

Operaciones Unitarias 3

Ejercicios Ago – Dic 2023

Unidad 1 – Destilación

EJERCICIO 1 (2 puntos)

La tabla muestra datos de equilibrio líquido-vapor del sistema metanol-agua a una presión constante de 101.3 kPa. Usarlos para trazar el diagrama de equilibrio (xy) y el diagrama temperatura-composición (T_{xy}). En estos diagramas, señalar los componentes puros y las líneas de líquido saturado y vapor saturado.

| temperatura (°C) | fracción mol de metanol en el líquido | fracción mol de metanol en el vapor |
|------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| 96.4 | 0.020 | 0.134 |
| 89.3 | 0.080 | 0.365 |
| 87.7 | 0.100 | 0.418 |
| 81.7 | 0.200 | 0.579 |
| 78.0 | 0.300 | 0.665 |
| 75.3 | 0.400 | 0.729 |
| 73.1 | 0.500 | 0.779 |
| 71.2 | 0.600 | 0.825 |
| 69.3 | 0.700 | 0.870 |
| 67.5 | 0.800 | 0.915 |
| 66.0 | 0.900 | 0.958 |
| 64.5 | 1.0 | 1.0 |

Adaptados de Perry, 7ª edición. Algunos datos se omitieron por simplicidad.

EJERCICIO 2 (2 puntos)

Las constantes de Antoine para el benceno y el tolueno se muestran en la tabla. Empleando la ley de Raoult, calcular las composiciones en equilibrio líquido-vapor a 96 °C y 1 atm.

| componente | número CAS | T_b | A | B | C | ecuación |
|------------|------------|----------|---------|---------|---------|---|
| benceno | 71-43-2 | 80.1 °C | 3.98523 | 1184.24 | -55.578 | $\log_{10} P_{vap} = A - \frac{B}{T + C}$ |
| tolueno | 108-88-3 | 110.6 °C | 4.05043 | 1327.62 | -55.525 | |

T en kelvín, P_{vap} en bar. Constantes adaptadas de Poling, Prausnitz y O'Connell, "The Properties of Gases and Liquids", 5a edición, McGraw-Hill.

RESPUESTA: $x = 0.371, y = 0.592$

EJERCICIO 3 (2 puntos)

Adaptado de Perry y Green (2004) "Manual del Ingeniero Químico", 7ª edición, McGraw-Hill.

Se va a llevar a cabo una destilación simple por lotes de una mezcla etanol-agua, a una presión constante de 1 atm. La carga inicial es 80 moles de una solución al 24% mol etanol. El líquido residual de la destilación debe tener una concentración máxima de etanol del 6% mol. Determine la cantidad en moles de producto destilado y su composición.

RESPUESTA: El destilado es 33.4 moles, con un 49% mol etanol.

EJERCICIO 4 (4 puntos)

Se tiene 180 kg de una solución acuosa de etanol al 59% peso que se desea concentrar mediante destilación batch a presión constante de 1 atm. (A) ¿A qué temperatura empieza a hervir la solución? (B) Si la destilación se detiene cuando el líquido alcanza 85.5 °C, ¿cuántos kilogramos de destilado se obtuvieron y cuál es su porcentaje peso?

RESPUESTA: (A) 81.1 °C, (B) 118.6 kg, 76.1% peso etanol

EJERCICIO 5 (2 puntos)

Una corriente de 3300 kmol/h de una solución acuosa de acetona (21% mol acetona) se alimenta de forma continua a una columna de destilación que opera a presión atmosférica. La composición de los productos debe ser 95% mol acetona y 99% mol agua, respectivamente. Determinar los flujos de las corrientes producto.

RESPUESTA: destilado: 702.1 kmol/h, fondo: 2597.9 kmol/h

EJERCICIO 6 (4 puntos)

Para la misma columna de destilación del ejercicio anterior, determinar las cargas térmicas del condensador y del hervidor, si la relación de reflujo R es 1.4 y tanto la alimentación como los productos son líquidos saturados.

DATOS DE LA ACETONA PURA (tomados del Manual del Ingeniero Químico, 7ª edición)

$$c_{p,L} = C_1 + C_2 T + C_3 T^2 + C_4 T^3 \quad C_1 = 135600, \quad C_2 = -177, \quad C_3 = 0.2837, \quad C_4 = 6.89 \times 10^{-4} \quad (T \text{ en kelvin y } c_{p,L} \text{ en J/kmol}\cdot\text{K})$$

$$\lambda = A(1 - T_r)^B \quad A = 4.215 \times 10^7, \quad B = 0.3397 \quad (\lambda \text{ en J/kmol})$$

RESPUESTA: $Q_C = 14.14 \text{ MW}$, $Q_B = 15.65 \text{ MW}$

EJERCICIO 7 (4 puntos)

Considérese la destilación a 1 atm de una mezcla equimolar de benceno y tolueno para obtener un destilado 98% mol benceno y un producto de fondo 96% mol tolueno. La alimentación entra como una mezcla líquido-vapor (20% vapor). Aplicando el método de McCabe-Thiele, determinar (A) el número mínimo de etapas teóricas, (B) el reflujo mínimo, (C) el número de etapas teóricas y la etapa de alimentación si la relación de reflujo es 30% mayor que el reflujo mínimo.

RESPUESTAS: (A) 7 + rehervidor, (B) $R_{\min} = 1.39$, (C) 15 etapas + rehervidor, alimentación en la 9.

EJERCICIO 8 (4 puntos)

Una mezcla 40% mol benceno – 60% mol tolueno entra a una columna de destilación como vapor saturado, para obtener un destilado que sea 80% mol benceno y un producto de fondo que sea 90% mol tolueno. La relación de reflujo es $R = 3$. (A) ¿Cuántas etapas ideales se requieren? (B) ¿Cuántas etapas reales se requieren si la eficiencia global de la columna es 70%? (C) ¿Cuántas etapas reales se requieren si la eficiencia de Murphree es 65%?

NOTA: Las composiciones y el reflujo se seleccionaron para que fuera más fácil trazar la curva de pseudoequilibrio. En una aplicación real, el espacio entre la curva de equilibrio y las líneas de operación es mucho más reducido.

RESPUESTA: (A) 6 etapas y el hervidor; (B) 9 etapas y el hervidor; (C) 10 etapas y el hervidor

EJERCICIO 9 (6 puntos)

Se va a destilar 15000 kg/h de una mezcla 62% peso tolueno y 38% peso acetonitrilo, entrando a una columna de destilación como mezcla líquido-vapor (25% líquido). Las corrientes de producto deben ser 98.5% peso tolueno y 67% peso acetonitrilo, respectivamente. Determinar (A) los flujos máscicos de las corrientes de destilado y fondo, (B) el número mínimo de etapas ideales, (C) el número de etapas ideales y la etapa de alimentación, y (D) el número de etapas reales asumiendo una eficiencia global del 70%.

RESPUESTA: (A) $D = 8358.8 \text{ kg/h}$, $B = 6641.2 \text{ kg/h}$, (B) 4 y el hervidor, (C) 10 y el hervidor, (D) 15 y el hervidor.

EJERCICIO 10 (4 puntos)

Se desea separar el metanol de una mezcla de alcoholes formada por metanol (20% mol), etanol (70% mol) y n-propanol (10% mol) empleando una columna de destilación continua. Se debe tener un 99% de recuperación de los componentes clave en los productos respectivos. Asumir que las volatilidades son constantes, calculadas a partir de las presiones de vapor a 80 °C. Determinar el número de etapas teóricas necesarias para obtener la separación.

Presiones de vapor a 80 °C: metanol 1339 mmHg, etanol 812 mmHg, 376 mmHg.

RESPUESTA: 39 etapas.

EJERCICIO 11

Los datos de la tabla corresponden al equilibrio L-L del sistema agua-benceno-piridina. Graficar la curva de equilibrio entre las dos fases y trazar las líneas de unión de este sistema empleando (A) un diagrama en triángulo equilátero, y (B) un diagrama en triángulo rectángulo.

| FASE ACUOSA | | | FASE ORGÁNICA | | |
|-------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| agua | benceno | piridina | agua | benceno | piridina |
| 98.6 | 0.0 | 1.4 | 0.0 | 96.8 | 3.2 |
| 94.6 | 0.0 | 5.4 | 0.4 | 85.5 | 14.1 |
| 87.6 | 0.0 | 12.4 | 1.4 | 72.6 | 26.0 |
| 74.6 | 0.0 | 25.4 | 2.4 | 65.7 | 31.9 |
| 59.4 | 1.7 | 38.9 | 3.5 | 60.9 | 35.6 |
| 45.2 | 4.8 | 50.0 | 5.0 | 55.1 | 39.9 |
| 32.6 | 11.1 | 56.3 | 7.3 | 47.8 | 44.9 |
| 21.9 | 22.7 | 55.4 | 11.8 | 38.4 | 49.8 |
| 16.2 | 31.0 | 52.8 | 16.2 | 31.0 | 52.8 |

EJERCICIO 12

Se desea emplear éter isopropílico para extraer ácido acético de 25 kg de solución acuosa al 47% en peso. Determinar la masa de ácido acético extraída si la alimentación se trata en una sola etapa con 40 kg de éter.

RESPUESTA: 6.25 kg

EJERCICIO 12+1

Se desea emplear éter isopropílico para extraer ácido acético de 25 kg de solución acuosa al 47% en peso. Determinar la masa de ácido acético extraída si la alimentación se trata en cuatro etapas en corriente cruzada, a cada una de las cuales se alimenta 10 kg de éter.

RESPUESTA: 8.66 kg

EJERCICIO 12+2

Se desea emplear éter isopropílico para extraer ácido acético de una solución acuosa al 47% en peso, mediante extracción en múltiples etapas a contracorriente. El flujo de alimentación es 25 kg/min, y el refinado que sale de la última etapa no debe tener más de 4% peso de ácido acético. Determinar (A) el número necesario de etapas de equilibrio, si el flujo de solvente es 40 kg/min, (B) el flujo másico de ácido acético extraído.

RESPUESTA: (A) 7 etapas, (B) 11.3 kg/min

EJERCICIO 15

Se va a lixiviar con agua el sulfato de cobre de un mineral tostado, en tres etapas a flujo cruzado. Se procesarán 1000 kg/h de mineral que contiene 19% en peso de sulfato, 76% de ganga y 5% de humedad, y el flujo de agua a cada etapa será de 14 LPM. Los lodos tienen una retención constante de solución, de 0.8 kg de solución por cada kg de ganga. Determinar la cantidad de sulfato extraído.

RESPUESTA:

EJERCICIO 16

Adaptado de Daham (2015) "Mass Transfer" <https://ceng.tu.edu.iq/ched/images/lectures/chem-lec/st3/c3/Lectures-Mass%20Transfer-2.pdf>

Se desea emplear éter etílico para extraer aceite de hígado de pescado en un sistema de lixiviación a contracorriente. La alimentación será 1000 kg/h de hígado, que contiene 26% peso de aceite. El extracto que sale de la primera etapa debe ser 70% peso aceite. El refinado que sale de la última etapa no debe contener más de 1% peso de aceite. Los datos para la línea de flujos inferiores se muestran en la tabla. Determinar (A) el flujo necesario de solvente, y (B) el número de etapas de equilibrio necesarias.

| kg solución / kg inerte | kg aceite / kg solución |
|-------------------------|-------------------------|
| 0.205 | 0 |
| 0.286 | 0.2 |
| 0.405 | 0.4 |
| 0.599 | 0.6 |
| 0.719 | 0.81 |

RESPUESTA: (A) 261 kg/h, (B) 7 etapas

Unidad 3 – Humidificación

EJERCICIO 17

Para aire a 1 atm, con las condiciones indicadas, determinar el dato pedido empleando la carta psicrométrica:

- (A) temperatura de bulbo seco 76 °C y humedad absoluta 0.08 kg agua/kg aire seco, ¿cuál es la humedad relativa?
- (B) temperatura de bulbo seco 4 °C y humedad relativa 80%, ¿cuál es la humedad absoluta?
- (C) temperatura de bulbo seco 106 °C y humedad absoluta 0.129 kg H₂O/kg AS, ¿cuál es la temperatura de bulbo húmedo?
- (D) temperatura de bulbo seco 21 °C y temperatura de bulbo húmedo 15 °C, ¿cuál es la humedad relativa?

RESPUESTA: (A) $\phi = 29\%$, (B) $Y = 0.0038$ kg H₂O/kg AS, (C) $T_w = 60$ °C, (D) $\phi = 53\%$

EJERCICIO 18

Se va a tomar aire ambiente ($T = 15$ °C, $T_w = 4.5$ °C) y se va a calentar, saturar adiabáticamente y calentar de nuevo, para obtener una corriente de 186 m³/h de aire a 33 °C y 40% de humedad.

- (A) Trazar el proceso en la carta psicrométrica. Determinar la temperatura de salida del primer calentador y la temperatura de salida del saturador adiabático.
- (B) Calcular el flujo de aire seco, en kg/h.
- (C) Calcular la cantidad de agua evaporada en el saturador adiabático.

RESPUESTA: (A) 47 °C, 15.7 °C, (B) 210.5 kg AS/h, (C) 2.37 kg/h

EJERCICIO 19

Se pretende deshumidificar una corriente de 1200 m³/h de aire ($T = 20$ °C, 70% humedad relativa) enfriándolo hasta 2 °C para condensar parte del agua y luego recalentándolo hasta 20 °C. Determinar la cantidad de agua condensada en el enfriador, así como los requerimientos energéticos de enfriamiento y calentamiento.

RESPUESTA: 8.09 kg H₂O/h, 46.4 MJ/h en el enfriador, 25.9 MJ/h en el calentador.

Unidad 4 – Secado

EJERCICIO 20

Los siguientes datos corresponden al peso de un material (humedad inicial 40%, en base húmeda) durante un proceso de secado:

| Tiempo (min) | 0 | 20 | 30 | 40 | 45 | 55 | 60 | 75 | 80 | 100 | 120 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Peso (kg) | 4.700 | 4.365 | 4.212 | 4.041 | 3.963 | 3.799 | 3.732 | 3.601 | 3.565 | 3.447 | 3.398 |

El material tiene un área expuesta al secado de 0.749 m². Graficar la curva de velocidad de secado, identificando la humedad crítica (si existe), la velocidad de secado en el periodo antecrítico, y la humedad de equilibrio.

RESPUESTA: $X_c = 0.375$ kg H₂O/kg SS, $W_c = 1.29$ kg H₂O/m²·h, $X^* = 0.183$ kg H₂O/kg SS.