

Historia de la destilación

Antonio Valiente-Barderas*

Abstract

Distillation is a unit operation widely used in industry. Some interesting aspects of its development are commented here.

Introducción

La operación unitaria de destilación es una de las más empleadas en la industria química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica y perfumera, para la separación de los componentes que forman mezclas líquidas miscibles. La destilación es una operación unitaria de transferencia de masa, tal como la absorción o la cristalización.

De acuerdo con el diccionario (Valiente, 1990) la destilación es la operación cuyo fin es la separación de dos o más líquidos miscibles mediante la ebullición. Los vapores obtenidos se recuperan como producto deseable y se condensan. Los vapores condensados son más ricos en el líquido o líquidos más volátiles, mientras que los fondos, o líquidos remanentes, son más ricos en las sustancias menos volátiles. Esta operación recibe también los nombres de *alambicación*, *refinación*, *agotamiento*, *fraccionamiento* y *rectificación*.

Origen

Hasta donde se sabe, el proceso de la destilación fue inventado por los alquimistas egipcios, quienes emplearon gran cantidad de aparatos diseñados para vaporizar sustancias volátiles y tratar los metales con ellas. Parece que, ocasionalmente, se realizaba una especie de destilación de líquidos. Por ejemplo, se calentaba agua de mar en calderos cubiertos y se sacudían las gotas condensadas en las tapaderas, con el fin de usarlas como agua para beber. Asimismo, el aceite de pez se elaboraba por el calentamiento del alquitrán y la subsecuente condensación de su vapor. El mercurio se obtenía al calentar el cinabrio (mineral de sulfuro de mercurio) sobre un plato de hierro, colocado dentro de una olla cubierta con un puchero

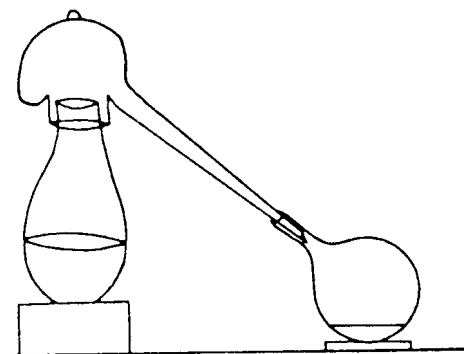


Figura 1. Alambique.

o "ambix", en el que se condensaba el vapor de mercurio. Posteriormente, ese término se usó para denominar al aparato completo de la destilación, en árabe *al anbiq*, de donde procede nuestro *alambique*.

Los alquimistas griegos, en el siglo primero de nuestra era, inventaron el alambique para destilar sustancias. Un alambique o destilador está compuesto de tres partes: una vasija en la que se calienta el material que se va a destilar, una parte fría para condensar el vapor producido y un recipiente para recogerlo (figura 1).

La destilación se inventó como un medio para obtener un líquido capaz de atacar o colorear los metales. Ciertamente, no se conoce el uso de alambiques para propósitos no alquímicos hasta alrededor de 700 años después de su primer empleo en la alquimia, cuando los encontramos en libros de recetas. Debe comprenderse que la falta de instrumentos (termómetros, por ejemplo) y el hecho de que no se conocieran disolventes ni ácidos más fuertes que el vinagre, representaba una limitación del campo de estudio. Los antiguos químicos trabajaban principalmente sobre alambiques primitivos, lo que les impedía recuperar los compuestos de bajo punto de ebullición. De aquí que no se descubrieran productos químicos como el alcohol hasta la época de los árabes, aunque desde muchos siglos atrás se conocían bebidas alcohólicas como el vino y la cerveza (Forbes, 1958).

*Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Conjunto "E", UNAM, Paseo de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F., Tel./Fax 622 5355.
Recibido: 18 de agosto de 1995;
Aceptado: 3 de noviembre de 1995.

En el mundo antiguo

Los conocimientos químicos de los árabes eran considerables. Aunque no profundizaron en la química teórica, su química aplicada era positivamente superior a la de los químicos helénicos. Un grupo considerable de químicos se inclinó a las teorías y discusiones abstrusas sobre la alquimia, en tanto que varios de los notables, despreciaban a los “*devotos de al-kimiya que conocen frecuentes maneras de engañar a sus víctimas*”. Un genio, Abu Mussah-al-Sofi o Geber, quien vivió alrededor de 760 dC describió métodos mejorados de evaporación, filtración, sublimación, fusión, destilación y cristalización. Otros como Ibn-Sina, mejor conocido como Avicena, clasificaron minerales y productos químicos y describieron muy detalladamente su elaboración. Gracias a los esfuerzos de éstos se estableció la diferencia entre sosa y potasa. Dejó de ser un misterio la purificación de vitriolo, alumbre, nitro y sal de amoniaco. La mayoría de estos avances se debió a las mejoras introducidas en los aparatos y en la calidad de los vidrios y esmaltes. Los árabes fueron, por supuesto, famosos en el arte de la alfarería, especialmente por los esmaltes lustrosos y coloridos aplicados a vasijas de barro. Estos vasos esmaltados, muchos de los cuales eran refractarios, fueron bien diseñados para procesos tecnológicos. Aunque la importación de la alfarería y la porcelana de China se remonta al siglo VIII, el secreto de la manufactura de esta última no se conoció en Persia antes del siglo XII. La calidad de esta alfarería contribuyó notablemente a facilitar el trabajo de los alquimistas árabes, que intentaban algo parecido a la producción en gran escala de determinados productos. Inventaron hornos cilíndricos o cónicos, en los que disponían hileras de alambiques para producir agua de rosas o “nafta” (gasolina) por medio del calor de los gases de combustión. Un incendio en la ciudadela de El Cairo en 1085, destruyó no menos de 300 toneladas de gasolina almacenada allí. El método del horno de galería que acabamos de describir era la única forma en que podrían producirse tales cantidades.

Los antiguos textos mencionan ciudades como Damasco entre los centros manufactureros y destiladores. Debido a ellos en la química actual tenemos nombres árabes para aparatos y productos químicos: álcali, antimonio y alambique. El procedimiento de destilar alcohol y producir ácidos fuertes, como el sulfúrico y el nítrico, afectaron de manera importante a muchas técnicas; la producción de perfumes, por ejemplo, cambió totalmente. Los químicos antiguos



Figura 2. Alambique de la época del Renacimiento.

obtenían sus esencias por *enfleurage*, esto es, mezclando flores y hierbas con grasas o ceras fundidas, que después se separaban por filtración. Las esencias responsables del aroma eran así absorbidas por el aceite o la grasa. Pero los árabes empezaron entonces a mezclar las hierbas y las flores con alcohol o agua, y a destilar las mezclas para producir un perfume líquido. Cuando se usaba agua, las esencias formaban una capa fina en la parte superior de la mezcla y podían separarse por decantación. De este modo se producía el agua de rosas a partir de los pétalos de las rosas. Éste es el inicio de la destilación por arrastre con vapor. Los descubrimientos árabes produjeron un gran impacto en la Europa medieval, y sobre todo la alquimia produjo furor en todos los reinos europeos.

Gradualmente se introdujo en Europa la práctica de enfriar el tubo de salida del alambique y, a partir del siglo XIV, la salida se convirtió en un serpentin condensador del que deriva el refrigerante moderno.

Con esta mejora se consiguieron recuperar, por condensación, los líquidos y sustancias que tienen bajo punto de ebullición. Las primeras descripciones europeas del alcohol datan de los alrededores del año 1100. Se encuentran en manuscritos del gran

centro médico que fue Salerno. Cien años después, el alcohol, obtenido por la destilación del vino, era ya una sustancia bien conocida. Durante la Edad Media, el alcohol concentrado solía prepararse en dos etapas; la primera destilación producía un alcohol de 60%, al que se le daba el nombre de *agua ardens*, o aguardiente, una nueva destilación subía la concentración al 96%, el producto final se conocía por el nombre de *aqua vitae*, o agua de la vida. En 1320, se producía alcohol en gran escala en Módena, Italia y su conocimiento se extendió a Francia y Alemania (Forbes, 1958).

Monasterios y farmacias empleaban este alcohol para preparar coccciones de hierbas, que al principio se vendían como medicinas. La peste negra, que devastó la población de Europa, fue una de las causas de la difusión de la afición al alcohol fuerte. Después de ese holocausto, la costumbre de beber “brandy”, licores y aguardiente o ginebra (de 33 a 45% de alcohol, o más), quedó firmemente arraigada como costumbre social. Hasta entonces los licores que se bebían contenían pequeños porcentajes de alcohol, tales como vinos y cervezas (7 a 15% en volumen).

El monasterio de los benedictinos, dio su nombre a un famoso “brandy”. La técnica mejorada de la destilación hizo posible otro importante progreso en el campo de la química: desde 1150, los químicos italianos destilaron ácido nítrico de una mezcla de nitro y alumbre. Venecia, y algunas ciudades de Francia y Alemania, fueron los centros productores de este ácido, que era el principal reactivo empleado para la refinación del oro que contenía plata. El ácido sulfúrico se producía en el siglo XIII, ya sea por destilación de alumbre, o quemando azufre sobre agua bajo una campana de cristal. En el siglo XV se destilaba ácido clorhídrico de una mezcla de nitro y sal común. El conocimiento de estos ácidos fuertes se difundió rápidamente, en todas direcciones; se aplicaron a la disolución de sales, en metalurgia y en el trabajo de metales, así como en calidad de agentes mordientes o de blanqueado.

El conocimiento de los ácidos y los disolventes de bajo punto de ebullición, como el alcohol, resultó de extraordinaria importancia para el progreso de la química, tanto teórica como experimental. Los químicos antiguos se habían limitado generalmente al estudio de sólidos o líquidos. Ahora podían estudiarse los cuerpos en disolución con otros compuestos. La industria química se integró al dominio del gremio de los destiladores, que en el siglo XV com-

prendía no sólo a los fabricantes de ginebra, sino también a los boticarios y a los fabricantes de ácidos. La destilación de ácidos abrió la puerta a la producción de diversos productos químicos nuevos.

La medicina, en la primera parte de la Edad Media, no contaba en general más que con medicamentos en forma de polvos y jarabes. Estos últimos fueron reemplazados entonces por tinturas, es decir, disoluciones o destilados de la droga o, en específico, en alcohol.

Los perfumes que se habían preparado siempre en la forma clásica, macerando hierbas y aceites o grasas, se empezaron a fabricar a la usanza árabe, es decir, por destilación y disolución con el alcohol. Hasta el siglo XIX los alambiques fueron del tipo de lotes con poco reflujo; eran muy pequeños, de 30 a 80 centímetros de diámetro y 1.5 metros de alto, con todo y accesorios.

La modernidad

Los primeros libros sobre destilación aparecieron en el siglo XVI (Brunschwig, 1500; Andrew, 1527); uno de ellos aparece más tarde, escrito por Libavius (1606).

Boyle destiló alcohol de madera y vinagre, y recibió las diferentes fracciones de acuerdo con sus puntos de ebullición, lo que constituyó probablemente la primera destilación analítica. Tuvieron que pasar muchos siglos para que, al llegar la Revolución Industrial, se encontraran nuevos usos para la destilación. En esa época los experimentos realizados para obtener coque de buena calidad demostraron que el carbón desprende un gas inflamable al ser calentado. Ese gas no tardó en ser aprovechado para producir gas de alumbrado. Con ello, los subproductos de la industria del gas adquirieron una importancia creciente. Entre ellos estaba el alquitrán, del que se obtenía benceno, el cual, al descubrirse los colorantes sintéticos en 1856, condujo a las plantas destiladoras de alquitrán de hulla.

En 1800 Rumford usó vapor de agua como agente térmico. En aquel tiempo los investigadores franceses de vanguardia habían diseñado y ensayado las llamadas columnas de destilación. Éstas progresaron apreciablemente con el invento de la columna de rectificación de Cellier Blumenthal, en 1813. En 1822, Perrier inventó las campanas de burbujeo y desarrolló un alambique continuo, con precalentamiento de la alimentación y uso de reflujo interno. Por otra parte, Adam y Bérard diseñaron independientemente columnas para rectificar el alcohol

extraído del vino. Blumenthal, combinó los principios utilizados por los dos inventores, para fabricar una columna que proporcionaba una corriente de alcohol rectificado a partir de una alimentación continua de vino; logró así el primer proceso de destilación a régimen permanente. Para 1850, las columnas rectificadoras de la industria del alcohol se empezaron a utilizar en las industrias del petróleo y del alquitrán de hulla. Entre 1860 y 1880, se descubrieron productos químicos valiosos tales como el benceno, el tolueno y el xileno, mediante la destilación del alquitrán.

A mediados del siglo pasado se descubrió la forma de fabricar vidrio transparente, dúctil y capaz de soportar el calentamiento y enfriamiento continuos. Este vidrio tuvo su aplicación inmediata en la fabricación de aparatos y material de laboratorio. Ello significó una enorme ventaja sobre los equipos de metal y cerámica que se venían utilizando, especialmente por la resistencia química del vidrio, su transparencia y su maleabilidad, lo que permitió la fabricación de nuevos y complicados instrumentos de laboratorio. En el campo de la destilación, los alambiques se modificaron y aparecieron los matracas, columnas y condensadores, semejantes a los empleados hoy. Desde entonces, la destilación ha sido una de las técnicas de separación más empleadas en los laboratorios y en la investigación química, al tiempo que se la utiliza también como una técnica analítica.

Por otra parte, desde mediados del siglo pasado los equipos más utilizados industrialmente estaban hechos de acero o de otros tipo de metal y recibieron el nombre de columnas de rectificación o columnas de destilación. Se trata de un equipo que consta de un calderín o rehervidor (en el cual se genera vapor), una columna con platos o con empaques (en la cual se lleva a cabo la rectificación, al ponerse los vapores en contracorriente con el líquido) y un condensador (en el cual se condensan los vapores salientes del domo, se regresa parte de ese líquido como "reflujo" y se extrae parte del mismo como un destilado o producto del domo), figura 3.

En estas columnas, la alimentación se efectúa por lo general cerca del centro de la columna. La parte por arriba de la alimentación recibe el nombre de *sección de rectificación* o *de enriquecimiento* y la parte de abajo *sección de agotamiento*.

La industria de la refinación del petróleo sufrió también modificaciones profundas bajo el impacto de la investigación científica. En 1859 el coronel

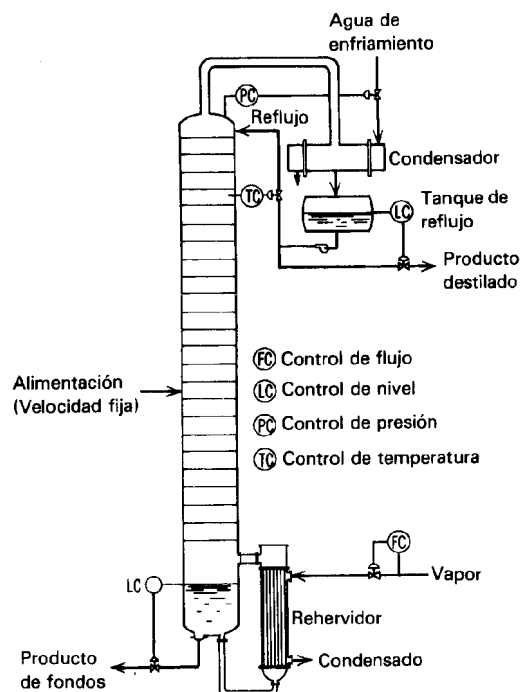


Figura 3. Esquema de una columna moderna de rectificación.

Drake demostró por primera vez la posibilidad de extraer el petróleo crudo del subsuelo de perforación, para no tener que depender exclusivamente de las afloraciones. Hasta 1900, cuando la industria automotriz daba apenas los primeros pasos, la industria del petróleo se había restringido a la producción de queroseno. Los procesos de refinación del petróleo y el correspondiente aparato técnico, eran en su mayoría adaptaciones de otras industrias, como la del alquitrán de hulla y la del alcohol. Gradualmente, las industrias del petróleo pusieron en práctica métodos más científicos en la destilación y refinación del petróleo. Este cambio recibió el impulso de la creciente demanda de productos distintos del queroseno: lubricantes, parafinas, asfalto, aceite combustible y sobre todo gasolina, que entonces se necesitaban en cantidades mayores cada vez para automóviles y aviones.

Trumble, en Estados Unidos, ideó en 1812 la combinación de un destilador de tubos con columnas desolladoras y evaporadores. Esto resultó ser un sistema extraordinariamente flexible para adaptar las unidades destiladoras a la diversidad de crudos existentes.

La refinación química, originalmente un proceso por lotes, se hizo entonces automática, hasta con-

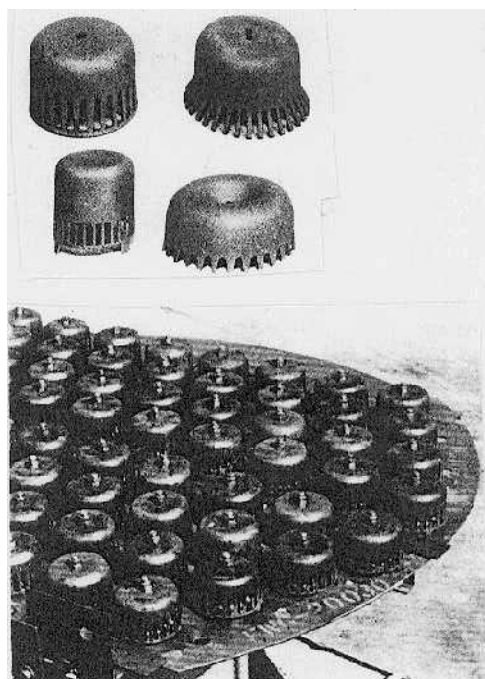


Figura 4. Campanas de burbujeo.

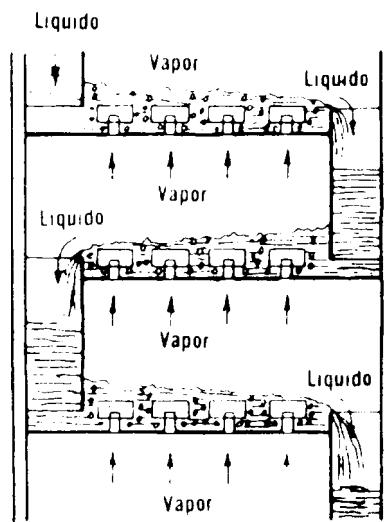
vertirse en una operación continua en recipientes cerrados, lo cual evitó la evaporación peligrosa y dispendiosa de fracciones ligeras.

El equipo predecesor de las campanas de burbujeo o "cachuchas" fue inventado en 1822 por Perrier. Estas campanas se usaron como aparatos para mejorar el contacto del vapor que se introducía por debajo del plato en el que estaban las campanas. Arriba de las campanas se introducía vino, y por debajo vapor. El vapor no se mezclaba con el vino. En 1830 Coffee desarrolló una columna continua que usaba tanto platos perforados como precalentamiento de la alimentación y reflujo interno.

Cuando el gas natural vino a suplir la falta de combustible, pudieron extraerse compuestos valiosos con bajo punto de ebullición, como el propano y el butano.

Esto era imposible sin una destilación adecuada para eliminar los gases disueltos. Como consecuencia, los técnicos se vieron en la necesidad de idear nuevos tipos de columnas destiladoras.

La destilación fue un arte durante el periodo de su desarrollo inicial. La invención de las campanas de burbujeo, los platos perforados, los condensadores enfriados con agua, el reflujo, el precalentamiento de la alimentación y la adaptación del proceso a la operación continua, se llevaron a cabo en el siglo



pasado, aunque no se hicieron intentos para sistematizar o aplicar principios cuantitativos a los procesos de destilación.

En los últimos años del siglo XIX, Hausbrand (1893) y Sorel (1899), presentaron los primeros estudios matemáticos aplicados al diseño de las columnas de fraccionamiento. Sorel (1889) desarrolló y aplicó relaciones matemáticas para la separación fraccionada de mezclas binarias, primero a las que tenían alcohol y agua, e introdujo en sus cálculos los conceptos de entalpía molar, pérdida de calor, composiciones, reflujo y gastos.

Otros investigadores de esa época fueron Barrel, Young, Rayleigh, Lewis, Rosanoff y Dufton.

En 1925, W.L. McCabe y E.W. Thiele presentaron un trabajo (McCabe, 1925) ante la American Chemical Society, que presentaba un nuevo método sencillo, rápido e ilustrativo para calcular gráficamente el número de platos teóricos necesarios para la separación de los componentes de una mezcla binaria en una columna de rectificación. La aportación original de McCabe a este problema fue un gran paso en el diseño científico de unidades de destilación y demostró ser un gran progreso cuando pasaron a primer plano los nuevos sistemas de *cracking* hacia 1936.

Posteriormente, Ponchon y Savarit (1922) dise-

ñaron un método para el cálculo de columnas de destilación para mezclas binarias, el cual no requería las simplificaciones del método de Mc.Cabe y que podía aplicarse a mezclas no ideales.

Entre 1930 y 1960, se hicieron numerosos estudios para predecir la eficiencia de las columnas de destilación. Sin embargo fue a partir de que el Instituto Americano de Ingenieros Químicos formó una comisión para estudiar el problema (AIChE, 1958), cuando se pudo contar con un método confiable para obtener las eficiencias en columnas de destilación que trabajan con mezclas binarias. Una vez resuelto este problema, las baterías se orientaron hacia el diseño de columnas que trabajaran mezclas multi-componentes (Holland, 1988). El diseño de éstas recibió un impulso muy importante con el desarrollo de las computadoras modernas, el cual hizo posible la aplicación de ecuaciones de estado para el cálculo del equilibrio vapor-líquido.

El estudio de los sistemas azeotrópicos permitió también que se pudieran diseñar columnas que pudieran separar estas mezclas, para obtener productos puros, tales como alcohol a partir de una mezcla alcohol-agua.

A pesar de que la operación unitaria de destilación es la que cuenta con más bibliografía y sobre la que se han efectuado y se efectúan más estudios e investigaciones, todavía no se ha agotado el campo, ni se ha dicho la última palabra sobre el diseño de los aparatos de destilación, que han probado ser tan útiles para la humanidad. Hoy, la destilación se reemplaza por otras operaciones que, o consumen menos energía, o son más eficientes, tales como la *extracción líquido-líquido*, la *adsorción*, la *cromatografía*, etcétera. Sin embargo, sigue presente en casi todos los procesos químicos, petroquímicos, farmacéuticos o de la industria alimentaria y vinícola.

El aparato utilizado en la actualidad en la destilación continua está constituido por tres equipos integrados: un generador de vapor, *rehervidor o calderín*, un elemento que pone en contacto vapor y líquido, *columna de platos o empacada*, y un *condensador*, que es un cambiador de calor enfriado por agua o por un refrigerante (figura 3).

La rectificación o destilación continua con etapas y con reflujo puede considerarse, de forma simplificada, como un proceso en el cual se lleva a cabo una serie de evaporaciones y condensaciones. Estos fenómenos se llevan a cabo en los platos o charolas de la columna de destilación. Para ello, el líquido de cada etapa fluye por gravedad a la etapa inferior y el

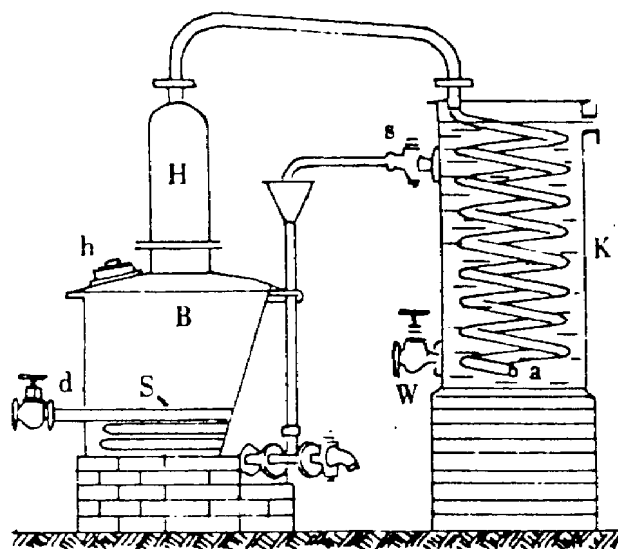


Figura 5. Aparato alemán de destilación del siglo XIX.

vapor de cada etapa lo hace hacia arriba, a la etapa superior. Por consiguiente, en cada etapa entra una corriente de vapor G y una corriente líquida L , las que se mezclan para transferir masa y tratar de alcanzar el equilibrio. La forma de lograrlo es la creación de una interfase líquido-vapor lo más extensa posible. La principal resistencia a la transferencia de masa está en la fase vapor, por lo que se han diseñado aparatos y dispositivos en los que el vapor burbujee dentro del líquido, para obtener así una mayor superficie de transferencia. Sin embargo, no es posible lograr que las corrientes que salen de una etapa estén en equilibrio, de allí que se hable de *eficiencia*, que es una medida del acercamiento al equilibrio. Los platos reales de una columna tienen eficiencias menores que 100 por ciento.

Como ya se mencionó, el principio de funcionamiento de la columna (figura 3) es poner en contacto un vapor con un líquido más rico en el componente más volátil que el correspondiente al equilibrio. Al mezclarse íntimamente, el vapor tenderá a ponerse en equilibrio con el líquido, condensándose parte del componente menos volátil y evaporándose el más volátil. Mediante la repetición de esos contactos a contracorriente, el vapor se irá enriqueciendo y el líquido empobreciendo (en el componente más volátil) hasta alcanzar las composiciones del destilado y del residuo respectivamente. Como el proceso consiste en poner en contacto vapor con líquido y a la columna no le entra más que la alimentación, el

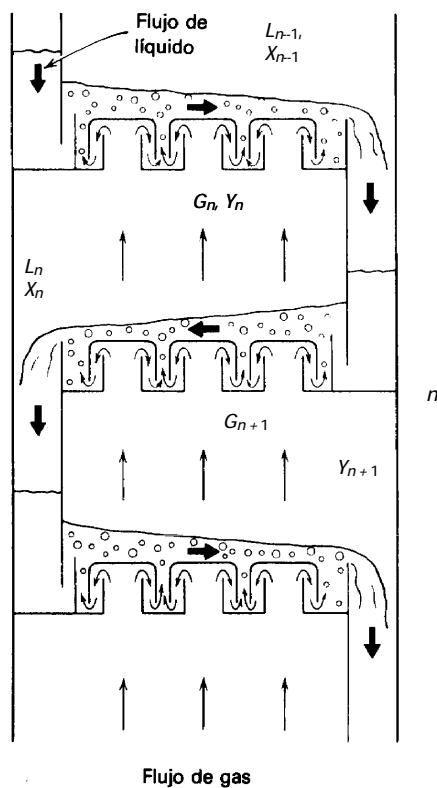


Figura 6. Platos con campanas de burbujeo con flujo cruzado para el contacto entre dos fases. El gas fluye en el sentido que indican las flechas delgadas. El líquido fluye como lo indican las flechas gruesas. Las campanas de burbujeo dispersan el gas en el líquido.

vapor se genera evaporando parte del residuo o fondos, y el líquido retornando a la columna parte del destilado, que son las mezclas más pobres y más ricas, respectivamente, en el componente más volátil. La energía para que la torre funcione así es proporcionada por el calor que se introduce en el rehervidor, el cual causa la evaporación de parte del líquido que llega a éste. La corriente de vapor, conforme asciende por la torre, se enriquece en el componente más volátil. Esta corriente se condensa en el condensador y una parte de ese líquido se regresa —refluja— hacia la columna y otra parte se extrae del domo como destilado o producto. La corriente del líquido que se refluja desciende por gravedad y se va enriqueciendo con el componente más pesado. Este proceso de enriquecimiento y empobrecimiento en determinados componentes se lleva a cabo en etapas sucesivas de la torre. Para entender más fácilmente este mecanismo es conveniente referirse a la figura 6, en la que se representa

un plato y las concentraciones del líquido volátil en las corrientes líquida y de vapor.

En cada plato se pone en contacto el líquido que desciende del plato superior, L_{n-1} , con el vapor que sube del plato inferior, G_{n+1} . Cuando la etapa se comporta de manera *ideal* se alcanza el equilibrio y las concentraciones son las correspondientes a la temperatura de equilibrio alcanzada, es decir, cuando la temperatura de ambas corrientes es la misma (t_n). En estas condiciones, la concentración del componente ligero en el líquido (X_n) y la concentración en el vapor (Y_n) son las concentraciones en el equilibrio. Aquí se puede apreciar también el efecto del empobrecimiento y enriquecimiento mencionados. La concentración del líquido que desciende, X_{n-1} , es mayor que X_n , pero la concentración del vapor que sube aumenta, es decir, Y_n es mayor que Y_{n-1} .

Bibliografía

- American Institute of Chemical Engineers, Distillation Committee, *Bubble Tray Design Manual*, 1958.
- Andrews, L., *The vertuose Boke of Distyllacyon of the waters of all Manner of Horbes*, Brunshing, 1527.
- Brunschwig, H., *Liber de arte destillandi de simplicibus*, Strasburg, 1500.
- Forbes, R.J., *Historia de la técnica*, Fondo de Cultura Económica, México, 1958.
- Hausbrand, E., *Die Wirkungsweise der Rectifier und Distillin Apparate*, Berlin, 1893.
- Holland, Ch.D., *Fundamentos de destilación de mezclas de multicomponentes*, Limusa, México, 1988.
- Libavius, A., *Alchymia*, Frankfurt, 1606.
- Mc.Cabe, W.L. y Thiele, E.W., "Graphical Design of Fractionating Columns", en *Ind. & Eng. Chem.*, June, 1925.
- Ponchon, M., *Etude graphique de la distillation fractionnée industrielle*, La technique Moderne, v. XIII, n. 1, p. 20.
- Savarit, R., *Eléments de distillation*, Arts et Métiers, n. 3, p. 65, marzo 1922.
- Sorel, M.E., *Sur la rectification de l'alcool*, Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, t. CVIII, p. 1128, 1204 y 1317, 27 de mayo de 1889.
- Sorel, M.E., *Distillation et rectification industrielle*, París, 1899.
- Urbina del Razo, A., "El método de Mc.Cabe-Thiele, según lo impartía el maestro Estanislao Ramírez", en *Educ. quím.* 1[4], 180 (1990).
- Valiente-Barderas, Antonio, *Diccionario de Ingeniería Química*, Alhambra, México, 1990. ■