con los componentes. Normalmente se suelen utilizar pequeñas bolas de vidrio, tal es el caso de una destilación en el laboratorio de química, como lo puedes observar en la imagen anterior (Marques, 2012).

En la **figura 3** se puede observar un ejemplo de **destilación simple**, muy utilizada en el laboratorio (cuando una mezcla de productos líquidos a destilar contiene una sola sustancia volátil y la diferencia de temperatura es de 80 °C).

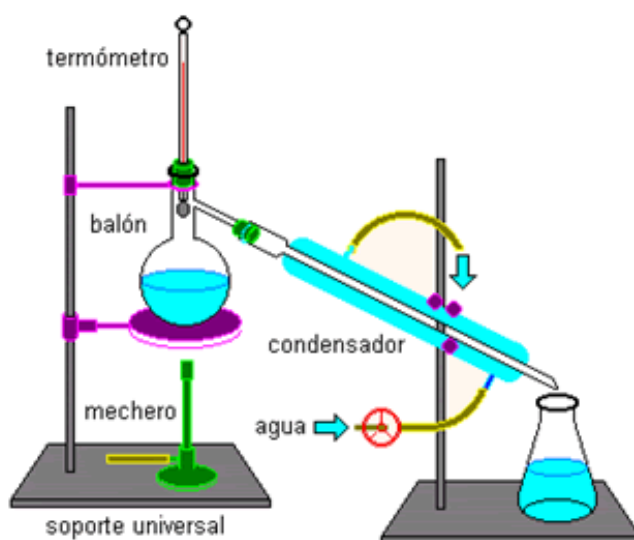


Figura 3. Destilación simple (Diego, J.P.2012).

Otro tipo de destilación muy utilizada en la industria petrolera es la **destilación fraccionada**, donde se separan mezclas muy complejas y los componentes tienen la variable de volatilidad muy parecida. Este destilado tiene como principal característica que el destilado vuelve al condensador y gotea por una larga columna a una serie de placas. En ese momento el vapor que se dirige al condensador hace burbujear al líquido de dichas placas.

Observa la **figura 4** que muestra a una torre de destilación fraccionada, en ella el vapor y el líquido interactúan de forma que parte del agua del vapor se condensa y parte del alcohol del líquido se evapora. Así, la interacción en cada placa es equivalente a una redistilación, y si se construye una columna con el suficiente número de placas; se puede obtener un producto destilado de la altísima pureza, como el alcohol de 96%; en una única destilación.

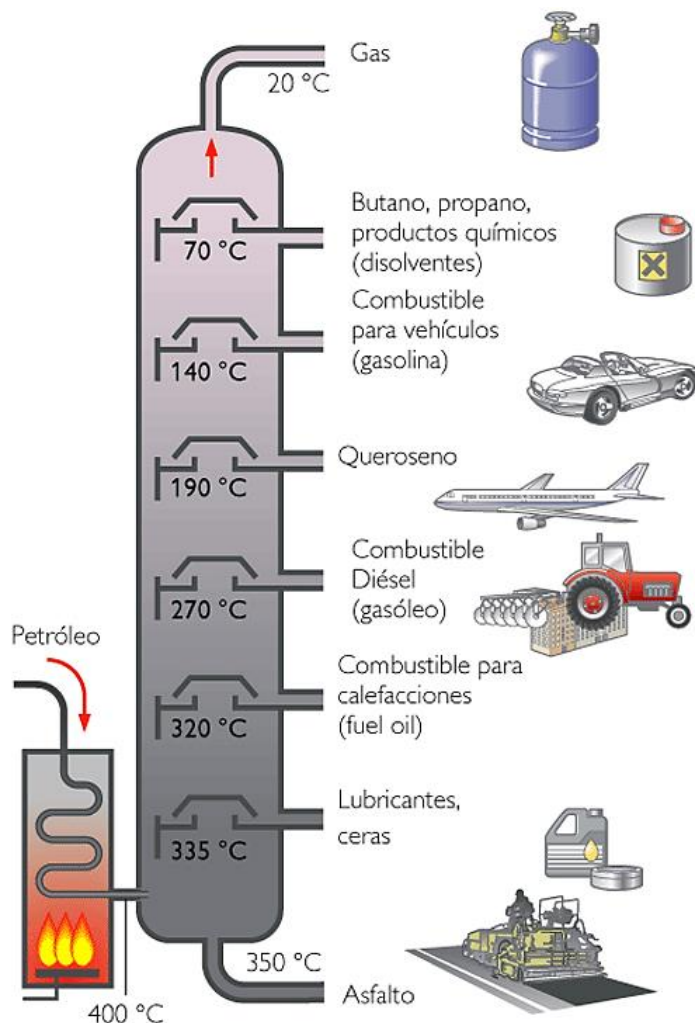


Figura 4. Columna de torres de destilación fraccionada (Núñez M.A. 2012).

Este tipo de proceso se utiliza en la industria no solo para mezclas simples binarias, como el alcohol y agua en la fermentación, usando oxígeno y nitrógenos en el aire líquido. Este proceso es también utilizado para mezclas complejas como las que se encuentran en el alquitrán de hulla y en el petróleo. Una columna fraccionada es también llamada torre de burbujeo, en la que las placas están dispuestas horizontalmente, separadas unos centímetros, y los vapores suben por unas capsulas de burbujeo a cada placa, donde burbujean a través del líquido.

Las placas de este tipo de destiladores se encuentran en forma escalonada para que el fluido se mueva de izquierda a derecha. La interacción entre el líquido y el vapor es incompleta debido a que puede producir espuma.



Como todos los procesos, esta destilación tiene como desventaja que se pierde un 50 % del destilado condensado y tiene que regresar a la parte superior de la torre y de nuevo hervir, por lo cual hay que suministrar más energía en forma de calor.

Existe otro tipo de destilación denominada **de vapor**: si dos líquidos insolubles se calientan, ninguno de los dos es afectado por la presencia del otro, siempre y cuando se les remueva para que el líquido más ligero no forme una capa impenetrable sobre el más pesado. Se evaporan en un grado determinado solamente por su propia volatilidad, por lo tanto dicha mezcla siempre hierve a una temperatura menor que la de cada componente por separado. El porcentaje de cada componente en el vapor sólo depende de su presión de vapor a esa temperatura. Este principio puede aplicarse a sustancias que podrían verse perjudicadas por el exceso de calor si fueran destiladas en la forma habitual, como se muestra en la **figura 5**.

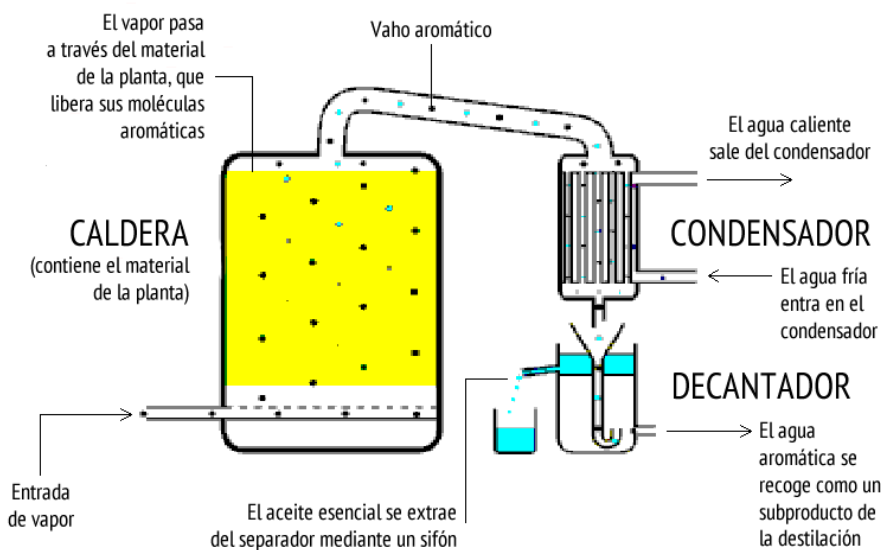


Figura 5. Destilación por arrastre de vapor (Núñez M.A, 2012).



Es importante identificar las partes fundamentales de un destilador industrial, en qué se basa el diseño y construcción de estos equipos y cómo las columnas de destilación son utilizadas para realizar el proceso (constituyen un porcentaje significativo de inversión que realizan las plantas químicas y refinerías de todo el mundo). Es muy importante disponer de técnicas prácticas para modelar columnas de destilación realistas y desarrollar sistemas de controles eficaces y fiables, a fin de conseguir un funcionamiento eficaz y seguro de los sistemas de destilación industrial.



Para profundizar en el tema te invito a leer “Destilación de aceite usando vapor con propano” (Ramírez- Garnica, M.A et al, 2007). Se trata de un artículo contenido en la Revista mexicana de ingeniería química donde se aborda el uso industrial de la destilación.

4.1.2. Equilibrio líquido–vapor

La composición del vapor en equilibrio con el líquido de una composición se determina experimentalmente mediante el empleo de un destilador de equilibrio, el cual puede ser representado adecuadamente con un diagrama de temperatura composición. El más sencillo de los diagramas de fases para sistemas de dos componentes es el de aquellos sistemas que pueden separarse en dos fases líquidas. Estos sistemas se estudian normalmente a presión constante, suficientemente elevada para que no aparezca vapor en equilibrio con las fases líquidas, y en un intervalo de temperaturas suficientemente alto para que no se formen fases sólidas.

A cualquier temperatura y a cualquier presión a las que exista una fase líquida, siempre hay un cierto número de moléculas del líquido que están pasando a la fase de vapor. Esta es la razón por la cual se secan los charcos de agua y la ropa que colgamos, o disminuye el nivel de agua en un vaso dejado durante algún tiempo sobre la mesa.

Hay dos tipos fundamentales de sistemas que se pueden incluir en este estudio: aquellos en los que los componentes forman una fase líquida miscible y aquellos en los que los componentes son inmiscibles en fase líquida. En cualquiera de estos casos no existirá más que una fase vapor, puesto que todos los gases conocidos son miscibles en todas las proporciones. Ambos tipos de sistemas líquido-vapor son importantes.

Recordemos que la destilación es un proceso donde se aprovecha la diferencia de volatilidad de los constituyentes de una mezcla, separando o fraccionando estos en función de su temperatura de ebullición. Se usa para concentrar mezclas alcohólicas y separar



aceites en componentes líquidos que se desean purificar. Observa la **figura 6**, donde podrás identificar las partes de las cuales consta un destilador de manera general.

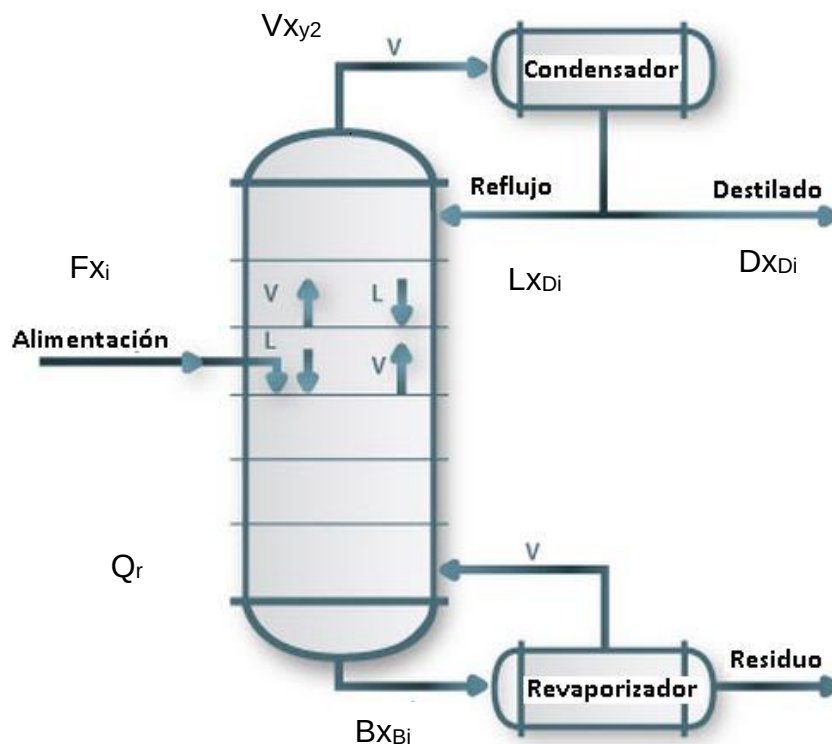


Figura 6. Columna de Destilación (González M. 2012).

En la figura anterior puedes observar que si se calienta una mezcla líquida de dos materiales volátiles, el vapor que se separa tendrá una mayor concentración del material de menor punto de ebullición que el líquido del cual se desprendió.

El funcionamiento del destilador consiste en que el vapor que se desprende en la columna debido a la mezcla y el líquido desciende, entonces se produce una transferencia de materia y energía en cada etapa. Aunque la alimentación sea un líquido subenfriado, el vapor aparece como consecuencia del evaporador situado en la parte inferior de la columna. Se debe tener en cuenta que los únicos aportes de calor a lo largo de la columna se realizan en el hervidor y el condensador, cuya función es almacenar energía en forma de campo electrónico.

A medida que se aproxima el vapor a la parte superior de la columna, se enriquece en los componentes volátiles de la mezcla, mientras que el líquido que circula en contracorriente arrastra los componentes más pasados.

Las partes más importantes de un destilador son (ver **figura 7**):



$Vy_w = \text{salida del vapor}$

$L_R = \text{Corriente líquida (reflujo)}$

$D_1 = \text{Destilado Líquido.}$

$V = \text{Vapor superior.}$

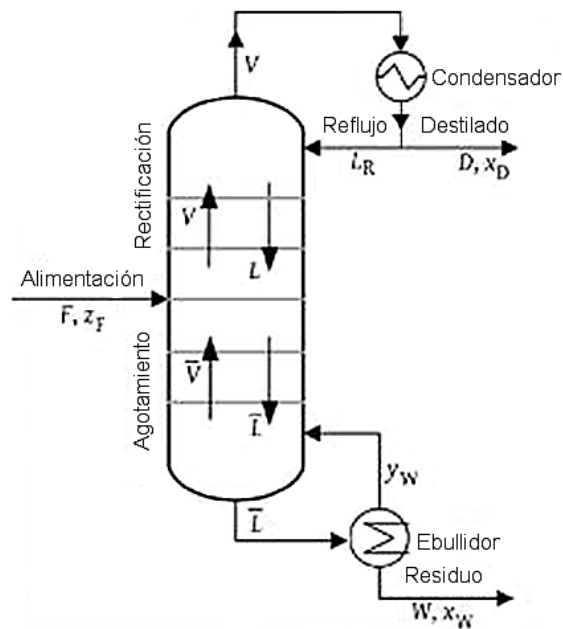


Figura 7. Partes del destilador (González M. 2012).

Las corrientes que salen de cada etapa se encuentran en equilibrio, pero las que entran no. Las corrientes de líquido están en sus puntos de burbuja y las corrientes de vapor en sus puntos de rocío, por tanto se produce un intercambio calorífico entre ambas corrientes. Para determinar las composiciones de cada corriente se pueden usar diagramas de fases como se muestra en la **figura 8**.

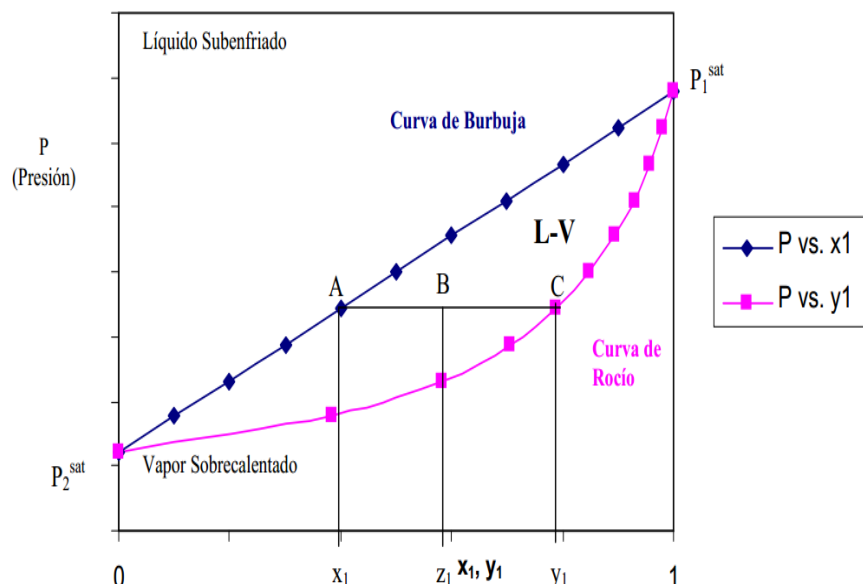


Figura 8. Diagrama de fases (Goitia K et al 2011).

Para calcular la composición del producto destilado y del producto condensado (la cual se puede esperar obtener al utilizar una columna de destilación, que funciona en un conjunto de condiciones fijas), es necesario resolver ecuaciones tales como los balances de energía, balances individuales de cada componente involucrados en la reacción, balances totales de la materias primas, así como las reacciones estequiométricas de equilibrio en la reacción (**figura 9**).



Figura 9. Principios básicos de destilación.

Una mezcla de dos fases se encuentra en equilibrio físico si se satisfacen las siguientes condiciones observa la **figura 10**.

- ✓ La temperatura T^v de la fase de vapor es igual a la temperatura T^l de la fase líquida.
- ✓ La presión total P^v en la fase vapor es igual a la presión P^l en la fase líquida
- ✓ La tendencia de cada componente de escapar de la fase líquida a la fase de vapor es exactamente igual a su tendencia a escapar de la fase de vapor a la fase líquida.

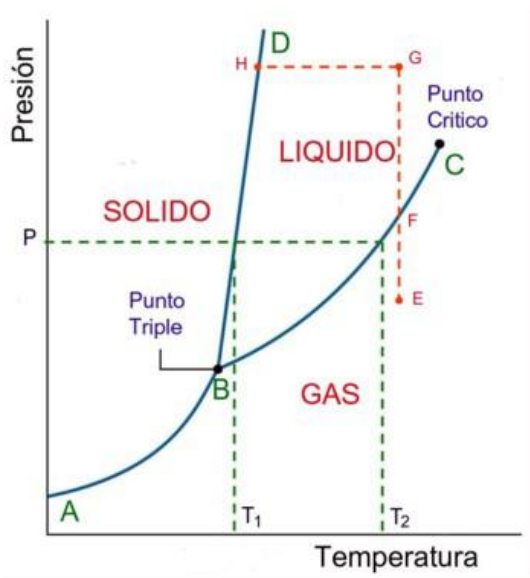


Figura 10. Diagrama de mezclas multicomponentes (Salazar F.G. 2012).

En los sistemas de composición variable, el comportamiento equilibrio- líquido- vapor posee una composición variable, la cuales conocida comúnmente como mezclas de dos o más componentes, recordemos que en la naturaleza la materia prima que se procesa para obtener productos finales se encuentra en su mayoría en mezclas, las cuales deben ser procesadas para obtener con mayor grado de pureza el producto deseado. En ello radica la gran importancia del estudio de sistemas de composición variable: sin sus propiedades sería una difícil tarea el diseño de equipos, el comportamiento ideal, representa en muchas ocasiones mezclas de compuestos en su proceso real, presentando integraciones atómicas o moleculares entre los componentes de la mezcla, en los cuales las fuerzas intermoleculares son casi iguales y simétricas. En este tema, se estudiará la mezcla de gases ideales, representada por la ley de Raoult, obteniéndose de este modo un estado de referencia para las mezclas reales. Es importante recordar que **el equilibrio líquido vapor determina cuando la composición del gas y el líquido se encuentran en equilibrio.**

Es fundamental recordar que si la disolución que se utiliza dentro del destilador es ideal, ambos componentes obedecen a la Ley de Raoult, dado que la presión total es una función lineal de la fracción molar de cualquier de los dos componentes en la fase líquida (X_i).

El conocimiento de la relación entre la presión del sistema y la combinación de las dos fases, líquida y gas, permite dibujar el diagrama de fases a un temperatura constante tal y como se observa en la **figura 11**.

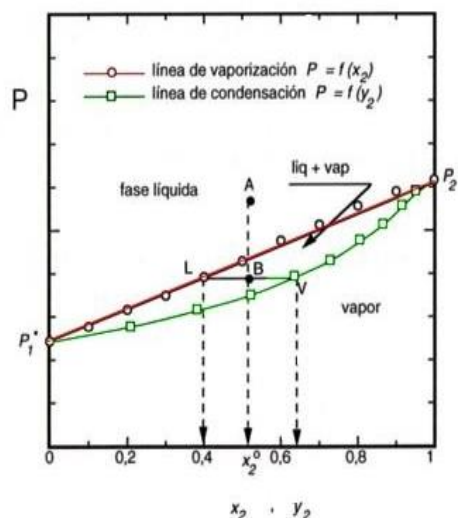


Figura 11. Relación presión-composición y temperatura (Arellanos S.C et al, 2012).

Donde la línea de color rojo representa la línea de vaporización en el punto A en la que sólo existe una fase líquida, por debajo de este punto tenemos una línea verde que representa la línea de condensación, baja presión, solo existe la fase gas y la región entre las dos líneas es bifásica, coexiste el equilibrio líquido vapor.

En el punto B la mezcla se separa en fase líquida y otra gaseosa, cuya composición se determina trazando la llamada línea de equilibrio, que representa la presión del sistema, y pasa por el punto B, la línea de equilibrio corta la línea de vaporización en el punto L, y cuya abscisa determina la composición de la fase líquida x_2 . La línea de equilibrio corta la línea de condensación en el punto V, cuya abscisa determina la composición de la fase gas y_2 .



Para conocer más sobre el tema, te invito a leer el artículo de Borretto, M. (2012): "Modelos de composición local del equilibrio-vapor del sistema binario aceite de soja-hexanos". Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba.

¿Por qué es necesario conocer el equilibrio líquido-vapor en esta unidad? ¿Por qué tiene gran importancia? Porque hace posible la separación de líquidos miscibles mediante la destilación. Según el diagrama, si partimos de una disolución ideal de los líquidos conociendo su composición, la temperatura de ebullición será la ordenada del punto L a esa temperatura, la composición del gas se determina por la abscisa en el punto V. Como se puede observar, el gas tiene una composición más rica en el componente más volátil, en



este caso el 2 si el gas se separa y se enfría, el condensado será ahora una disolución de composición diferente. Este líquido puede volver a calentarse hasta su nuevo punto de ebullición, menor que el anterior y tras repetir varias veces el proceso de recogida del vapor, condensación y reevaporación se pueden separar los líquidos que formaban la disolución ideal.

Las destilaciones industriales se llevan a cabo a presión constante; resulta más adecuado representar los componentes líquido- vapor sobre un diagrama de composición, denominado **de equilibrio** (observa la **figura 12**), donde se observan las fracciones molares, representados por las abscisas correspondientes a la fase líquida, mientras que en las ordenadas se representan las fracciones molares de la fase gaseosa).

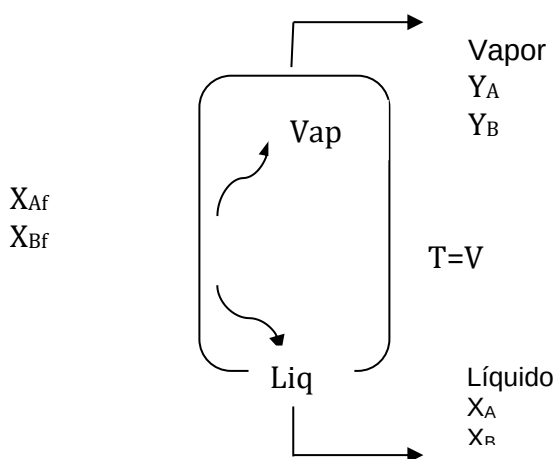


Figura 12. Columna de destilación

Al hablar de destilación se supone una mezcla binaria de componentes A y B; la presión parcial P_A que ejercerá el componente A en dicha mezcla, en fase vapor, será la que ejercería dicho componente a la misma temperatura si estuviera solo en el mismo volumen.

La presión total es la suma de las presiones parciales de todos los componentes:

$$P = \sum P_i$$

Recordemos que existe un estado de equilibrio en donde la temperatura $T^V=T^L=T$, $P^V=P^L=P$ y las tendencias de escape son iguales.



Ahora considérese el caso en que la tercera condición puede expresarse de acuerdo con la Ley de Raoult:

$$Py_i = P_i x_i$$

Donde:

x_i y y_i = son las fracciones mol de componentes i en la fases líquida y de vapor, para

Conocer la presión parcial = P_T *Fracción mol.

$$P_A \approx P_A^L \text{ Idealidad}$$

$$\frac{P_T Y_A}{P_A^0} = \frac{P_A^0 X_A}{P_A^L}$$

En el diagrama de la figura 12 puedes observar cómo se encuentran distribuidos las fracciones molares de alimentación y las salida de vapor, así como sus fracciones molares representados por Y_A y Y_B , y en la parte inferior la salida del líquido y sus fracciones molares representadas por X_A , X_B ,



Te invito a leer un ejemplo del uso de ecuaciones de Presión de vapor en el artículo de Rodríguez, S.P. (2011) *Presiones de Vapor y equilibrio -vapor de acetato de propilo/metanol o i-Propanol a 0.15 M.Pa sistemas binarios*.

La idealidad de un destilador se determina mediante la siguiente ecuación.

$$P_A^G \approx P_A^L$$

$$\frac{P_T Y_A}{P_A^G} = \frac{P_A^0}{P_A^L} \text{ Ley de Raoult}$$

Tenemos que la fracción mol en la idealidad es

$$X_A + X_B = 1$$



$$Y_A + Y_B = 1$$

Nuestra ecuación quedaría

$$P_T^V = P_A^G + P_B^G = P_T^G + P_T^G(1 - Y_A)$$

$$P_T^L = P_A^L + P_B^L$$

$$= P_A^0 X_A + P_B^0(1 - X_A)$$

$$= P_A^G X_A + P_B^V + P_A^V X_A$$

$$P_T^L = X_A(P_A^G - P_B^G) + P_B^G$$

$$X_A = \frac{P_B^G + P_T^L}{P_A^0 - P_B^0}$$

Imagínate un recipiente cerrado en donde se ha realizado un vacío, que se llena parcialmente con una sustancia líquida A. Esta sustancia se evapora parcialmente de tal forma que alcanza un estado de equilibrio en el que la presión reinante en el recipiente es la presión de vapor de la sustancia a la temperatura considerada. La presión inicial es P_A^0 .

Existen tablas en las que se pueden encontrar directamente las presiones de vapor de sustancias puras a diversas temperaturas, pero recuerda que también puedes calcularlo mediante una ecuación empírica, la de *Antoine*:

$$\log_e P_i^0 = A - \frac{B}{T + C}$$

Con ella se tabulan los coeficientes de las constantes A, B, y C para muchas sustancias, entre las que se encuentra el etanol con agua, por ejemplo.

Imaginemos ahora un recipiente lleno de líquido A a una temperatura T_0 , de modo que una de sus paredes es móvil. Si la presión externa sobre ella es $P \approx P_A^0$ y se le aporta calor, se aumentará la temperatura del líquido y su presión de vapor, de modo que ambas presiones tienden a igualarse. Cuando eso sucede se formará la primera burbuja de vapor, es decir, comienza la ebullición. La temperatura a la cual se igualan ambas presiones es el punto de ebullición a la presión P. Si ésta es 1 atm tendremos el punto de ebullición normal. Si se sigue aportando calor, esta temperatura permanece constante entre tanto haya líquido, aumentando de nuevo cuando toda la sustancia esté en fase gaseosa.



Consideremos ahora una mezcla ideal de dos sustancias en fase líquida, A y B. Eso quiere decir, entre otras cosas que:

- a) La interacción de moléculas de A con moléculas de B es idéntica a la que se da entre las moléculas de A o entre las de B;
- b) El volumen de mezcla es la suma de los volúmenes de A y B por separado;
- c) El calor de mezcla es nulo; d) el equilibrio líquido-vapor obedece la Ley de *Raoult*.

La Ley de *Raoult* establece que, en el equilibrio, la presión parcial de una sustancia es igual a su presión de vapor por la fracción molar en la fase líquida, es decir:

$$P_A = P_A^0(T) \cdot X_A \quad \text{y también} \quad P_B = P_B^0(T) \cdot X_B$$

Si se introduce una mezcla de A y B en un recipiente en el que se ha hecho el vacío y en el que se mantiene una temperatura constante, se vaporizarán A y B hasta alcanzar un estado de equilibrio en el que la presión reinante será la presión total de vapor de la mezcla, P, que de acuerdo con la Ley de *Raoult*, tendrá el valor.

$$P = P_A + P_B = P_A^0(T) \cdot X_A + P_B^0(T) \cdot (1 - X_A)$$

Siendo la fracción mol de líquido X_A la composición de la fase líquida en el equilibrio, diferente de la composición inicial de la mezcla. La presión total es menor que la presión inicial P_A^0 , la presión de vapor del más volátil, y mayor que P_B^0 , la presión de vapor del componente pesado.



Te invito a revisar el artículo de Vázquez C., et al (2005). "Producción de etanol absoluto por destilación extractiva combinada con efecto salino". Universidad de Antioquia.

Para finalizar este tema es importante recordar que existen infinidad de aplicaciones de la operación de destilación; se emplea en numerosas industrias y se puede afirmar que prácticamente en cualquier proceso químico va a aparecer una destilación debido a la necesidad de separar ciertos componentes de otros menos valiosos.

Actualmente existen procesos más empleados, como lo es la separación de aire con el fin de obtener nitrógeno y oxígeno puros para su empleo en la industria electrónica, o en la



industria petrolera, donde se aplican los fundamentos básicos de la destilación y las presiones de vapor y temperatura de cada componente.

4.2. Destilación de mezclas binarias

Dado que las operaciones básicas que se realizan en la industria química implican en la mayoría de los casos la separación de uno o más componentes dentro de una mezcla, dichas operaciones se fundamentan en la diferencia de densidad, afinidad hacia ciertos absorbentes o disolventes y pos-volatilidad.

La destilación aprovecha la diferencia de volatilidad entre dos o más componentes de una mezcla para separarlos. Se dice que un compuesto es más volátil que otro si bajo las mismas condiciones de presión y temperatura se encuentra en mayor proporción.

Como ya se mencionó anteriormente, en dicha operación la mezcla líquida se somete a ebullición, creándose una segunda fase de vapor a la que se transfiere el componente más volátil.

4.2.1. Destilación simple

En la destilación simple, los vapores que se generan se envían de manera inmediata a un condensador en el que son refrescados y por lo tanto condensados, de modo que el destilado no resulta puro. Su composición será idéntica a la composición de los vapores a la presión y temperatura dados.

La destilación simple es empleada en aquellos líquidos cuyos puntos de ebullición difieren extraordinariamente en aproximadamente 80 °C o para separar líquidos de sólidos no volátiles. Las presiones son distintas para cada uno de los componentes de este tipo de destilación, por lo que se ve relacionado con la **Ley de Raoult**.

Un ejemplo de destilación simple en el laboratorio es el uso de un alambique (**figura 13**); es un aparato muy utilizado para destilar mezclas de líquidos mediante un proceso de evaporación por calentamiento y posterior condensado por enfriamiento. Es muy utilizado para la producción de perfumes, medicinas y el alcohol procedente de frutas fermentadas.



Figura 13. Alambique (Ramírez de la Torre N. 2011).

Los alambiques de laboratorio suelen ser de vidrio, pero los utilizados para destilar, bebidas alcohólicas se fabrican normalmente de cobre porque este material le proporciona al alcohol su sabor, es resistente a ácidos y es buen conductor de calor. Este es un ejemplo claro de una destilación simple en laboratorio.

Observa que el alambique de la figura anterior está constituido por una caldera o retorta donde se calienta la mezcla. Los vapores emitidos salen por la parte superior y se enfrían en un serpentín situado en un recipiente refrigerado por agua. El producto se recoge en el depósito final.

Recordemos que la destilación simple es el método más frecuente e importante para la purificación de líquidos, se utiliza siempre para separar un líquido de sus impurezas no volátiles, el cual está basado en las diferencias del punto de ebullición de dos sustancias. Por ejemplo: una sustancia hierve a menos temperatura de la otra, entonces pasa al estado gaseoso, primero, y de esta manera se hace la separación.

Esta operación se lleva a cabo con adición de calor, como en cualquier de estos procedimientos, y pasa por un tubo refrigerante cuya propiedad es que en sus paredes que lo rodean pasan continuamente flujos de agua que hacen que la sustancia que se requiere destilar se enfríe y se recoja el líquido en un recipiente.

Las columnas de destilación son de gran importancia en la industria química, farmacéutica, alimentación y también en el campo de la tecnologías ambiental. Todas usan y manejan un amplio rango de solventes y compuestos volátiles, absolutamente en diferentes aplicaciones típicas donde utilizan torres de destilación. Las torres de destilación son de mucha utilidad para la recuperación de dimetil- acetamida y concentración del residuo, concentración de antibióticos, rectificación de mezclas de



ácidos grasos/metil-éster y en la concentración de alcohol de la precipitación en la fabricación de pectina.

Observa la **figura 14**, donde encontrarás una aplicación industrial del uso de columnas de destilación. La destilación fraccional separa los hidrocarburos en flujos separados, cortes o fracciones. Para la operación óptima de la columna de destilación, los controles de nivel deben lidiar con la aparición de espuma, burbuja y temperatura.



Figura 14. Torres de Destilación (Corporate Headquarters, USA, 2013).

Una columna de destilación se basa en la existencia de un vapor que sube por la columna, y que se encuentra con un líquido que desciende; es entonces cuando se produce una transferencia de materia y energía en cada etapa (bien sea un plato o una porción de relleno). La alimentación, en muchas ocasiones es un líquido subenfriado, el vapor aparece como consecuencia del hervidor situado en la parte inferior de la columna. Hay que tener en cuenta que los únicos aportes de calor a lo largo de la columna se realizan en el hervidor y el condensador.

Dentro de la torre, a medida que se aproxima a la parte superior de la columna el vapor, se enriquece por los componentes volátiles de la mezcla, mientras que el líquido que circula en contracorriente arrastra los componentes más pesados.

Las corrientes que salen de cada etapa se encuentran en equilibrio, pero las que entran no lo están. Las corrientes de líquido están en sus puntos de burbuja y las corrientes de vapor en sus puntos de rocío, por lo tanto se producen un intercambio calorífico entre ambas corrientes.



4.2.2. Balance de materia

En una columna de destilación se lleva a cabo la conversión de un líquido al estado de vapor por medio de aplicación de calor, y después la condensación de la vapores a un líquido que se recoge en un recipiente (**figura 15**). La temperatura a la cual destila un líquido es una constante a presión dada conocida como punto de ebullición y sirve como criterio de pureza.

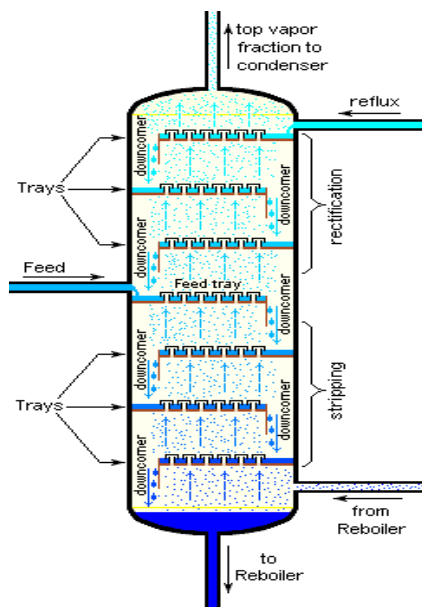


Figura 15. Columna de Destilación (Calleja, G et al .1999).

En una columna de destilación es de vital importancia elaborar un balance sobre la cantidad conservable de masa total, masa de un componente, energía o momento en un sistema o proceso único, así como la serie de unidades. Puede ser escrito, de manera general, de la manera como se muestra en la **figura 16**:

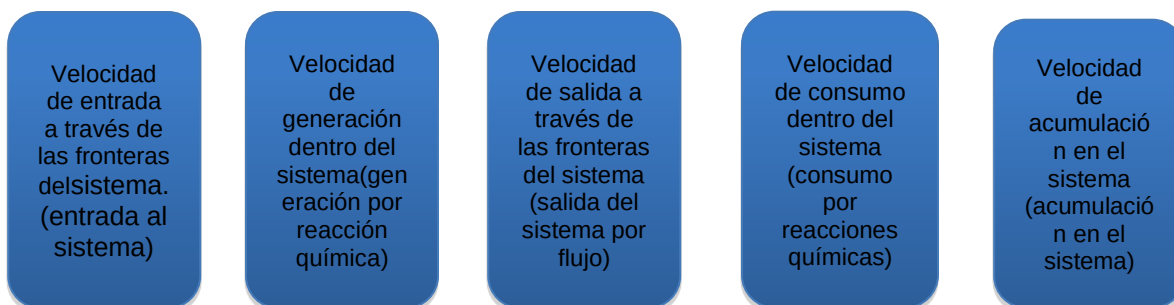


Figura 16. Balance de materia y energía de una columna de destilación se realiza.



En todo proceso de destilación, el vapor que se forma en el calderín es más rico en el componente volátil que el líquido que queda en él. Sin embargo, el vapor contiene cantidades de ambos componentes, y el destilado raramente es una sustancia pura. Para aumentar la concentración del componente más volátil en el vapor, y separar el menos volátil de esta, el vapor se pone en contacto con una corriente descendente del líquido hirviente. Por la parte superior de la columna de destilación se introduce una corriente de líquido de alta concentración del componente volátil, que se denomina *reflujo*. Los componentes más volátiles se concentran en fase vapor, y los menos volátiles en la fase líquida. De esta forma la fase vapor se va haciendo más rica en el componente más volátil a medida que va ascendiendo por la columna, mientras que la fase líquida es cada vez más rica en el componente más pesado conforme desciende.

Esta mezcla se logra de la mezcla entre el producto superior y el inferior, depende de las volatilidades relativas de los componentes, el número de etapas de contacto y de la razón de reflujo.

Tenemos que:

$$V_1 Y_{1,1} = V_{1,1}; V_1 Y_{1,2} = V_{1,2} \dots \dots \dots V_1 Y_{1L} = V_{1L}$$

$$V_1 = V_{1,1} + V_{1,2} + \dots + V_{1,L} = \sum_{c=1}^{c,1} V_{1,c}$$

$$L_1 X_{1,1} = l_{1,1} + l_{1,2} + l_{1,3} + \dots \dots l_{1,c}^1 = \sum_1^{c,1} l_{1,c}$$

Para cualquier plato:

Plato i =

$$V_i Y_{i,1} = V_{i,1}; V_i Y_{i,2} = V_{i,2} \dots \dots; V_i Y_{ic} = V_{i,c}$$

$$V_i = V_{i,1} + V_{i,2} + V_{i,3} + \dots \dots V_{i,c} = \sum_{i=1}^{c,1} V_{i,c}$$

$$L_i X_{i,1} = l_{i,1}; L_i X_{i,2} = l_{i,2}; L_i X_{i,3} = l_{i,3} + \dots \dots + L_i X_{i,c}$$

$$L_i = l_{i,1} + l_{i,2} + \dots l_{i,L} = \sum_{i=1}^{c,1} l_{i,c}$$

Para el destilado y residuo, para cualquier plato:

$$H_j = H_{j,1} Y_{j,i} + H_{j,2} Y_{j,2} + \dots \dots H_{j,c} Y_{j,c} = \sum_1^{c,1} H_{j,L} Y_{j,L}$$

$$h_j = h_{j,l} + X_{j,i} + h_{j,2} X_{j,2} + \dots \dots h_{j,l} = \sum_1^{c,1} h_{j,c} X_{j,l}$$



Se toma en cuenta la carga del hervidor y condensador.

En la **figura 17** puedes observar un condensador de tubos y coraza; vigila el cilindro exterior donde el agua de refrigeración entra por la derecha, se reparte por el haz de tubos al interior y sale por la izquierda. El vapor condensa al exterior de los tubos y gotea al fondo de la coraza, donde es recolectado.

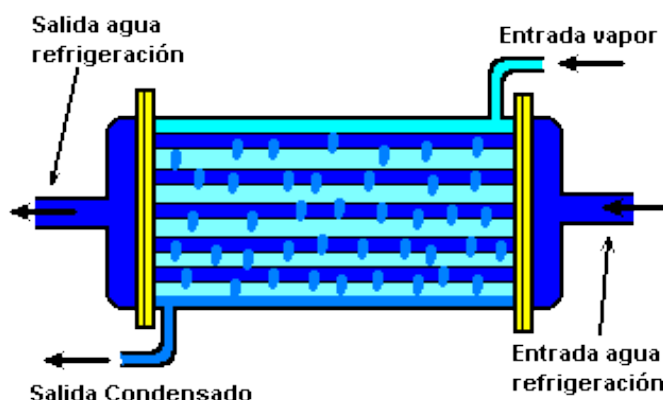


Figura 17. Destilador (Román L. R., 2002).



Te invito a que leas el artículo de Cristea, S. et al (2003). *Control predictivo no lineal aplicado a columnas de destilación* del Departamento de Ingeniería química de sistemas y automático de la Universidad de Valladolid.

Un condensador está compuesto por una coraza tubular; dentro de la carcasa hay un haz de tubos, por el interior circula agua de refrigeración, el vapor entra por el exterior de la carcasa y rodea el haz de tubos. Los tubos están más fríos que el vapor por lo que al pasar el vapor se condensa. Las gotas de condensación que se forman en los tubos van cayendo al fondo de la carcasa, allí se recolecta y se extraen del condensador.



4.2.2. Balance de Energía

La temperatura de condensación es muy inferior a 100 °C y suele estar cerca de la temperatura ambiente, la presión dentro del condensador está por debajo de la presión atmosférica y típicamente menor a 0,1 bar absolutos. Esto hace que la máquina que opera entre la caldera y el condensador disponga de un mayor salto de presión utilizable.

Recordemos que el Balance de energía en el entorno i:

$$V_1 H_1 = Q_C + D H_D + L_0 H_0$$

Donde:

$Q_C = \text{Carga de condensador}$

Recordemos que la cantidad de calor condensado está dado por la ecuación general:

$$Q_c = Q = U h A (\Delta T_m)$$

Recordemos la importancia de la resistencia individual en un condensador.

$$U h = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{R_e}}$$

$$\frac{Q_C}{D} = V_1 H_1 = Q_C + D H_D + L_0 H_0 = \frac{(L_0 + D) H_1 - D H_D - L_0 H_0}{D} = R H_1 + H_1 - H_D - R H_0$$

$$\frac{Q_C}{D} = D [H_1 (R + 1) - R H_0 - H_D]$$

El análisis y balance de materia de una columna de destilación se analiza por dos métodos desarrollados entre la relación número de platos, la relación líquido-vapor y las composiciones del producto. Uno de ellos es el método de Ponchon y Savarit, el cual no es riesgoso y puede usarse en todos los casos, pero requiere datos detallados de entalpía para poderse aplicar. Otro método muy conocido es el Mc Cabe Thiele, una simplificación que sólo requiere los equilibrios de concentración, es menos riguroso pero adecuado para muchos fines. Desarrollaremos el método de Mc Cabe Thiele.



Te recomendamos el libro de McCabe W. et al (2003). *Operaciones básicas de ingeniería química*, donde podrás comprender y conocer cómo este autor aborda el método de McCabe Thiele.

Este método, aunque menos riguroso que el Ponchon y Savarites muy útil, puesto que no requiere de datos detallados de entalpía. Una rectificación en marcha continua, que corresponde al caso en el que los caudales de entrada y salida de la columna permanecen constantes, considerando mezclas binarias.

Balance de materia:

$$G_{n+1} = L_n + D \dots \dots \dots (1)$$

Por componentes

$$G_{n+1}Y_{An+1} = L_nX_{An} + DX_{AD} \dots \dots \dots (2)$$

$$G_{n+1}Y_{An+1} = L_nX_{An} + D(G_{n+1} - L_n)X_{AD}$$

$$= L_n(X_{AD} - X_{AR}) = +G_{n+1}(X_{AD} - Y_{A,n+1})$$

$$\frac{L_n}{G_{n+1}} = \frac{(X_{AD} - Y_{An+1})}{(X_{AD} - X_{An})} \dots \text{Relacion de reflujo interno} \dots \dots \dots (3)$$

Tomando de la ecuación 2:

$$(L_n + D)Y_{An+1} = L_nX_{An} + DX_{AD}$$

$$Y_{An+1} = \frac{L_nX_{An}}{(L_n + D)} + \frac{D}{L_n + D}X_{AD}$$

$$= \frac{\frac{L_n}{D}}{\frac{L_n}{D} + \frac{D}{D}}X_{An} + \frac{\frac{D}{D}}{\frac{L_n}{D} + \frac{D}{D}}X_{AD}$$

$$Y = mx + b$$

$$Y_{An+1} = \frac{R}{R + 1}X_{An} + \frac{X_{AD}}{R + 1} \dots \dots \dots (4)$$



Teniendo una fórmula de línea recta la podemos graficar:

Observa la **figura 18**, donde, en el momento que todo el condensado se devuelve a la columna, las líneas de operación coinciden con la diagonal, lo que se traduce en un mínimo de pisos y en el reflujo mínimo las líneas de operación cortan con la curva de equilibrio y la línea de alimentación, lo que conduce a un número de pisos infinitos.

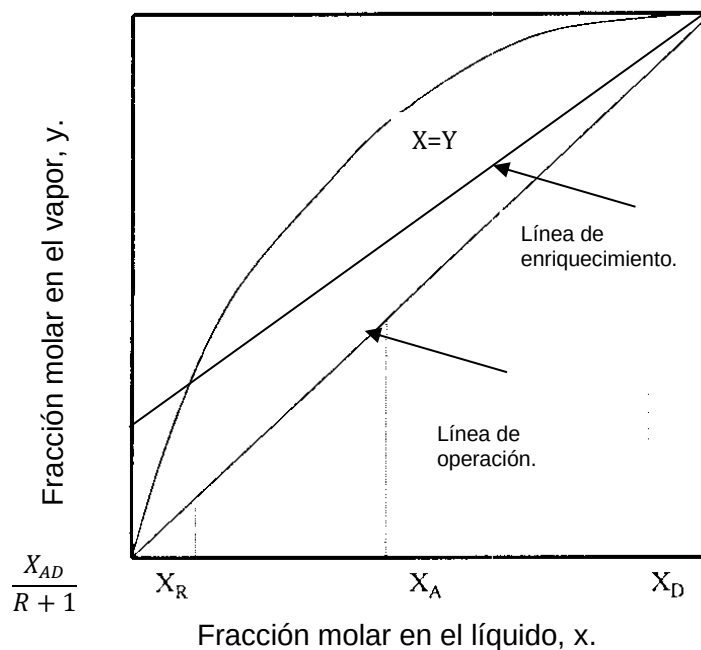


Figura 18. (Kister, H.Z. 1992).



Para conocer más sobre el tema de reflujo total, así como las líneas de operación y reflujo mínimo. Te invito a revisar el libro de McCabe W. et al (2003). *Operaciones básicas de ingeniería química*.

En una columna de destilación, una vez desprendido en la parte superior de la columna, son condensados y devueltos a la misma como reflujo determinado por $\frac{L_D}{D} = \infty$, para extraer producto del destilado, entonces se lleva a cabo el reflujo total, observa la siguiente figura 19, donde verás la representación del reflujo total.

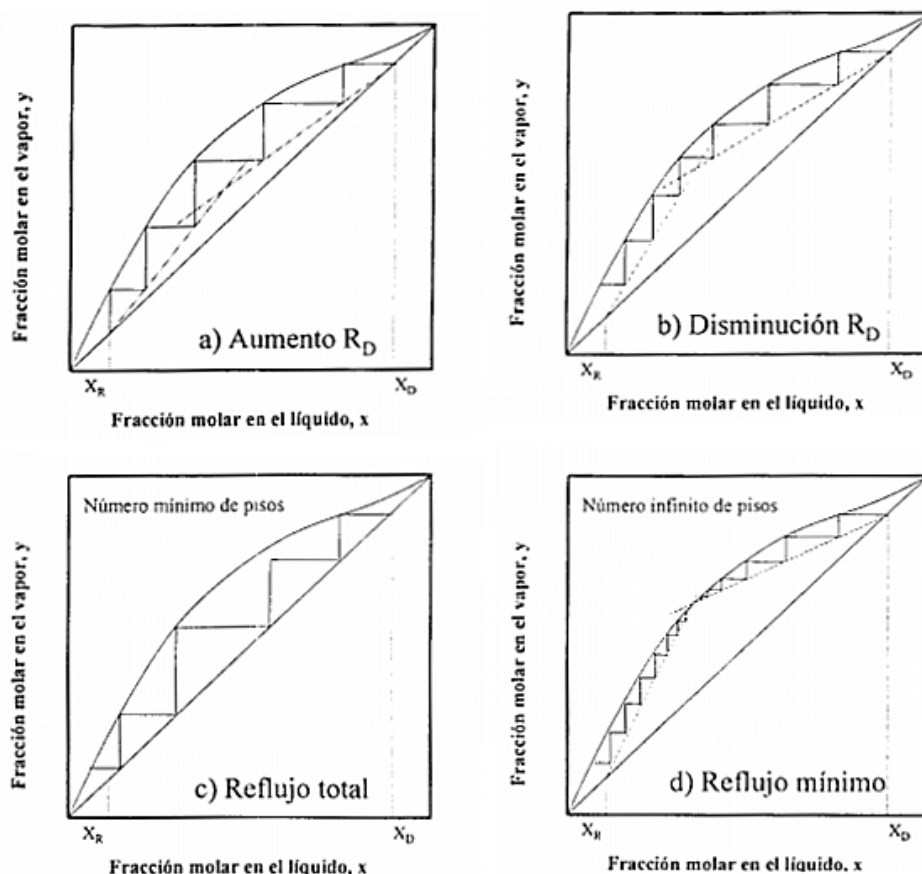


Figura 19. Influencia de la razón de reflujo en el número de pisos (Marcilla, A., 1998).

El cálculo del reflujo se realiza con la siguiente ecuación.

$$R = \frac{L_0}{D} \approx \frac{L_1}{D} \approx \frac{L_2}{D} \dots \dots \dots = \frac{L_n}{D}$$

$$R_{OPT} = (1.2 - 1.5)R_m$$

En una columna de destilación es importante la línea de alimentación, donde $q =$ es la cantidad de calor que hay suministrar a 1 mol de alimentación para llevarla desde H_F hasta H_G dividida entre su calor latente (ver **figura 20**).

$$q = \frac{H_G - H_F}{H_G - H_L}$$

H_G = Entalpia de alimentación como vapor sobresaturado.



H_L = Entalpia de la alimentación como líquido saturado.

H_F

= Entalpia de alimentación a las condiciones de T y P de la alimentación si es líquido sube enfriado

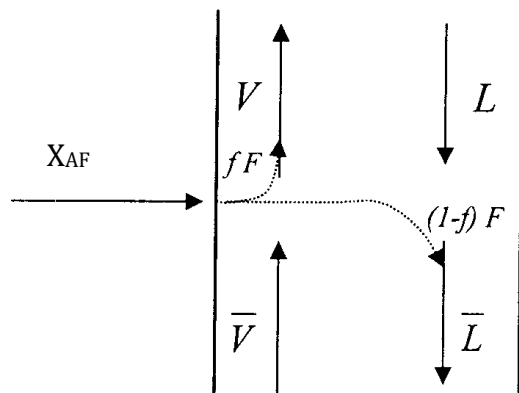


Figura 20. Esquema del plato de alimentación (Mc Cabe W.et al 2003).

Cómo calcular la línea de alimentación:

Vapor saturado

$$H_G = Y_{AF}[C_{PA}(T_G - T_0) + L_A] + (1 - Y_{AF})[C_{PB}(T_G - T_0) + L_B]$$

$$H_L = X_{AF}[C_{PA}(T_L - T_0)] + (1 - X_{AF})[C_{PB}(T_L - T_0)]$$

$$H_F = X_{AF}[C_{PA}(T_F - T_0)] + (1 - X_{AF})[C_{PB}(T_F - T_0)]$$

T_0 = Temperatura de referencia.

1.- $T_0 = 25^\circ\text{C}$ o cualquier valor

2.- $T_0 = T_F$

L_A = Calor latente de vaporización.

En la siguiente tabla encontrarás variables y condiciones de alimentación de las columnas de destilación sobre la entalpia de alimentación de acuerdo a la temperatura, presión, así como el calor (q).



Tiempo de alimentación	H_F	$q = \frac{H_G - H_F}{H_G - H_L}$	$m = \frac{q}{q - 1}$
Líquido subenfriado	$H_G > H_L > H_F$	$q > 1$	$\infty > m > 1$
Líquido saturado	$H_G > H_L = H_F$	$q = 1$	$m = \infty$
Vapor líquido	$H_G > H_F > H_L$	$q < 1$	$0 < m < 1$
Vapor saturado	$H_G = H_L > H_F$	$q = 0$	$m = 0$
Vapor sobresaturado	$H_F > H_G > H_L$	$q < 0$	$1 > m > 0$

Para finalizar, recuerda que la destilación es una operación unitaria para la separación de mezclas, frente a la cual deben eliminarse las demás, es predominante la destilación sobre otras operaciones unitarias a pesar de su baja eficiencia termodinámica, dado que se trata de una operación de alta velocidad de transferencia de materia.

Es importante recordar que el balance de materia y energía son necesarios para determinar y diseñar una columna de destilación, de ahí la importancia que se realice una deducción matemática de las variables que influyen en dicho balance.



Para tener más información respecto a este tema te pido revises las páginas 585 a 587 del libro de McCabe W. et al (2003). *Operaciones Básicas de ingeniería Química*.

4.3. Rectificación continua

Con las destilaciones simples y continuas se pueden conseguir separaciones útiles, generalmente económicas. Este método de destilación se ha desarrollado enormemente y es el método de separación más utilizado actualmente. La operación de rectificación consiste en hacer circular en contracorriente el vapor de una mezcla con el condensado procedente de mismo vapor. La rectificación es una operación por la que a partir de una mezcla alimento se obtienen dos corrientes de productos (destilado y residuo) con las calidades deseadas. Los equipos más empleados son torres cilíndricas, que pueden ser de rellenos o de platos (**figura 21**).

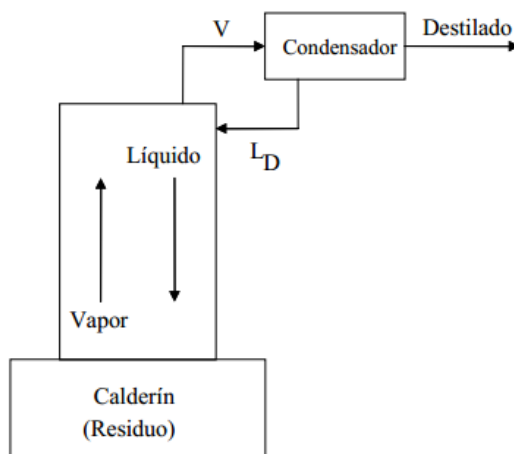


Figura 21. Esquema de una columna de rectificación discontinua (Henle, J. D. et al 1998).

Las torres de relleno son columnas cilíndricas verticales, las cuales están rellenas con pequeñas piezas que sirven para aumentar el área de contacto entre la fase gaseosa y la líquida. Las torres de platos son columnas cilíndricas que contienen en su interior una serie de platos perforados o con campanas de burbujeo que permiten el contacto íntimo de las fases líquida y gaseosa.

Podemos mencionar que en una columna de platos sencilla está compuesta por:

- Caldera; está colocada en la base de la columna, se le suministra el calor necesario para generar una corriente de vapor y está provista de un dispositivo de entrada de la corriente líquida procedente del plato inferior, también posee una salida para la eliminación de la corriente residuo.
- Acumulador: este dispositivo está junto al condensador, el cual recibe las corrientes de vapor y líquidos procedentes de este y que permite la salida del reflujo y el destilado.
- Pisos. Es el lugar donde se produce el contacto entre las fases, uno de los pisos intermedios es el de alimentación, que divide a la columna en dos sectores de enriquecimiento y agotamiento.

Para el diseño de una columna de destilación de platos es necesario conocer las siguientes variables:

- Diámetro de la columna, está influenciado con los caudales de líquidos y vapor de que circula por su interior.
- Altura de la columna, está relacionado con el número de platos y de la separación entre los mismos.



- c) Caudales de calor, los cuales son suministrados a la caldera y eliminados en el condensador.
- d) Caudales y composición de todas las corrientes.
- e) Detalles constructivos, tales como el número y diámetro de agujeros de hombre material de platos y válvula.

Ahora nos concentraremos en el cálculo del número de platos necesarios para separación determinada, que es el cálculo ingenieril más importante.



Para conocer un poco más de rectificación continua, te recomendamos las páginas 575 al 578 del libro de McCabe, W. et al (2003). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*.

4.3.1. Número de platos

El método gráfico de McCabe-Thiele, muy intuitivo, se basa en la secuencia alternada de las ecuaciones de equilibrio y de las rectas de operación.

Así, si se representa en un diagrama (X, Y), la curva de equilibrio y las rectas de operación, el número de platos teóricos requeridos para una cierta separación queda determinado por el número de escalones que se pueden trazar entre la curva y las rectas (**figura 22**). Cada escalón corresponde con un paso en el esquema de cálculo anterior, es decir, con una etapa teórica. Observa una aplicación:

$$G_{n+1} = L_n + D$$

$$G_{n+1}Y_{A,n+1} - G_{n+1}X_{AD} = L_nX_{A,n} - L_nX_{AD}$$

$$G_{n+1}(Y_{A,n+1} - X_{AD}) = L_n(X_{A,n} - X_{AD})$$

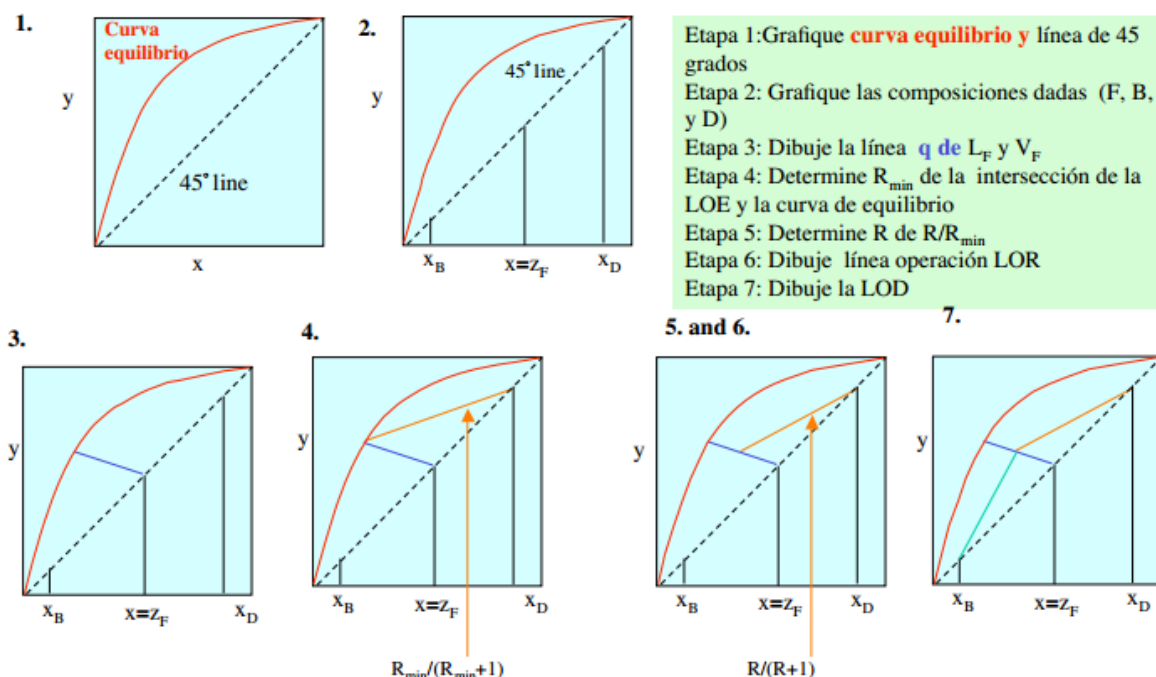
$$\frac{L_n}{G_{n+1}} = \frac{(X_{AD} - Y_{A,n+1})}{(X_{AD} - X_{A,n})}$$

$$\frac{L_n}{D} = \frac{X_{AD} - Y_{A,n+1}}{Y_{A,n+1} - X_{A,n}}$$

$$Y_{A,n+1} > X_{A,n}$$



Construcción McCabe-Thiele



Figuro 22. Método gráfico de Mc Cabe-Thiele para calcular el número de platos
(Arellanos S.C 2013)

El número de platos reales será superior al de platos teóricos, además de que tiene que ser un número entero. En la realidad el rendimiento de los platos no es del 100%, pues no se llega al equilibrio plenamente en ellos, se define a la eficiencia de la columna como la relación entre el número de etapas teóricas requeridas en una columna y el número de etapas reales. Este valor depende directamente del tipo de plato, así como de las propiedades del fluido, tipo de flujo, etcétera, y debe determinarse experimentalmente. En realidad, la eficiencia varía entre plato y plato y se determina primeramente la eficiencia individual que varía entre (0.6 y 0.75), mientras que la global lo hace entre (0.4 y 0.9) según los casos.



Te recomendamos revisar el capítulo cinco de Mc Cabe, W. et al (2003) *Operaciones Básicas de Ingeniería Química Operaciones Básicas de Ingeniería Química* para tener más información sobre el Método gráfico de Mc Cabe-Thiele para calcular el número de platos.

Por otro lado, el calderín puede considerarse como un plato teórico más, pues se produce un vapor en equilibrio con el líquido que sale de él. Por tanto, el número de platos necesarios en la columna será el calculado menos uno, que corresponde al calderín. Lo mismo sucede si se utiliza un condensador parcial (Arnaiz, F.C 2012).

La corriente descendente de reflujo facilita la separación de los componentes de la mezcla debido a que proporciona un mayor contacto entre el vapor que asciende y el líquido que baja y favorece la vaporización de los más volátiles. Es decir, una relación de reflujo pequeña conducirá a la necesidad de un mayor número de platos para una separación determinada. Una mayor supondrá el empleo de menor número de platos, pero sus diámetros han de ser superiores y los costes de operación también. La relación de reflujo óptima vendrá dada por consideraciones económicas.

Se define como "razón de reflujo externa", o "relación de reflujo" a la relación entre los moles de líquido descendente y los moles de destilado, $L/D = R$, la cual puede introducirse en la ecuación.

$$Y_n = \frac{L_n}{L_n + D} X_{n+1} + \frac{1}{L_n + D} X_D = \frac{L_n / D}{(L_n / D) + 1} X_{n+1} + \frac{1}{(L_n / D) + 1} X_D = \frac{R}{R + 1} X_{n+1} + \frac{X_D}{R + 1}$$

Cualquier cambio en la relación de reflujo dará lugar a un cambio de la pendiente de la ROE y con ello a una variación del número de platos teóricos necesarios para una determinada separación.

4.3.2. Eficiencia de platos

Las etapas de destilación suponen que el vapor que se desprende de un plato de equilibrio con el líquido que sale del mismo, pero no siempre ocurre así en la realidad, si el tiempo de contacto y el grado de mezclado en el plato son insuficientes, las corrientes no se encuentran en equilibrio, de tal forma que la eficiencia en el plano es insuficiente donde las corrientes no están en equilibrio, por lo que su eficiencia no es del 100%. Este dato indica que para que se realice una destilación con una adecuada eficiencia será



necesario usar más platos reales que el número teórico que se determina por cálculo. Los análisis de esta sección son aplicables tanto a torres de destilación como en torres de absorción.

Para el cálculo de la eficiencia de las columnas de destilación se utilizan tres tipos de eficiencia de platos o de etapas.

- Eficiencia total de platos E_0 . Esta eficiencia se refiere a la totalidad de la torres y es de uso muy simple, aunque es la menos fundamental. La eficiencia de platos total es la relación entre el número de platos teóricos o ideales necesarios en una torre y el número de platos reales usados.

$$E_0 = \frac{\text{Número de platos ideales}}{\text{Número de platos reales}}$$

- Eficiencia de Murphree E_M . La eficiencia de platos de Murphree se define con una ecuación matemática.

$$E_M = \frac{Y_n - Y_{n+1}}{Y_n^* - Y_{n+1}}$$

Donde:

Y_n = Concentración real promedio de vapor mezclado que sale de un plato.

Y_{n+1} = Concentración real promedio del vapor mezclado que entra al plato.

Y_n^* = Es la concentración del vapor que estaría en equilibrio con el líquido concentrado.

En el líquido que entra al plato tiene una concentración de X_{n-1} y al desplazarse por el mismo la concentración se reduce a x , a la salida de dicho plato, por lo que existe un gradiente de la concentración en la parte líquida a medida que fluye por el plato. El vapor que entra al plato se pone en contacto con el fluido que tiene distintas concentraciones, y el vapor de salida no tiene una concentración uniforme.

- Eficiencia de platos puntual o local E_{MP}

$$E_{MP} = \frac{Y_n' - Y_{n+1}'}{Y_n^* - Y_{n+1}'}$$

Donde:

Y_n' = concentración del vapor en un punto del plato n

Y_{n+1}' = es la concentración del vapor que entra al plato n

Y_n^* = la concentración del vapor que estaría en equilibrio con x en el mismo punto.

Puesto que el valor de Y_n , la eficiencia local no puede ser superior a 1.0, esto es 100%.



En la torres de diámetro pequeño el flujo de vapor produce suficiente agitación en el líquido como para que este sea uniforme en todo el plato. De esta manera, la concentración del líquido que sale es igual a la que está en el propio plato.

La eficiencia de la columnas determinan el diseño mecánico del dicho equipo, así como las condiciones de operación, por otra parte el diámetro de la columna depende de las cantidades del líquido y el vapor que fluye dentro de la torres por unidad de tiempo.

El número de platos utilizados en la torre será mayor al calculado teóricamente, t estos tienen eficiencias que varían entre el 40% al 90 %, dependiendo de la hidrodinámica del equipo, características del sistema y condiciones de operación.

4.3.3. Problemas resueltos

Ejemplo.

La presión de vapor del benceno y del tolueno están dadas por

$$\log_{10} P^{\circ} = A - \frac{B}{(\theta + T)}$$

$$P^{\circ} = \text{Presión de vapor mmHg}$$

$$A, B, \theta^{\circ} = \text{Constante de Antoine}$$

	A	b	c
Benceno	7.42912	1628.32	279.56
Tolueno	6.95334	1343.943	219.38

1. A partir de estos datos, determina el punto normal de ebullición del tolueno y benceno puros. ¿Cuál será el punto normal de ebullición o punto de burbuja de una mezcla formada por 40% en mol de benceno y 60 % en el mol de tolueno? (Ver figura 23)

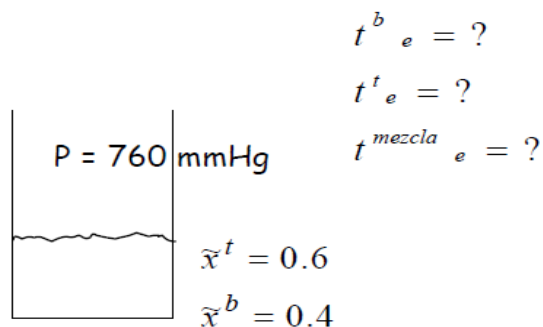


Figura 23. Temperaturas de ebullición
(Valiente A. B., 2003)

2. Planteamiento

Puntos de ebullición usando la ecuación de Antoine

$$P_T^\circ = 760 \text{ mm Hg}$$

Punto de ebullición de la mezcla por la ley de Raoult

$$P_T = P_B^\circ X_B + P_{To}^\circ$$

La temperatura de ebullición deberá estar entre la de los dos compuestos puros.

3. Cálculo

Temperatura de ebullición

$$\log_{10} = 6.95334 \frac{1343.943}{(219.38 + T)}$$

De tolueno $T = 110.6^\circ\text{C}$

del benceno

$$\log_{10} = 7.42912 \frac{1638.32}{(279.56 + T)}$$

$$T = 78.44^\circ\text{C}$$



Temperatura de ebullición de la mezcla.

$$\text{Tanteo a } 90^{\circ}\text{C } P_{TO} = 406.7 \quad P_B^{\circ} = 1054.42$$

$$P_T = 406.7(0.6) + 1054(0.4) = 665.78$$

$$\text{Tanteo a } 95^{\circ}\text{C } P_T = 476.91(0.6) + 1207(0.4) = 769$$

Resultado: la temperatura de ebullición normal del tolueno es de 110.6 pc y la del benceno 78.44°C.

La temperatura de ebullición normal de una mezcla de 60% de tolueno y 40% de benceno es de alrededor de 95 °c.

Para finalizar es importante reconocer que la principal aplicación en el laboratorio es la separación de sustancias de puntos de ebullición próximos y su principal uso industrial, con mucha mayor importancia que cualquier otro, es la destilación fraccionada del petróleo por ejemplo o de gas natural, con la finalidad de obtener dicho componente libre de otros con lo que normalmente viene acompañado.

Durante el desarrollo se observó que el número de etapas o de platos necesarios para una determinada separación se puede calcular teóricamente, ya que no es más que la combinación de una serie de destilaciones simples y el número de platos reales necesarios es siempre superior al plato teórico calculado.

De la misma manera, en función del resultado buscando se diseñan el diámetro de la columna y el tipo de relleno o de platos. La eficiencia de la separación depende de múltiples factores como la diferencia de puntos de ebullición de los componentes de la mezcla, la presión a la que se trabaje y otros parámetros fisicoquímicos de los componentes.

Actividades

La elaboración de las actividades estará guiada por tu docente en línea, mismo que te indicará, a través de la Planificación de actividades, la dinámica que tú y tus compañeros (as) llevarán a cabo, así como los envíos que tendrán que realizar.



Para el envío de tus trabajos usarás la siguiente nomenclatura: BOU1_U4_A1_XXYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U4 es la etapa de conocimiento, A1 es el número de actividad, el cual debes sustituir considerando la actividad que se realices, XX son las primeras letras de tu nombre, Y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Autorreflexiones

Para la parte de **autorreflexiones** debes responder las *Preguntas de Autorreflexión* indicadas por tu docente en línea y enviar tu archivo. Cabe recordar que esta actividad tiene una ponderación del 10% de tu evaluación.

Para el envío de tu autorreflexión utiliza la siguiente nomenclatura: BOU1_U4_ATR_XXYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U4 es la unidad de conocimiento, XX son las primeras letras de tu nombre, y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Cierre de la Unidad

Para finalizar esta unidad es importante recordar que la destilación es un proceso que nos permite separar los distintos componentes de una mezcla mediante el calor, por lo que se realiza el calentamiento de dicha sustancia a separar, normalmente en estado líquido, para que sus componentes más volátiles pasen a convertirse en vapor y posteriormente volver al estado líquido mediante la condensación

Los puntos de ebullición de todos o algunos de los componentes de una mezcla difieren en poco entre sí por lo que no es posible obtener la separación completa en una sola operación de destilación por lo que se suelen realizar dos o más. Así el ejemplo del alcohol etílico y el agua. El primero tiene un punto de ebullición de 78,5 °C y el agua de 100 °C por lo que al hervir esta mezcla se producen unos vapores con ambas sustancias aunque diferentes concentraciones y más ricos en alcohol. Para conseguir alcohol industrial o vodka es preciso realizar varias destilaciones.



Para saber más



Para saber más te invito a leer la información contenida en el siguiente enlace:
http://media.wix.com/ugd/25b09b_752fb34ed593689c7d0a9e7e8a5e3b14.pdf
Donde podrás encontrar información sobre destilación, de transferencia de calor y condiciones de separación.

Para saber más te invito a leer la información contenida en el siguiente enlace:
http://media.wix.com/ugd/25b09b_752fb34ed593689c7d0a9e7e8a5e3b14.pdf
Donde podrás encontrar información sobre destilación, de transferencia de calor así como el uso de métodos numérico para su análisis.

Para saber más te invito a leer la información contenida en el siguiente enlace:
<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r63488.PDF>
Donde podrás encontrar información sobre destilación multicomponentes donde analizarás los puntos de ebullición así como los datos equilibrio para estas mezclas.

Textos recomendados

Carrillo Trueba, L.A (2007). *Los destilados de agave en México y su denominación de origen*. Universidad nacional autónoma de México. En este documento encontrarás la historia de la destilación en nuestro país y como fue cambiando en el transcurso del tiempo.

Vázquez C., et al (2005). *Producción de etanol absoluto por destilación extractiva combinada con efecto salino*. Universidad de Antioquia.
En este artículo podrás encontrar información sobre la destilación extractiva de mezclas etanol agua con polialcohol y sales en una relación volumétrica 1:1.



Ramírez, M. A et al (2006). *Destilación de aceite usando vapor con propano*. Instituto mexicano del petróleo. Revista Mexicana de Ingeniería Química.

En este artículo encontrarás el uso de un hidrocarburo sintético para realización de experimentos de destilación en aceites pesados usando vapor y propano.

Boretto M. (2012). *Modelos de composición local del equilibrio- vapor del sistema binario aceite de soja- hexanos*. Universidad Tecnológica Nacional. Córdoba.

En este artículo encontrarás la estimación del equilibrio líquido vapor en mezclas multicomponentes es uno de los aspectos de interés para la ingeniería química y de procesos.

Rodríguez S. P et al (2011). *Presiones de vapor y equilibrio líquido vapor de acetato de propilo/ metanol- propanol a 0.15 MPa*. Sistemas binarios: Revista Metropolitana D.F

En este artículo encontrarás las presiones de vapor de 0 a 1.6 Mpa, así como los datos para sistemas binarios.

Fuentes de consulta



Boretto, M. (2012). *Modelos de composición local del equilibrio líquido-vapor del sistema binario aceite de soja – hexanos*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Villa María.

Carrillo Trueba, L. (2007). *Los destilados de agave en México y su denominación de origen*. México: Revista Ciencias. REDALYC. Universidad Autónoma del Estado de México.

Cristea, S. et al. (2003) *Control predictivo no lineal aplicado a columnas de destilación*. Valladolid. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.



Martínez (2011). *Simulación de una columna de destilación de lecho empacado*. Investigación científica. México. Universidad Autónoma de Zacatecas.

Mc Cabe, W. et al. (2003). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. España. Reverte.

Otiniano C.M (2004). Cálculo en destilación continua para sistemas binarios ideales utilizado hojas de cálculo. Perú. *Revista de la Sociedad Química*.

Pérez, O., Zumalacárregui, L. y González, O. (2010) *Simplificación en el cálculo de columnas de destilación alcohólica*. Cuba: Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.

Ramírez, M.A. et al. (2006). *Destilación de aceite usando vapor con propano*. Instituto mexicano del petróleo. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*.

Susial, P., Rodríguez-Henríquez, J.J., Apolinario, J.C., Castillo, V.D., Estupiñan, E.J. (2011). Presiones de vapor equilibrio_ vapor de acetato de propilo metanol o propanol a 0.15MPa. Sistemas binarios. México: *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10, No. 3. Universidad Autónoma Metropolitana.

Vázquez C et al. (2005). Producción de etanol absoluto por destilación extractiva combinada con efecto salino universidad de Antioquia.