

# Unidad

## 5

## Balances de Masa en Estado Estacionario

### Introducción

Los balances de masa son requeridos en todos los procesos industriales. En esta unidad se estudiarán aquellos balances de energía en sistemas que no presenten reacciones químicas y que estén operando en condiciones estacionarias. Estos tipos de equipos pueden ser separadores, mezcladores, torres de destilación, torres fraccionadoras, y otros. Se dará el principio de conservación y se describirá y caracterizará los parámetros que definen a los procesos.

También se introducirán los grados de libertad de un proceso, herramienta de mucha utilidad para el ingeniero químico, ya que los resultados de un buen análisis de libertad le indicará al ingeniero de procesos si el sistema está bien especificado o no.

En algunas oportunidades, aún cuando los grados de libertad indiquen que los balances no se pueden responder pues falta un dato, es posible tomar una base (por ejemplo, un flujo molar de una corriente cualquiera) y resolver así el sistema. En este capítulo veremos cuándo una base se puede tomar y cuándo se puede cambiar.

Finalmente se verán sistemas que involucran múltiples unidades y se indicará cómo los grados de libertad darán una estrategia de cálculo fácil de seguir.

### Objetivos

Que el estudiante sea capaz de resolver un balance de materia de una planta de procesos básica.

*Sigue.....*

Continuación .....

Contenido

Esta unidad consta de los siguientes temas:

<b>Tema</b>	<b>Página</b>
1. Principios de conservación	111
2. Balance de masa sin reacción química	117
3. Análisis de los grados de libertad	121
4. Base de cálculo	124
5. Sistemas que involucran múltiples etapas	127
6. Corriente de recicló	130
7. Corriente de desvíó	133

## Tema 1

### Principios de conservación

Uno de los postulados más importantes de la teoría de la relatividad es el que establece que la energía y la masa total de un sistema se conservan. Este principio es la base de los cálculos en los balances de masa y energía. Es de hacer notar, que este principio jamás ha sido demostrado. Sin embargo, es una hipótesis sumamente sólida ya que nunca ha sido refutada experimentalmente.

Vamos a definir algunos términos antes de enunciar el postulado.

**Sistema:** Aquella porción del espacio que va a ser estudiada.

**Alrededores:** El resto del universo que no forma parte del sistema.

**Masa “m”:** Se refiere a una cantidad de materia con velocidad cero con respecto a un punto de referencia escogido arbitrariamente.

**Energía “E”:** Se refiere a la energía del sistema en todas sus posibles formas.

Entendemos que una cantidad se **conserva**, si no puede crearse ni destruirse. El principio de conservación de la masa y la energía puede ser expresado por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt}(m + E)_s = (\dot{m} + \dot{E})_{\text{entra}} - (\dot{m} + \dot{E})_{\text{sale}}$$

En sistemas que trabajan a velocidades mucho más bajas que la velocidad de la luz, o que no involucran reactores nucleares, la interconexión existente entre masa y energía es despreciable y la ecuación anterior puede desglosarse en dos:

$$\frac{d}{dt} m_s = \dot{m}_{\text{entra}} - \dot{m}_{\text{sale}} \quad \text{Principio de conservación de la masa.}$$

*Sigue.....*

$$\frac{d}{dt} E_s = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} \quad \text{Principio de conservación de la energía.}$$

### Clasificación de los sistemas:

• **Sistemas abiertos:** Son aquellos en los cuales hay transferencia de masa a través del sistema (entra y sale). Estos sistemas a su vez pueden clasificarse en:

- **Sistemas dinámicos:** Los cuales se caracterizan porque sus propiedades varían con el tiempo.
- **Sistemas estacionarios:** Son aquellos en los cuales sus propiedades permanecen constantes a través del tiempo.

Para sistemas en estado estacionario los términos de acumulación  $dm_s/dt$  y  $dE_s/dt$  son iguales a cero y por lo tanto:

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{sale} \quad y$$

$$\dot{E}_{entra} = \dot{E}_{sale}$$

• **Sistemas cerrados:** Son aquellos en los cuales no hay transferencia de masa a través de los límites del sistema y por lo tanto:

$$\frac{d}{dt} m_s = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale} = 0$$

• **Sistemas aislados:** Son aquellos que son cerrados y, adicionalmente, no hay transferencia de energía a través de los límites del sistema.

$$\frac{d}{dt} E_s = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = 0$$

*Sigue.....*

## Continuación de principios de conservación.....

**Ejemplo:**

Considérese el sistema que consiste en un barril con una capacidad de 100 kg de H<sub>2</sub>O, el cual está vacío en el tiempo 0, y comienza a llenarse a una tasa de 10 kg de agua por minuto. A los diez minutos el barril se llena y comienza a desbordarse. Para un tiempo  $t < 10$  min, el agua entra a una tasa de 10 kg/min pero no sale nada. Por lo tanto, de la ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{d}{dt} m_s = 10 - 0 = 10 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

El barril es un sistema dinámico a pesar de que los flujos de entrada y salida no son funciones del tiempo. Para  $t > 10$  min, el barril está lleno, y por lo tanto la masa de agua en el sistema es constante con el tiempo.

$$\frac{d}{dt} m_s = 0 = 10 \frac{\text{kg}}{\text{min}} - \dot{m}_{\text{sale}}$$

$$\dot{m}_{\text{sale}} = 10 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

**Mol:** En el Sistema Internacional se define como: La cantidad de una sustancia que contiene tantas entidades elementales como número de átomos hay en 0,012 kg de Carbono 12. Podríamos llamar a esto gmol aunque en el Sistema Internacional la designación oficial es simplemente mol.

$$\text{Masa en g} = \text{Peso molecular} * \text{gmol}$$

$$\text{Masa en lb} = \text{Peso molecular} * \text{lbmol}$$

**Densidad:** Es la relación de la masa por unidad de volumen. ( $\rho = m/V$ )

**Volumen Específico:** El inverso de la densidad. ( $v = 1/\rho$ )

*Sigue.....*

**Peso Específico:** (gravedad específica)

$$g_{\text{esp}} = \frac{\rho_A}{\rho_{\text{ref}}}$$

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{g_{\text{esp}} \frac{60}{60^{\circ}}} - 131,5$$

**Unidades de composición:** Cuando tenemos un sistema en el cual hay más de un componente, debemos conocer las características de cada uno de ellos, así como la proporción de cada uno de los componentes con respecto al total. Es por ello que definimos las unidades de composición o concentración.

- **Concentración molar:** Moles de un componente por volumen de solución. Ej: Molaridad (mol/l).
- **Concentración en masa:** Masa de un componente por volumen de solución.
- **Fracción molar ( $x_i$ ):** Moles de un componente por mol de mezcla.

$$x_i = \frac{\text{moles de } i}{\text{moles totales}}$$

- **Fracción en masa ( $w_i$ ):** masa de un componente por unidad de masa de la mezcla. Ej: p.p.m. partes por millón.

$$w_i = \frac{\text{masa de } i}{\text{masa total}}$$

Se debe recordar que el principio de conservación de la masa únicamente se aplica a la masa de las especies o a los moles cuando no hay reacción

*Sigue.....*

## Continuación de principios de conservación.....

química. En consecuencia, para propósitos de balance de materiales es necesario y preferible trabajar con fracción en masa o en moles o flujo mássicos y molares.

**Peso molecular promedio de una mezcla:**

$$\ddot{M} = \sum_{i=1}^n x_i M_i$$

**Ejemplo:** Una solución de NaOH en agua tiene una molaridad de 2,0 y una densidad de 53 kgmol/m<sup>3</sup>. Calcule la fracción molar de NaOH y la densidad mássica de la solución en toneladas por metro cúbico.

$$x_{\text{NaOH}} = \frac{2,0 \text{ g mol}_{\text{NaOH}}}{l_{\text{solución}}} \frac{1 \text{ l}}{10^{-3} \text{ m}^3} \frac{1 \text{ kg mol}}{10^3 \text{ g mol}} \frac{1 \text{ m}^3}{53 \text{ kg mol}}$$

$$x_{\text{NaOH}} = 0,0377 \frac{\text{kg mol}_{\text{NaOH}}}{\text{kg mol}_{\text{solución}}}$$

Si por definición 1 kgmol de solución contiene 0,0377 kgmol de NaOH, el resto tiene que ser agua 0,9623. El peso molecular promedio de la solución es:

$$\ddot{M} = x_{\text{NaOH}} M_{\text{NaOH}} + x_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0377 * 40 + 0,9623 * 18 = 18,83$$

$$\rho_{\text{kg/m}^3} = \rho_{\text{kmol/m}^3} M_{\text{kg/kgmol}} = 998,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1 \text{ ton} = 10^3 \text{ kg} \quad \rho = 0,998 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$$

**Ejemplo:** Una mezcla contiene 10 g/l de ambos tolueno y xileno en benceno. Si la densidad de la mezcla es de 0,85 g/cc, calcule la fracción mássica de tolueno en una base libre de benceno.

*Sigue.....*

En primer lugar, las concentraciones de tolueno y xileno tienen que ser expresadas en fracciones en masa.

$$w_t = \frac{10 \text{g}_{\text{tolueno}}}{1_{\text{solución}}} \frac{11 \text{ cm}^3 (10^{-2} \text{ m})^3}{10^{-3} \text{ m}^3 0,85 \text{g}} \frac{1}{1 \text{cm}^3}$$

$$w_t = \frac{10^{-2} \text{g}_{\text{tolueno}}}{0,85 \text{g}_{\text{solución}}} = 0,01176 = w_x$$

$$\frac{\text{masa tolueno}}{\text{masa tolueno} + \text{masa xileno}} = \frac{w_t}{w_t + w_x} = 0,5$$



## Tema 2

### Balance de masa sin reacción química

A continuación vamos a comenzar con el estudio de los balances de masa sin reacción química en sistemas abiertos en condiciones estacionarias. Éste es el caso más simple que se puede hallar. No obstante su falta de complicación, es muy importante prestarle mucha atención ya que en la práctica muchos sistemas se comportan de esta manera. La mayoría de los sistemas involucran uno o más reactores, pero la parte más importante suele venir después, cuando hay que separar los diferentes compuestos que salen de los reactores para obtener el o los productos deseados con la calidad y pureza requeridas. Esto se logra por medio de procesos de separación como los que vamos a estudiar a continuación.

En primer lugar vamos a definir la nomenclatura a ser utilizada en este curso:

$N_j$  = Moles de  $j$  por unidad de tiempo.

$F_j$  = Masa de  $j$  por unidad de tiempo.

$$N = \sum_{j=1}^s N_j \quad F = \sum_{j=1}^s F_j$$

Fracción en masa  $w_j$ , en  $S$  especies

$$\sum_{j=1}^s w_j = 1$$

Fracción en moles  $x_j$ , en  $S$  especies

$$\sum_{j=1}^s x_j = 1$$

Peso molecular para cada especie  $M_j$ .

$$N = \sum_{j=1}^s \left( \frac{w_j * F}{M_j} \right) = F \sum_{j=1}^s \left( \frac{w_j}{M_j} \right)$$

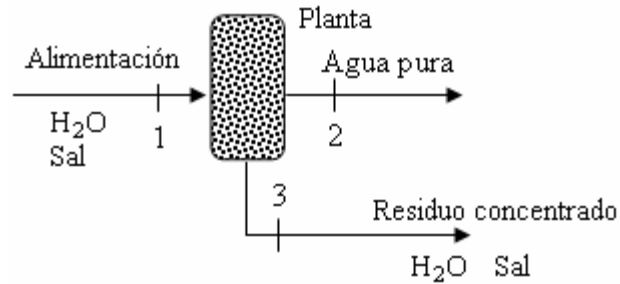
$$x_j = \left( \frac{F * w_j}{M_j} \right) \frac{1}{N} = \frac{w_j}{M_j} \frac{1}{\sum_{j=1}^s \frac{w_j}{M_j}}$$

*Sigue.....*

Continuación de balance de masa sin reacción química.....

$$w_j = \frac{F_j}{F} \quad x_j = \frac{N_j}{N}$$

**Ejemplo:** Considere la planta de desalinización mostrada en la figura:



Si el agua de mar contiene  $w_{\text{NaCl}} = 0,035$  y es evaporada hasta producir 1000 lb/h de agua pura. Determine la cantidad de agua de alimentación requerida si problemas de corrosión limitan la concentración másica de sal en el residuo a 0,07 ( $w_{\text{NaCl}}$ ).

$$w_{\text{H}_2\text{O}}^1 = 1 - 0,035$$

$$w_{\text{H}_2\text{O}}^3 = 1 - 0,07$$

$$\text{Masa que entra} = \text{Masa que sale:} \quad F^1 = F^2 + F^3$$

$$\text{La masa total de sal se conserva:} \quad F^1 w_{\text{NaCl}}^1 = F^3 w_{\text{NaCl}}^3$$

$$\text{La masa total de agua se conserva} \quad F^1 (1 - w_{\text{NaCl}}^1) = F^2 + F^3 (1 - w_{\text{NaCl}}^3)$$

### Nº de Ecuaciones Independientes.

En general, si el sistema tiene  $N$  especies o compuestos, la ley de la conservación de la masa dará  $N + 1$  ecuaciones, una para cada una de las especies y una para la masa total. De éstas  $N + 1$  ecuaciones, únicamente  $N$  serán linealmente independientes.

### Homogeneidad de las Ecuaciones de Balance.

Un sistema de ecuaciones en el cual, los valores de un conjunto de

*Sigue.....*

## Continuación de balance de masa sin reacción química.....

variables pueden ser cambiados en escala uniformemente, de forma tal que los valores resultantes continúen satisfaciendo las ecuaciones, se dice que es un sistema homogéneo.

Las ecuaciones de balance envuelven siempre dos tipos de variables, composición y flujos. Es fácil observar que estas ecuaciones son siempre homogéneas en los flujos  $F_j$  porque, si cualquier conjunto de flujos  $F_j$  satisface las ecuaciones de balance, y si  $\alpha$  es un número de los flujos,  $\alpha F_j$  también satisfacen las ecuaciones.

Como consecuencia de esto podemos tomar cualquier solución y cambiar de escala todos los flujos por cualquier factor y todavía estar seguros de que el principio de conservación no será violado.

Es por ello que, si a ninguno de los flujos de las corrientes se le asigna un valor en el problema, entonces a uno cualquiera de los flujos se le asigna un valor arbitrario para propósitos de cálculo. Esto se denomina escoger una base de cálculo.

**Ejemplo:** En una columna de destilación una mezcla equimolar de etanol, propanol y butanol es separada en una corriente de tope que contiene 2/3 de etanol y no tiene butanol y una corriente de fondo que no contiene etanol. Calcule las corrientes de tope y de fondo para una tasa de alimentación de 1000 mol/h.

Balance global:

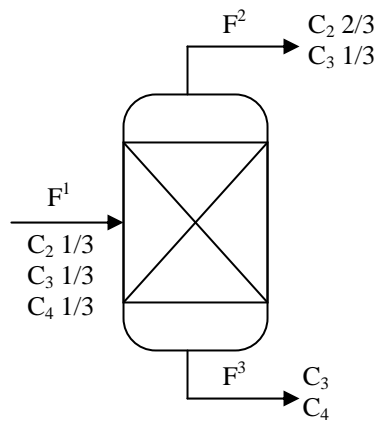
$$N^1 = N^2 + N^3$$

Balance en  $C_2$ :

$$\frac{1}{3}N^1 = \frac{2}{3}N^2$$

Balance en  $C_3$ :

$$\frac{1}{3}N^1 = \frac{1}{3}N^2 + xN^3$$



*Sigue.....*

Continuación de balance de masa sin reacción química.....

Balance en C<sub>4</sub>:

$$\frac{1}{3}N^1 = yN^3$$

por lo tanto:  $N^2 = 500 \text{ mol/h}$  y  $N^3 = 500 \text{ mol/h}$

$$y = 2/3 \quad x = 1/3$$

## Tema 3

### Análisis de los grados de libertad

Los grados de libertad de un sistema representan un índice para medir el balance entre el número de incógnitas y el número de ecuaciones y datos disponibles.

El grado de libertad de un sistema se define como:

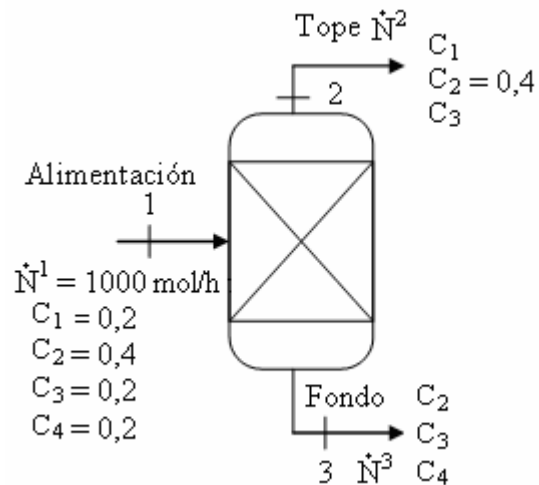
**Grado de libertad = N° total de variables independientes – N° total de ecuaciones de balance linealmente independientes – N° total de variables independientes especificadas – N° total de relaciones subsidiarias.**

Si el grado de libertad es positivo, entonces el problema está subespecificado, y no es posible solucionarlo para todas las variables. Si el grado de libertad es negativo, entonces el problema está sobreespecificado y hay que descartar la información adicional antes de hallar una respuesta única. Si el grado de libertad es cero, entonces el problema está correctamente especificado, es decir, el número de incógnitas iguala al número de ecuaciones disponibles.

**Ejemplo:** Considere el sistema mostrado en el diagrama de flujo anexo. Si se sabe que el 80% del compuesto 3 se recupera por el fondo de la columna, verifique que el proceso esté bien especificado y determine todas las composiciones molares de las corrientes.

*Sigue.....*

Continuación de análisis de los grados de libertad.....



Para poder verificar que el proceso está bien especificado, vamos a determinar los grados de libertad del sistema:

Grado de libertad = N° total de variables independientes – N° total de ecuaciones de balance linealmente independientes – N° total de variables independientes especificadas – N° total de relaciones subsidiarias.

N° total de variables independientes = 10

N° total de ecuaciones de balance linealmente independientes = 4

N° total de variables independientes especificadas

Composiciones de corrientes = 4

Flujos = 1

N° total de relaciones subsidiarias = 1

Grados de libertad = 0

Por lo tanto el problema está correctamente especificado y pueden conocerse los flujos y las composiciones de todas las corrientes:

$$0,8 (0,2 * 1000) = N_{C_3}^3 \quad N_{C_3}^3 = 160 \text{ mol/h}$$

Si al sistema le entran  $0,2 * 1000 = 200 \text{ mol/h}$  de  $C_3$ , por el tope de la columna salen  $200 - 160 = 40 \text{ mol/h}$  de  $C_3$ .

Todo el  $C_1$  sale por el tope, por lo tanto:

$$N_{C_1}^2 = 0,2 * 1000 = 200 \text{ mol/h.}$$

*Sigue.....*

Continuación de análisis de los grados de libertad.....

Si  $N_{C_1}^2 + N_{C_3}^2$  representan el 60% de la corriente 2:

$$N^2 = \frac{N_{C_1}^2 + N_{C_3}^2}{0,6} = \frac{200 + 40}{0,6} = 400$$

Por balance global:  $N^1 = N^2 + N^3$

$$N^3 = 1000 - 400 = 600 \text{ mol/h}$$

Corriente de fondo:

$$N_{C_3}^3 = 160 \text{ mol/h}$$

Todo el  $C_4$  que entra a la columna sale por la corriente 3:

$$N_{C_4}^3 = 0,2 * 1000 = 200 \text{ mol/h}$$

$$N_{C_2}^3 + N_{C_3}^3 + N_{C_4}^3 = N^3$$

$$\text{Por lo tanto: } N_{C_2}^3 = 600 - 160 - 200 = 240 \text{ mol/h}$$

Composiciones molares de las corrientes 2 y 3:

$$X_{C_1}^2 = \frac{N_{C_1}^2}{N^2} = \frac{200}{400} = 0,50$$

$$X_{C_2}^2 = 0,40$$

$$X_{C_3}^2 = 1 - (0,5 + 0,4) = 0,10$$

$$X_{C_2}^3 = \frac{N_{C_2}^3}{N^3} = \frac{240}{600} = 0,4$$

$$X_{C_3}^3 = \frac{N_{C_3}^3}{N^3} = \frac{160}{600} = 0,27$$

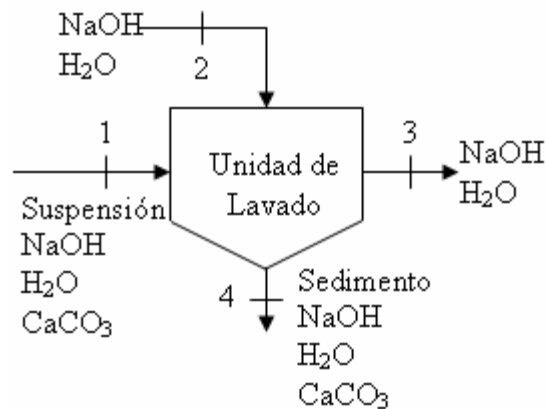
$$X_{C_4}^3 = 1 - (0,4 + 0,27) = 0,33$$

**Tema 4****Base de cálculo**

Si ninguno de los flujos másicos es asignado al establecer el problema, entonces a cualquiera de estos flujos se le puede asignar un valor arbitrario para propósitos de cálculo.

**Ejemplo:**

Una suspensión de  $\text{CaCO}_3$ , precipitada en una solución de  $\text{NaOH}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , es lavada con una masa igual de una solución diluida de 5% (en peso) de  $\text{NaOH}$  en  $\text{H}_2\text{O}$ . La suspensión lavada y sedimentada que sale por la unidad contiene 2 kg de solución por cada kg de sólido ( $\text{CaCO}_3$ ). Puede suponerse que la solución que sale de la unidad tiene la misma concentración que la solución que sale con los sólidos. Si la corriente de alimentación contiene la misma fracción en masa para todos los componentes, calcule la concentración de la solución que sale de la unidad.



Vamos a determinar los grados de libertad del sistema:

Grado de libertad =  $N^\circ$  total de variables independientes –  $N^\circ$  total de ecuaciones de balance linealmente independientes –  $N^\circ$  total de variables independientes especificadas –  $N^\circ$  total de relaciones subsidiarias.

$N^\circ$  total de variables independientes = 10

$N^\circ$  total de ecuaciones de balance linealmente independientes = 3

$N^\circ$  total de variables independientes especificadas

*Sigue.....*



Continuación de base de cálculo.....

Composiciones de corrientes = 3

Nº total de relaciones subsidiarias = 3

Grados de libertad = 1

Base de cálculo = 1

**Grados de libertad = 0**

Por lo tanto el problema está bien especificado y puede resolverse.

Tomamos una base de cálculo:  $F^1 = 1000$  kg/h

$$F^1 = F^2 \quad w_{\text{NaOH}}^2 = 0,05$$

$$w_{\text{NaOH}}^4 + w_{\text{H}_2\text{O}}^4 + w_{\text{CaCO}_3}^4 = 1$$

$$w_{\text{H}_2\text{O}}^4 = 1 - w_{\text{NaOH}}^4 - w_{\text{CaCO}_3}^4$$

$$\frac{F_{\text{NaOH}}^4 + F_{\text{H}_2\text{O}}^4}{F_{\text{CaCO}_3}^4} = 2$$

$$\frac{w_{\text{NaOH}}^4 F^4 + (1 - w_{\text{NaOH}}^4 - w_{\text{CaCO}_3}^4) F^4}{w_{\text{CaCO}_3}^4 F^4} = 2$$

$$\text{de donde: } \frac{w_{\text{NaOH}}^4 + (1 - w_{\text{NaOH}}^4 - w_{\text{CaCO}_3}^4)}{w_{\text{CaCO}_3}^4} = 2 \quad (1)$$

$$w_{\text{NaOH}}^3 = \frac{F_{\text{NaOH}}^3}{F_{\text{NaOH}}^3 + F_{\text{H}_2\text{O}}^3} = \frac{F_{\text{NaOH}}^4}{F_{\text{NaOH}}^4 + F_{\text{H}_2\text{O}}^4} = \frac{w_{\text{NaOH}}^3}{w_{\text{NaOH}}^3 + (1 - w_{\text{NaOH}}^3)} = \frac{w_{\text{NaOH}}^4}{w_{\text{NaOH}}^4 + w_{\text{H}_2\text{O}}^4} \quad (2)$$

Balance global:

$$F^1 + F^2 = F^3 + F^4 \quad (3)$$

Balance en  $\text{CaCO}_3$ :

$$\frac{1}{3} F^1 = F^4 w_{\text{CaCO}_3}^4 \quad (4)$$

Balance en NaOH:

$$\frac{1}{3} F^1 + 0,05 F^2 = w_{\text{NaOH}}^3 F^3 + w_{\text{NaOH}}^4 F^4 \quad (5)$$

de las ecuaciones (1) y (2) obtenemos:

*Sigue.....*

Continuación de base de cálculo.....

$$w_{\text{NaOH}}^3 = \frac{2 + w_{\text{NaOH}}^4}{2w_{\text{NaOH}}^4 - 1}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (3) y si sabemos (de la ecuación (1)) que:

$$w_{\text{CaCO}_3}^4 = 2w_{\text{NaOH}}^4 - 1$$

se obtiene un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas que, al resolver, se tiene resuelto el sistema.

## Tema 5

### Sistemas que involucran múltiples etapas

Hasta el momento hemos observado, que independientemente del grado de complejidad que implique el sistema estudiado, éste puede representarse como una caja negra de la cual sólo nos interesan los flujos de entrada y de salida. Sin embargo, la mayoría de los sistemas con los cuales se ve involucrado un Ingeniero Químico consiste en una secuencia de etapas de proceso, cada una de las cuales ocurre dentro de una unidad individual diseñada especialmente. Para poder hacer el balance de materia de estos sistemas integrados por unidades múltiples, el ingeniero debe conocer los flujos de entrada y salida de toda la planta en su globalidad, así como los flujos de entrada y salida y cada una de las unidades que forman parte del proceso.

**Ejemplo:** Considere un sistema formado por dos columnas de destilación diseñadas para separar una mezcla de Benceno, Tolueno y Xileno en tres corrientes, cada una de las cuales es rica en uno de los compuestos. La corriente de alimentación tiene un flujo másico de 1000 mol/h y está compuesta de 20% Benceno, 30% Tolueno y el resto Xileno (% en moles), en la primera unidad se obtiene una corriente de fondo de 2,5% B y 35% T y un destilado de 8% B y 72% T en la segunda unidad. Halle el flujo de cada una de las corrientes así como su composición.

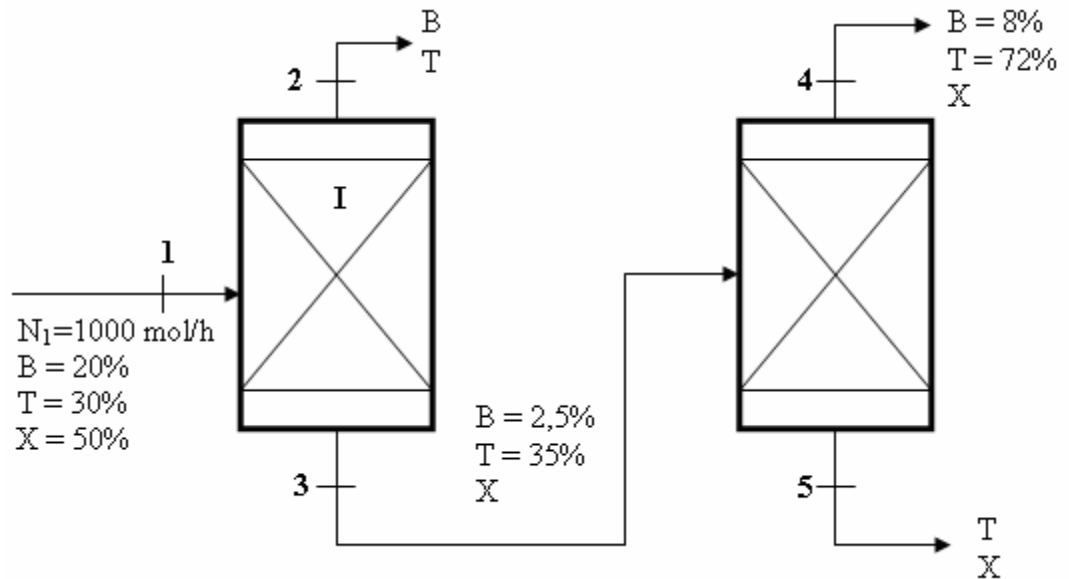
**Solución:**

En primer lugar vamos a hacer un análisis de los grados de libertad de todo el sistema. Para ello podemos utilizar la **Unidad I** en forma independiente,

*Sigue.....*

## Continuación de Sistemas que involucran múltiples unidades.....

después podemos hacer el análisis de la **Unidad II** en la misma forma, después es posible hacer un análisis global del sistema, es decir, considerarlo como una caja negra y tomar en cuenta únicamente las corrientes que entran y salen del proceso (corrientes 1, 4 y 5); por último se hace el análisis de todo el sistema en forma completa tomando en cuenta todas las corrientes.



	<b>Unidad I</b>	<b>Unidad II</b>	<b>Global</b>	<b>Sistema</b>
Corrientes	1, 2, 3	3, 4, 5	1, 2, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5
Variables independientes	8	8	10	13
Ec. de balance	3	3	3	6
Composiciones	4	4	4	6
Flujos	1	-	1	1
Relaciones Subsidiarias	-	-	-	-
<b>Grados de libertad</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

*Sigue.....*

*Continuación de Sistemas que involucran múltiples unidades.....*

De este análisis puede deducirse que el sistema está bien especificado, y que la estrategia de cálculo es la siguiente: En primer lugar, se resuelve la Unidad I, después la Unidad II.

Balance global:

$$N^1 = N^2 + N^3$$

Balance en Xileno:

$$0,50 * 1000 = 0,625N^3, \text{ por lo tanto } N^3 = 800 \text{ mol/h}$$

$$N^2 = 200 \text{ mol/h}$$

Balance en Benceno:

$$0,20 * 1000 = x_B^2 * 200 = 0,025 * 800$$

$$\text{de donde } x_B^2 = 0,90$$

Una vez resuelta la columna I, pasamos a resolver la Unidad II.

Balance global:

$$N^3 = N^4 + N^5$$

Balance en Benceno:

$$0,025 * 800 = 0,08N^4 \text{ de donde } N^4 = 250 \text{ mol/h}$$

$$N^5 = 800 - 250 = 550 \text{ mol/h}$$

Balance en Tolueno:

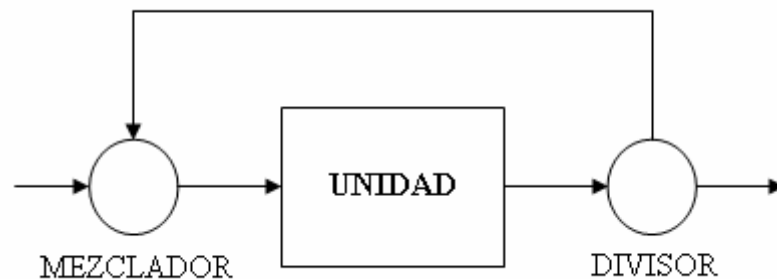
$$0,35 * 800 = 0,72 * 250 + x_T^5 * 550$$

$$\text{de donde } x_T^5 = 0,18$$

## Tema 6

### Corriente de reciclo

Un reciclo es simplemente una corriente que es separada de la salida de una unidad y regresa a una corriente anterior. La unidad que tiene un reciclo puede ser considerada como un proceso que contiene tres unidades: un mezclador, la unidad donde se realiza el proceso y un divisor de flujo.



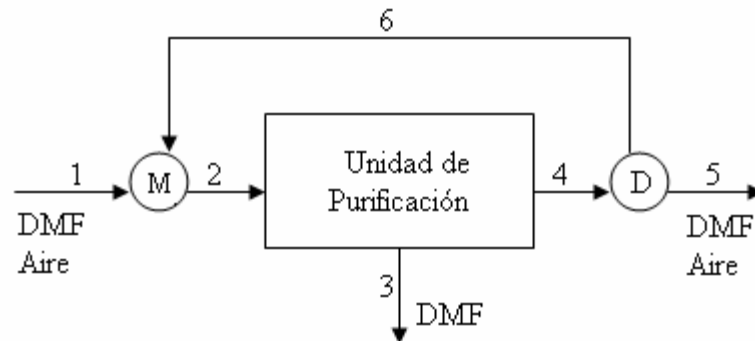
En este proceso el divisor requiere atención especial. Un divisor de corrientes es un dispositivo dentro del cual se divide el flujo de entrada de una determinada corriente en dos más corrientes menores. Como lo único que se separa es el flujo, la composición de cada una de las corrientes menores es igual e idéntica a la corriente principal. Debido a esto, los divisores de flujo tienen asociadas una serie de restricciones que es necesario utilizarlas en el momento de evaluar los grados de libertad de las unidades. En un sistema que contiene  $S$  sustancias cuyo flujo es dividido en  $N$  ramales habrá  $(N-1)(S-1)$  restricciones a las cuales las denominaremos “restricciones del divisor”.

**Ejemplo:** Un sistema de purificación con reciclo es utilizado para recuperar el solvente DMF de un gas de desecho que contiene 55% de DMF en aire. El producto debe tener únicamente 10% de DMF (% másicos). Calcule la fracción de reciclo si supone que la unidad de purificación puede remover

*Sigue.....*

Continuación de corriente de recicló.....

2/3 del DMF de la alimentación combinada a la unidad.



Análisis de los grados de libertad:

	Unidad	Divisor	Mezclador	Global	Sistema
Variables independientes:	5	6	6	5	11
Ec. de Balance:	2	2	2	2	6
Composiciones:	-	1	1	2	2
Flujos:	-	-	-	-	-
Relaciones Subsidiarias:	1	-	-	-	1
Restricciones del Divisor:	-	1	-	-	1
<b>Grados de libertad:</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Base de cálculo:</b>				<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Grados de libertad:</b>				<b>0</b>	<b>0</b>

Como puede observarse, el sistema está correctamente especificado, se toma una base de cálculo en la corriente 1 y se resuelve el sistema en forma global:

$$\text{Base de cálculo } F^1 = 100 \text{ lb/h}$$

Por la corriente 1 entran: 55 lb/h de DMF y 45 lb/h de aire. Todo el aire

*Sigue.....*

## Continuación de corriente de recicló.....

que entra al sistema por la corriente 1 tiene que salir por la corriente 5, es decir, por 5 salen 45 lb/h de aire; esto representa el 90% de esta corriente, Por lo tanto:

$$F^5 = \frac{45}{0,9} = 50 \text{ lb/h} \text{ es decir } F_{\text{DMF}}^5 = 50 - 45 \text{ lb/h}$$

El resto de la DMF que entra tiene que salir por la Unidad de Purificación:  
 $F^3 = 55 - 5 = 50 \text{ lb/h}$ .

El enunciado dice que la unidad está en capacidad de remover 2/3 de lo que entra por 2. Entonces, la cantidad de DMF que entra a la unidad es de 75 lb/h. Por la corriente 4 circulan  $75 - 50 = 25 \text{ lb/h}$  de DMF, si por la corriente 5 salen 5 lb/h de DMF, por la corriente 6 circularán  $25 - 5 = 20 \text{ lb/h}$  de DMF. Como estamos en presencia de un divisor de flujo, la composición de la corriente 5 debe ser igual a la de la 6, por lo tanto:

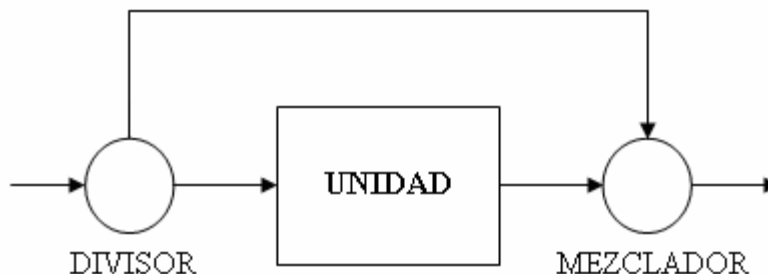
$$F^6 = \frac{20}{0,10} = 200 \text{ lb/h} \quad \frac{F^1}{F^6} = \frac{100}{200} = 0,50$$



## Tema 7

### Corriente de desvío

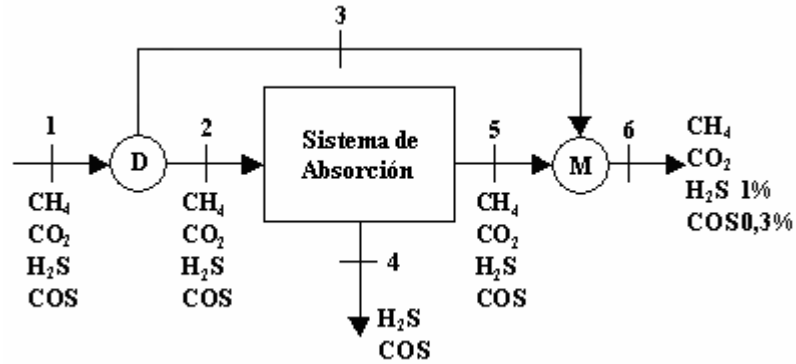
Una corriente de desvío corresponde a la separación de la corriente para impedir que sea procesada por la unidad situada más adelante. Este tipo de sistema puede ser considerado como un proceso que contiene tres unidades: un divisor de flujo, la unidad donde se realiza el proceso y un mezclador. Por lo tanto el análisis que se efectúa en las unidades en las cuales intervienen corrientes de desvío es similar al efectuado en los sistemas que contienen corrientes de reciclo.



**Ejemplo:** En un determinado proceso, el sistema de purificación para remover los compuestos de azufre, diseñado para operar con una carga de 820 mol/h, está sujeto temporalmente a un flujo de 1000 mol/h. Tomando en cuenta que el sistema de absorción sólo puede trabajar con el 82% de este flujo, se propone que el flujo adicional sea desviado y que la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en la corriente de salida del sistema de absorción sea reducida de tal manera que la corriente producto del mezclado contenga únicamente 1% de  $\text{H}_2\text{S}$  y 0,3% de COS (molar). Calcule todos los flujos del sistema. La corriente de alimentación tiene la siguiente composición: 15% de  $\text{CO}_2$ , 5% de  $\text{H}_2\text{S}$  y 1,41% de COS con el resto de  $\text{CH}_4$ .

*Sigue.....*

Continuación de corriente de desvío.....



Análisis de los grados de libertad:

	Divisor	Unidad	Mezclador	Global	Sistema
Variables Independientes	12	10	12	10	22
Ec. de Balance	4	4	4	4	12
Composiciones	3	--	2	5	5
Flujos	1	--	--	1	1
Relaciones Subsidiarias	1	--	--	--	1
Restricciones del Divisor	3	--	--	--	3
<b>Grados de Libertad</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Al estudiar este análisis de Grados de Libertad podemos sacar las siguientes conclusiones: El sistema está correctamente especificado, por lo tanto estamos en capacidad de determinar todos los flujos y todas las composiciones del sistema. Lo más conveniente es resolver el sistema, en primer lugar en forma global, después el divisor de flujo y, por último, la unidad de mezclado.

Balance global del sistema:

Por la corriente 1 entran: 785,9 mol/h de CH<sub>4</sub>, 150,0 mol/h de CO<sub>2</sub>, 50,0 mol/h de H<sub>2</sub>S y 14,1 mol/h de COS.

Sigue.....

Continuación de corriente de desvío.....

Por la corriente **6** sale todo el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> que entra por **1**, es decir, 935,9 mol/h. Esta cantidad de moles representa el 98,7% de la corriente **6**, por lo tanto:

$$N_6 = \frac{935,9}{0,987} = 948,22$$

Haciendo uso de las composiciones conocidas de la corriente **6**:

$$N_{H_2S}^6 = 9,45 \text{ y } N_{COS}^6 = 2,83 \text{ mol/h}$$

Por la corriente **4** sale el resto de H<sub>2</sub>S y COS:

$$N_{H_2S}^4 = 40,55 \text{ y } N_{COS}^4 = 11,27 \text{ mol/h} \quad N^4 = 51,82 \text{ mol/h}$$

Como la corriente **2** proviene de un divisor de flujo, tiene la misma composición que la corriente **1** y la corriente **3**.

$$N_1 = N_2 + N_3 \text{ por lo tanto, } N_3 = 180 \text{ mol/h}$$

Conociendo N<sub>2</sub> y N<sub>4</sub>, se puede conocer N<sub>5</sub>.

$$N^5 = N^2 - N^4 = 820 - 51,82 = 768,18$$

$$N_{CH_4}^5 = 0,7859 * 820 = 644,438$$

$$N_{CO_2}^5 = 0,15 * 820 = 127,5$$

$$N_{H_2S}^5 = N_{H_2S}^2 - N_{H_2S}^4 = 0,05 * 820 - 40,55 = 0,45$$

$$N_{COS}^5 = N_{COS}^2 - N_{COS}^4 = 0,0141 * 820 - 11,27 = 0,292$$

Con lo cual tenemos el problema resuelto.

Autoevaluación

1. Según sus grados de libertad, ¿cuándo un sistema está bien definido?
2. Cuando los grados de libertad son cero, ¿se puede tomar una base? Explique su respuesta.
3. Una base de cálculo se puede cambiar sin ningún problema, ¿las composiciones y flujos calculados por los balances de masa son los mismos? Detalle su respuesta.

*Sigue.....*

4. ¿Cuántas ecuaciones de balance se pueden escribir en un sistema de cuatro componentes? ¿Cuántas de esas ecuaciones son linealmente independientes?
5. ¿Un problema tiene solución si sólo se dan como datos variables intensivas (composiciones)?

**REFERENCIAS**

Creus, A., Instrumentación Industrial, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1979.

Felder, R. y R. Rousseau, Principios Elementales de los Procesos Químicos, 2da. Edición, Addison-Wesley Iberoamericana, Delaware, 1991.

Himmelblau, D., Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Prentice-Hall International Series, London, 1989.

Hougen, O., Watson, K. y R. Ragatz, Principios de los Procesos Químicos, Tomo I: Balances de Materia y Energía. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 1982.

Ledanois, J. M. y A. L. López de Ramos, Magnitudes, Dimensiones y Conversiones de Unidades, Equinoccio, Caracas, 1996.

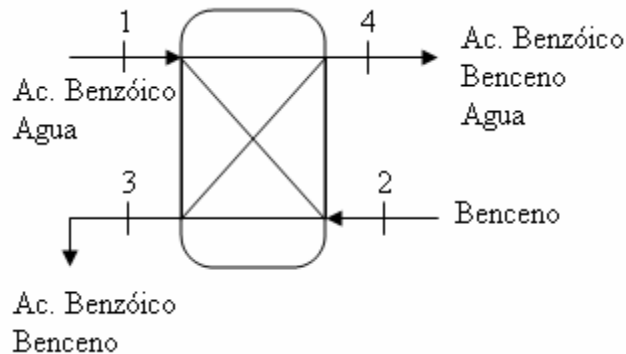
Perry, R. y D. Green, Perry's Chemical Engineer's Handbook, 6<sup>th</sup>. Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.

Reklaitis, G., Balances de Materia y Energía, McGraw-Hill, México, 1989.

Whitweel, J. y R. Toner, Conservation of Mass and Energy, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., Tokyo, 1969.

**EJERCICIOS PROPUESTOS**

1. El ácido benzóico puede ser extraído a partir de una solución diluida en agua, poniendo en contacto la solución con benceno. El proceso se lleva a cabo en una unidad de extracción de una sola etapa. La mezcla se separa en dos corrientes: una tendrá ácido benzóico y benceno, y la otra corriente tendrá los tres compuestos como se muestra en la figura.



El benceno es ligeramente soluble en agua, por lo tanto la corriente 4 tendrá 0,07 kg de benceno/kg de agua. El ácido benzóico se distribuirá entre las corrientes 3 y 4 como sigue:

$$\left( \frac{\text{Masa de ácido benzóico}}{\text{Masa de benceno}} \right)_3 = 4 \left( \frac{\text{Masa de ácido benzóico}}{\text{Masa (benceno + agua)}} \right)_4$$

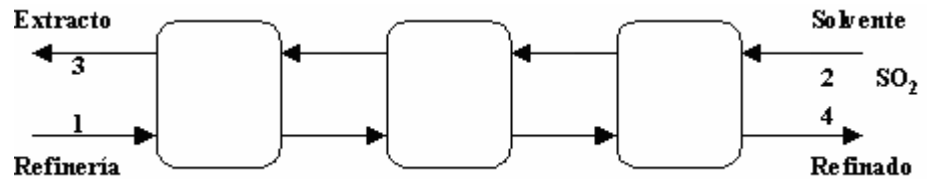
La corriente de alimentación (1) contiene 0,02 kg de ácido/kg de agua y es alimentada a una tasa de 10.000 kg/h.

- Muestre que el problema está subespecificado.
  - Suponga que el ácido benzóico extraído de la corriente (3) vale \$1/kg y que el benceno fresco (corriente 2) cuesta \$0,03/kg. Construya un gráfico de beneficio neto vs. flujo de benceno, y seleccione el flujo óptimo de benceno.
2. Para recobrar un soluto de una solución se emplea muchas veces un segundo solvente, el cual es inmisible con la solución, pero disuelve el soluto deseado. Este tipo de proceso de separación es conocido como extracción con solvente. En el sistema mostrado en la figura, se separa benceno de una corriente de refinería que contiene 70% (másico) de benceno en una mezcla de hidrocarburos parafínicos y nafténicos, por medio de una corriente de SO<sub>2</sub> líquido. Cuando se usan 3 libras de SO<sub>2</sub> por libra de alimentación al proceso se obtiene una corriente de Refinado que contiene 1/6 (fracción másica) de SO<sub>2</sub> y el resto de benceno. La corriente de extracto contiene todos los hidrocarburos restantes, SO<sub>2</sub>, y 1/4 de libra de

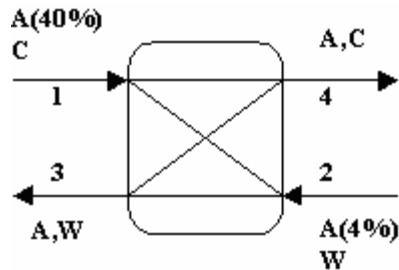
*Sigue.....*

Continuación de ejercicios.....

benceno por libra de hidrocarburos. En estas condiciones, cual es el porcentaje de benceno recuperado (lb de benceno en el refinado por lb de benceno en la alimentación)?.



3. Se desea separar una mezcla de alcohol A y una cetona C cuya composición en peso es 40% de A y 60% de C. Como el agua W es soluble en A pero no en C, se quiere utilizar como un elemento de extracción, tal como se muestra a continuación:



El agua que se utiliza en la extracción (corriente 2) no es pura, sino que contiene un 4% en peso de A y se sabe que la de distribución de A entre las corrientes (3) y (4) está dada por la siguiente relación:

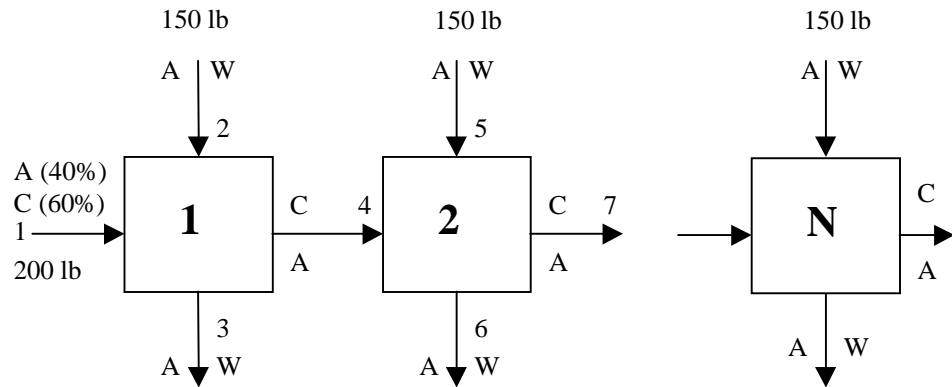
$$\left(\frac{\text{masaA}}{\text{masaW}}\right)_3 = 4 \left(\frac{\text{masaA}}{\text{masaC}}\right)_4$$

Si se alimentan 200 lb/h al proceso y se añaden 150 lb/h de agua de lavado, calcular:

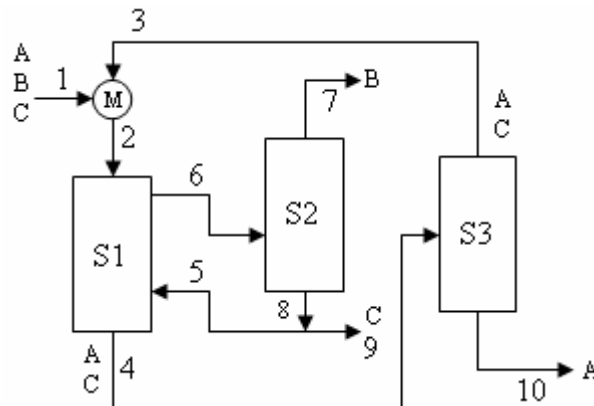
- Los grados de libertad del proceso.
- La composición y masa de la corriente (4).
- Si esta etapa de extracción es repetida alimentando 150 lb/h de agua de lavado (con 4% en peso de A) en cada etapa, ¿cuántas etapas son requeridas para remover el 98% del alcohol original?

Sigue.....

## Continuación de ejercicios.....



4. El sistema mostrado en la figura se usa para separar 2000 kg/h de una mezcla de 67% de A, 31% de B y el resto de C. La composición másica de la corriente 3 es: 80% de A y 20% de C. Si la relación de la alimentación fresca a reciclo es de 4, determine si el sistema está bien determinado. En caso de que su respuesta sea positiva calcule los flujos y las composiciones de todas las corrientes.

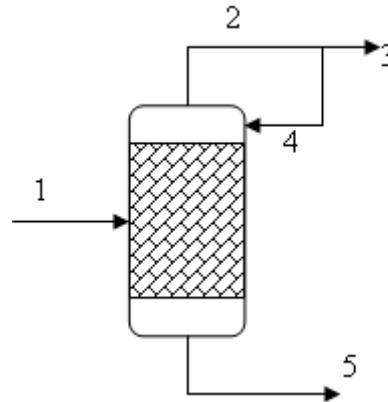


5. Considere la columna de destilación mostrada en la figura anexa, la cual es usada para separar una mezcla de tres componentes consistentes de 7% de acetona, 61,9% de ácido acético y 31,1% de anhídrido acético. La columna está diseñada de tal manera que la corriente de fondo no contenga acetona y el destilado contenga 10% de acetona y 88% de ácido acético. Si la columna es operada de tal manera que el 60% de la corriente de tope retorne como reflujo, calcule todos los flujos suponiendo que todas las composiciones son molares y que se producen 700 mol/h de destilado.

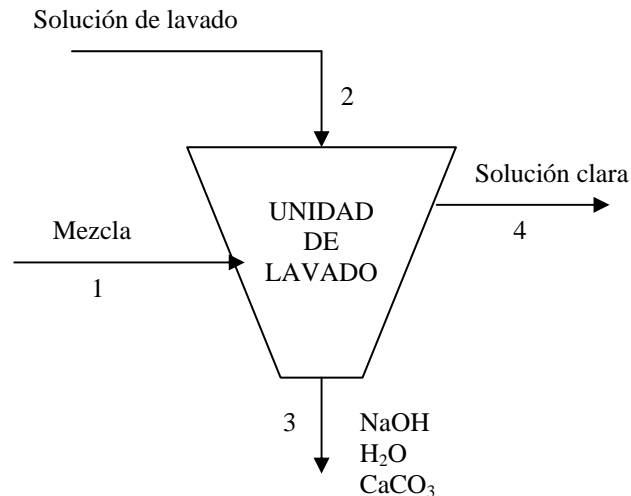
*Sigue.....*



Continuación de ejercicios.....



6. Se tiene el proceso mostrado en la figura, en el cual una mezcla consistente de  $\text{CaCO}_3$  precipitado en una solución de  $\text{NaOH}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , es lavada con una cantidad igual (en masa) de una solución diluida de 5% de  $\text{NaOH}$  (másico) en  $\text{H}_2\text{O}$ . El  $\text{CaCO}_3$  lavado contiene 2 lb de solución por libra de sólido. La composición de la mezcla de alimentación es la siguiente (molar): 11,04%  $\text{CaCO}_3$ , 27,61%  $\text{NaOH}$  y el resto de  $\text{H}_2\text{O}$ . Si la concentración (másica) de las soluciones de  $\text{NaOH}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  que salen de la unidad son las mismas, calcule la concentración de la solución clara.



7. En el Criogénico de Oriente se extraen del gas natural líquidos de elevado valor comercial: Propano (P) y Butano (B). Uno de los procesos iniciales consiste en eliminar el 80% del agua (A) que contiene el gas natural en el separador de entrada; luego el gas pasa al

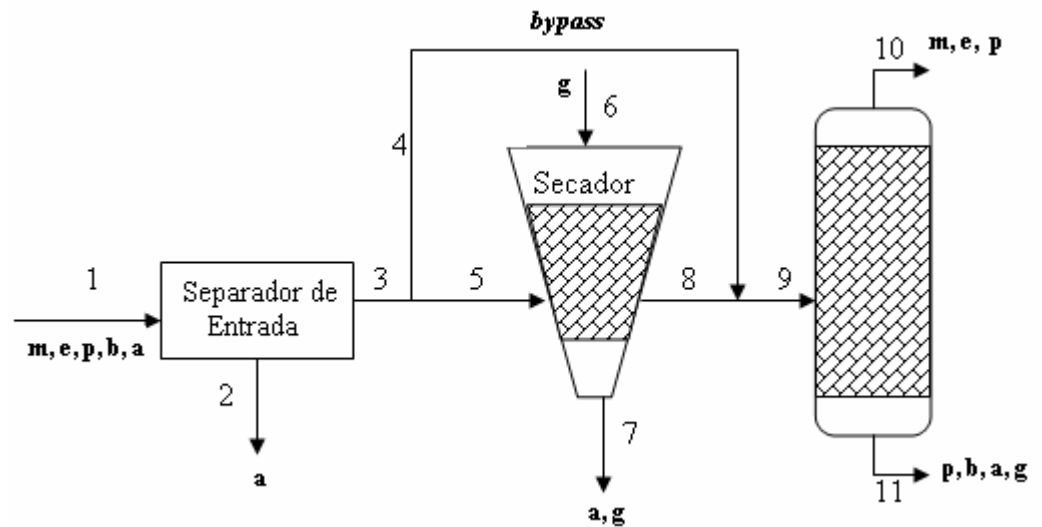
*Sigue.....*

## Continuación de ejercicios.....

tratamiento de deshidratación con Glicol (secador), donde se reduce nuevamente el contenido de agua del gas. Se conoce que se necesitan 2 kg de glicol (G) por cada kg de gas seco alimentado al secador.

Al finalizar el secado del gas, éste pasa a la columna de extracción donde se licúa parte del mismo y que sale por el fondo de la columna. Considere que en el by-pass se cumple que la relación entre los flujos de la corriente (4) y de la (3) es de 1/3. Con los datos suministrados en el problema, se le pide que llene la tabla anexa con los valores de fracciones másicas y flujos solicitados (Nota: M Metano, E Etano).

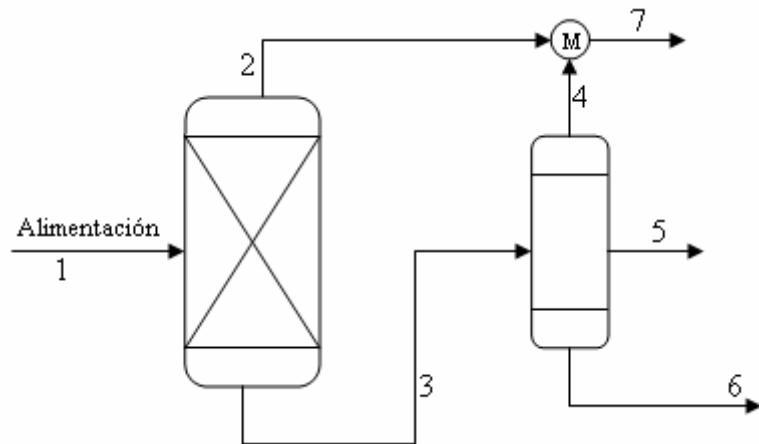
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>M</b>	0,2										
<b>E</b>	0,25										
<b>P</b>	0,35										0,60
<b>B</b>	0,12										0,37
<b>G</b>											0,01
<b>A</b>	0,08										0,02
<b>FLUJO</b>	100										



Sigue.....



Continuación de ejercicios.....



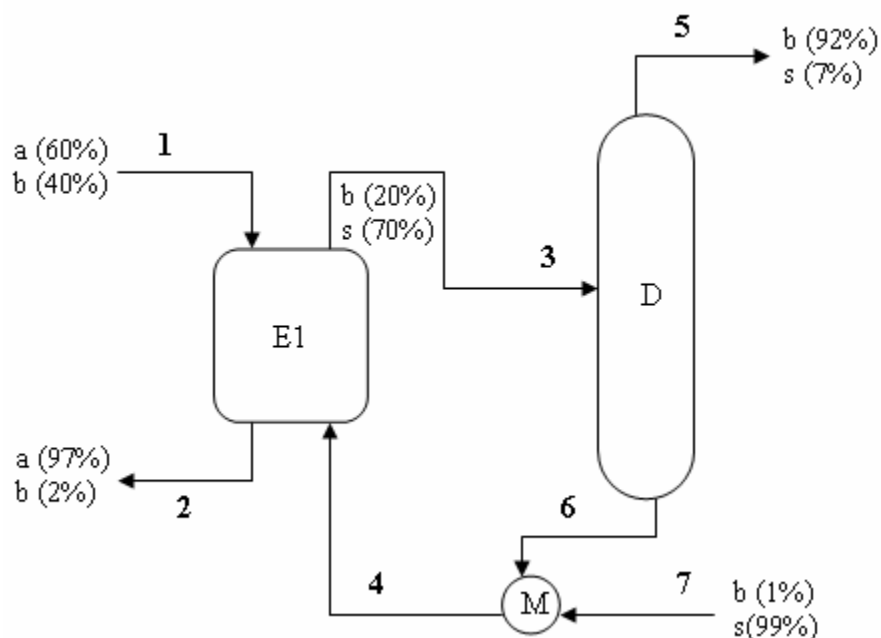
10. Se tiene una tonelada métrica por hora de una mezcla de A y B (corriente 1) que contiene 60% de A. Se desea separar A y B, mediante un sistema de extracción E1, en el cual una corriente rica en solvente S (corriente 4) arrastra casi todo el B y muy poca cantidad de A de la corriente de alimentación. La mezcla de B y S se somete a destilación, con el objeto de recuperar el solvente, que es reciclado, y obtener como producto de fondo una corriente donde se recupere S. Como la corriente (2) del sistema de extracción y la corriente de tope D (corriente 5) se llevan algo de S, se hace necesario reponer el solvente S perdido. Adicionalmente se conoce que el sistema de extracción requiere de 4 kg de S por cada kg de B alimentado (corriente 1).

Nota: todos los porcentajes son másicos. Calcular:

- Flujo másico de la corriente de reposición (kg/h).
- Composición (%) de A, B, S y flujo másico de la corriente (6).

*Sigue.....*

Continuación de ejercicios.....



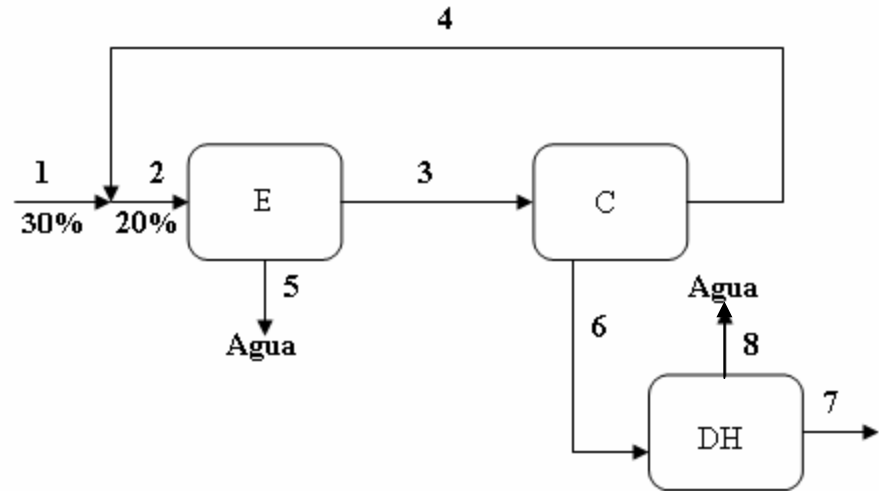
11. En el diagrama de flujo anexo, se observa el proceso para la producción de la sal Sulfato de Magnesio 7-hidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Para ello se introducen al proceso 100 kg/h de una solución de  $\text{MgSO}_4$  al 30% en peso, la cual después de ser mezclada con una corriente de reciclo es sometida a un proceso de evaporación (E). La solución resultante pasa a un cristalizador (C) de donde sale una corriente que recicla (4), la cual contiene 24g de  $\text{MgSO}_4$  por cada 100 g de agua y otra corriente en la cual sale la sal con un 5% de humedad (6). La sal es sometida a un proceso de deshumidificación (DH) para, por último, obtener el producto deseado (7).

Determine:

- Masa de la corriente de reciclo (4)
- Masa de sal en (7).
- Masa de agua evaporada.

Sigue.....

Continuación de ejercicios.....



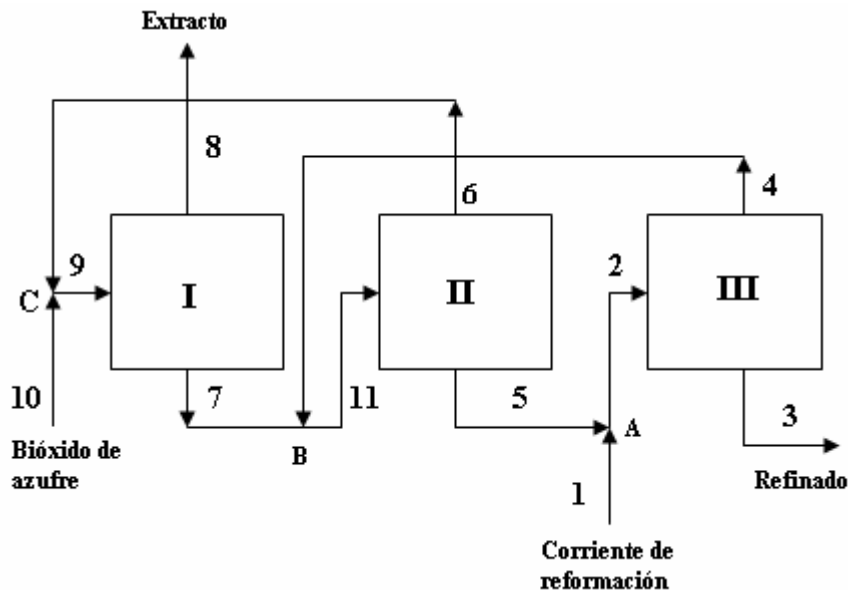
12. El benceno, tolueno y otros componentes aromáticos pueden recuperarse mediante extracción con bióxido de azufre como disolvente. Como ejemplo se tiene el siguiente: una corriente de reformación catalítica, la cual contiene 65% en peso de benceno y 35% de materiales diferentes al mismo, se pasa en contra corriente a través del sistema de recuperación por extracción cuyo esquema se muestra en el diagrama.

Mil libras de la corriente de reformación y 3000 libras de bióxido de azufre se alimentan cada hora. La corriente de extracto contiene 0,19lb de bióxido de azufre por libra de benceno, que inicialmente se cargó, así como 0,27 lb de benceno por lb de material no bencénico. El componente residual en la corriente refinada es el bióxido de azufre.

- Haga el análisis de los grados de libertad y plantee una estrategia para resolver el problema.
- ¿Cuántas libras de benceno se extraen por hora?. ¿Cuántas libras de refinado y cuántas de extracto se obtienen por hora?.
- Si por (4) fluyen 800 lb/h de benceno conteniendo 0,27 lb de materiales no bencénicos por lb de benceno, y si por (6) pasan 700 lb de benceno formadas por 0,07 lb de material no bencénico por lb de benceno. ¿Cuántas lb (exentas de azufre) pasan por (1) y (2).

*Sigue.....*

Continuación de ejercicios.....



13. En el sistema de Absorción-Regeneración mostrado en el diagrama de flujo anexo, se pretende remover el  $H_2S$ ,  $COS$  y  $CO_2$  de la corriente gaseosa. Para ello, una corriente de gas ácido (1) es alimentada en una columna de absorción en contracorriente con Monoetanolamina (MEA) que actúa como solvente, obteniéndose una corriente de tope libre de compuestos de azufre y con 0,5% de  $CO_2$ . La corriente del fondo (3), es alimentada a un sistema de separación con el objeto de recuperar la mayor parte posible de la Monoetanolamina. El sistema está diseñado de tal manera que el 70% del  $CO_2$  y el 80% del  $H_2S$  que entra al sistema sale por la corriente (6) y la relación de Monoetanolamina recirculada a la corriente de reposición es de  $\frac{1}{2}$ . La corriente (7) contiene únicamente MEA. La composición de MEA en la corriente (5) es del 10%. Sabiendo que todas las composiciones son másicas.
- Construya una tabla de los grados de libertad del sistema y proponga un procedimiento de cálculo.
  - Determine todas las composiciones de todas las corrientes.

Sigue.....

Continuación de ejercicios.....

