



# **Estudio, identificación y corrección de cuellos de botella en equipos de destilación**

## **Study, identification and correction of bottlenecks in distillation equipment**

Bethuel-Iram Mares-Torres<sup>1</sup>, Jorge-Alberto Orrante-Sakanassi<sup>1</sup>, María-Guadalupe Vásquez-González<sup>1</sup>, Alberto-Arturo Flores-Hernández<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México – IT Matamoros, Tamaulipas, México.

---

Recibido: 31-10-2021

Aceptado: 06-12-2021

Autor correspondal: [bethuel.mares@gmail.com](mailto:bethuel.mares@gmail.com)

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es la realización de un estudio para la identificación y corrección de cuellos de botella de equipos de destilación utilizados para la remoción de impurezas de una corriente continua de producto a su capacidad nominal, de manera que se resuelvan problemáticas relacionadas con reducción de eficiencia y afectaciones de calidad en separación.

Lo anterior pretende lograrse mediante la ejemplificación y realización de cálculos utilizando datos de operación generales e interpretación de resultados para sugerir alternativas de acuerdo con las mejores prácticas operativas.

El procedimiento de identificación de problemas se basa en la generación de una tabla básica de parámetros de operación que se utilizará para realizar cálculos de datos esenciales para el buen funcionamiento de columnas de destilación.

Con lo anterior, se obtendrá información que es vital para la interpretación del comportamiento del proceso productivo y la resolución de cualquier inconveniente identificado.

**Palabras clave:** Destilación, Eficiencia, Capacidad, Cálculos, Cuello de botella.

## Abstract

The objective of this work is to carry out a study for the identification and correction of bottlenecks of distillation equipment used to remove impurities from a continuous stream of product at its nominal capacity, so that problems related to efficiency reduction and quality affectations in separation are resolved.

The foregoing is intended to be achieved by exemplifying and performing calculations using general operating data and interpretation of results to suggest alternatives in accordance with best operating practices.

The problem identification procedure is based on the generation of a basic table of operating parameters that will be used to perform calculations of essential data for the proper functioning of distillation columns.

With the above, information that is vital for the interpretation of the behavior of the production process and the resolution of any identified inconvenience will be obtained.

**Keywords:** Distillation, Efficiency, Capacity, Calculations, Bottlenecks.

## **Introducción**

La destilación es el método de separación de sustancias químicas puras, más antiguo e importante que se conoce. La época más activa de esta área de investigación fue en torno a los años 70. No obstante, hoy en día es un área de investigación relevante, con una gran acogida tanto en el ámbito industrial como en el universitario (Mascarell Miguélez, 2017).

Las columnas de destilación utilizadas para realizar el proceso de separación de sustancias constituyen un porcentaje significativo de la inversión que se realiza en plantas químicas y refinerías de todo el mundo. El coste de operación de las columnas de destilación es a menudo, la parte más costosa de la mayoría de los procesos industriales en los que interviene (Vela, 2016).

Por lo anterior, es de vital importancia que las operaciones de destilación funcionen correctamente y de acuerdo con sus especificaciones de diseño, de lo contrario, los costos por ineficiencias en consumos energéticos y falta de producción pueden repercutir negativamente y de manera importante en la economía de las empresas (Kister, 1990).

Es por esto que, como parte del desarrollo de este estudio, se identificarán los puntos clave para la operación de una columna de destilación, con el objetivo de sugerir y ejecutar acciones para el incremento de capacidad de esta, obteniendo resultados y datos importantes en cuanto a producciones de destilado, así como también de eficiencia, y, sobre todo, entendimiento de la operación ideal de estos equipos industriales de proceso.

## **Columna de Destilación**

Es una estructura cerrada en la cual se realiza la separación física de un fluido en varias fracciones.

La separación de fluidos en una columna de destilación se alcanza mediante el control de ciertas condiciones operativas de presión y temperatura en el equipo que permiten que las diferencias en propiedades físicas del fluido principal y los secundarios propicien la separación

mediante las operaciones unitarias de evaporación y condensación en la columna (Montoya Mistretta, 2012).

Los componentes principales de la columna de destilación son: a) la estructura de la propia columna, b) el condensador y c) el rehervidor, que se encargan de realizar el cambio de fases de gas a líquido y líquido a gas, respectivamente.

El flujo de material que entra en la columna de destilación viaja en estado líquido al fondo de la columna, en donde se evapora con ayuda del rehervidor y asciende entre los componentes internos para después ser condensado y retornado a la columna y/o enviado a un contenedor como producto final (Zavaleta Ortiz, 2007).

Las columnas de destilación pueden ser de platos o empacadas, lo cuál significa que están compuestas internamente por partes mecánicas geométricas que se encargan de mejorar la superficie de contacto entre el gas y el líquido.

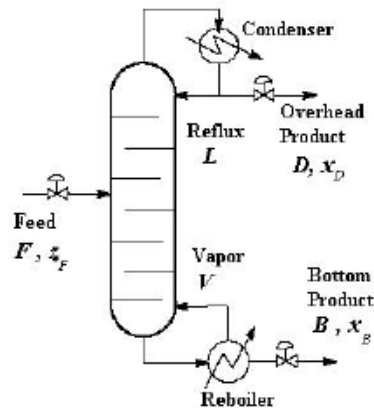


Figura 1. Diagrama esquemático de una columna de destilación.  
Fuente: Tomado de Zavaleta, et. al. (2007)

## Materiales y métodos

Existen 4 parámetros básicos para la detección de problemas en cualquier columna de destilación, que se tomarán como principales para este análisis: a) Calor latente de la corriente de alimentación, b) Tonelaje de refrigeración del condensador, c) Energía disponible para la evaporación, d) Presión diferencial de componentes internos (Oriol Planas, 2017).

La manera de calcular cada uno de ellos, es la siguiente (Raffino, 2019):

- a)  $Q_L = m_{CH}H$  (1)
- b)  $TR = m_e C_p \Delta T_e * 0.00033$  (2)
- c)  $Q = m_c C_p \Delta T_c$  (3)
- d)  $\Delta P = P_f - P_d$  (4)

donde:

$Q_L = \text{Calor latente (kcal/h)}$

$m_{CH} = \text{Carga hidráulica [Alimentación + Reflujo] (kg/h)}$

$H = \text{Entalpía (kcal/h)}$

$TR = \text{Toneladas de refrigeración (TR)}$

$m_e = \text{Masa de flujo de enfriamiento (kg)}$

$C_p = \text{Capacidad calorífica de flujo de enfriamiento y calentamiento (kcal/kg °C)}$

$\Delta T_e = \text{Diferencial de temperatura de enfriamiento } [T_{e2} - T_{e1}] \text{ (°C)}$

$Q_c = \text{Energía disponible para la evaporación (kcal/h)}$

$m_c = \text{Masa de flujo de calentamiento (kg)}$

$\Delta T_c = \text{Diferencial de temperatura de calentamiento } [T_{c1} - T_{c2}] \text{ (°C)}$

$\Delta P = \text{Diferencial de presión } [P_f - P_d] \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

El calor latente es de suma importancia para los sistemas de destilación, ya que representa la cantidad de energía calorífica necesaria para que cierta masa de una sustancia cambie de estado (Atarés Huerta, 2015).

De no contar con suficiente energía para realizar los cambios de fase requeridos en las etapas de evaporación y condensación, la separación de los componentes de la corriente de alimentación no ocurrirá (Carel, 2019).

Adicional a lo anterior, si el diferencial de presión entre el fondo y el domo de la columna es mayor al especificado por los datos de diseño para un equipo en particular, puede ser una señal de daños en los componentes internos, que bien pueden ser, pero no se limitan a: ensuciamiento, canalizaciones, colapsamiento, etc.

Considerando un sistema que se encuentra bajo las condiciones operativas de la Tabla 1, se pueden obtener los siguientes resultados al sustituir la información en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4:

$$a) Q_L = m_{CH}H = (179 \text{ kg}) \left( 95 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = \mathbf{17,021 \text{ kcal} = 5.6 \text{ TR}} \quad (1)$$

$$b) TR = m_e C_p \Delta T_e * 0.00033 = \left( 2,486 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \left( 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}} \right) (16^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C})(0.00033) = \mathbf{3.3 \text{ TR}} \quad (2)$$

$$c) Q = m C_p \Delta T_c = (3,000 \text{ kg}) \left( 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg °C}} \right) (42^\circ\text{C} - 36^\circ\text{C}) = \mathbf{18,000 \text{ kcal}} \quad (3)$$

$$d) \Delta P = P_f - P_d = 4.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 3.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = \mathbf{1.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \quad (4)$$

Tabla 1. Variables operativas de un sistema de destilación.

Parámetro	Variable	Valor
Carga hidráulica (flujo de alimentación + reflujo)	$m_{CH}$	179 kg/h
Entalpía de la corriente	$H$	95 kcal/kg
Masa de flujo de enfriamiento	$m_e$	2,486 kg/h
Capacidad calorífica de flujo de enfriamiento y calentamiento	$C_p$	1 kcal/kg °C
Temperatura de salida de flujo de enfriamiento	$T_{e2}$	16°C
Temperatura de entrada de flujo de enfriamiento	$T_{e1}$	12°C
Presión del fondo de la columna	$P_f$	4.3 kg/cm <sup>2</sup>
Presión del domo de la columna	$P_d$	3.0 kg/cm <sup>2</sup>
Diferencial de presión de diseño	$\Delta P_{diseño}$	1.0 kg/cm <sup>2</sup>
Masa de flujo de calentamiento	$m_c$	3,000 kg/h
Temperatura de entrada de flujo de calentamiento	$T_{c1}$	42°C
Temperatura de salida de flujo de calentamiento	$T_{c2}$	36°C

Fuente: Los autores.

## Resultados y discusión

El punto de partida en la interpretación de resultados es el dato obtenido de calor latente, puesto que es este parámetro el que representa el principio de operación de las columnas de destilación.

En todos los casos, el calor latente debe ser menor al tonelaje de refrigeración y a la energía disponible para la evaporación, de lo contrario, no ocurrirá la separación por diferencia de temperaturas de saturación de los componentes de la corriente de alimentación.

Lo anterior puede representarse de manera concisa en la Tabla 2.

Tabla 2. Interpretación de parámetros

Parámetro	Variable	Valor
Calor latente	$Q_L$	$Q_L < TR \approx Q$
Toneladas de refrigeración (capacidad de enfriamiento)	$TR$	$TR \approx Q > Q_L$
Energía disponible para la evaporación	$Q$	$Q \approx TR > Q_L$
Presión diferencial	$\Delta P$	$\Delta P \approx \Delta P_{diseño}$

Fuente: Los autores.

Para este caso en particular, la cantidad de energía (calor latente) que hará que la corriente de alimentación cambie de fase es 17,021 kcal, o lo que es lo mismo, 5.6 TR.

Lo anterior quiere decir que, tanto las toneladas de refrigeración disponibles en el condensador como la energía disponible en el evaporador, deben ser mayores a 17,021 kcal para cubrir los requerimientos mínimos para la separación de componentes.

Tras comparar resultados con los datos de la Tabla 2, se obtiene:

$$Q_L < TR = 5.6TR < 3.3TR$$

**No cumple.**

$$Q_L < Q = 17,021 \text{ kcal} < 18,000 \text{ kcal}$$

**Cumple.**

$$\Delta P \approx \Delta P_{\text{diseño}} = 1.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \approx 1.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

**Dependiente de la desviación permisible de cada equipo.**

## Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos para este escenario en particular, puede decirse que:

a) La capacidad de refrigeración no cumple con los requerimientos mínimos, ya que representa un 60% del total necesario para una correcta condensación.

Situaciones en las que la condensación es deficiente pueden resultar en incrementos de presión en el domo de las columnas, puesto que la cantidad de gases que se evaporan en el fondo no se condensarán por completo y se acumularán poco a poco en la parte superior.

b) La energía disponible para evaporación de la corriente de alimentación es superior a la necesaria, lo cual es adecuado, pero no del todo bueno si se considera que la condensación es deficiente. Esto puede acelerar la acumulación de gases en el domo de la columna, ya que se está evaporando más materia de la necesaria y condensando menos de lo requerido.

c) Tras haber obtenido los resultados anteriores, es necesario abordar más en detalle las razones por las que el sistema de enfriamiento no tiene la capacidad de

refrigeración necesaria para condensar el producto, y algunas razones pueden ser, pero no se limitan a: 1) el sistema presenta daños mecánicos, 2) el sistema está diseñado para una capacidad menor, 3) las condiciones de operación del sistema de enfriamiento no se están cumpliendo.

d) Para este caso, la diferencia de presión que existe entre el domo y el fondo de la columna es de 30% mayor a la del diseño, lo cuál podría o no ser correcto dependiendo de las recomendaciones del fabricante y el tipo de internos que tenga la columna (empacado estructurado, aleatorio, platos, etc.). Es necesario revisar la documentación de diseño de los equipos de destilación para averiguar cuál es la variación permisible e identificar en tiempo los cambios que pueda tener para evitar colapsamientos y necesidad de reemplazo de componentes internos.

## Referencias bibliográficas

- Bolivar, G. (16 de Septiembre de 2008). Condensación. Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/ejemplos-de-condensacion/>
- Carel. (19 de Abril de 2019). Carel. Obtenido de Carel: <https://www.carel.es/what-s-refrigeration->
- Fernández, J. L. (16 de Marzo de 2016). FisicaLab. Obtenido de FisicaLab: <https://www.fisicalab.com/apartado/presion#contenidos>
- Henry Z. Kister. (1990). Distillation Operation. Michigan, USA: McGraw-Hill.
- Lorena Atarés Huerta. (2015). Funcionamiento del método de las mezclas. En Determinación del calor latente de fusión del hielo(6). Valencia, España: UPV.
- Mascarell Miguélez. (2017). Introducción a la destilación. En Diseño de una columna de rectificación a vacío para la obtención de cerveza de bajo contenido alcohólico a partir de cervezas artesanales(388). Cadiz, España: UCA.
- Melendi, D. (23 de Octubre de 2015). Mendoza Conicet. Obtenido de Mendoza Conicet: <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Energ.htm>
- Montoya Mistretta. (2012). Generalidades sobre la teoría de la destilación. En DISEÑO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN PARA RECUPERACIÓN DE UNA SUSTANCIA TERMOSENSIBLE(102). Valparaíso, Chile: PUCV.



- Oriol Planas. (3 de Febrero de 2017). solar-energia. Obtenido de solar-energia:  
<https://solar-energia.net/termodinamica/propiedades-termodinamicas/calor>
- Puerta, G. R. (31 de Enero de 2008). Galeon. Obtenido de Galeon:  
<http://galeon.com/jackzavaleta/balw1.pdf>
- Raffino, M. E. (6 de Diciembre de 2019). Destilación. Obtenido de Concept:  
<https://concepto.de/destilacion/#ixzz67Yspa92l>
- Staff, C. (3 de Junio de 2019). DeConceptos. Obtenido de DeConceptos:  
<https://deconceptos.com/ciencias-naturales/temperatura>
- Staff, C. (8 de Diciembre de 2017). Significados. Obtenido de Significados:  
<https://www.significados.com/presion/>
- TPLab. (8 de Mayo de 2019). TPLaboratorioQuímico. Obtenido de TPLaboratorioQuímico:  
<https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/procedimientos-basicos-de-laboratorio/evaporacion.html>
- Vela, P. (2016). Diseño, construcción e instalación de equipos de destilación. Iquitos, Perú: D. H.
- Zavaleta Ortiz Jack. (2007). Balance de Materia y Energía. Callao, Perú: UNC.