

# BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

## CAPITULO 1: BALANCES DE MATERIALES

### 1.1 INTRODUCCION

*Proceso:* Cualquier operación o serie de operaciones que produce un cambio físico o químico en una sustancia o en una mezcla de sustancias.

*Alimentación o entrada:* Sustancia que entra en un proceso.

*Producto o salida:* Sustancia que sale de un proceso.

*Unidad del proceso:* Cualquier aparato donde se lleva a cabo una de las operaciones del proceso.

*Flujos del proceso:* Sustancias que entran y que salen de una unidad del proceso. Se expresan como la masa o el volumen o las moles que entran o que salen por unidad de tiempo.

Para realizar balances de materiales o para supervisar un proceso o para modificar el mismo, un químico debe conocer las cantidades (en masa o en volumen), las velocidades de flujo (en unidades másicas, molares o volumétricas), las composiciones (en moles, en masa molar o en unidades de concentración) y las condiciones (presión o temperatura) de las sustancias que entran y salen de cada unidad del proceso.

#### 1.1.1 MASA Y VOLUMEN

La *densidad* de una sustancia es la masa por unidad de volumen de la sustancia ( $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{lb}_m/\text{pie}^3$ , etc.). El *volumen específico* de una sustancia es el volumen por unidad de masa de dicha sustancia ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ,  $\text{pie}^3/\text{lb}_m$ , etc.).

La densidad de una sustancia puede usarse como un factor de conversión para relacionar la masa y el volumen de una cantidad de sustancia.

El *peso específico* de una sustancia es el cociente de la densidad de la sustancia entre la densidad de una sustancia de referencia en condiciones específicas:  $PE = \rho/\rho_{\text{ref}}$ .

La sustancia de referencia para sólidos y líquidos es el agua a  $4^\circ\text{C}$  cuya densidad es  $1 \text{ g/cm}^3$  o  $62,43 \text{ lb}_m/\text{pie}^3$  a esa temperatura.

*Al multiplicar el peso específico de una sustancia por la densidad de la sustancia de referencia en cualesquiera unidades se obtiene la densidad de la sustancia en las mismas unidades.*

### 1.1.2 VELOCIDAD DE FLUJO

*Velocidad de flujo* es la velocidad a la que se transporta una sustancia a través de una línea de un proceso. Puede expresarse en unidades másicas (masa/tiempo), volumétricas (volumen/tiempo) o molares (moles/tiempo).

La densidad de un fluido puede utilizarse para convertir una velocidad de flujo volumétrico conocida de un flujo de un proceso en la velocidad de flujo másico de ese flujo, o viceversa.

La masa molar de una sustancia puede utilizarse para relacionar la velocidad de flujo másico de un flujo continuo de la sustancia con su correspondiente velocidad de flujo molar.

Los medidores más empleados para la velocidad de flujo son el rotámetro y el medidor de orificio.

### 1.1.3 COMPOSICIÓN

El peso atómico de un elemento es la masa de un átomo en una escala que asigna una masa de exactamente 12 al isótopo del carbono cuyo núcleo posee 6 protones y 6 neutrones. La masa molar (o peso molecular) de un compuesto es la suma de los pesos atómicos de los átomos que constituyen la molécula del compuesto.

Un *gramo mol* (g-mol, o mol en el sistema SI) de una sustancia es la cantidad de esa sustancia cuya masa en gramos es numéricamente igual a su masa molar. Un *kilogramo mol* (kg-mol o kmol) de una sustancia es la cantidad de esa sustancia cuya masa en kilogramos es numéricamente igual a su masa molar. Otros tipos de moles (lb-mol y ton-mol) se definen de modo similar.

*Si el peso molecular de una sustancia es  $M$ , entonces hay  $M$  g/mol,  $M$  kg/kmol y  $M$  lb<sub>m</sub>/lb-mol de esta sustancia.*

La masa molar puede utilizarse como un factor de conversión que relaciona la masa con el número de moles de una cantidad de sustancia.

Los mismos factores que se utilizan en la conversión de masa de una unidad a otra pueden utilizarse para convertir las unidades molares equivalentes: por ejemplo, hay 453,6 g/lb<sub>m</sub> y por tanto hay 453,6 mol/lb-mol, sin importar cuál es la sustancia involucrada. Un gramo-mol de cualquier sustancia contiene  $6,022 \times 10^{23}$  moléculas de esa sustancia.

La composición de una mezcla de sustancias que incluye la especie A puede definirse de las siguientes maneras:

*Porcentaje en masa de A* = 100 x fracción en masa = 100 x (masa de A/masa de la mezcla).

*Porcentaje en mol de A* = 100 x fracción molar de A = 100 x (moles de A/ moles totales).

*Concentración en masa de A* = masa de A/volumen de la mezcla.

*Concentración molar de A* = moles de A/volumen de la mezcla.

*Molaridad de una disolución* = gramos-mol del soluto/litro de disolución.

La concentración de una sustancia en una mezcla o en una disolución puede utilizarse como un factor de conversión para relacionar la masa (o moles) de un componente en una muestra de la mezcla con el volumen de la muestra, o para relacionar la velocidad de flujo másico (o molar) de un componente de un flujo continuo con la velocidad de flujo volumétrico del flujo.

#### 1.1.4 PRESIÓN Y TEMPERATURA

La *presión* es el cociente entre una fuerza y el área sobre la cual actúa la fuerza.

*Unidades de presión:* dinas/cm<sup>2</sup>, lb<sub>f</sub>/pul<sup>2</sup> o psi, N/m<sup>2</sup> o pascal Pa.

La *presión hidrostática* P de un fluido es la presión del fluido en la base de una columna de él:

$$P = P_0 + \rho (g/g_c) h$$

Donde P es la presión hidrostática,  $\rho$  es la densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>),  $g/g_c = 9,8066$  N/kg, h es la altura de la columna en metros y P<sub>0</sub> es la presión que se ejerce sobre la superficie superior de la columna en N/m<sup>2</sup>.

Como el área de la columna no aparece en la ecuación, ésta se puede aplicar a una columna de fluido tan estrecha o tan ancha como se desee.

Además de que la presión puede expresarse como una fuerza por unidad de área, ésta puede escribirse como una *columna* de un fluido particular; esto es, como la altura de una columna hipotética de este fluido que ejercería una determinada presión en su base, si la

presión en la parte superior de ésta fuese cero. Se puede hablar entonces de una presión de 14,7 psi, o en forma equivalente, de una presión (o columna) de 33,9 pie de H<sub>2</sub>O o 760 mm Hg.

*La equivalencia entre una presión P (fuerza/área) y la columna correspondiente P<sub>h</sub> (altura de un fluido) la proporciona la siguiente ecuación en la cual se considera P<sub>0</sub> = 0:*

$$P \text{ (fuerza/área)} = \rho \text{ (g/g}_c\text{)} P_h \text{ (columna del fluido).}$$

La relación entre la presión en la base de una columna de fluido de altura h y la presión en la parte superior es particularmente simple si se expresan estas presiones como columnas de fluido; por ejemplo, si la columna es de mercurio, entonces

$$P \text{ (mm Hg)} = P_0 \text{ (mm Hg)} + h \text{ (mm Hg)}$$

Las unidades mm Hg pueden sustituirse con cualquier otra unidad de longitud y cualquier otra sustancia química.

La *presión de la atmósfera* es la presión en la base de una columna de fluido (aire) localizada en el punto de la medición (por ejemplo, al nivel del mar). La presión P<sub>0</sub> en la parte superior de la columna es cero y ρ y g son los valores promedio de la densidad del aire y de la aceleración de la gravedad entre la parte superior de la atmósfera y el punto de medición. La presión atmosférica al nivel del mar tiene un valor de 760 mm Hg equivalente a 1 atmósfera.

Cuando la presión de cero corresponde al vacío absoluto, la presión de un fluido es *absoluta*. Muchos aparatos de medición de presión proporcionan la *presión manométrica* de un fluido o la presión en relación con la presión atmosférica. *Una presión manométrica de cero indica que la presión absoluta del fluido es igual a la presión atmosférica:*

$$P \text{ absoluta} = P \text{ manométrica} + P \text{ atmosférica.}$$

Las abreviaturas psia y psig se usan para denotar presiones absolutas y manométricas, respectivamente, en lb<sub>f</sub>/pul<sup>2</sup>.

Existen varios aparatos mecánicos usados para medir la presión de fluidos. En general, reciben el nombre de manómetros. Un manómetro muy utilizado es el de Bourdon que es un tubo hueco cerrado por uno de sus extremos y doblado en forma de C. El extremo abierto está en contacto con el fluido cuya presión se va a medir. Si la presión aumenta, el tubo se endereza produciendo el movimiento de rotación de una aguja unida al tubo y permite leer la presión sobre un disco.

Un manómetro es, en general, un tubo en forma de U que contiene un líquido de densidad conocida (fluido manométrico). Cuando los extremos del tubo están expuestos a diferentes presiones, el nivel del fluido disminuye en el brazo de alta presión y aumenta en

el otro brazo. La diferencia de presiones se calcula a partir de la diferencia de los niveles del líquido en los brazos.

Manómetro abierto: Uno de sus extremos está expuesto al fluido cuya presión se va a medir y el otro está abierto a la atmósfera.

Manómetro diferencial: Los dos extremos están expuestos al fluido cuya presión se va a medir.

Manómetro sellado: Hay vacío en uno de sus extremos. (Si el extremo abierto se expone a la atmósfera se tiene un barómetro).

Ecuación general manométrica:

$$P_1 + \rho_1 (g/g_c) d_1 = P_2 + \rho_2 (g/g_c) d_2 + \rho_f (g/g_c) h$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a los dos extremos del manómetro. La letra  $d$  indica la distancia desde la parte superior del manómetro hasta el nivel del fluido manométrico. El símbolo  $\rho$  denota densidad del fluido de cada extremo siendo  $\rho_f$  la del fluido manométrico. La letra  $h$  corresponde a la diferencia entre  $d_1$  y  $d_2$ .

Como en un manómetro diferencial los fluidos 1 y 2 son el mismo la ecuación se reduce a:

$$P_1 - P_2 = (\rho_f - \rho) (g/g_c) h. \text{ \{Ecuación diferencial manométrica\}}$$

La *temperatura* de una sustancia en un estado de agregación en particular (sólido, líquido o gas) es una medida de la energía cinética promedio que poseen las moléculas que forman la sustancia. Como esta energía no puede medirse directamente, la temperatura se determina midiendo una propiedad física cuyo valor dependa de la temperatura: resistencia eléctrica de un conductor (*termómetro de resistencia*), voltaje en la unión de dos metales diferentes (*termopar*), espectro de radiación emitida (*pirómetro*), volumen de una masa fija de un fluido (*termómetro*).

Las dos escalas más comunes de temperatura se definen utilizando el punto de congelación ( $T_f$ ) y el punto de ebullición ( $T_b$ ) del agua a una presión de 1 atmósfera.

*Escala Celsius (o centígrada)*: A  $T_f$  se le asigna un valor de  $0^\circ\text{C}$  y a  $T_b$  se le asigna un valor de  $100^\circ\text{C}$ . El *cero absoluto* (la temperatura más baja que se puede alcanzar) corresponde a  $-273,15^\circ\text{C}$ .

*Escala Fahrenheit*: A  $T_f$  se le asigna un valor de  $32^\circ\text{F}$  y a  $T_b$  se le asigna uno de  $212^\circ\text{F}$ . El *cero absoluto* corresponde a  $-459,67^\circ\text{F}$ .

Las escalas *Kelvin* y *Rankine* se definen de forma que el cero absoluto corresponda a un valor de cero y el tamaño de un grado sea igual a un grado Celsius (en la escala Kelvin) o a un grado Fahrenheit (en la escala Rankine).

Las relaciones para convertir de una escala de temperatura en otra son:

$$T (\text{K}) = T (^\circ\text{C}) + 273,15.$$

$$T (^\circ\text{R}) = T (^\circ\text{F}) + 459,67.$$

$$T (^\circ\text{R}) = 1,8 T (\text{K}).$$

$$T (^\circ\text{F}) = 1,8 T (^\circ\text{C}) + 32.$$

Un grado es tanto un valor de temperatura como un intervalo de temperatura, hecho que a veces lleva a confusiones: un intervalo de 1 grado Celsius o Kelvin contiene 1,8 grados Fahrenheit o Rankine, lo que conduce a los factores de conversión: 1,8°F/1°C; 1,8°R/1K; 1°F/1°R; 1°C/1K.

### 1.1.5 EJERCICIOS

1.1.5.1 El peso específico del nitrobenceno es de 1,20. (a) Calcule la masa en kg de 250 litros de nitrobenceno; (b) calcule la velocidad de flujo volumétrico en ml/min que corresponde a una velocidad de flujo másico de 30,0 lb<sub>m</sub> de nitrobenceno/h; (c) calcule la densidad de una mezcla formada por 20,0 litros de nitrobenceno y 3,00 pie<sup>3</sup> de benceno (PE = 0,879), suponiendo que el volumen de la mezcla es igual a la suma de los volúmenes de sus componentes.

Respuestas: (a) 300 kg; (b) 189 ml/min; (c) 0,94 kg/l

1.1.5.2 Un flujo estacionario de agua alimenta una probeta graduada durante 30 s y se colectan 50 ml. ¿Cuál es la velocidad de flujo volumétrico? ¿Cuál es la velocidad de flujo másico?

Respuestas: 100 ml/min; 100 g/min.

1.1.5.3 Un reactor se alimenta con 100 kg de hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>) cada hora. ¿Cuál es la velocidad de flujo molar de este flujo en kmol/hora?

Respuesta: 50 kmol/h.

1.1.5.4 ¿Cuál es la fracción en masa y la fracción molar del bromo en HBr puro?

Respuestas: 80/81; 0,5.

1.1.5.5 ¿Cuál es la presión a 30,0 m por debajo de la superficie de un lago? La presión atmosférica es de 10,4 m de agua, la  $\rho$  del agua es de  $1000 \text{ kg/m}^3$  y  $g/g_c$  es de  $9,807 \text{ N/kg}$ .

Respuesta: 40,4 m  $\text{H}_2\text{O}$ .

1.1.5.6 (a) Convierta la siguiente temperatura:  $T = 20^\circ\text{C}$  en  $^\circ\text{F}$ , K,  $^\circ\text{R}$  (b) Convierta el siguiente intervalo de temperatura:  $\Delta T = 100^\circ\text{R}$  en  $^\circ\text{F}$ ,  $^\circ\text{C}$ , K.

Respuestas: (a)  $68^\circ\text{F}$ ,  $293,15 \text{ K}$ ,  $527,67^\circ\text{R}$ ; (b)  $100^\circ\text{F}$ ,  $55,56^\circ\text{C}$ ,  $55,56 \text{ K}$ .