$$\Delta\hat{H}_{C,\mathrm{HCHO}} = \Delta\hat{H}^{\circ}_{f\ \mathrm{HCHO}} + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} C_{p\ \mathrm{HCHO}}\,dT$$

$$= -115{,}90 + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} \left(34{,}28\times10^{-3} + 4{,}268\times10^{-5}T - 8{,}694\times10^{-12}T^{3}\right)dT$$

$$= -115{,}90 + 34{,}28\times10^{-3}(150-25) + 4{,}268\times10^{-5}(150^{2}-25^{2})/2\ \ldots$$

$$\ldots - 8{,}694\times10^{-12}(150^{4}-25^{4})/4$$

$$= -111{,}15\ \mathrm{kJ/gmol\ HCHO}$$

Haciendo cálculos similares para los otros componentes, los cuales no se muestran en todo detalle en lo sucesivo, se obtienen los siguientes términos:

$$\Delta\hat{H}_{C,\mathrm{CO_2}} = \Delta\hat{H}^{\circ}_{f\ \mathrm{CO_2}} + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} C_{p\ \mathrm{CO_2}}\,dT = -393{,}50 + 4{,}99 = -388{,}51\ \mathrm{kJ/gmol\ CO_2}$$

$$\Delta\hat{H}_{C,\mathrm{H_2O(v)}} = \Delta\hat{H}^{\circ}_{f\ \mathrm{H_2O(v)}} + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} C_{p\ \mathrm{H_2O(v)}}\,dT = -241{,}83 + 4{,}275 = -237{,}56\ \mathrm{kJ/gmol\ H_2O}$$

$$\Delta\hat{H}_{C,\mathrm{O_2}} = \Delta\hat{H}^{\circ}_{f\ \mathrm{O_2}} + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} C_{p\ \mathrm{O_2}}\,dT = 0 + 3{,}775 = +3{,}775\ \mathrm{kJ/gmol\ O_2}$$

$$\Delta\hat{H}_{C,\mathrm{N_2}} = \Delta\hat{H}^{\circ}_{f\ \mathrm{N_2}} + \int_{25^{\circ}\mathrm{C}}^{150^{\circ}\mathrm{C}} C_{p\ \mathrm{N_2}}\,dT = 0 + 3{,}66 = +3{,}66\ \mathrm{kJ/gmol\ N_2}$$

La entalpía total del proceso, calculada a través de la ecuación (4.50), será:

$$\Delta H = \left[\left(60\ \mathrm{gmol\ CH_4}\times -69{,}96\ \mathrm{kJ/gmol\ CH_4}\right) + \left(30\ \mathrm{gmol\ HCHO}\times -111{,}15\ \mathrm{kJ/gmol\ HCHO}\right)\ldots\right.$$

$$\ldots + \left(10\ \mathrm{gmol\ CO_2}\times -388{,}51\ \mathrm{kJ/gmol\ CO_2}\right) + \left(50\ \mathrm{gmol\ H_2O}\times -237{,}56\ \mathrm{kJ/gmol\ H_2O}\right)\ldots$$

$$\left.\ldots + \left(50\ \mathrm{gmol\ O_2}\times 3{,}775\ \mathrm{kJ/gmol\ O_2}\right) + \left(376\ \mathrm{gmol\ N_2}\times 3{,}66\ \mathrm{kJ/gmol\ N_2}\right)\right]\ldots$$

$$\ldots - \left[\left(100\ \mathrm{gmol\ CH_4}\times -74{,}85\ \mathrm{kJ/gmol\ CH_4}\right) + \left(100\ \mathrm{gmol\ O_2}\times 2{,}235\ \mathrm{kJ/gmol\ O_2}\right)\ldots\right.$$

$$\left.\ldots + \left(376\ \mathrm{gmol\ N_2}\times 2{,}187\ \mathrm{kJ/gmol\ N_2}\right)\right]$$

$$= -15292{,}1\ \mathrm{kJ} \approx -1{,}53\times10^{4}\ \mathrm{kJ}.$$

La cantidad de calor a extraer del proceso, para asegurar una buena operación del mismo, es de aproximadamente $1{,}53\times10^{4}$ kJ por minuto.

4.4 Ejercicios propuestos[17]

1. La entalpía específica del n-hexano líquido a 1,00 atm varía linealmente con la temperatura, y es igual a 6,15 cal/g cuando la temperatura es 30 ºC, en tanto que

[17] Adaptados de: *Problemas de balance de materia y energía.* Recuperado 08 de Mayo 2009 desde: http://www.unap.cl/metadot/index.pl?iid=18196&isa=Category

alcanza un valor igual a 30,8 cal/g cuando la temperatura es 50 ºC. (a) Determine una expresión que relacione $\hat{H}$ (cal/g) con la temperatura T (ºC). (b) Calcule la velocidad a la que debe extraerse calor para enfriar 350 kilogramos de n-hexano líquido desde 68 ºC hasta 20 ºC en 2 horas.

2. Una corriente de 100 kg/h de propileno gaseoso, $H_2C{=}CH{-}CH_3$, a 5 bares y 90 ºC era calentada hasta una temperatura de 310 ºC por medio de un serpentín que le suministraba el calor necesario para alcanzar dicha temperatura. Lamentablemente el sistema falló y se requiere en forma urgente evaluar la alternativa de usar otro equipo disponible que entrega 12 kW de calor. Determine la temperatura que alcanzaría el propileno con este último equipo y defina si recomienda su uso o no, indicando las consideraciones y cuidados que se deberían tener.
3. Se requiere precalentar un solvente haciéndolo pasar a través de un intercambiador de calor, en el cual el medio de calefacción es un aceite caliente. Las siguientes condiciones se aplican para cada corriente del intercambiador:

Características	Solvente	Aceite
Flujo volumétrico, m^3/h	128	96
Densidad relativa	0,60	0,70
Calor específico, kJ/kg-K	1,40	1,80
Temperatura de entrada, K	288	500

Si el solvente sale del intercambiador de calor a 390 K, ¿A qué temperatura sale el aceite? *Recuerde que: la densidad relativa, o gravedad específica, de una sustancia es el cociente entre la densidad de dicha sustancia y la densidad del agua.*

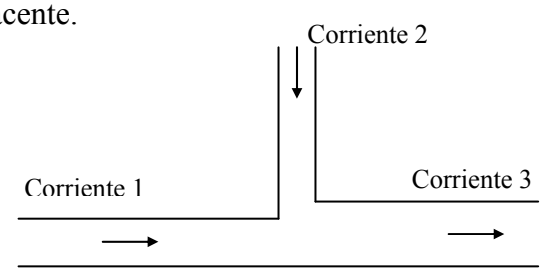
4. 150 litros de etanol líquido, C_2H_5OH, a 70 ºC y 130 litros de agua líquida a 27 ºC se mezclan en un recipiente cerrado y bien aislado. Despreciando la evaporación y el calor que se puede producir al mezclar los componentes: (a) dibuje y etiquete un diagrama de flujo de éste proceso; (b) calcule la temperatura final de la mezcla.
Utilice los siguientes datos:

Características	Etanol	Agua
Capacidad calorífica, Btu/lb-F	0,72	1,0
Densidad, kg/L	0,77	1,0

5. Una mezcla equimolar de benceno (B) y tolueno (T) a 10 ºC alimenta continuamente un recipiente donde se calienta la mezcla a 50 ºC. El producto líquido contiene 40,0 % en mol de benceno y el producto vapor 68,4 % en mol de benceno. (a) ¿Cuánto

calor debe transferirse a la mezcla por mol de alimentación? (b) ¿Cuánto calor debe transferirse por kilogramo de alimentación?

6. Dos flujos cuyas características se indican en la tabla adjunta se mezclan como lo indica la figura adyacente.

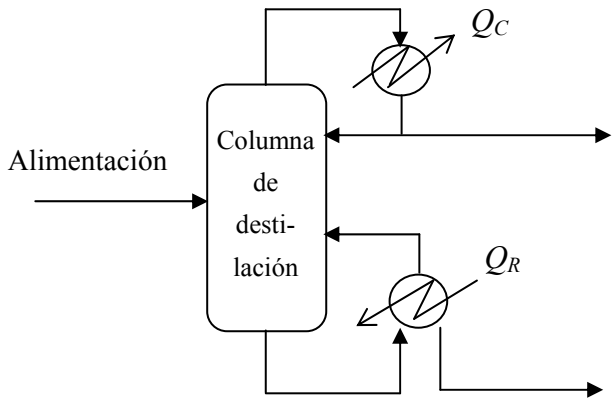


Características	Corriente 1	Corriente 2	Corriente 3
Caudal, L/h	245		
Densidad, g/mL	0,94	0,99	
Flujo másico, kg/h	230	205	435
Temperatura, ºC	12	60	
Estado de agregación	líquido	líquido	líquido
Capacidad calorífica, kcal/(kg.ºC)	1,10	1,10	

(a) Escriba el balance de materia para el punto de mezcla.
(b) Escriba el balance de energía para en el punto de mezcla.
(c) Determine la temperatura de la corriente de salida (Corriente 3).

7. Una mezcla que contiene 46,0 % en peso de acetona (CH_3COCH_3), 27,0 % de ácido acético (CH_3COOH) y 27,0 % de anhídrido acético ($CH_3CO\text{-}O\text{-}OCCH_3$) se destila a presión atmosférica. La alimentación entra a una columna de destilación a T= 348 K y a una velocidad de 15000 kg/h. El destilado (que sale por el tope de la torre de destilación) es esencialmente acetona pura, y el producto de la parte inferior contiene 1,00 % de la acetona que entra a la columna. El vapor de salida del tope de la columna entra a un condensador a 329 K y sale como líquido a 303 K. La mitad del condensado se extrae del sistema en tanto que el resto se retorna como reflujo a la columna. El líquido que sale por la base de la torre va a un calentador de vapor, donde es parcialmente evaporado. La fracción vaporizada (3,20 % de acetona, 73,8 % de ácido y 23,0 % de anhídrido acético) vuelve a la columna a una temperatura de 398 K, y el líquido residual, también a 398 K y en equilibrio con el vapor, constituye el producto inferior o también llamado producto de cola de la torre. Determine: (a)

las velocidades de flujo y las composiciones de los flujos de productos; (b) el calor que es necesario retirar en el condensador, Q_C (kJ/h).



Componente	Cp_l	Cp_v	$\Delta \hat{H}_v$
[kJ/(kg.K)] [kJ/(kg.K)]	[kJ/kg]		
Acetona	2,30	0,459	521
Acido Acético	2,18	0,688	407
Anhídrido Acético	?	0,751	?

4.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se dieron los fundamentos del balance de energía enfocándose en procesos químicos en estado estacionario, tanto en casos donde no ocurren reacciones químicas como en casos donde sí hay cambios químicos en los componentes.

Al igual que en el capítulo anterior, que trata sobre los balances de materia, es necesario hacer cumplir la ley de conservación de la energía. Esta condición implica escribir una ecuación adicional sobre el proceso en estudio y resolver el problema para el conjunto de ecuaciones resultantes de plantear los balances de materia y de energía en conjunto. En muchos problemas de complejidad mediana a mayor podrá ser necesario utilizar alguna herramienta matemática para resolver ecuaciones simultáneas, como Matlab® u otro *software* de análisis matemático. Sin embargo, para los fines de este texto y del usuario potencial del mismo, no se tratarán problemas de mayor complejidad.

Finalmente, hasta el presente capítulo se ha cubierto los aspectos más importantes a ser considerados al momento de analizar algún proceso físico, de naturaleza química o no

necesariamente. Se debe aclarar que quedan muchos otros temas por ser estudiados alrededor de los fundamentos explicados aquí para los balances de materia y de energía, pero los mismos no pueden ser cubiertos en un texto de carácter introductorio, como el aquí presentado, pues superan en tiempo y en complejidad el objetivo del curso al cual el presente texto está destinado: "Introducción a los Procesos Químicos".

4.6 Lecturas recomendadas

Se recomienda al lector leer los capítulos mencionados de los siguientes libros, así como revisar ciertos problemas resueltos y propuestos en dichos capítulos a fin de ejercitarse en los temas estudiados:

Felder R, y Rousseau R.W. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*, 3º Edición, Limusa Wiley, México. Capítulos: 7, 8 y 9.

Himmelblau D.M. (1997). *Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química*, 6º Edición, Prentice Hall Hispanoamericana, México. Capítulos: 5 y 6.