



EJEMPLO DE RESOLUCIÓN DE UN BALANCE DE MATERIA EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN

Apellidos, nombre	Fombuena Borràs, Vicent (vifombor@upv.es) Cardona Navarrete, Salvador C. (scardona@iqn.upv.es) Domínguez Candela, Iván (ivdocan@doctor.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Química y Nuclear (DIQN)
Centro	Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) Universitat Politècnica de València (UPV)

1 Resumen de las ideas clave

En el día a día de un ingeniero químico es necesario desarrollar una metodología para poder determinar las variables desconocidas de un determinado proceso industrial. Una forma de poder desarrollar esta tarea es haciendo uso de los balances de materia y energía, ya que permiten la obtención de variables presentes en un sistema industrial, como pueden ser los caudales, flujos, composiciones, reactividades químicas, etc.

Desde el punto de vista docente, es importante explicar de forma detallada la resolución de problemas mediante balances de materia/energía, ya que será una herramienta muy usada e importante para el alumno, tanto en el grado universitario como en su carrera profesional. Es por ello que el presente artículo busca afianzar estos conocimientos, desarrollando una metodología de resolución adaptable a múltiples procesos industriales.

La metodología utilizada es muy sistemática y esto proporciona al alumno una seguridad a la hora de afrontar la obtención de variables desconocidas. El seguimiento de los pasos que van a ser descritos, facilita la comprensión de los resultados, y en la medida de lo posible, intenta evitar las posibles dudas que puedan bloquear la resolución de un problema.

En este artículo se realiza la resolución de un balance de materia en una columna de destilación, elemento clave en el desarrollo de la actividad de un ingeniero químico. Siguiendo siempre una metodología muy didáctica, el artículo plantea preguntas y soluciones que todo ingeniero se realizaría en la resolución de dicho balance de materia.

2 Introducción

Los ingenieros químicos están presentes en muchos sectores a nivel industrial, desde la industria de transformación tradicional como es el caso de los combustibles, productos farmacéuticos, productos químicos y polímeros, hasta los sectores como minería y extracción de metales. Esta presencia en tantos sectores se debe a la multidisciplinariedad que presenta el ingeniero químico, factor de gran aceptación por la parte empresarial.

Tal y como Sinott et al. Muestra, una de las posibles razones es la siguiente: "a partir de una necesidad que presenta la empresa, el ingeniero químico tiene capacidad suficiente para comprender y desarrollar soluciones para un determinado problema, haciendo uso del amplio conocimiento sobre química, física, matemáticas... En la resolución del problema, las tareas abarcan desde conocer las especificaciones del diseño objetivo hasta evaluar, optimizar y seleccionar un determinado diseño, con el objetivo de construir y comenzar la operación" [1]. Por tanto, es clave que deba tener conocimiento interdisciplinar para la correcta resolución de los problemas o necesidades que presenta cualquier empresa de un sector.

En el día a día del ingeniero químico necesita calcular ciertas variables de un proceso que no son conocidas. Y es aquí es donde los Balances de Materia y Energía cogen importancia para la resolución de estas variables. Estos cálculos se basan en la ley de la conservación de la materia y energía que se define como: "La materia y energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma". Haciendo uso de este principio, se puede determinar las cantidades necesarias de materia prima y los productos que se han generado en un determinado proceso, además de las temperaturas en cada una de

las corrientes. Una buena comprensión en los cálculos de balances es algo esencial en el diseño de un proceso [1].

En el presente artículo se centrará únicamente en la resolución de un proceso donde el elemento principal es una columna de destilación. Las columnas de destilación son un tipo de operaciones de separación que un ingeniero químico debe conocer y controlar ya que permiten la separación de uno o varios componentes de una mezcla líquida o gaseosa haciendo uso de un líquido o vapor que se ha generado mediante calefacción o enfriamiento de la mezcla original [2]. Una columna de destilación se puede diferenciar tres sectores:

- La zona de alimentación: es donde se introduce el flujo de la mezcla a separar.
- La zona de agotamiento: es el sector inferior situado por debajo de la zona de alimentación. Aquí es donde el producto líquido va hacia el fondo y hacia arriba va el reflujo del vapor generado por el calderín.
- La zona de enriquecimiento: sector superior situado por encima de la zona de alimentación. Tiene lugar el enriquecimiento del vapor que proviene del condensador.

En la Figura 1 se muestra el esquema de una columna de destilación con sus respectivos componentes.

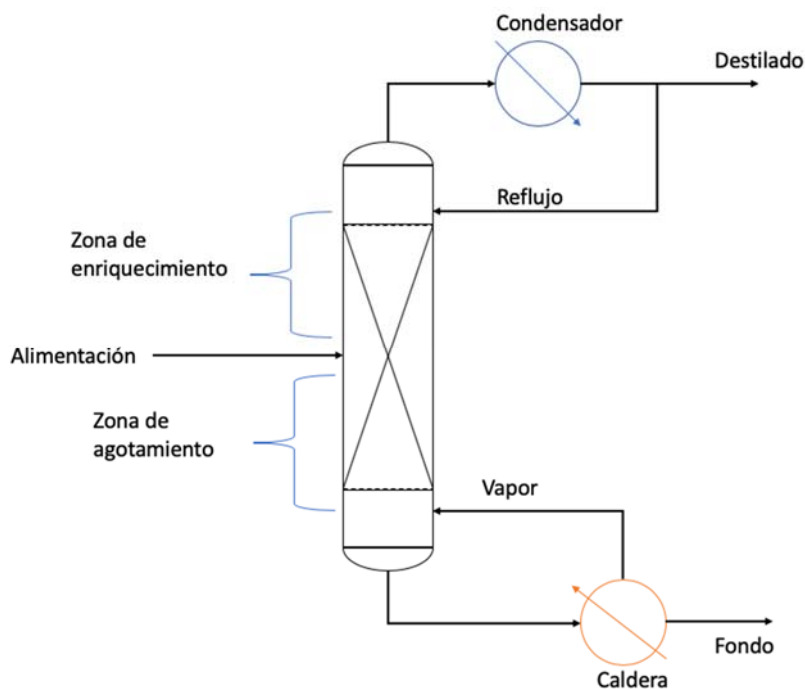


Figura 1. Esquema de una columna de destilación

3 Objetivos

La lectura de dicho artículo tiene como objetivos otorgar al lector los siguientes ítems:

- Mostrar una metodología detallada sobre la determinación de los grados de libertad de un sistema y aplicarla en un proceso típico de ingeniería química.
- Obtener tanto las ecuaciones independientes como las relaciones adicionales necesarias para la resolución del problema.

- Interpretación de los resultados obtenidos aplicando los balances de materia.

4 Desarrollo

A continuación, se mostrará el enunciado del problema a resolver, donde se aplicará la resolución de los grados de libertad del sistema para determinar las variables desconocidas relacionadas con el balance de materia.

Partimos de un proceso industrial compuesto por una columna de destilación que se utiliza para separar una mezcla de tres componentes consistente en un 7% de acetona, 61.9% de ácido acético y el resto de anhídrido acético. La columna ha sido diseñada para producir una corriente de fondo que no contenga acetona, y una corriente de destilado que contenga 10% de acetona y 88% de ácido acético. Si se opera la columna de manera que se recircule como reflujo un 60% del flujo molar que sale por la cabeza de la columna, uno de los principales objetivos va a ser establecer todos los flujos y composiciones que forman el proceso. Para ello se establece que la columna ha sido diseñada para producir 700 mol/h de destilado y las composiciones son fracciones molares. En la figura 2 se muestra el esquema de la columna de destilación:

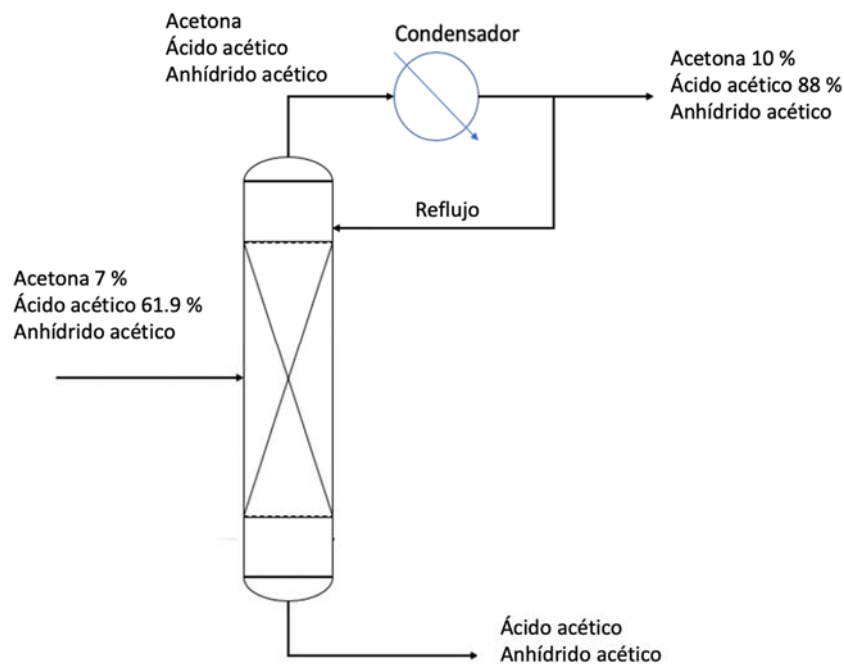


Figura 2. Columna destilación del problema

Antes de comenzar, es importante remarcar que tal y como aparece la Figura 2, podríamos detallar dos elementos claves: la columna de destilación y el condensador. ¿Pero influye el condensador en la resolución de un balance de materia?

La respuesta es no, ya que el condensador tiene el objetivo de producir un cambio de fase en la corriente y, por tanto, no modifica ningún flujo de materia ni composición. Por tanto, podemos omitir dicho elemento en la resolución del balance de materia para conocer todos los flujos y composiciones.

Una vez aclarado esto, se deben enumerar las corrientes del sistema e identificar las variables de cada corriente etiquetándolas.

¿Cuántas **corrientes** existen en el proceso?

- Hay tres corrientes fáciles de reconocer, las cuales pertenecen a la de alimentación, la del enriquecimiento antes de la bifurcación y la del fondo. Estas corrientes las llamaremos 1, 2 y 5 respectivamente (véase Figura 3).
- Por otra parte, cabe destacar la bifurcación, elemento clave para el correcto funcionamiento de la columna de destilación. En toda bifurcación los flujos entrantes o salientes serán diferentes, mientras que la composición permanece constante. Estas corrientes se llamarán 3 y 4 respectivamente. Por tanto, **hay 5 corrientes diferentes**.

¿Cómo se **etiquetan** las variables del sistema?

- Las variables se etiquetan en función de la corriente en la que esté mediante un subíndice. Se tiene en cuenta que las fracciones molares se etiquetan como X y los flujos molares como F. Además, se abrevian los componentes involucrados en el proceso de forma que P es acetona, A es ácido acético y H es anhídrido acético. Por tanto, x_{P1} sería fracción molar de acetona en la corriente uno, y así con todas las demás.

En la Figura 3 se muestra cada una de las corrientes con sus correspondientes variables etiquetadas.

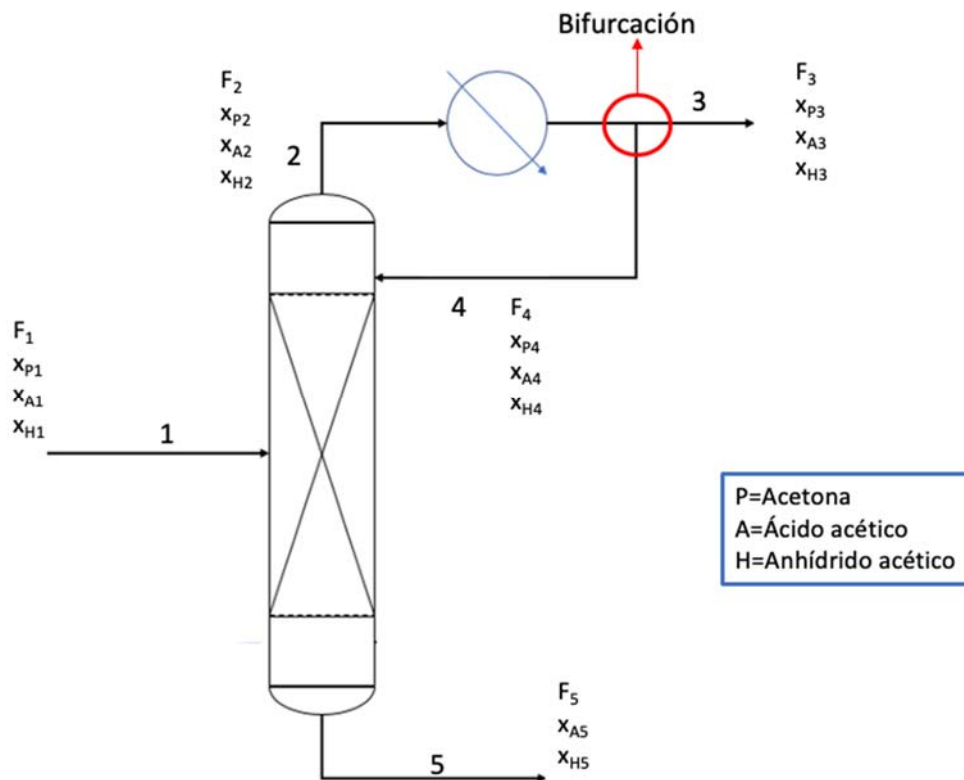


Figura 3. Numeración e identificación de variables

El siguiente paso sería introducir los valores de las variables especificadas por el problema, es decir, los datos que se conocen gracias al enunciado. Además, se debe identificar los diferentes volúmenes de control.

Empecemos por los volúmenes de control. ¿Cuántos **volúmenes de control (VC)** hay en este problema?

- Un volumen de control en un proceso industrial será todo aquel elemento donde converja o diverjan corrientes. En este problema podemos determinar dos volúmenes de control: La propia columna de destilación (donde entra la corriente de alimentación 1 y la de recirculación 4 y salen las corrientes 2 y 5) y la bifurcación de la corriente de salida superior (donde la corriente 2 se divide en la 3 y la 4). Por tanto, **existen 2 VC**.

¿Cuántas **variables especificadas** nos proporciona el enunciado?

- El enunciado nos dice **5 variables independientes especificadas (conocidas)**. En este apartado no se contabilizan como variables específicas aquellas que se podrían obtener mediante un sencillo balance de materia de las composiciones molares. Por ejemplo, en la corriente 3 sabemos que x_{P3} vale 0.1 y x_{A3} 0.88, por tanto si el sumatorio de las fracciones molares debe ser 1, podemos deducir fácilmente que x_{H3} será igual a $1 - 0.1 - 0.88 = 0.02$. No obstante repetimos que esta variable no la tendremos en cuenta como variable especificada.

En la figura 4 aparecen el esquema con las variables especificadas y los volúmenes de control identificados.

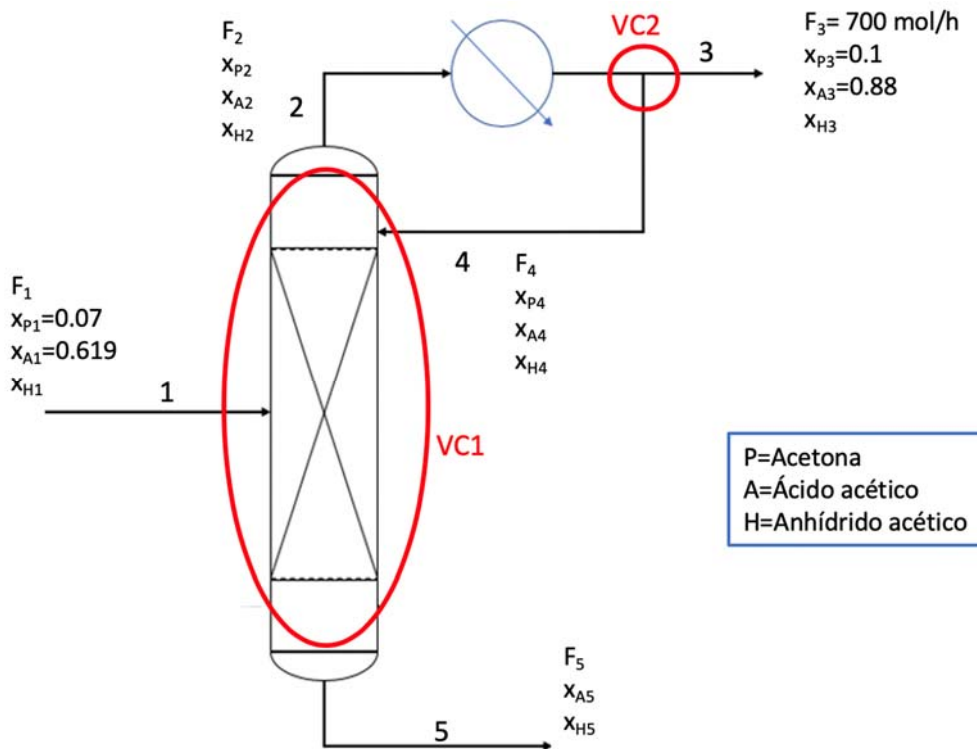


Figura 4. Volúmenes de control y variables especificadas

Ahora se debe realizar el análisis de grados de libertad para cada volumen de control.

Obtención de las ecuaciones de Balance de Materia independientes (por cada volumen de control):

- **VC1:** Se debe de obtener las ecuaciones independientes para cada uno de los componentes que intervienen en este volumen de control, siendo en este caso 3 componentes (A, P y H). En este proceso no hay ni acumulación ni reacción química, por lo que [Entradas]=[Salidas].

$$P \rightarrow F_1 \cdot X_{P1} + F_4 \cdot X_{P4} - F_2 \cdot X_{P2} = 0$$

$$A \rightarrow F_1 \cdot X_{A1} + F_4 \cdot X_{A4} - F_2 \cdot X_{A2} - F_5 \cdot X_{A5} = 0$$

$$H \rightarrow F_1 \cdot X_{H1} + F_4 \cdot X_{H4} - F_2 \cdot X_{H2} - F_5 \cdot X_{H5} = 0$$

- **VC2:** En este caso intervienen el mismo número componentes (3) y no hay ni acumulación ni reacción química, por lo que [Entradas]=[Salidas].

$$P \rightarrow F_2 \cdot X_{P2} - F_3 \cdot X_{P3} - F_4 \cdot X_{P4} = 0$$

$$A \rightarrow F_2 \cdot X_{A2} - F_3 \cdot X_{A3} - F_4 \cdot X_{A4} = 0$$

$$H \rightarrow F_2 \cdot X_{H2} - F_3 \cdot X_{H3} - F_4 \cdot X_{H4} = 0$$

Después de haber obtenido estas ecuaciones, se vuelve a leer el enunciado para conocer que **relaciones adicionales** existen. La que se puede obtener mediante el enunciado es:

- *“Si se opera la columna de manera que se recircule como reflujo un 60% del flujo molar que sale por la cabeza de la columna”:* Esto nos indica que $F_4 = 0.6 \cdot F_2$, siendo F_4 la corriente de reflujo y F_2 corriente de la cabeza. Por tanto, tenemos **1 relación adicional**.

Una vez estudiado los VC, las relaciones adicionales e identificado las variables independientes específicas, se calcula los grados de libertad sabiendo que:

$$GDL = (\text{Var. Independientes}) - (\text{N}^\circ \text{ ecuaciones B.M}) - (\text{N}^\circ \text{ Var. Identificadas}) - (\text{N}^\circ \text{ relaciones adicionales})$$

$$GDL = (14) - (6) - (5) - (1) = 2$$

Los GDL han dado 2, por lo que no podríamos obtener una solución matemática. Si queremos que el problema tenga solución matemática y por tanto obtener todos los flujos y composiciones, se deben obtener 2 relaciones adicionales más para poder resolver el ejercicio (GDL=0).

Si uno se da cuenta, anteriormente se ha comentado que en las bifurcaciones los flujos cambian, pero las composiciones permanecen invariables. Aquí es donde se pueden obtener relaciones para tener el problema especificado. De esta bifurcación como máximo podemos tener 3 relaciones adicionales, las cuales son:

$$X_{P3} = X_{P4}$$

$$X_{A3} = X_{A4}$$

$$X_{H3} = X_{H4}$$

Como para obtener GDL=0 únicamente necesitamos tener **2 relaciones** más, se tiene libertad para escoger. En este caso se han escogido $X_{P3} = X_{P4}$ y $X_{A3} = X_{A4}$.

Por tanto, en la Tabla 1 se resume el cálculo de los GDL:

		Número	Identificación
Variables independientes		14	$F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, X_{P1}, X_{A1}, X_{P2}, X_{A2}, X_{P3}, X_{A3}, X_{P4}, X_{A4}, X_{A5}$
Ecuaciones de BM independientes		6	$VC1=3$ $VC2=3$
Variables independientes especificadas	Flujos	1	$F_3=700 \text{ mol/s}$
	Composiciones	4	$X_{P1}=0.07, X_{A1}=0.619, X_{P3}=0.1, X_{A3}=0.88$
	Vel. reacción	0	
Relaciones adicionales		3	$F_4=0.6 \cdot F_2, X_{P3}=X_{P4}, X_{A3}=X_{A4}$
GDL		0	Problema especificado correctamente

Tabla 1. Tabla resumen grados de libertad

Con el problema especificado correctamente, se realizarían los cálculos necesarios para obtener los resultados que se pueden observar en la Figura 5.

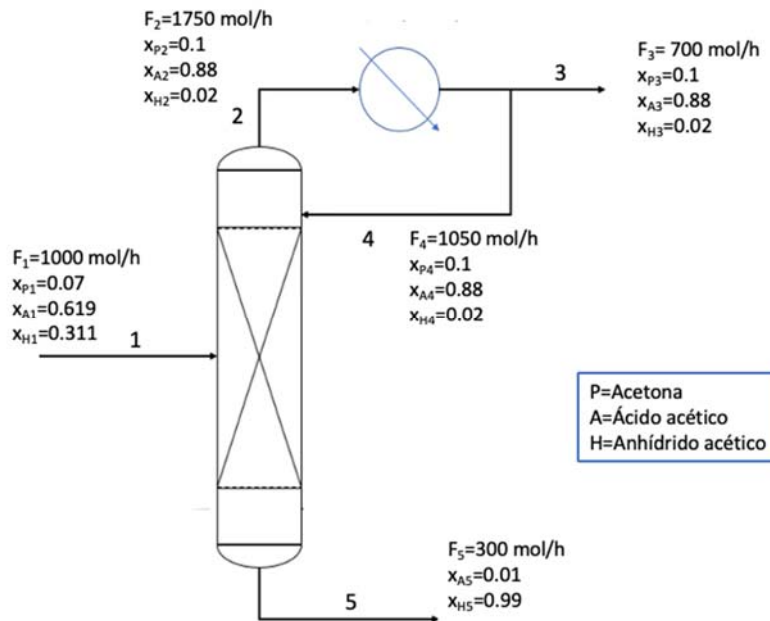


Figura 5. Resolución del problema

Por último, siempre se debe repasar los resultados finales de un problema e interpretar los resultados.

Se comprueba que tanto las composiciones de la corriente 2, 3 y 4 son iguales, cosa muy lógica teniendo en cuenta que es una bifurcación. En cambio, los flujos son diferentes. Por otra parte, para tener un flujo de 700 mol/h de destilado con la composición específica, es necesario tener un alimento de 1000 mol/h. Por último, cabe

destacar que en el fondo el flujo obtenido es de 300 mol/h, teniendo una composición al 99% de anhídrido acético y 1 % de ácido acético.

5 Conclusiones

Los balances de materia es un método de resolución muy efectivo aplicable a muchos procesos industriales. El ejercicio resuelto es un problema típico de ingeniería química, donde las columnas de destilación tienen un papel importante. Se ha hecho la resolución mediante balances de materia, mostrando una metodología paso a paso para obtener una correcta resolución. La ventaja de esta metodología es que se puede aplicar para la resolución de cualquier proceso involucrado en ingeniería química.

6 Bibliografía

[1] Sinnott, R. K., and Gavin P. Towler. 2020. Chemical Engineering Design [electronic Resource]. Sixth edition.

[2] Martínez de la Cuesta, Pedro J., and Eloísa Rus Martínez. 2004. Operaciones de separación en ingeniería química: métodos de cálculo. Madrid [etc.]: Prentice Hall Iberia.