

2. BALANCES DE MATERIA

2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS

Los balances de masa o balances de materia se basan en la *ley de la conservación de la materia*, que establece que la materia no se crea ni se destruye.

Los balances de masa son utilizados en el diseño de un nuevo proceso o en el análisis de uno ya existente.

Los procesos químicos pueden clasificarse en intermitentes (batch), continuos o semiintermitentes y como estacionarios (en régimen permanente) o transitorios.

Proceso intermitente: La alimentación se introduce al sistema al principio del proceso, y todos los productos se extraen juntos tiempo después.

Proceso continuo: Las entradas y salidas fluyen continuamente durante el proceso.

Proceso semiintermitente: Cualquier proceso que no es intermitente ni es continuo.

Proceso en régimen permanente o estacionario: Todas las variables del proceso (temperaturas, presiones, volúmenes, velocidades de flujo) no cambian con el tiempo, excepto, por fluctuaciones pequeñas alrededor de los valores promedio constantes.

Proceso transitorio: Cualquiera de las variables del proceso cambia con el tiempo.

Los procesos intermitentes y semiintermitentes son operaciones en régimen no permanente y los procesos continuos pueden ser transitorios o estacionarios.

El proceso intermitente se usa cuando se producen cantidades pequeñas de producto en una única ocasión, mientras que para producciones grandes se usan procesos continuos en régimen permanente. *Las condiciones de un régimen transitorio existen durante el arranque de un proceso y en los cambios subsecuentes en las condiciones de operación del proceso.*

2.2 ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE

Un *balance o inventario* sobre una sustancia en un sistema (una unidad del proceso, varias unidades o el proceso completo) puede escribirse de la siguiente forma general:

Entrada (entra a través de las fronteras del sistema) + **Producción** (producida dentro del sistema) – **Salida** (sale a través de las fronteras del sistema) – **Consumo** (consumida dentro del sistema) = **Acumulación** (acumulada dentro del sistema).

Esta ecuación general de balance puede escribirse para cualquier sustancia que entre o salga de cualquier proceso, para cualquier especie atómica (balance parcial de masa) o para las masas totales de los flujos de entrada y salida (balance total de masa).

Se pueden escribir dos tipos de balances: diferenciales e integrales.

Balances diferenciales: Indican lo que está sucediendo en un sistema en un instante de tiempo. Cada término de la ecuación de balance es una velocidad (velocidad de entrada, velocidad de producción) y tiene unidades de la unidad de la cantidad balanceada dividida entre una unidad de tiempo (g/s, barriles/día). Este tipo de balance se aplica generalmente a procesos continuos.

Balances integrales: Describen lo que ocurre entre dos instantes de tiempo. Cada término de la ecuación de balance es una cantidad de la cantidad balanceada y tiene las unidades correspondientes (g, barriles). Este tipo de balance se aplica generalmente a procesos intermitentes siendo ambos instantes de tiempo el momento en que se efectúa la entrada y el momento previo a la extracción del producto.

2.3 BALANCES EN PROCESOS CONTINUOS EN RÉGIMEN PERMANENTE:

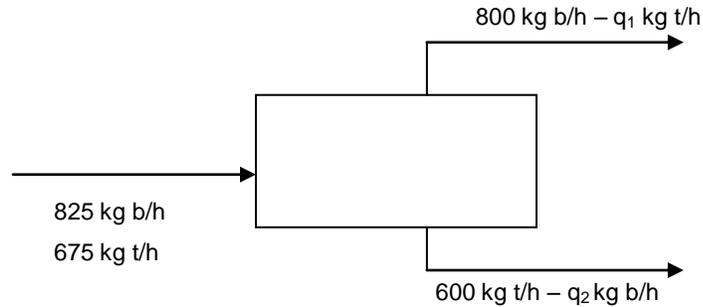
Para cualquier sustancia involucrada en el proceso el término de acumulación en la ecuación de balance debe ser igual a cero, de lo contrario, la cantidad de la sustancia en el sistema debe necesariamente cambiar con el tiempo y, por definición, el proceso no se llevaría a cabo en régimen permanente. Así pues, para los procesos continuos en régimen permanente, la ecuación general de balance se simplifica en:

$$\boxed{\text{Entrada} + \text{producción} = \text{salida} + \text{consumo}}$$

2.3.1 EJERCICIO:

Mil quinientos kilogramos por hora de una mezcla de benceno y tolueno que contiene 55% en masa de benceno se separan, por destilación, en dos fracciones. La velocidad de flujo

másico del benceno en la parte superior del flujo es de 800 kg/h y la del tolueno en la parte inferior del flujo es de 600 kg/h. La operación se lleva a cabo en régimen permanente. Escriba los balances del benceno y del tolueno para calcular las velocidades de flujo no conocidas de los componentes en los flujos de salida.



El proceso se efectúa en régimen permanente y por eso el término acumulación de los balances de masa es cero. Como no ocurren reacciones químicas, los términos de producción y consumo son iguales a cero. Por lo tanto, la ecuación de balance de masa toma la forma: Entrada = salida.

Balance parcial de masa de benceno: $825 \text{ kg b/h} = 800 \text{ kg b/h} + q_2 \rightarrow q_2 = 25 \text{ kg b/h}$

Balance parcial de masa de tolueno: $675 \text{ kg t/h} = q_1 + 600 \text{ kg t/h} \rightarrow q_1 = 75 \text{ kg t/h}$

Comprobación:

Balance total de masa: $1500 \text{ kg/h} = 800 \text{ kg/h} + q_1 + q_2 + 600 \text{ kg/h} \rightarrow 1500 \text{ kg/h} = 800 \text{ kg/h} + 75 \text{ kg/h} + 25 \text{ kg/h} + 600 \text{ kg/h} \rightarrow 1500 \text{ kg/h} = 1500 \text{ kg/h}$

Respuestas: 25 kg b/h y 75 kg t/h.

2.4 BALANCES INTEGRALES EN PROCESOS INTERMITENTES:

Cuando ocurren reacciones químicas en procesos intermitentes, como las fronteras del sistema no son atravesadas ni por reactivos ni por productos entre el momento inicial y el momento en el cual termina la reacción, la ecuación de balance se reduce a:

Acumulación = producción – consumo.

Además, la cantidad de cada sustancia en el reactor entre ambos momentos, es simplemente la cantidad final menos la cantidad inicial:

Acumulación = salida final – entrada inicial.

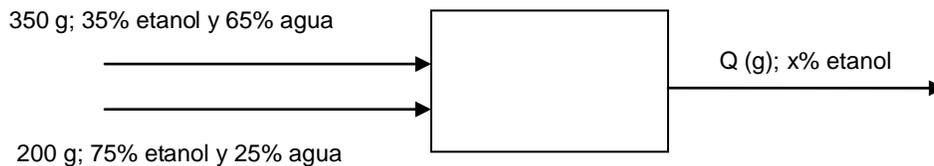
Si se igualan estas dos expresiones para la acumulación, se tiene

$$\boxed{\text{Entrada inicial} + \text{producción} = \text{salida final} + \text{consumo}}$$

Esta ecuación es idéntica a la ecuación para procesos continuos, excepto que en este caso los términos de entrada y salida denotan las cantidades inicial y final de la sustancia balanceada en vez de las velocidades de flujo de la misma en los flujos de alimentación y producción continuos.

2.4.1 EJERCICIO:

Dos mezclas etanol – agua se encuentran en dos matraces separados. La primera mezcla contiene 35% en peso de etanol, y la segunda contiene 75% en peso del mismo. Si se combinan 350 g de la primera mezcla con 200 g de la segunda, ¿cuál es la masa y la composición del producto?



Como no hay reacciones químicas involucradas, los términos de producción y consumo de la ecuación de balance valen cero y la ecuación toma la forma “entrada = salida”.

Balance total de masa: $350 \text{ g} + 200 \text{ g} = Q \rightarrow Q = 550 \text{ g}$.

Balance parcial de masa para el etanol: $350 \text{ g} * 0,35 + 200 \text{ g} * 0,75 = 550 \text{ g} * r_{\text{et}} \rightarrow r_{\text{et}} = 0,4955$.

El cálculo se puede comprobar mediante el balance parcial de masa para el agua:

$350 \text{ g} * 0,65 + 200 \text{ g} * 0,25 = Q * r_{\text{ag}} \rightarrow 277,5 \text{ g} = 550 \text{ g} * (1 - 0,4955)$

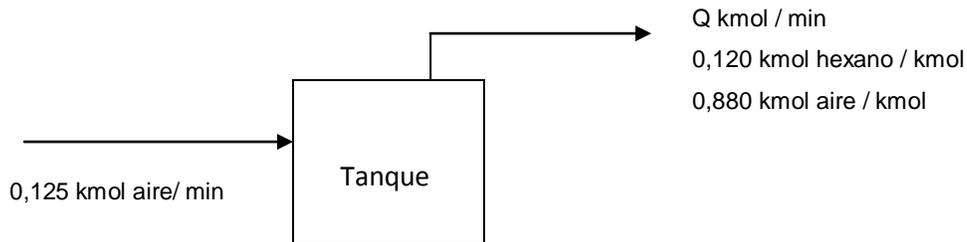
$\rightarrow 277,5 \text{ g} = 277,5 \text{ g}$.

2.5 BALANCES INTEGRALES SOBRE PROCESOS SEMIINTERMITENTES Y CONTINUOS:

Los balances integrales también pueden escribirse para procesos semiintermitentes y continuos. El procedimiento consiste en escribir un balance diferencial del sistema y después integrarlo entre dos instantes de tiempo.

2.5.1 EJERCICIO:

Se hace burbujear aire a un tanque de hexano líquido a una velocidad de 0,125 kmol / min. El gas que sale del tanque contiene 12,0% en mol de vapor de hexano. Se puede considerar que el aire es insoluble en el hexano líquido. Utilice un balance integral para estimar el tiempo requerido para vaporizar 15,0 m³ de hexano.



Balance de masa diferencial para el aire (entrada = salida):

$$0,125 \text{ kmol aire / min} = 0,880 \text{ kmol aire / kmol} * Q \rightarrow Q = 0,142 \text{ kmol / min}$$

Un balance del hexano toma la forma *acumulación = - salida*.

$$\text{Acumulación} = - 15 \text{ m}^3 * 659 \text{ kg / m}^3 * 1 \text{ kmol / 86,0 kg} = - 114,9 \text{ kmol.}$$

El término de salida en el balance se obtiene integrando la velocidad de salida diferencial desde el tiempo inicial del proceso ($t = 0$) hasta el tiempo final que es la cantidad a calcular:

$$-114,9 \text{ kmol} = - \int_0^t (0,120 * Q * dt) = - 0,120 * Q * t \rightarrow t = 6742,96 \text{ min.}$$

2.6 METODOLOGÍA PARA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN BALANCES DE MATERIA:

La resolución de los problemas de balances de masa requiere del desarrollo y la solución de ecuaciones para las incógnitas de los flujos, siendo esto último, generalmente, un asunto de álgebra simple, pero la descripción del proceso y la colección de datos del mismo puede presentar dificultades considerables.

Un método posible para realizar cálculos de balances de materia puede ser el siguiente:

2.6.1 ORGANIZAR LA INFORMACIÓN:

La mejor forma de hacerlo es dibujar un *diagrama de flujo* del proceso, usando cajas u otros símbolos para representar las unidades del proceso (reactores, destiladores, extractores, etc.) y líneas con flechas para representar las entradas y las salidas.

El diagrama debe *etiquetarse*, escribiendo los valores de las variables conocidas y los símbolos de las incógnitas para cada flujo de entrada y de salida: Se escriben los valores y las unidades de todas las variables conocidas de los flujos en las posiciones de éstos sobre el diagrama. Se asignan símbolos algebraicos a las incógnitas de los flujos y se pueden escribir sus unidades asociadas (Q kg/h; n kmol).

Es necesario desarrollar y resolver una ecuación para cada incógnita, por lo cual es conveniente reducir al mínimo el número de incógnitas etiquetadas. Por ejemplo, cuando se etiquetan las fracciones másicas de los componentes de un flujo, se asignan nombres a todos menos a uno ya que éste se calcula como 1 menos la suma de los demás.

Un proceso representado por un diagrama de flujo está *balanceado* cuando se satisfacen los balances de materia para los componentes del sistema. Las masas pero no las fracciones másicas de todos los flujos pueden multiplicarse por un factor común y el proceso sigue balanceado; además las masas de los flujos pueden transformarse en velocidades de flujo másico y las unidades de masa de todas las variables de flujo y de las fracciones másicas pueden cambiarse (por ejemplo, de kg a lb_m) continuando balanceado el proceso. Este procedimiento se llama *cambio de escala* del diagrama de flujo y puede ser *aumento de escala* cuando las cantidades finales del flujo son mayores que las originales o una *disminución de escala* cuando son menores.

2.6.2 ESCOGER UNA BASE DE CÁLCULO:

Como siempre se puede cambiar la escala de un proceso balanceado, los cálculos de balance de materia pueden efectuarse sobre la *base* de cualquier conjunto conveniente de cantidades de los flujos o de las velocidades de flujo, y después se puede cambiar de escala el resultado, tanto como se quiera. Al balancear un proceso se escoge una cantidad (masa o moles) o una velocidad de flujo másico o molar de un flujo o de un componente del flujo, como *base de cálculo*; todas las incógnitas se determinan, entonces, de manera que sean consistentes con esta base.

Si una cantidad de un flujo o una velocidad de flujo es un dato del enunciado, suele ser conveniente usar esta cantidad como base de cálculo. Si no se conocen las cantidades de los flujos o las velocidades de flujo, hay que suponer una; en éste caso, se escoge un flujo con una composición conocida y si ésta última es fracción másica, la base será una masa pero si es fracción molar la base será número de moles.

2.6.3 REALIZAR LA CONTABILIDAD DEL PROBLEMA:

Se cuentan las incógnitas y las relaciones entre ellas. Si estos números son iguales, se puede adelantar la solución del problema. Si hay más incógnitas que ecuaciones, entonces el problema no está especificado por completo o se han olvidado algunas relaciones. Entre las relaciones que pueden utilizarse para relacionar las variables de los flujos de los procesos están las siguientes: *Balances de materia* teniendo en cuenta que para procesos no reactivos pueden escribirse hasta N balances de materia donde N es el número de componentes y para procesos reactivos el número máximo de balances de materia se reduce en el número de reacciones químicas entre los componentes; *Especificaciones del proceso* o relaciones entre las variables dadas en el enunciado; *Leyes y propiedades físicas* como por ejemplo las leyes de los gases y las densidades que proporcionan relaciones entre las variables; *Restricciones físicas* como por ejemplo, si las fracciones molares se etiquetan como x , y , z se sabe que una relación entre ellas es que su suma es igual a 1 y, por tanto, en lugar de etiquetar z se etiqueta $1 - x - y$.

2.6.4 CONVERTIR LOS DATOS VOLUMÉTRICOS EN MÁSICOS O MOLARES:

Los volúmenes conocidos de los flujos o las velocidades de flujo volumétrico conocidas se convierten en cantidades másicas o molares usando las densidades tabuladas o las leyes de los gases.

2.6.5 CONVERTIR LOS DATOS DE UN MISMO FLUJO A LAS MISMAS UNIDADES:

Si por ejemplo, en un flujo se conoce la velocidad de flujo másico total y las fracciones molares de los componentes, se convierten todos los datos en una cualquiera de las unidades (másica o molar).

2.6.6 ESCRIBIR LAS ECUACIONES DE BALANCE DE MATERIA:

Si no ocurren reacciones químicas y hay N especies presentes, se pueden escribir máximo N balances, ya sea para cada especie o bien para la masa o moles totales y para todas las especies menos una. Los balances deben escribirse de manera que los primeros sean aquellos que involucren el menor número de incógnitas.

2.6.7 RESOLVER LAS ECUACIONES DE BALANCE DE MATERIA:

Con ello se resuelven las incógnitas que es necesario determinar. Cuando se calcula el valor de una de las incógnitas, se puede escribir en el diagrama de flujo lo cual proporciona un seguimiento continuo del estado de la resolución del problema.

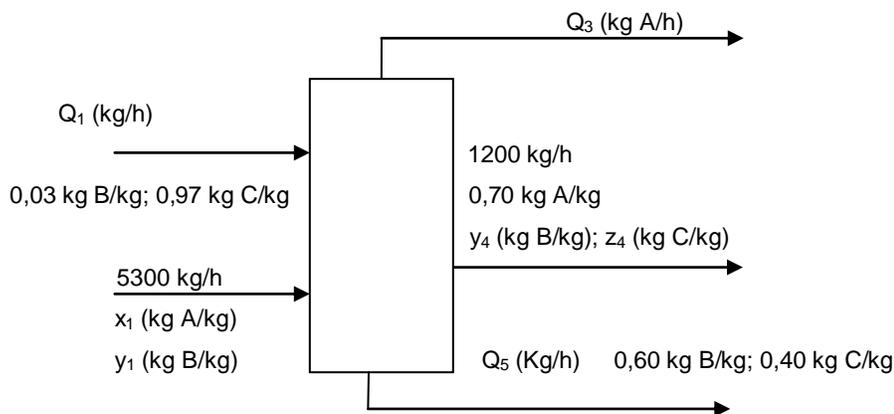
2.6.8 ESCALAR EL PROCESO BALANCEADO:

Esto se hace cuando en el enunciado del problema se proporciona una cantidad o una velocidad de flujo determinada y se tomó como base de cálculo otro valor.

Es necesario aclarar que éste no es el único método posible para resolver los problemas de balance de materia; es posible desarrollar métodos propios cuando se tenga algo de experiencia.

2.6.9 EJERCICIO:

Supóngase una columna de destilación que opera como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.



- ¿Cuántos balances independientes se pueden escribir para este sistema?
- ¿Cuántas incógnitas de las velocidades de flujo y/o de las fracciones molares deben especificarse antes de calcular las demás?
- Supóngase que se proporcionan los valores de Q_1 y x_1 . Establezca una serie de ecuaciones, cada una con una incógnita, para las variables restantes. (Una vez que se ha

calculado una variable en una de estas ecuaciones, debe aparecer en las demás ecuaciones sin que se le cuente como una incógnita).

(a) Tres balances independientes, porque se tienen tres componentes (A, B y C).

(b) Deben especificarse y_1 y z_4 , así: $y_1 = 1 - x_1$; $z_4 = 1 - (0,70 + y_4)$.

(c) Se conocen todos los datos de entrada al conocerse x_1 y Q_1 .

Incógnitas: Q_3 ; y_4 ; Q_5 .

Balance parcial de masa para A: $5300 * x_1 = Q_3 + 1200 * 0,70$. Incógnita: Q_3 .

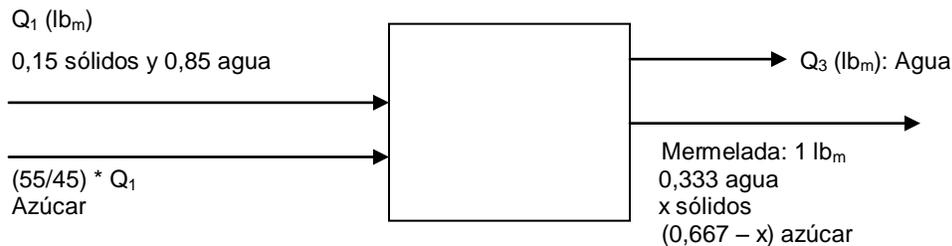
Balance total de masa: $Q_1 + 5300 = Q_3 + 1200 + Q_5$. Incógnita: Q_5 .

Balance parcial de masa para C: $0,97 * Q_1 = 1200 * (1 - 0,70 - y_4) + 0,40 * Q_5$. Incógnita: y_4 .

Respuestas: (a) Tres; (b) Dos.

2.6.10 EJERCICIO:

Las fresas contienen alrededor de 15% de sólidos y 85% de agua. Para preparar mermelada de fresa, se mezclan las fresas trituradas con azúcar en una relación de 45:55, y la mezcla se calienta para evaporar el agua hasta que el residuo contiene una tercera parte de agua en masa. Dibuje y etiquete el diagrama de flujo de este proceso y utilícelo para calcular cuántas libras de fresa se necesitan para producir una libra de mermelada.



Balance parcial de masa para sólidos: $0,15 * Q_1 = x * 1$ lb_m

Balance parcial de masa para azúcar: $(55/45) * Q_1 = (0,667 - x) * 1$ lb_m

$\rightarrow x = (0,15 * Q_1)/lb_m \rightarrow (55/45) * Q_1 = (0,667 - (0,15 * Q_1/lb_m)) lb_m \rightarrow Q_1 = 0,486$ lb_m.

Respuesta: 0,486 lb_m.

2.7 BALANCES EN PROCESOS DE VARIAS UNIDADES:

No es frecuente que los procesos químicos industriales se lleven a cabo en una sola unidad. En general, están presentes dos o más unidades (reactores, mezcladores, enfriadores, equipos de separación, etc.).

Cuando el proceso consta de una unidad, esa unidad es el *sistema*. Cuando el proceso consta de varias unidades, el sistema puede definirse como cualquier porción del proceso que se escoge para estudiar: el proceso completo, una combinación de unidades del proceso; una sola unidad; un punto donde dos o más flujos se unen o donde un flujo se ramifica.

Para cada uno de los subsistemas se pueden escribir balances de masa. Los balances para el proceso completo se conocen como *balances globales*.

El procedimiento para resolver problemas de balance de materia es esencialmente el mismo que se mostró en la sección 2.6, excepto que para el caso de varias unidades se pueden aislar y escribir los balances de varios subsistemas, de manera que se obtengan suficientes ecuaciones para determinar todas las incógnitas de los flujos. Generalmente se usan los balances globales para resolver las incógnitas de los flujos de alimentación y de productos y luego se usan los balances de los distintos subsistemas para determinar las variables de los flujos interiores.

Al escoger los subsistemas para los que se escriben los balances, es conveniente escoger las fronteras que intersecan los flujos que tienen el menor número de incógnitas posible.

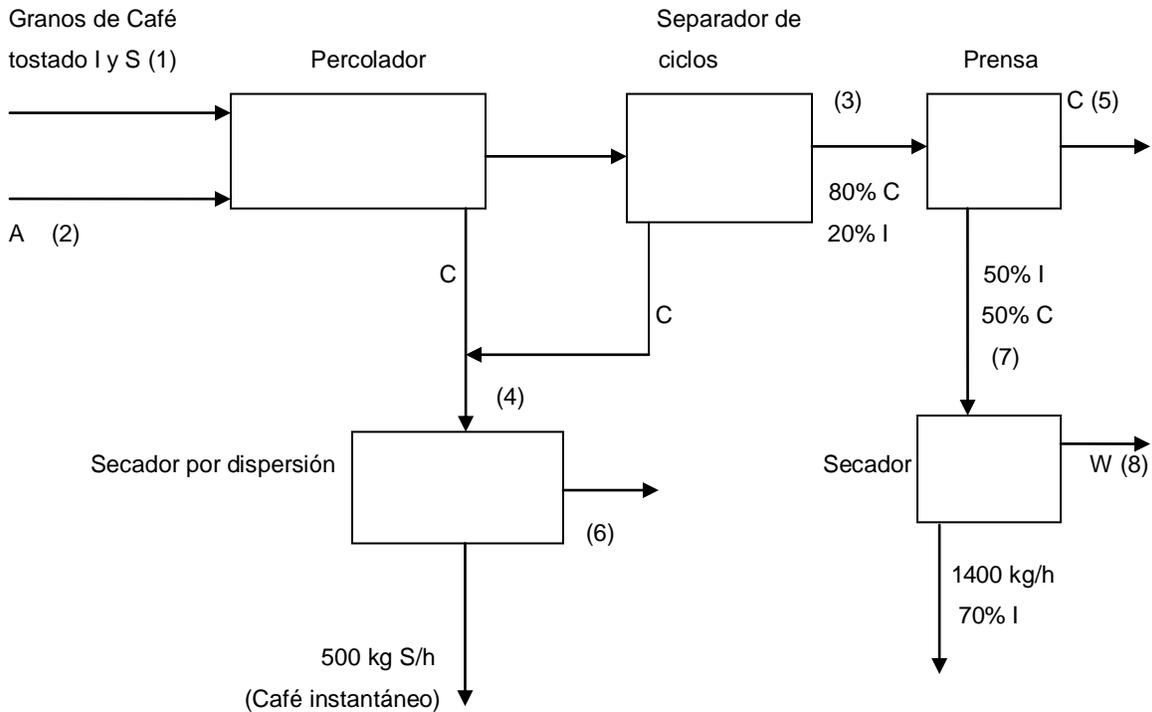
2.7.1 EJERCICIO:

Los granos de café contienen sustancias solubles en agua y otras que no lo son. Para producir café instantáneo, se disuelve la porción soluble en agua hirviendo (es decir, preparando café) en percoladores grandes, y se alimenta después con el café un secador en el que se evapora el agua, dejando el café soluble como un polvo seco. La porción insoluble de los granos de café (el sedimento) pasa a través de varias operaciones (diferentes secados) y los sedimentos secos pueden usarse para rehabilitación de tierras. La disolución extraída de los sedimentos en la primera etapa de secado (separador de ciclos) se junta con el flujo de salida de los percoladores y esa es la alimentación del secador. Aquí se muestra el diagrama de flujo de este proceso, en el cual S e I

representan los componentes solubles e insolubles de los granos de café, A es el agua y C la disolución que contiene 35% en masa de S y 65% en masa de A.

(a) Calcule las velocidades de flujo (kg/h) e los flujos 1 a 8.

(b) Si el líquido de salida de la prensa puede alimentar el secador por dispersión sin afectar el sabor del producto, ¿en qué porcentaje se puede aumentar la velocidad de producción del café instantáneo?



Balances de masa en el secador:

Balance parcial de masa para I: $0,50 \cdot Q_7 = 0,70 \cdot 1400 \text{ kg/h} \rightarrow Q_7 = 1960 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa: $Q_7 = Q_8 + 1400 \text{ kg/h} \rightarrow Q_8 = 560 \text{ kg/h}$.

Balances de masa en la prensa:

Balance parcial de masa para I: $0,20 \cdot Q_3 = 0,50 \cdot Q_7 \rightarrow Q_3 = 4900 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa: $Q_3 = Q_5 + Q_7 \rightarrow Q_5 = 2940 \text{ kg/h}$.

Balances de masa en el secador por dispersión:

Balance parcial de masa para S: $500 \text{ kg/h} = 0,35 \cdot Q_4 \rightarrow Q_4 = 1428,6 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa: $Q_4 = Q_6 + 500 \text{ kg/h} \rightarrow Q_6 = 928,6 \text{ kg/h}$.

Balance de masa en el secador:

Balance parcial de masa para A: $0,50 \cdot Q_7 \cdot 0,65 = Q_8 + 1400 \text{ kg/h} \cdot x \rightarrow x = 0,055$

Balances globales (para todo el proceso):

Balance parcial de masa para A: $Q_2 = Q_5 \cdot 0,65 + Q_8 + 1400 \text{ kg/h} \cdot 0,055 + Q_6$

$\rightarrow Q_2 = 3476,6 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa: $Q_1 + Q_2 = Q_5 + Q_8 + 1400 \text{ kg/h} + 500 \text{ kg/h} + Q_6$.

$\rightarrow Q_1 = 2852 \text{ kg/h}$.

(b) Balances de masa en el secador por dispersión:

Balance parcial de masa para A: $2940 \text{ kg/h} \cdot 0,65 + 1428,6 \text{ kg/h} \cdot 0,65 = Q_6$

$\rightarrow Q_6 = 2839,6 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa: $2940 \text{ kg/h} + 1428,6 \text{ kg/h} = Q_6 + \text{Café instantáneo}$.

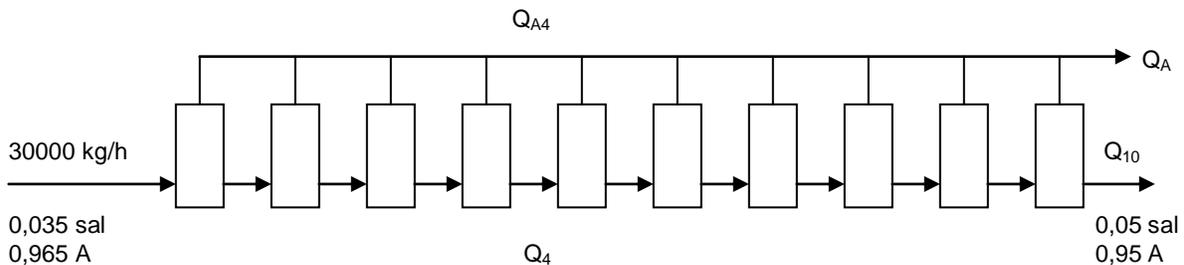
$\rightarrow \text{Café instantáneo} = 1528,4 \text{ kg/h}$.

Porcentaje de aumento = $\{(1528,4 \text{ kg/h} - 500 \text{ kg/h})/500\} \cdot 100 = 205,68\%$.

Respuestas: (a) 2852; 3746,6; 4900; 1428,6; 2940; 928,6; 1960; 560 kg/h; (b) 205,68%

2.7.2 EJERCICIO:

Agua de mar, que contiene 3,50% en masa de sal, pasa a través de una serie de 10 evaporadores. En cada una de las 10 unidades se evapora aproximadamente la misma cantidad de agua, que después se condensa y se combina para obtener un flujo de productos que es agua pura. La salmuera a la salida del último evaporador contiene 5,00% en masa de sal. Si el proceso se alimenta con 30000 kg/h de agua de mar, calcule el rendimiento fraccionario de agua pura y el porcentaje en peso de sal en la disolución que sale del cuarto evaporador.



Base de cálculo: 1 hora de operación.

Balance global de masa para la sal: $30000 \text{ kg} \cdot 0,035 = Q_{10} \cdot 0,05 \rightarrow Q_{10} = 21000 \text{ kg}$.

Balance global de masa: $30000 \text{ kg} = Q_A + Q_{10} \rightarrow Q_A = 9000 \text{ kg}$.

Cada evaporador elimina 900 kg de agua.

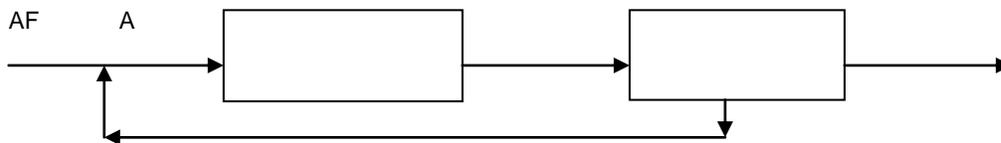
Balance global total entre el 1º y el 4º evaporador: $30000 = 3600 + Q_4 \rightarrow Q_4 = 26400 \text{ kg}$.

Balance de masa parcial para la sal entre el 1º y el 4º evaporador: $30000 \cdot 0,35 = Q_4 \cdot x$
 $\rightarrow x = 0,0398$.

Respuestas: 900 kg de agua; 3,98%.

2.8 RECIRCULACIÓN, DERIVACIÓN Y PURGA:

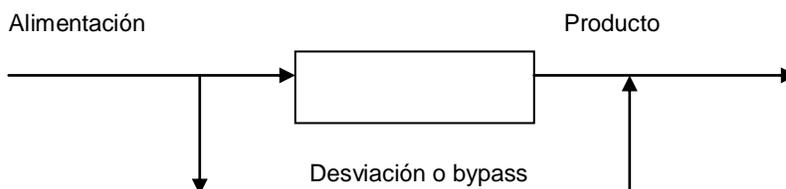
Se presenta *recirculación* cuando uno de los productos de una unidad se devuelve a otra unidad anterior:



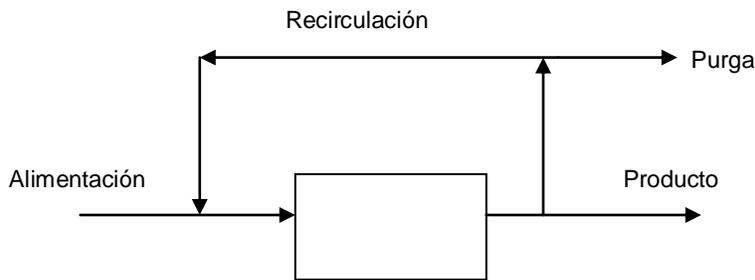
En este caso la alimentación (A) a la primera unidad es igual a la alimentación fresca (AF) al proceso más la recirculación (R).

Existen varias razones para utilizar la recirculación en un proceso químico, como por ejemplo: recuperación y utilización de reactivos no consumidos, recuperación de catalizadores, dilución de un flujo de un proceso, circulación de un fluido de trabajo como en los refrigeradores.

Se presenta *desviación* (o *bypass*) cuando una fracción de la alimentación a una unidad del proceso se desvía de la unidad y se combina con el flujo de salida de la misma o de otra unidad posterior. Generalmente, la razón para utilizar la desviación es influir en la composición y las propiedades del producto.



Se presenta *purga* cuando una fracción de la recirculación se extrae del proceso para eliminar una acumulación de materiales inertes o indeseados.

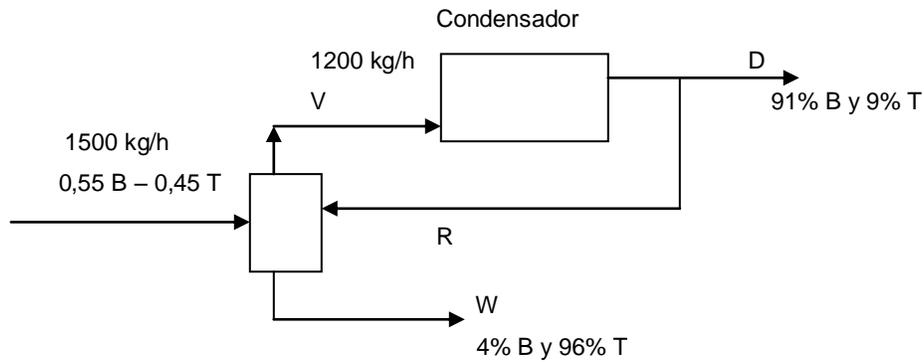


Los cálculos de desviación, recirculación y purga se realizan de la misma manera: se dibuja y se etiqueta el diagrama de flujo y se usan los balances globales, los balances de las unidades del proceso y los balances alrededor del punto de mezclado para determinar las incógnitas del problema.

2.8.1 EJERCICIO:

Una columna de destilación separa 1500 kg/h de una mezcla de benceno y tolueno que contiene 55% en masa de benceno. El producto recuperado del condensador en el domo de la columna contiene 91% de benceno y los fondos de la columna contienen 96% de tolueno. La corriente de vapor que entra al condensador de la parte superior de la columna es 1200 kg/h. Una parte del producto se regresa a la columna como reflujo y el resto se saca para utilizarlo en otra parte. Suponga que las composiciones de las corrientes en la parte superior de la columna (V), del producto retirado (D) y del reflujo (R) son idénticas. Encuentre la relación entre el reflujo y el producto retirado.

Al dibujar y etiquetar el diagrama de flujo se observa que se conocen todas las composiciones y se desconocen algunas masas. Se pueden efectuar balances de materia sobre la columna de destilación y sobre el condensador y cualquiera que sea la unidad elegida incluye la corriente R (recirculación o reflujo)



Balance global total de masa: $1500 \text{ kg/h} = D + W \rightarrow W = 1500 \text{ kg/h} - D$

Balance global parcial de masa para benceno: $0,55 \cdot 1500 \text{ kg/h} = 0,91 \cdot D + 0,04 \cdot W$

$\rightarrow 825 \text{ kg/h} = 0,91 \cdot D + 0,04 \cdot (1500 \text{ kg/h} - D) \rightarrow D = 879,31 \text{ kg/h}$.

Balance total de masa en el condensador: $V = D + R \rightarrow R = 1200 \text{ kg/h} - 879,31 \text{ kg/h}$

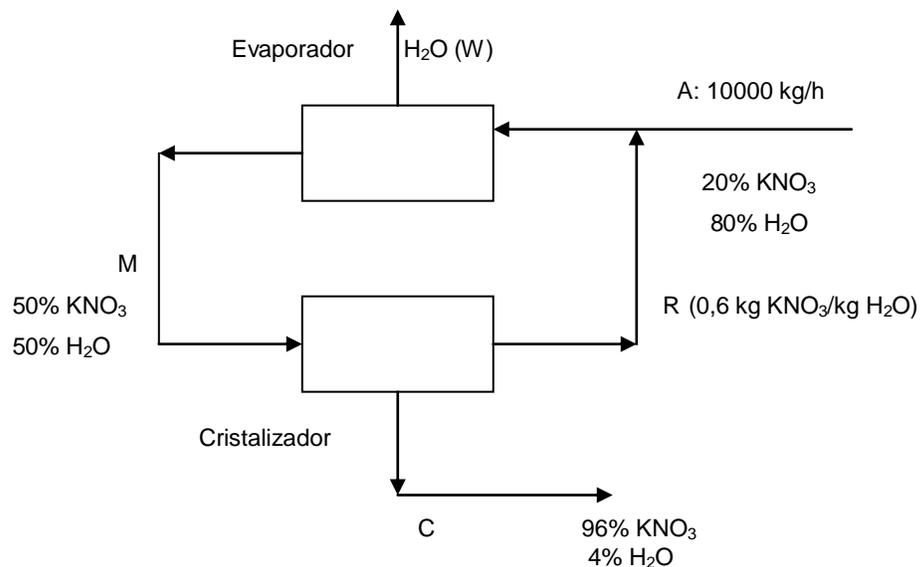
$\rightarrow R = 320,69 \text{ kg/h}$.

$\rightarrow R/D = 0,365$.

Respuesta: $R/D = 0,365$

2.8.2 EJERCICIO:

En la siguiente figura se presentan los datos para un proceso que incluye una evaporación y una cristalización. ¿Cuál es la corriente de recirculación en kilogramos por hora?



Balances globales:

Balance parcial de masa para el KNO_3 : $10000 \text{ kg/h} * 0,20 = 0,96 C \rightarrow C = 2083,33 \text{ kg/h}$

Balance total de masa: $A = W + C \rightarrow W = 7916,67 \text{ kg/h}$.

Balances de masa en el cristalizador:

Balance total de masa: $M = C + R \rightarrow M = 2083,33, \text{ kg/h} + R$

Balance parcial de masa para el KNO_3 : $0,5 * M = 0,96 * C + (0,6/1,6) * R$

$\rightarrow 0,5 * (C + R) = 0,96 * C + (0,6/1,6) * R \rightarrow 0,125 * R = 0,46 * C \rightarrow R = 7666,65 \text{ kg/h}$.

Respuesta: 7666,65 kg/h.

2.9 BALANCES PARA SISTEMAS REACTIVOS:

Cuando en un proceso ocurren reacciones químicas, el balance de materia para sustancias que participan en la reacción no tiene la forma “entrada = salida” ya que debe contener un término de producción o de consumo.

La estequiometría estudia las proporciones en las que se combinan unas sustancias con otras. Una *ecuación estequiométrica* representa a una reacción química e indica el número de moléculas o moles de reactivos y de productos que participan de la reacción. Como los átomos no se pueden crear ni destruir durante una reacción química, el número de átomos de cada elemento debe ser el mismo entre los productos y los reactivos para que la ecuación esté balanceada. Los coeficientes que se asignan a cada sustancia al balancear la ecuación se llaman *coeficientes estequiométricos* y al cociente entre dos coeficientes estequiométricos de una misma ecuación se le denomina *cociente estequiométrico*. Los cocientes estequiométricos se usan como factores de conversión para calcular cantidades consumidas de reactivos o producidas de productos.

El equipo donde se lleva a cabo la reacción química se llama *reactor químico*. Si un reactor químico se alimenta con reactivos en proporción estequiométrica, y la reacción se lleva a cabo completamente, todos los reactivos se consumen. Si uno de los reactivos se suministra en menor cantidad a la estequiométrica mientras los demás se suministran en las cantidades estequiométricas, aquel se consume primero y se conoce como *reactivo limitante* y los otros se conocen como *reactivos en exceso*. *Un reactivo es limitante si está presente en menor cantidad que su proporción estequiométrica con respecto a cualquier*

otro reactivo. Si hay presentes n moles de un reactivo en exceso y su proporción estequiométrica corresponde a n_d , se define la fracción en exceso como $(n - n_d)/n_d$.

Muchas reacciones químicas proceden lentamente. En estos casos, el reactor se diseña de manera que el reactivo límite no se consuma completamente y se diseña un proceso de separación para extraer el reactivo no consumido del producto. Se llama fracción de conversión (o *conversión fraccionaria*) al cociente:

$$f = (\text{moles consumidas}) / (\text{moles suministradas}).$$

Si se empieza la reacción con n_{i0} moles de un determinado reactivo o de un producto, si ν_i es el coeficiente estequiométrico de esa sustancia y si n_i son las moles de la sustancia en la salida del reactor se tiene:

$$n_i = n_{i0} + \beta_i \xi, \text{ donde:}$$

$\beta_i = \nu_i$ si la sustancia es un producto = $-\nu_i$ si la sustancia es un reactivo = 0 si la sustancia es inerte.

ξ = moles que reaccionan si es un reactivo = moles producidas si es un producto = *grado de avance de la reacción*.

Algunas reacciones son irreversibles, es decir, la reacción se lleva a cabo en una dirección (de reactivos a productos) y la concentración del reactivo limitante se aproxima a cero. La composición de equilibrio para estas reacciones es la que corresponde al consumo completo del reactivo limitante. Otras reacciones son reversibles, es decir, los reactivos forman productos y los productos reaccionan en sentido opuesto para volver a formar los reactivos. Se alcanza un punto en el que las velocidades de las dos reacciones son iguales. En este punto, las composiciones no cambian y la mezcla de reacción se encuentra en equilibrio químico.

En algunas reacciones químicas, los productos pueden reaccionar con los reactivos iniciales dando lugar a productos no deseados. Estas reacciones se llaman reacciones adyacentes y en estos casos se usan dos términos para describir el grado en el que la reacción deseada predomina sobre las reacciones adyacentes: *Rendimiento y selectividad*.

Rendimiento: (Moles formadas de producto deseado) / (Moles que se formarían si no hubiera reacciones adyacentes y si el reactivo limitante reaccionara completamente).

Selectividad: (Moles formadas de producto deseado)/ (Moles formadas de producto no deseado).

En el análisis de reactores químicos con separación de productos y recirculación de los reactivos no consumidos, se utilizan dos definiciones de conversión de reactivos:

$$\text{Conversión global} = (\text{ERP} - \text{SPP}) / \text{ERP}$$

ERP: Entrada reactivos al proceso.

SPP: Salida productos del proceso.

$$\text{Conversión en una sola etapa} = (\text{ERR} - \text{SPR}) / \text{ERR}$$

ERR: Entrada reactivos al reactor.

SPR: Salida productos del reactor.

Para resolver problemas de balances de masa en procesos con reacciones químicas, se pueden usar diferentes balances:

Balance para la masa total. Tiene la forma “entrada = salida”.

Balance para cada reactivo o para cada producto. Contiene un término de producción si se trata de un producto o un término de consumo si se trata de un reaccionante.

Balance para cada átomo participante en la reacción. Los balances de especies atómicas tienen la forma “entrada = salida” ya que los átomos no se crean ni se destruyen en una reacción química.

2.9.1 EJERCICIO:

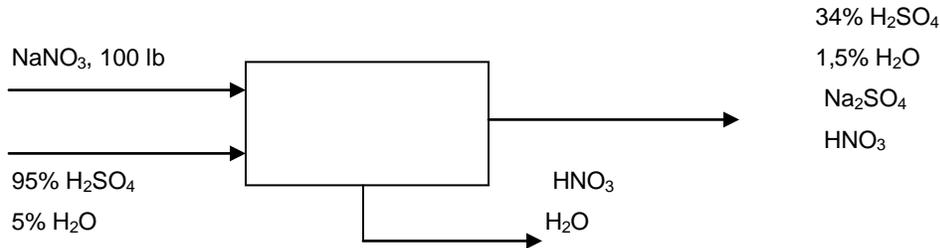
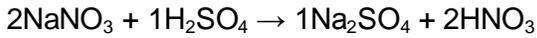
En el proceso ordinario para la fabricación de ácido nítrico, se trata nitrato sódico con un ácido sulfúrico acuoso que tiene 95% de H_2SO_4 en masa. Para que la pasta que resulta pueda fluidizarse, es conveniente emplear ácido suficiente de forma que haya un 34% de H_2SO_4 en peso en la pasta final. Este exceso de H_2SO_4 , en realidad estará combinado con el sulfato de sodio en la pasta formando sulfato ácido de sodio, aunque para efectos de cálculo puede considerarse como ácido libre. Puede suponerse que la pasta contiene 1,5% de agua en peso y que el resto del agua sale con el HNO_3 producido. Puede suponerse que la reacción es completa y que el 2% del HNO_3 formado permanece en la pasta. El NaNO_3 utilizado es puro y está seco.

(a) Calcule el peso y la composición porcentual de la pasta formada por 100 lb de nitrato sódico cargado.

- (b) Calcule el peso de ácido diluido que ha de emplearse por 100 lb de nitrato sódico.
 (c) Calcule la composición de la solución acuosa de HNO₃ producida por 100 lb de nitrato sódico cargado.

Base de cálculo: 100 lb de nitrato sódico.

La reacción química es:



Moles de NaNO₃ = 100 lb * (1lbmol/85 lb) = 1,176 lbmol.

Moles producidas de HNO₃ = 1,176 lbmol.

Masa producida de HNO₃ = 1,176 lbmol * (63 lb / 1lbmol) = 74,088 lb.

Moles producidas de Na₂SO₄ = 1,176 lbmol / 2 = 0,588 lbmol.

Masa producida de Na₂SO₄ = 0,588 lbmol * (142 lb / 1 lbmol) = 83,496 lb.

Masa de HNO₃ producido que permanece en la pasta: 74,088 lb * 0,02 = 1,482 lb.

El 64,5% de la pasta está formado por esta cantidad de ácido nítrico (1,482 lb) más el sulfato de sodio producido (83,496 lb) = 84,978 lb.

Con esta información puede calcularse la masa total de la pasta = 84,978 lb * (100/64,5) = 131,749 lb.

(a) Composición de la pasta:

Porcentaje másico de H₂SO₄ = 34%

Porcentaje másico de H₂O = 1,5%

Porcentaje másico de Na₂SO₄ = (83,496 lb/131,749 lb)*100 = 63,38%

Porcentaje másico de HNO₃ = (1,482 lb/131,749 lb)*100 = 1,12%

(b) Masa de H₂SO₄ en la pasta = 0,34 * 131,749 lb = 44,795 lb.

Moles de H₂SO₄ que reaccionan = 0,588 lbmol.

Masa que reacciona de H₂SO₄ = 0,588 lbmol * (98 lb/1lbmol) = 57,624 lb.

Masa de H₂SO₄ en solución acuosa = 57,624 lb + 44,795 lb = 102,419 lb.

Masa de la solución acuosa de H₂SO₄ = 102,419 lb * (100/95) = 107,809 lb.

(c) Masa de HNO₃ en la solución acuosa de salida = 74,088 lb – 1,482 lb = 72,606 lb.

Masa de agua en esta solución = $107,809 \text{ lb} \cdot 0,05 - 131,749 \text{ lb} \cdot 0,015 = 3,414 \text{ lb}$.

Masa de la solución = $72,606 \text{ lb} + 3,414 \text{ lb} = 76,020 \text{ lb}$

Porcentaje de $\text{HNO}_3 = (72,606 \text{ lb}/76,020 \text{ lb}) \cdot 100 = 95,51\%$

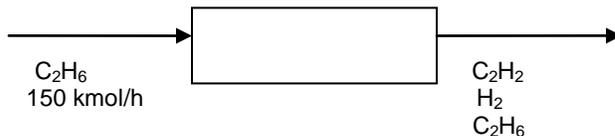
Porcentaje de $\text{H}_2\text{O} = (3,414 \text{ lb}/76,020 \text{ lb}) \cdot 100 = 4,49\%$

Respuestas: (a) $131,749 \text{ lb}$; $34\% \text{ H}_2\text{SO}_4$; $1,5\% \text{ H}_2\text{O}$; $63,38\% \text{ Na}_2\text{SO}_4$; $1,12\% \text{ HNO}_3$. (b) $107,809 \text{ lb}$; (c) $95,51\% \text{ HNO}_3$ y $4,49\% \text{ H}_2\text{O}$.

2.9.2 EJERCICIO:

Un reactor de deshidrogenación se alimenta con etano a una velocidad de 150 kmol/h . Los productos de la reacción son acetileno e hidrógeno. Se alcanza una conversión fraccionaria de $0,80$. Calcule las siguientes propiedades del producto gaseoso final:

- (a) La velocidad de flujo molar total.
- (b) El cociente entre las masas de hidrógeno y acetileno.
- (c) La masa molar promedio.
- (d) La velocidad de flujo másico de acetileno.



Base de cálculo (b. c.): 1 hora de reacción.

(a) $f = 0,80 = \text{Moles consumidas}/\text{Moles suministradas}$

Moles consumidas $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,80 \cdot 150 \text{ kmol} = 120 \text{ kmol}$.



Moles C_2H_2 producidas = 120 kmol .

Moles H_2 producidas = 240 kmol .

Moles C_2H_6 en la corriente de salida = 30 kmol .

Velocidad de flujo molar total = $(120 \text{ kmol} + 240 \text{ kmol} + 30 \text{ kmol})/\text{h} = 390 \text{ kmol/h}$.

(b) Masa de $\text{H}_2 = 240 \text{ kmol} \cdot (2 \text{ kg/kmol}) = 480 \text{ kg}$.

Masa de $\text{C}_2\text{H}_2 = 120 \text{ kmol} \cdot (26 \text{ kg/kmol}) = 3120 \text{ kg}$.

Masa de $\text{H}_2/\text{Masa de } \text{C}_2\text{H}_2 = 480 \text{ kg}/3120 \text{ kg} = 0,154$.

(c) Fracción molar del $H_2 = 240 \text{ kmol}/390 \text{ kmol} = 0,615$.

Fracción molar de $C_2H_2 = 120 \text{ kmol}/390 \text{ kmol} = 0,308$.

Fracción molar de $C_2H_6 = 30 \text{ kmol}/390 \text{ kmol} = 0,077$.

$M = 0,615 \cdot 2 \text{ kg/kmol} + 0,308 \cdot 26 \text{ kg/kmol} + 0,077 \cdot 30 \text{ kg/kmol} = 11,548 \text{ kg/kmol}$.

(d) 3120 kg/h.

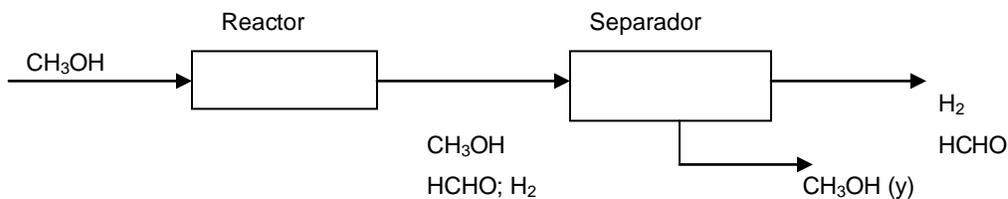
Respuestas: (a) 390 kmol/h; (b) 0,154; (c) 11,548 kg/kmol; (d) 3120 kg/h.

2.9.3 EJERCICIO:

Se utiliza un reactor catalítico para producir formaldehído a partir de metanol por medio de la reacción



Se alcanza una conversión en una sola etapa de 70% en el reactor. El metanol en el producto del reactor se separa del formaldehído y del hidrógeno en separador especial. La velocidad de producción del formaldehído es de 600 kg/h. Calcule la velocidad de alimentación de metanol (kmol/h) que requiere el proceso si no hay recirculación.



$$0,70 = (ERR - SPR)/ERR$$

Velocidad de producción del HCHO = $600 \text{ kg/h} \cdot (1 \text{ kmol}/30 \text{ kg}) = 20 \text{ kmol/h}$

$$0,70 = \{(y + 20) - y\} / (y + 20)$$

$$\rightarrow y = 8,57 \text{ kmol/h.}$$

Como se produjeron 20 kmol/h de formaldehído, según la ecuación química se consumieron 20 kmol/h de metanol. Por ello, esta cantidad consumida (20 kmol/h) más la cantidad que sale (8,57 kmol/h) es la cantidad de metanol que se debe suministrar: 28,57 kmol/h.

Respuesta: 28,57 kmol/h.

2.10 REACCIONES DE COMBUSTION:

La combustión es la reacción entre un combustible y oxígeno. Es una reacción muy importante en la industria química por la gran cantidad de calor que produce. Los combustibles más empleados son: carbón de hulla (C, algo de H y S y sustancias no combustibles); aceite combustible (hidrocarburos pesados y S); combustible gaseoso (CH₄ principalmente) y GLP (gas licuado del petróleo conformado principalmente por propano y/o butano).

El aire es la fuente de oxígeno en la mayoría de los reactores de combustión debido a su costo (el costo del aire es menor que el de los combustibles). Para los cálculos de combustión, la composición del aire seco se considera como 79% en volumen de N₂ y 21% en volumen de O₂.

Cuando se quema un combustible, el carbono que contiene reacciona para formar CO₂ o CO, el hidrógeno forma H₂O, el azufre forma SO₂ y el nitrógeno forma óxidos de nitrógeno. Una reacción de combustión en la que todo el C del combustible forma CO₂ se conoce como combustión completa, mientras que si se forma CO (aunque parte del C del combustible forme CO₂) se conoce como combustión parcial o incompleta.

El término *composición en base húmeda* indica las fracciones molares de un gas que contiene agua y el término *composición en base seca* indica las fracciones molares del mismo gas sin agua. El producto gaseoso que sale de la cámara de combustión se conoce como gas de emisión o gas de combustión.

Como en una reacción de combustión el reactivo más barato es el aire, éste se suministra en cantidad mayor a la necesaria (teórica). Los siguientes términos son útiles en la combustión:

Oxígeno teórico: Moles o velocidad de flujo molar (intermitente o continuo) de O₂ que se necesitan para efectuar la combustión completa del combustible, suponiendo que todo el carbono del combustible forma CO₂ y todo el hidrógeno forma H₂O.

Aire teórico: Es la cantidad de aire que contiene el oxígeno teórico.

Aire en exceso: Es la cantidad en exceso del aire que entra al reactor con respecto al aire teórico. El porcentaje de aire en exceso se calcula usando la siguiente ecuación:

% de aire en exceso = $\{(\text{Moles de aire que entran} - \text{moles de aire teórico})/\text{moles de aire teórico}\} * 100$

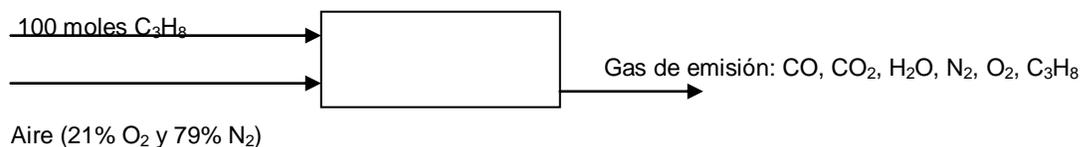
El procedimiento para resolver balances de materia en la combustión es el mismo que el procedimiento para los sistemas reactivos, pero teniendo en cuenta estos puntos:

- (1) El N_2 sale del reactor tal como entra. En la salida del reactor debe considerarse el O_2 que no reacciona y el combustible que no se consume.
- (2) El porcentaje de aire en exceso y el porcentaje de oxígeno en exceso tienen el mismo valor numérico. Si se conoce el porcentaje en exceso de O_2 , el O_2 real se calcula multiplicando el O_2 teórico por 1 más la fracción de oxígeno en exceso.
- (3) Si sólo sucede una reacción se pueden usar indistintamente balances para especies moleculares o para especies atómicas. Si ocurren varias reacciones químicas suelen ser más convenientes los balances para especies atómicas.

2.10.1 EJERCICIO:

Se quema propano (C_3H_8) con 12% de aire en exceso. El porcentaje de conversión del propano es de 95%; del propano quemado, 15% reacciona para formar CO y el resto para formar CO_2 . Calcule la composición del gas de combustión en base seca y en base húmeda.

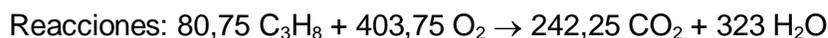
Base de cálculo: 100 moles de propano alimentados.

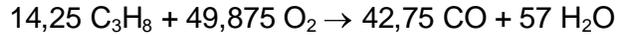


Moles de propano que reaccionan: 95 moles.

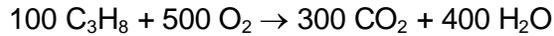
Moles de propano que producen CO_2 = 95 moles * 0,85 = 80,75 moles.

Moles de propano que producen CO = 95 moles * 0,15 = 14,25 moles.





Cálculo del número de moles de oxígeno teórico:



Moles de O_2 teórico = 500 moles

Moles de O_2 alimentados = 500 moles * 1,12 = 560 moles

Moles de N_2 alimentados = 560 moles O_2 * (79 moles N_2 /21 moles O_2) = 2106,67 moles

Balance de C_3H_8 : Entrada = salida + consumo \rightarrow 100 moles = salida + 95 moles

\rightarrow C_3H_8 que sale = 5 moles.

Balance de N_2 : Entrada = salida \rightarrow N_2 que sale = 2106,67 moles.

Balance de CO: Salida = producción \rightarrow CO que sale = 42,75 moles.

Balance de CO_2 : Salida = producción \rightarrow CO_2 que sale = 242,5 moles.

Balance de H_2O : Salida = producción \rightarrow H_2O que sale = (323 moles + 57 moles) = 380 moles.

Balance de O_2 : Entrada = salida – consumo \rightarrow O_2 que sale = 560 moles – (403,75 moles + 49,875 moles) = 106,375 moles.

Moles totales del gas de combustión = 2883,045 moles.

Composición de los gases de emisión en base húmeda:

$$\% \text{CO} = (42,75 \text{ moles} * 100 / 2883,045 \text{ moles}) = 1,48\%$$

Mediante cálculos similares se obtienen los siguientes valores:

$$\% \text{CO}_2 = 8,40\%; \% \text{H}_2\text{O} = 13,18\%; \% \text{N}_2 = 73,07\%; \% \text{O}_2 = 3,69\%; \% \text{C}_3\text{H}_8 = 0,18\%.$$

Composición de los gases de combustión en base seca:

Moles de gases de emisión sin agua: 2883,045 moles – 380 moles = 2503,045 moles.

$$\% \text{CO} = (42,75 \text{ moles} * 100 / 2503,045 \text{ moles}) = 1,71\%.$$

Mediante cálculos similares se obtienen los siguientes valores:

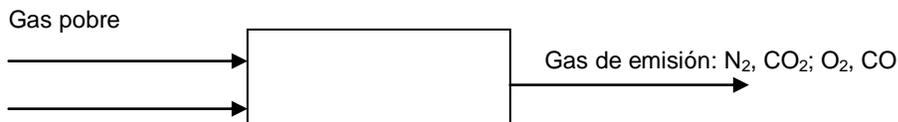
$\%CO_2 = 9,68\%$; $\%N_2 = 84,16\%$; $\%O_2 = 4,25\%$; $\%C_3H_8 = 0,20\%$.

Respuestas: Composición en base húmeda: $\%CO = 1,48\%$; $\%CO_2 = 8,40\%$; $\%H_2O = 13,18\%$; $\%N_2 = 73,07\%$; $\%O_2 = 3,69\%$; $\%C_3H_8 = 0,18\%$; Composición en base seca: $\%CO = 1,71\%$; $\%CO_2 = 9,68\%$; $\%N_2 = 84,16\%$; $\%O_2 = 4,25\%$; $\%C_3H_8 = 0,20\%$.

2.10.2 EJERCICIO:

Un gas pobre obtenido de coque tiene la siguiente composición en volumen: 28,0% de CO; 3,5% de CO₂; 0,5% de O₂ y 68% de N₂. Este gas se quema con una cantidad tal de aire que el oxígeno del aire está en un 20% en exceso del oxígeno *neto* necesario para la combustión. Si la combustión se completa en un 98%, calcule la masa y la composición en porcentaje volumétrico del gas de combustión formado por cada 100 lb. de gas quemado.

Base de cálculo: 100 lb -mol de gas pobre.



Aire 79% N₂ y 21% O₂

El gas pobre consiste en: 28 lb Mol de CO, 3,5 lb mol de CO₂, 0,5 lb mol de O₂ y 68 lb mol de N₂.

Combustión completa: $28 CO + 14 O_2 \rightarrow 28 CO_2$

O₂ necesario para la combustión completa: 14 lb mol.

O₂ en gas pobre: 0,5 lb mol.

O₂ neto necesario para la combustión completa: 13,5 lb mol.

O₂ suministrado: $13,5 \text{ lb mol} * 1,2 = 16,2 \text{ lb mol}$.

N₂ suministrado = $16,2 \text{ lb mol } O_2 * (79 \text{ lb mol } N_2 / 21 \text{ lb mol } O_2) = 60,94 \text{ lb mol}$.

CO que se quema: $28 \text{ lb mol} * 0,98 = 27,44 \text{ lb mol}$.

$27,44 CO + 13,72 O_2 \rightarrow 27,44 CO_2$

Balance para N₂: Entrada = salida → 68 lb mol + 60,94 lb mol = N₂ que sale → N₂ que sale = 128,94 lb mol.

Balance para CO₂: Entrada + producción = salida → 3,5 lb mol + 27,44 lb mol = CO₂ que sale → CO₂ que sale = 30,94 lb mol.

Balance para O₂: Entrada = salida + consumo → 0,5 lb mol + 16,2 lb mol = O₂ que sale + 13,72 lb mol → O₂ que sale = 2,98 lb mol.

Balance para CO: Entrada = salida + consumo → 28 lb mol = CO que sale + 27,44 lb mol → CO que sale = 0,56 lb mol.

Resumen para el gas de emisión:

Gas	Lb mol	Masa (lb)
N ₂	128,94	3610,32
CO ₂	30,94	1361,36
O ₂	2,98	95,36
CO	0,56	15,68
Totales	163,42	5082,72

Masa de gas pobre = 28 lb mol CO * (28 lb / 1 lb mol) + 3,5 lb mol CO₂ * (44 lb / 1 lb mol) + 0,5 lb mol O₂ * (32 lb / 1 lb mol) + 68 lb mol N₂ * (28 lb / 1 lb mol) = 2858 lb.

Se producen 5082,72 lb por cada 2858 lb de gas pobre quemadas. Entonces, el cálculo para determinar la masa de gas de emisión obtenida al quemar 100 lb de gas pobre es:

Masa de gas de emisión = 100 lb de gas pobre * (5082,72 lb gas emisión / 2858 lb gas pobre) = 177,84 lb.

La composición volumétrica del gas de emisión es la misma para cualquier cantidad del mismo gas pobre quemado:

% N₂ = 128,94 lb mol N₂ * 100 / 163,42 lb mol gas emisión = 78,90%.

De manera análoga se obtienen los siguientes porcentajes:

% CO₂ = 18,93%

% O₂ = 1,82 %

% CO = 0,34%

Respuestas: 177,84 lb; 78,90% N₂, 18,93% CO₂, 1,82% O₂, 0,34% CO.

2.11 EJERCICIOS

2.11.1 Dibuje un diagrama de flujo para el proceso que se describe a continuación, etiquetando todos los flujos de alimentación, de producción y de conexión entre las unidades: La deshidrogenación catalítica del propano se lleva a cabo en un reactor continuo de cama empacada. Un precalentador se alimenta con 100 libras por hora de propano puro, en el que se calienta a una temperatura de 670° C antes de pasar al reactor. El gas de salida del reactor, que contiene propano, propileno, metano e hidrógeno, se enfría desde 800° C hasta 110° C y alimenta una torre de absorción en la que el propano y el propileno se disuelven en aceite. El aceite entra a una torre de desorción en la que se calienta, permitiendo la salida de los gases disueltos; estos gases se comprimen y se transfieren a una columna de destilación de alta presión, en donde el propano y el propileno se separan. El flujo de propano se hace recircular hacia la alimentación del precalentador del reactor. El flujo del producto de la columna de destilación contiene 98% de propileno, y el flujo de recirculación, 97% de propano. El aceite desorbido se hace recircular a la torre de absorción.

2.11.2 Se destilan cien kilogramos por hora de una mezcla que contiene partes iguales en masa de benceno y tolueno. La velocidad de flujo del producto en la cabeza de la columna es de 48,8 kg/h, y el residuo de la destilación contiene 7,11% en peso de benceno. Dibuje y etiquete un diagrama de flujo del proceso. Después calcule las fracciones en masa y las fracciones molares del benceno y las velocidades de flujo molar del benceno y del tolueno (mol/h) en el flujo de productos en la cabeza de la destilación.

Respuestas: 0,95; 0,96; 26,5 moles tolueno/h.

2.11.3 Una mezcla de pintura que contiene 25% de un pigmento y el resto de agua se vende a \$12,00/kg, y una mezcla que contiene 10% de pigmento se vende a \$7,00/kg. Si un fabricante de pinturas produce una mezcla que contiene 15% de pigmento, ¿en cuánto debe venderla (en \$/kg) para tener una ganancia del 10%?

Respuesta: \$9,53/kg.

2.11.4 Un flujo de agua líquida y aire entran a una cámara humectadora en la que el agua se evapora por completo. El aire a la entrada contiene 1,00% en mol de H_2O (v), 20,8% de O_2 y el resto de N_2 , y el aire húmedo contiene 10,0% en mol de H_2O . Calcule la velocidad de flujo volumétrico (pie^3/min) del líquido requerida para humedecer 200 lb mol/min del aire de entrada.

Respuesta: 5,77 pie^3/min .

2.11.5 Se desea preparar una tonelada de una solución acuosa de KOH al 6% en masa. Para lo anterior se dispone de un tanque que contiene solución de KOH al 4% en masa. ¿Cuánto KOH debe añadirse a la solución del 4%?

Respuesta: 20,9 kg.

2.11.6 Una compañía tiene un contrato para NaCl del 98% de pureza (2% de impurezas insolubles) por \$1200 / tonelada. Su último cargamento de 10 toneladas tenía solamente el 90% de pureza (10% de sólidos insolubles). ¿Cuánto se debe pagar por el cargamento?

Respuesta: \$11016.

2.11.7 En un proceso para la obtención de sal cristalizada se introduce a un evaporador – cristizador una solución saturada de cloruro de sodio al 30% en peso y 240° F. El proceso es isotérmico de tal manera que se obtiene por el fondo del aparato la sal cristalizada igual al 90% de la sal alimentada. Se evaporan 100 lb/h de agua y se produce, además, una salmuera saturada (o sea de composición 30% en masa). Calcúlese la cantidad de salmuera introducida en lb/h y la sal cristalizada en lb/h.

2.11.8 Una mezcla que contiene 20% molar de butano, 35% molar de pentano y 45% molar de hexano se separa por destilación fraccionada. El destilado contiene 95% molar de butano, 45 de pentano y 1% de hexano. El destilado debe contener 90% del butano cargado en el alimento. Determínese la composición de los productos de fondo.

Respuesta: 2,46% de butano, 42,24% de pentano y 55,28% de hexano.

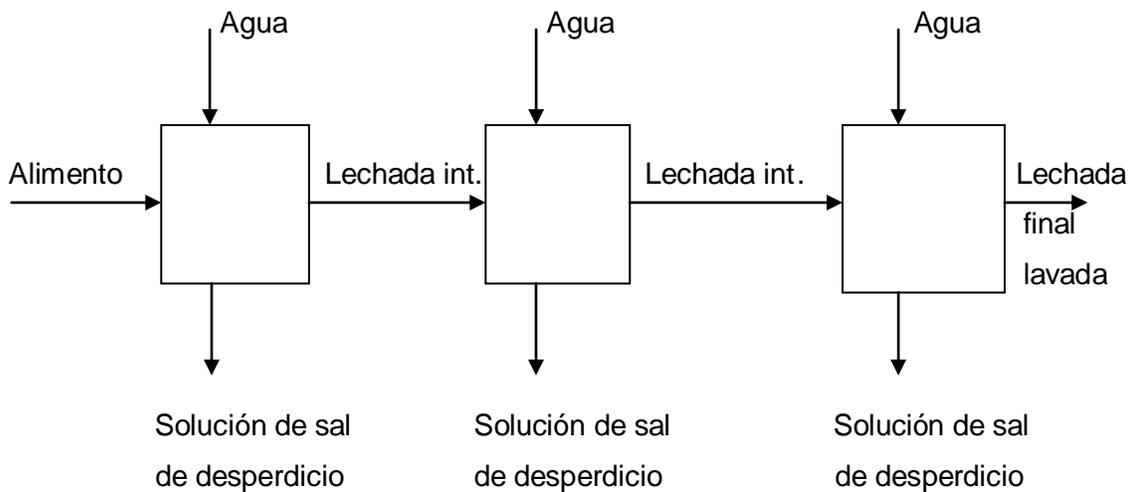
2.11.9 Se alimentan a un evaporador 10000 lb/h de una solución que contiene 6% en masa de sal en agua. Se produce una solución saturada y parte de la sal cristaliza. Los cristales, con algo de solución adherida, son centrifugados para retirar parte de la

solución. Luego los cristales se secan para remover el resto del agua. Durante una prueba de una hora, 837,6 lb de solución concentrada se retiran, 198,7 lb de solución son retiradas en la centrífuga y 361,7 lb de cristales secos salen del secador. Ensayos previos sobre la centrífuga demuestran que se retira aproximadamente el 60% de la solución adherida. Calcúlese: La solubilidad de la sal en lb sal / lb agua; el agua evaporada en el evaporador y el agua evaporada en el secador.

Respuestas: 0,298 lb sal / lb agua; 8500 lb; 102 lb.

2.11.10 Una lechada compuesta de un precipitado de TiO_2 en una solución de agua salada se va a lavar en tres etapas como se muestra en el diagrama de flujo. Si la lechada de alimentación consiste de 1000 lb/h de 20% de TiO_2 , 30% de sal y el resto de agua, calcúlese la alimentación de agua de lavado a cada etapa. Supóngase que:

- (a) El 80% de la sal alimentada a cada etapa sale con la solución de desperdicio.
- (b) Se operan las etapas de manera que la lechada de salida contenga una tercera parte de sólidos.
- (c) En cada etapa, la concentración de sal en su solución de desperdicio es la misma que la concentración de sal acarreada con la lechada de salida de la etapa



2.11.11 Se bombea agua a alta presión a un proceso. Se desea añadir sal al agua con el fin de que ésta tenga un 4% de sal. Por la dificultad de introducir un sólido a una corriente de alta presión, se utiliza el siguiente procedimiento: parte del agua que entra es derivada a través de un recipiente donde llega a saturarse de sal. Esta corriente saturada se mezcla con la de agua pura para obtener la solución al 4%. Si la concentración de la

solución saturada es del 17%, ¿qué porcentaje de agua debe ser derivada a través del saturador?

Respuesta: 20,34%.

2.11.12 Para un proceso se requieren $1000 \text{ pie}^3/\text{min}$ de aire a 75° F con humedad de $0,01808 \text{ lb-mol agua/lb-mol aire seco}$. Para tal efecto se dispone de aire a 95° F con humedad de $0,05288 \text{ lb-mol agua/lb-mol aire seco}$, el cual se acondiciona pasando parte de él por un enfriador – condensador donde pierde agua y sale a 50° F con humedad de $0,01226 \text{ lb-mol agua/lb-mol aire seco}$ para luego ser mezclado con la corriente derivada y recalentado hasta los 75° F . Calcúlese el porcentaje de aire derivado. La presión de trabajo es de 1 atm .