Por lo que $N_e/N_s = 1.184$. Además, $N_e + N_s = 1.184\ N_s + N_s = N = 11.0$ etapas.

Resolviendo, $N_s = 5.0$ y $N_e = 6.0$, esto significa que el plato de alimentación está a 6.0 platos de la parte alta.

PROBLEMAS

11.1-1. ***Regla de las fases para un sistema de vapor.*** Calcule el número de grados de libertad para el sistema NH_3-agua existiendo una sola fase de vapor. ¿Qué variables se pueden fijar?

Respuesta: $F = 3$ grados de libertad; las variables T, P, y_A

11.1-2. ***Punto de ebullición y ley de Raoult.*** Con los datos de la tabla 11.1-1, proceda a lo siguiente para el sistema benceno-tolueno:

a) Calcule y_A y x_A a 378.2 K, con la ley de Raoult.

b) ¿Podrá hervir una mezcla con composición $x_A = 0.40$ a 358.2 K y 101.32 kPa de presión? De no ser así, ¿a qué temperatura hervirá y cuál será la composición del primer vapor que se desprenda?

11.1-3. ***Cálculo del diagrama de puntos de ebullición.*** A continuación se muestran datos de presión de vapor para el sistema hexano-octano:

		Presión de vapor			
		n-Hexano		*n-Octano*	
T(°F)	*T(°C)*	*kPa*	*mm Hg*	*kPa*	*mm Hg*
155.7	68.7	101.3	760	16.1	121
175	79.4	136.7	1025	23.1	173
200	93.3	197.3	1480	37.1	278
225	107.2	284.0	2130	57.9	434
258.2	125.7	456.0	3420	101.3	760

a) Calcule y grafique los datos xy a una presión total de 101.32 kPa, usando la ley de Raoult.

b) Construya el diagrama de puntos de ebullición.

11.2-1. ***Contacto de una sola etapa para un sistema vapor-líquido.*** Una mezcla de 100 mol que contiene 60% mol de *n*-pentano y 40% mol de *n*-heptano se vaporiza a 101.32 kPa abs de presión hasta que se producen 40 mol de vapor y 60 mol de líquido en equilibrio. Esto se lleva a cabo en un sistema de una sola etapa y el vapor y el líquido se mantienen en contacto entre sí hasta que la vaporización es completa. Los datos de equilibrio se muestran en el ejemplo 11.3-2. Calcule la composición del vapor y del líquido.

11.3-1. ***Volatilidad relativa de un sistema binario.*** Usando los datos de equilibrio para el sistema *n*-pentano-*n*-heptano del ejemplo 11.3-2, calcule la volatilidad relativa para cada concentración y grafique α en función de la composición de líquido x_A.

11.3-2. ***Comparación de destilación diferencial y repentina.*** Una mezcla de 100 kg mol que contiene 60% mol de *n*-pentano (A) y 40% de mol de *n*-heptano (B) se vaporiza a 101.32 kPa de presión en condiciones diferenciales hasta destilar 40 kg mol. Use los datos de equilibrio del ejemplo 11.3-2:

a) ¿Cuál es la composición promedio del vapor total destilado y la composición del líquido remanente?

b) Si esta misma vaporización se lleva a cabo en una destilación de equilibrio o instantánea y se destilan 40 kg mol, ¿cuál será la composición del vapor destilado y la del líquido remanente?

Respuesta: a) $x_2 = 0.405$, $y_{prom} = 0.892$; b) $x_2 = 0.430$, $y_2 = 0.854$

11.3-3. ***Destilación diferencial de benceno-tolueno.*** Una mezcla que contiene 70% mol de benceno y 30% mol de tolueno se destila en condiciones diferenciales a 101.32 kPa (1 atm). Se vaporiza un total de un tercio de los moles en la alimentación. Calcule la composición promedio del destilado y la composición del líquido remanente. Use los datos de equilibrio de la tabla 11.1-1.

11.3-4. ***Destilación de etilanilina con arrastre de vapor.*** Una mezcla contiene 100 kg de H_2O y 100 kg de etilanilina (peso molecular = 121.1 kg/kg mol), inmiscible en agua. El compuesto orgánico tiene una pequeña cantidad de impurezas no volátiles disueltas. Para purificar, la etilanilina se destila con arrastre de vapor, haciendo burbujear vapor saturado en la mezcla a presión total de 101.32 kPa (1 atm). Determine el punto de ebullición de la mezcla y la composición del vapor. La presión de vapor de cada uno de los componentes puros es como sigue (T1):

Temperatura		P_A *(agua)*	P_B *(etilanilina)*
K	*°C*	*kPa*	*kPa*
353.8	80.6	48.5	1.33
369.2	96.0	87.7	2.67
372.3	99.15	98.3	3.04
386.4	113.2	163.3	5.33

11.3-5. ***Destilación de benceno con arrastre de vapor.*** Una mezcla de 50 g mol de benceno líquido y 50 g mol de agua hierve a 101.32 kPa. (El benceno líquido es inmiscible en agua.) Determine el punto de ebullición de la mezcla y la composición del vapor. ¿Cuál es el primer componente que se elimina por completo del destilador? Los datos de presión de vapor de los componentes puros son:

Temperatura		P_{agua}	$P_{benceno}$
K	*°C*	*(mm Hg)*	*(mm Hg)*
308.5	35.3	43	150
325.9	52.7	106	300
345.8	72.6	261	600
353.3	80.1	356	760

11.4-1. ***Destilación por medio del método de McCabe-Thiele.*** Una columna de rectificación se alimenta con 100 kg mol/h de una mezcla de 50% mol de benceno y 50% mol de tolueno a 101.32 kPa de presión absoluta. La alimentación es un líquido a su punto de ebullición. El destilado debe contener 90% mol de benceno y el residuo 10% mol de benceno. La relación de reflujo es 4.52:1. Calcule los kg mol/h de destilado, los kg mol/h de residuo y el número de platos teóricos necesarios por medio del método de McCabe-Thiele.

Respuesta: $D = 50$ kg mol/h, $W = 50$ kg mol/h, 4.9 platos teóricos más un hervidor.

11.4-2. ***Rectificación de una mezcla de heptano-etilbenceno.*** Se desea fraccionar una alimentación de líquido saturado de 200 mol/h al punto de ebullición, que contiene 42% mol de heptano y 58% mol de etilbenceno a 101.32 kPa abs, para obtener un destilado con 97% mol de heptano

y un residuo que contenga 1.1% mol de heptano. La relación de reflujo es 2.5:1. Calcule las mol/h de destilado, mol/h de residuo, el número teórico de platos y el número de platos de alimentación. A continuación se proporcionan los datos de equilibrio a 101.32 kPa abs para la fracción mol de *n*-heptano x_H y y_H:

Temperatura				*Temperatura*			
K	°C	x_H	y_H	*K*	°C	x_H	y_H
409.3	136.1	0	0	383.8	110.6	0.485	0.730
402.6	129.4	0.08	0.230	376.0	102.8	0.790	0.904
392.6	119.4	0.250	0.514	371.5	98.3	1.000	1.000

Respuesta: $D = 85.3$ mol/h, $W = 114.7$ mol/h, 9.5 platos más un hervidor, la alimentación se introduce en el plato 6 contando desde la parte superior.

11.4-3. ***Solución gráfica para una razón de reflujo mínima y total.*** Calcule las siguientes variables por medio de métodos gráficos, para la rectificación del problema 11.4-1, donde se destila una alimentación líquida equimolar de benceno y tolueno para obtener un destilado de composición $x_D = 0.90$ y residuo de composición $x_W = 0.10$:

a) Razón de reflujo mínimo, R_m.
b) Número mínimo de platos teóricos y reflujo total.

Respuesta: a) $R_m = 0.91$; b) 4.0 platos teóricos más un hervidor.

11.4-4. ***Número mínimo de platos teóricos y razón de reflujo mínimo.*** Determine la relación de reflujo mínimo R_m y el número mínimo de platos teóricos con reflujo total para la rectificación de una mezcla de heptano y etilbenceno, como la del problema 11.4-2. Proceda por medio de métodos gráficos de McCabe-Thiele.

11.4-5. ***Rectificación mediante una alimentación parcialmente vaporizada.*** Se desea fraccionar una alimentación total de 200 mol/h que tiene una composición total de 42% mol de heptano y 58% mol de etilbenceno a 101.3 kPa de presión, para obtener un destilado que contenga 97% mol de heptano y residuo con 1.1% mol de heptano. La alimentación entra a la torre parcialmente vaporizada, por lo que 40% mol es líquido y 60% mol es vapor. Los datos de equilibrio son los del problema 11.4-2. Calcule:

a) Moles por hora de destilado y de residuo.
b) Razón de reflujo mínimo R_m.
c) Etapas mínimas y platos teóricos con reflujo total.
d) Número teórico de platos que se requieren para una razón de reflujo de operación de 2.5:1. Compare con los resultados del problema 11.4-2, que usa alimentación de líquido saturado.

11.4-6. ***Destilación mediante una alimentación de vapor.*** Repita el problema 11.4-1 pero con una alimentación que es vapor saturado a su punto de rocío. Calcule lo siguiente:

a) Razón de reflujo mínimo R_m.
b) Número mínimo de platos teóricos con reflujo total.
c) Número teórico de platos con una razón de reflujo de operación de 1.5 (R_m).

11.4-7. ***Torre de enriquecimiento para benceno-tolueno.*** En una torre de enriquecimiento se procesan 100 kg mol/h de una alimentación de vapor saturado que contiene 40% mol de benceno (*A*) y 60% mol de tolueno (*B*) a 101.32 kPa abs. El destilado debe contener 90% mol de benceno. La razón de reflujo se fija a un valor de 4.0:1. Calcule las mol kg/h de destilado *D* y el residuo *W*, así como sus composiciones. Además, calcule el número de platos teóricos que se requieren.

Respuesta: $D = 20$ kg mol/h, $W = 80$ kg mol/h, $x_W = 0.275$

11.4-8. ***Torre de empobrecimiento.*** Una mezcla líquida que contiene 10% mol de *n*-heptano y 90% mol de *n*-octano se alimenta a su punto de ebullición por la parte superior de una torre de empobrecimiento a 101.32 kPa abs. El residuo debe contener 98% mol de *n*-octano. Se extraen 2 moles de vapor por cada 3 moles de alimentación. Calcule la composición de vapor y el número de platos teóricos requeridos. Los datos de equilibrio que se muestran a continuación corresponden a fracción mol de *n*-heptano:

x	y	x	y
0.284	0.459	0.039	0.078
0.097	0.184	0.012	0.025
0.067	0.131		

11.4.9. ***Torre de empobrecimiento e inyección directa de vapor.*** Una corriente de alimentación líquida a su punto de ebullición contiene 3.3% mol etanol y 96.7% mol de agua y entra por el plato superior de una torre de empobrecimiento. Se inyecta vapor saturado directamente al líquido en el fondo de la torre. El vapor superior que se extrae contiene 99% del alcohol de la alimentación. Suponga un derrame equimolar para este problema. La tabla inferior contiene los datos de equilibrio para la fracción mol de alcohol a 101.32 kPa de (1 atm abs):

x	y	x	y
0	0	0.0296	0.250
0.0080	0.0750	0.033	0.270
0.020	0.175		

a) Para un número infinito de etapas teóricas, calcule el mínimo de moles de vapor necesarias por cada mol de alimentación. (*Nota*: Asegúrese de graficar la línea *q*.)
b) Empleando el doble de mínimo de moles de vapor, calcule el número de etapas teóricas necesarias, la composición del vapor superior y la composición del residuo.

Respuesta: a) 0.121 moles de vapor/mol de alimentación;
b) 5.0 etapas teóricas, $x_D = 0.135$, $x_W = 0.00033$

11.5-1. ***Eficiencia de Murphree y número real de platos.*** Para la destilación de heptano y etilbenceno del problema 11.4-2, se estima que la eficiencia de platos de Murphree es 0.55. Determine el número real de platos que se necesitan escalonando los platos y usando una eficiencia de platos de 0.55. Además, calcule la eficiencia total de los platos E_O.

11.6-1. ***Uso del método de entalpía y concentración para destilar una solución de etanol y agua.*** Una mezcla de 50% en peso de etanol y 50% en peso de agua que es un líquido saturado en el punto de ebullición, se va a destilar a 101.3 3 kPa para dar un destilado que contenga 85% en peso de etanol y un residuo que contenga 3% en peso de etanol. La tasa de alimentación es de 453.6 kg/h y se usará una razón de reflujo de 1.5. Utilice los datos de equilibrio y entalpía del Apéndice A.3. Observe que los datos están dados en fracción peso y en kJ/kg. Utilice estas unidades de manera congruente al graficar los datos de entalpía y concentración y los datos de equilibrio. Haga lo siguiente.
a) Calcule la cantidad de destilado y de residuo.
b) Calcule el número de platos teóricos necesarios.
c) Calcule las cargas del condensador y del hervidor.

Respuesta: a) $D = 260.0$ kg/h, $W = 193.6$ kg/h
b) 3.9 platos más hervidor
c) $q_C = 698\ 750$ kJ/h, $q_R = 704\ 770$ kJ/h

11.6-2. ***Destilación de una solución de etanol-agua usando el método de entalpía-concentración.*** Repita el ejemplo 11.6-1, ahora con una relación de reflujo de 2.0 en lugar de 1.5.

Respuesta: 3.6 platos teóricos más hervidor

11.6-3. ***Reflujo mínimo y número teórico de platos.*** Se desea destilar una alimentación de etanol-agua que contiene 60% en peso de etanol a 101.32 kPa de presión, para obtener un destilado que contenga 85% en peso de etanol y un residuo que contenga 2% en peso de etanol. La velocidad de alimentación es de 10000 kg/h y su entalpía es 116.3 kJ/kg (50 btu/lb_m). Utilice de manera congruente las unidades de kg/h, fracción de peso y kJ/kg.

a) Calcule las cantidades de destilado y de residuo.

b) Determine la razón de reflujo mínimo usando los datos de entalpía-concentración del Apéndice A.3.

c) Usando 2.0 veces la razón de reflujo mínimo, determine el número teórico de platos que se necesitan.

d) Calcule las cargas de calor del condensador y del hervidor.

e) Determine el número mínimo de platos teóricos con reflujo total.

Respuesta: b) $R_m = 0.373$

c) 4.4 platos teóricos más hervidor

d) $q_C = 3634$ kW, $q_R = 4096$ kW

e) 2.8 platos teóricos más hervidor.

11.6-4. ***Destilación de una alimentación de benceno y tolueno utilizando el método de entalpía y concentración.*** Una alimentación líquida de 100 kg mol/h de benceno-tolueno en el punto de ebullición contiene 55% mol de benceno y 45% mol de tolueno. Se destila a 101.32 kPa de presión para dar un destilado con $x_D = 0.98$ y un residuo de $x_W = 0.04$. Utilizando una razón de reflujo de 1.3 veces el mínimo y el método de entalpía y concentración, haga lo siguiente.

a) Determine el número teórico de platos necesarios.

b) Calcule las cargas de calor en el condensador y en el hervidor.

c) Determine el número mínimo de platos teóricos a reflujo total.

11.6-5. ***Uso de la gráfica de entalpía y concentración.*** Para el sistema de benceno y tolueno, haga lo siguiente:

a) Grafique los datos de entalpía y concentración usando los valores de la tabla 11.6-2. Para un valor de $x = 0.60 = y$, calcule la entalpía h del líquido saturado y la entalpía H del vapor saturado y grafique esos datos.

b) Una mezcla contiene 60 mol de benceno y 40 mol de tolueno. Esta mezcla se calienta hasta que se producen 30 mol de vapor. La mezcla está en equilibrio. Determine la entalpía de esta mezcla general y grafique este punto sobre el diagrama de entalpía-concentración.

11.7-1. ***Vaporización instantánea de una alimentación de multicomponentes.*** Para la alimentación a la torre de destilación del ejemplo 11.1.-1, calcule lo siguiente.

a) El punto de rocío de la alimentación y la composición del líquido en equilibrio. (*Nota:* El punto de ebullición de 70 °C ya se había calculado.)

b) La temperatura y la composición de ambas fases cuando el 40% de la alimentación se vaporizó en una destilación instantánea.

Respuesta: a) 107 °C, $x_A = 0.114$, $x_B = 0.158$, $x_C = 0.281$, $x_D = 0.447$;
b) 82 °C, $x_A = 0.260$, $x_B = 0.254$, $x_C = 0.262$, $x_D = 0.224$;
$y_A = 0.610$, $y_B = 0.244$, $y_C = 0.107$, $y_D = 0.039$

11.7-2. ***Punto de ebullición, punto de rocío y vaporización instantánea.*** En seguida se da la composición de una alimentación líquida en fracción molar: n-butano ($x_A = 0.35$), n-pentano,

($x_B = 0.20$), n-hexano, ($x_C = 0.25$), n-heptano, ($x_D = 0.20$). A una presión de 405.3 kPa, calcule lo que sigue:

a) El punto de ebullición y la composición del vapor en equilibrio.
b) El punto de rocío y la composición del líquido en equilibrio.
c) La temperatura y la composición de ambas fases cuando el 60% de la alimentación se ha vaporizado en una destilación instantánea.

11.7-3. ***Vaporización de una mezcla de alcoholes de multicomponentes.*** Los datos de vapor-presión para los siguientes alcoholes se dan en seguida.

	Presión de vapor (mm Hg)			
T(°C)	*Metanol*	*Etanol*	*n-propanol*	*n-butanol*
50	415	220.0	88.9	33.7
60	629	351.5	148.9	59.2
65	767	438	190.1	77.7
70	929	542	240.6	99.6
75	1119	665	301.9	131.3
80	1339	812	376.0	165.0
85	1593	984	465	206.1
90	1884	1185	571	225.9
100	2598	1706	843	387.6

La siguiente composición es la de una mezcla líquida de alcoholes que se va a alimentar a una torre de destilación a 101.32 kPa: alcohol metílico ($x_A = 0.30$), alcohol etílico ($x_B = 0.20$), alcohol n-propílico ($x_C = 0.15$), y alcohol n-butílico ($x_D = 0.35$). Calcule lo siguiente suponiendo que la mezcla sigue la ley de Raoult,

a) El punto de ebullición y la composición del vapor en equilibrio.
b) El punto de rocío y la composición del líquido en equilibrio.
c) La temperatura y la composición de ambas fases cuando el 40% de la alimentación se ha vaporizado en una destilación instantánea.

Respuesta: a) 83 °C, $y_A = 0.589$, $y_B = 0.241$, $y_C = 0.084$, $y_D = 0.086$
b) 100 °C, $x_A = 0.088$, $x_B = 0.089$, $x_C = 0.136$, $x_D = 0.687$

11.7-4. ***Reflujo total, reflujo mínimo, número de etapas.*** La siguiente alimentación de 100 mol/h en el punto de ebullición y a 405.3 kPa de presión se alimenta a una torre fraccionadora: n-butano ($x_A = 0.40$), n-pentano ($x_B = 0.25$), n-hexano ($x_C = 0.20$) y n-heptano ($x_D = 0.15$). Esta alimentación se destila de manera que el 95% del n-pentano se recupera en el destilado y el 95% del n-hexano se recupera en el residuo. Calcule lo siguiente.

a) Las moles por hora y la composición del destilado y el residuo.
b) Las temperaturas de la parte superior y del fondo de la torre.
c) Las etapas mínimas para el reflujo total y la distribución de otros componentes (componentes traza) en el destilado y en el residuo, es decir, los moles y las fracciones molares. [También corrija las composiciones y moles del inciso (a) para las trazas.]
d) La razón de reflujo mínimo utilizando el método de Underwood.
e) El número de etapas teóricas a una razón de reflujo de operación de 1.3 veces el mínimo, utilizando la correlación de Erbar-Maddox.
f) La ubicación del plato de alimentación usando el métodod de Kirkbride.

Respuesta: a) $D = 64.75$ mol/h, $x_{AD} = 0.6178$, $x_{BD} = 0.3668$, $x_{CD} = 0.0154$, $x_{DD} = 0$; $W = 35.25$ mol/h, $x_{AW} = 0$, $x_{BW} = 0.0355$, $x_{CW} = 0.5390$, $x_{DW} = 0.4255$;
b) arriba 66 °C; abajo 134 °C; $N_m = 7.14$ etapas; composiciones de las trazas, $x_{AW} = 1.2 \times 10^{-4}$, $x_{DD} = 4.0 \times 10^{-5}$;
d) $R_m = 0.504$;

e) $N = 16.8$ etapas;
f) $N_e = 9.1$ etapas, $N_s = 7.7$ etapas, alimentación en 9.1 etapas desde la parte superior.

11.7-5. ***Diseño por método corto de una torre de destilación de multicomponentes.*** Una alimentación formada por una parte líquida y una parte de vapor ($q = 0.30$) a 405.4 kPa se alimenta a razón de 1000 mol/h a una torre de destilación. La composición global de la alimentación es *n*-butano ($x_A = 0.35$), *n*-pentano ($x_B = 0.30$), *n*-hexano ($x_C = 0.20$) y *n*-heptano ($x_D = 0.15$). La alimentación se destila de modo que el 97% de *n*-pentano se recupera en el destilado y el 85% del *n*-hexano se recupera en el residuo. Calcule lo siguiente:

a) La cantidad y la composición de los productos y las temperaturas en la parte superior.
b) El número de etapas en el reflujo total y la distribución de los otros componentes en los productos.
c) La relación de reflujo mínimo, el número de etapas a 1.2 R_m y la ubicación del plato de alimentación.

11.7-6. ***Destilación de una mezcla de alcoholes de multicomponentes.*** Una alimentación de 30% mol de metanol (*A*), 20% de etanol (*B*), 15% de *n*-propanol (*C*) y 35% de *n*-butanol (*D*) se destila a 101.32 kPa para dar una composición del destilado que contiene 95.0% mol de metanol y una composición residual que contiene 5.0% de metanol y los otros componentes como se calculó. La alimentación está por debajo del punto de ebullición, de modo que $q = 1.1$. La razón de reflujo operativa es 3.0. Suponga que se cumple la ley de Raoult y utilice los datos de vapor-presión del problema 11.7-3. Calcule lo siguiente:

a) La composición y las cantidades del destilado y el residuo para una alimentación de 100 mol/h.
b) Las temperaturas de la parte superior y del residuo y el número de etapas a reflujo total. (Calcule también la distribución de los otros componentes.)
c) La relación de reflujo mínimo, el número de etapas a $R = 3.00$ y la ubicación del plato de alimentación.

Respuesta: a) $D = 27.778$ mol/hr $x_{AD} = 0.95$, $x_{BD} = 0.05$, $x_{CD} = 0$, $x_{DD} = 0$;
$W = 72.222$ mol/h, $x_{AW} = 0.0500$, $x_{BW} = 0.2577$, $x_{CW} = 0.2077$, $x_{DW} = 0.4846$;
b) 65.5 °C, temperatura superior; 94.3 °C, temperatura del fondo; $N_m = 9.21$ etapas, $x_{CD} = 3.04 \times 10^{-5}$, $x_{DD} = 8.79 \times 10^{-7}$ (composición de las trazas);
c) $R_m = 2.20$, $N = 16.2$ etapas, $N_s = 7.6$, $N_e = 8.6$, alimentación en la etapa 8.6 desde la parte superior.

11.7-7. ***Método corto de diseño para la destilación de una mezcla ternaria.*** Una alimentación líquida a su punto de burbuja se va a destilar en una torre de platos para producir el destilado y el residuo como sigue. Alimentación, $x_{AF} = 0.047$; $x_{BF} = 0.072$, $x_{CF} = 0.881$; destilado, $x_{AD} = 0.1260$; $x_{BD} = 0.1913$, $x_{CD} = 0.6827$; fondos, $x_{AW} = 0$, $x_{BW} = 0.001$, $x_{CW} = 0.999$. Los valores α promedio por usar son $\alpha_A = 4.19$, $\alpha_B = 1.58$, $\alpha_C = 1.00$.

a) Para una tasa de alimentación de 100 mol/h, calcule *D* y *W*, el número de etapas a reflujo total y la distribución (concentración) de *A* en el residuo.
b) Calcule R_m y el número de etapas a 1.25 R_m.