

# Operaciones de separación

## Teoria y problemas

Christian Perez hita

# Contents

## Chapter 1

### Conceptos basicos \_\_\_\_\_ Page 2

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.1    | Procesos Quimicos Industriales                 | 2  |
| 1.1.1  | Representación de procesos                     | 3  |
| 1.1.2  | Tecnicas basicas de operación (1.2)            | 3  |
| 1.1.3  | Recuperación de compuestos                     | 4  |
| 1.1.4  | Fracción de separación y razones de separación | 4  |
|        | Fracción de separación . . . . .               | 5  |
|        | Porcentaje de recuperación . . . . .           | 6  |
|        | Razón de separación . . . . .                  | 6  |
| 1.1.5  | Pureza   | 6  |
| 1.1.6  | Factor de separación                           | 7  |
| 1.1.7  | Denominaciones de composicion y pureza         | 7  |
| 1.1.8  | Secuencias de separación                       | 8  |
| 1.1.9  | Selección de Separaciones posibles             | 8  |
| 1.1.10 | Questionario                                   | 9  |
| 1.2    | Problemas                                      | 11 |
|        | Problema 01-01: . . . . .                      | 11 |
|        | Problema 01-02: . . . . .                      | 14 |

## Chapter 2

### Transferencia de masa \_\_\_\_\_ Page 16

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.1   | Introducción  | 16 |
| 2.1.1 | Difusión molecular en Estado estacionario               | 17 |
| 2.1.2 | Velocidades de las especies en difusión                 | 17 |
| 2.1.3 | Contradifusión molecular EMD                            | 17 |
| 2.1.4 | Difusión unimolecular UMD                               | 18 |
| 2.1.5 | Transferencia de materia a través de un medio estatico: | 18 |
| 2.2   | Problemas   | 18 |
|       | Problema 02-01: . . . . .                               | 18 |
|       | Problema 02-02: . . . . .                               | 19 |
|       | Problema 02-03: . . . . .                               | 19 |
|       | Problema 02-04: . . . . .                               | 19 |
|       | Problema 02-05: . . . . .                               | 20 |
|       | Problema 02-06: . . . . .                               | 20 |

# Chapter 1

## Conceptos basicos

### 1.1 Procesos Quimicos Industriales

son las industrias quimicas y bioquimicas destinadas a fabricar productos, que pueden ser materiales naturales vivos o no, estos pueden ser intermedios, comerciales o de deshechos (Aunque es necesario revisar si puede tener un valor añadido para su reutilización.)

Independientemente del tipo de producto que se obtenga, desde el punto de vista de las operaciones de separación, hemos de fijarnos en las composiciones del producto, puesto a que si se lleva una operación de separación, la composición de los productos deben diferir de la alimentación.

**existen 3 formas de operar en la industria quimica en cuanto al regimen de operacion:**

- Operación en continuo: se alimenta continuamente y se obtiene un producto continuamente no hay acumulación de producto.
- Operación en discontinuo: se trabaja en lotes/batch también conocido como operación por carga, ya que se carga y tras un tiempo se descarga.
- Operación en semicontinuo: se trata de una combinación de las dos anteriores, normalmente el proceso continuo es la alimentación.

**Podemos clasificar las operaciones de 2 formas:**

- **Operaciones auxiliares:** son aquellas que no modifican la composición del producto, pero si sus propiedades físicas.

Separaciones de fases

Transferencia de calor

Compresión de gases o bombeo de líquidos

Mezclado o división de corrientes

aglomeraciones de sólidos

Reducción de tamaño de sólidos

Separación de sólidos por tamizado

- **Operaciones claves:** son aquellas que modifican la composición del producto es decir donde únicamente opera un ingeniero químico.

Reactores químicos

Separaciones de mezclas

### 1.1.1 Representación de procesos

Para representar un proceso en función del grado de detalle nos encontraremos con 3 tipos de diagramas:

- Diagrama de bloques: BFD (Block Flow Diagram) Diagrama simplificado donde se representan las corrientes y la operación dentro de un bloque
- Diagrama de flujo de proceso PFD (Process Flow Diagram) Diagrama más detallado que el anterior, donde se representan las simbologías y procesos auxiliares además de las corrientes.
- Diagrama de tuberías e instrumentación P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) Diagrama más detallado que el anterior, donde además se representan los instrumentos de control y las tuberías.

### 1.1.2 Técnicas básicas de operación (1.2)

Dependiendo del criterio en que se base la clasificación podemos obtener un mayor o un menor número de operaciones de separación, Pero principalmente existen 5 técnicas básicas de operación:

#### Claim 1.1.1

- **Separación por adición de fase:** esta consiste en crear una nueva fase inmiscible con la anterior, por ejemplo la destilación. donde básicamente se usa un AES o un intercambio de trabajo mecánico.
- **Separación por creación de fase:** Consiste en adicionar una segunda fase es decir un AMS un ejemplo podría ser una extracción líquido-líquido, absorción...
- **Separación por barrera:** se trata de una operación menos común que la anterior, por una membrana polimérica, por permeabilidad retienen unas especies, se trata de filtración tangencial.
- **Separación por agente sólido:** se trata de una operación en la que se usa un agente sólido para separar las fases, un ejemplo sería la adsorción, cromatografía... donde la alimentación se adhiere al sólido.
- **Separación por campo de fuerza o gradiente:** una centrifugación para separar isótopos, o una separación magnética.

Hay que tener en cuenta que en el mezclado se da de forma natural y espontánea, va asociado a un incremento de entropía, y no requiere ningún aporte de energía. por ello cuando queremos uno de los productos de la mezcla es necesario una operación de separación que no es espontánea por tanto requiere de un gasto energético, las mezclas pueden ser monofásicas o multifásicas.

#### Lemma 1.1.1

Las técnicas de separación buscan la transferencia de materia hacia diferentes localizaciones espaciales soportables o fases

#### Question 1

Indicar las distintas técnicas de separación en la industria química

#### Question 2: cuáles son las técnicas básicas de separación y que tienen todas ellas en común

**Solution:** Todas tienen en común que requieren energía y que transforman una única corriente de entrada (alimentación o mezcla) en varias corrientes de salida (fases o productos que difieren en composición) por la acción del proceso de separación.

En el analisis es importante tener una serie de aspectos en cuenta:

- **Tamaño de los equipos:** estos tendran un tamaño especifico en funcion de la cinetica del proceso o los fenomenos de transferencia de masa por difusión, a mayor velocidad los equipos seran mas pequeños para ello se estudia la transferencia de masa  
Estan determinadas por la velocidad de transferencia de materia relativa a sus componentes.
- **transferencia de masa:** se rige principalmente por la termodinamica del equilibrio.
- **Extensión de separación:** es decir depende de cuan diferente sean sus propiedades moleculares o termodinamicas y del transporte de estos a la hora de separarlos.
- **Fuerza impulsora y dirección de esta**

**Note:-**

El AMS tiene como desventaja que es necesaria la recuperacion del disolvente, puede existir perdidas del disolvente y que sea contaminante, ademas de que el diseño del proceso se vuelve mas complejo

**Question 3: ¿Por qué es la transferencia de masa un factor importante en los procesos de separación?**

La velocidad de transferencia de masa es un factor importante en los procesos de separación, ya que determina el tamaño de los equipos necesarios para llevar a cabo la separación. A mayor velocidad de transferencia de masa, los equipos serán más pequeños.

### 1.1.3 Recuperación de compuestos

Proceso de separación, generalización con alimentación  $F$  de una mezcla de  $c$  compuestos ( $i=1,..c$ ) siendo posible separar en  $N$  productos, para simplificar consideramos que el proceso es continuo, estado estacionario sin reacción química, teniendo solo en cuenta a la hora de hacer los balances  $\sum F_e = \sum F_s$  si planteamos las corrientes con caudales individuales no se puede hacer el Balance de materia total, es decir se plantean para cada compuesto  $C$  Balances de materias independientes.

$n_i^F$  = donde  $F$  es la corriente a la que pertenece,  $n$  es el caudal individual y  $i$  es el compuesto.

$n_i^N$  = donde  $N$  corresponde a la corriente del producto.

#### Caudales molares (masicos):

Para cada compuesto hay  $N+1$  variables, como se conocera  $n_i^F$  habra  $N$  variables, como se ha formulado el balance de materia respecto a los componentes, el numero total de incognitas sera  $N \cdot C$ . para dar solución al sistema queda un total de  $C \cdot (N-1)$  por lo que es necesario el mismo numero de ecuaciones adicionales, las cuales estan relacionadas con los productos. Estas son las especificaciones de diseño.

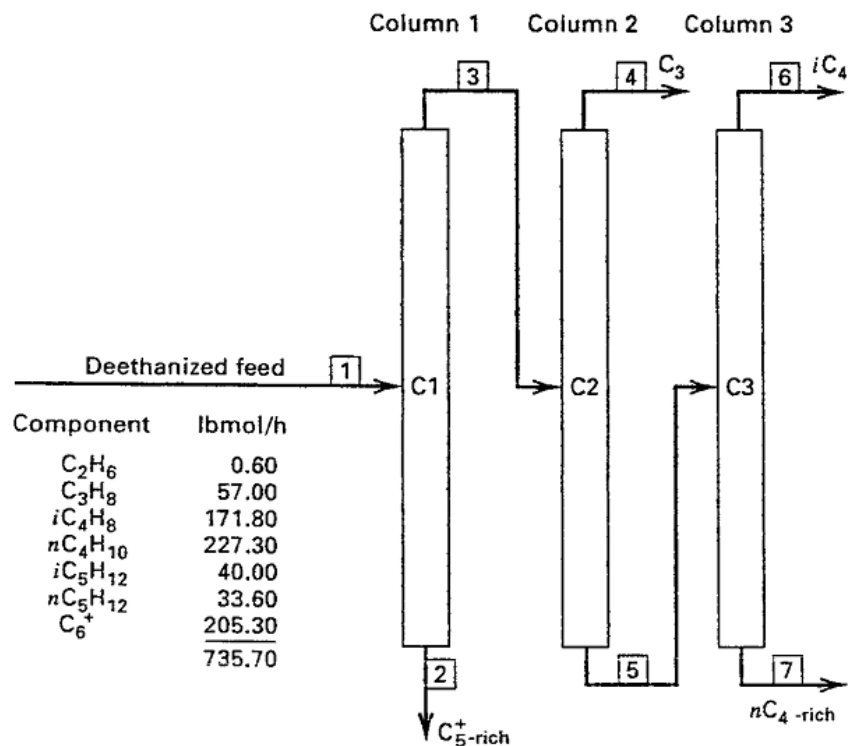
### 1.1.4 Fracción de separación y razones de separación

#### Example 1.1.1 (Proceso de recuperación de hidrocarburos)

Los componentes de acuerdo con la fracción de separación o la razón de separación dependen de sus propiedades termodinámicas y del transporte de los componentes, así como del número de etapas y los caudales de la propia columna.

En el siguiente proceso se obtienen 4 productos:

Una vez planteados los balances de materia, teniendo en cuenta todas las especificaciones de diseño, se obtiene la composición y caudal de cada corriente, dando lugar a la siguiente tabla:



**Figure 1.8** Hydrocarbon recovery process.

- Porcentaje de recuperación

$$\textcircled{2} \text{ C}_5 \rightarrow \frac{233.3}{278.9} = 83.65\%$$

$$\textcircled{4} \text{ C}_3 \rightarrow \frac{54.8}{57} = 96.14\%$$

$$\textcircled{6} i - \text{C}_4 \rightarrow \frac{162.5}{171.8} = 94.59\%$$

$$\textcircled{7} n - \text{C}_5 \rightarrow \frac{215.8}{227.3} = 94.94\%$$

- Pureza molar del producto

$$\frac{233.3}{234.1} = 99.66\% \text{mol}$$

$$\frac{54.8}{56} = 97.86\% \text{mol}$$

$$\frac{162.5}{175.5} = 92.59\% \text{mol}$$

$$\frac{215.8}{270} = 79.93\% \text{mol}$$

### Fracción de separación

La fracción de separación es la relación entre dos caudales individuales relativos al mismo compuesto para el mismo dispositivo teniendo en cuenta la corriente de salida rica en la especie más volátil y la corriente de alimentación. Cuanta menor sea su volatilidad, menor será la fracción de separación, es decir, si la fracción de separación es 0, los componentes están en equilibrio. Es decir:

$$SF = \frac{\text{Caudal molar del componente en el producto}}{\text{Caudal molar del componente en la alimentación de ese equipo}}$$

otra forma de definirlo sería: La fracción de separación es un parámetro que mide la eficiencia con la que un proceso de separación extrae un componente específico de una corriente de alimentación y lo dirige hacia una corriente de producto.

### Porcentaje de recuperación

El porcentaje de recuperación es la relación entre el caudal molar del componente en la corriente de producto y el caudal molar del componente en la corriente de alimentación del proceso inicial. Se expresa como:

$$\%PR = \frac{\text{Caudal molar del componente en el producto}}{\text{Caudal molar del componente en la alimentación de partida}} \times 100$$

Este parámetro mide la eficiencia con la que un proceso de separación extrae un componente específico de la corriente de alimentación y lo dirige hacia la corriente de producto.

**Note:-**

Si se refiere al mismo equipo, el porcentaje de recuperación será igual a la fracción de recuperación.

### Razón de separación

La razón de separación es la relación entre dos caudales individuales relativos al mismo compuesto ,

$$SR = \frac{\text{Caudal molar del componente en el producto 1}}{\text{Caudal molar del componente en el producto 2}}$$

La razón de separación es un parámetro que mide la eficiencia con la que dos procesos de separación extraen un componente específico de una corriente de alimentación y lo dirigen hacia una corriente de producto. en el caso en que solo haya 2 productos se puede definir como :

$$SR = \frac{SF}{1 - SF}$$

es decir como se distribuye un compuesto entre dos corrientes de salida.

#### 1.1.5 Pureza

Se trata de la cantidad de un componente en una corriente de salida de un separador respecto a la cantidad total de los componentes en esa misma corriente de salida.

**Clave ligera (LK):** Componente designado como el más volátil. Todos los que tengan mayor volatilidad también se consideran clave ligera.

**Clave pesada (HK):** Componente designado como el menos volátil. Todos los que tengan menor volatilidad también se consideran clave pesada.

**Example 1.1.2** (Designar el LK y HK en una corriente de 6 componentes para hidrocarburos)

- Metano
- Etano
- Propano ← LK
- Butano ← HK
- Pentano
- Hexano

Es decir, los componentes clave ligera serían el metano, etano y propano, mientras que los clave pesada serían el butano, pentano y hexano.

**Note:-**

**Separación nítida:** Es aquella que cumple que es superior al 0.95\* el compuesto clave ligero (LK), o el 0.05 del producto pesado HK

### 1.1.6 Factor de separación

El factor de separación entre dos compuestos, es la relación entre la fracción de separación del componente ligero respecto al pesado, es decir:

$$SP_{lk,hk} = \frac{SR_{LK}}{SR_{HK}}$$

También se puede definir respecto a la fracción de separación de los componentes, es decir:

$$SP_{lk,hk} = \frac{SF_{LK}/SF_{HK}}{(1 - SF_{HK})/(1 - SF_{LK})}$$

y de otra manera definiendo con concentraciones:

$$SP_{lk,hk} = \frac{C_{LK}^1/C_{HK}^2}{C_{LK}^1/C_{HK}^2} \leftrightarrow SP_{lk,hk} = \frac{y_{LK}/x_{LK}}{y_{HK}/x_{HK}}$$

cuanto mayor sea el factor de separación más viable será la operación siendo como máximo 1 cuando se pueda separar por completo. Esto depende de los siguientes parámetros:

- Cantidades relativas de ambas fases
- Propiedades termodinámicas de los componentes y de sus propiedades de transporte y moleculares
- Diseño del equipo
- Número de etapas y configuración del equipo

#### Lemma 1.1.2 Factor de separación en columna de rectificación

En una columna simple de rectificación, los productos ligeros irán por el destilado, es decir, la cabeza, mientras que los pesados irán por la cola, es decir, por el residuo.

También es posible tener extracciones laterales, conocidas como corriente de sangrado, si se quieren extraer fracciones intermedias o bien una alimentación múltiple si hay varias corrientes de entrada.

En una columna simple podemos distinguir dos zonas para una configuración óptima, divididas por la corriente de alimentación:

- **Sección de enriquecimiento** (superior o "top"), donde sale el destilado, marcada por la **LOSE** (Línea de Operación de la Sección de Enriquecimiento).
- **Sección de agotamiento** (inferior), donde sale el residuo, marcada por la **LOSA** (Línea de Operación de la Sección de Agotamiento).

### 1.1.7 Denominaciones de composición y pureza

En función del estado de agregación se tiende a expresar de una manera las composiciones y pureza o de otra.

- **Mezclas gaseosas:** % mol que es equivalente a %vol o bien fracciones molares  $y_i = \frac{mol_i}{m_i}$
- **líquidas:** % peso (%wt) o bien fracciones másicas  $x_i = \frac{kg_i}{kg_t}$
- **Normativa/regulaciones ambientales:** ppm (g/L) o ppb (mg/L)
- **Disoluciones acuosas:** molaridad
- **Mezclas acuosas:** Concentraciones en g/L o g/mol



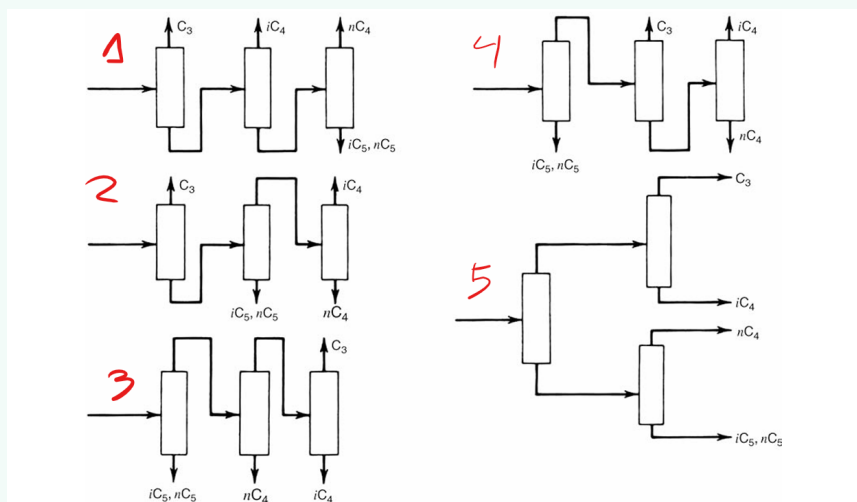
### 1.1.8 Secuencias de separación

De todas las secuencias posibles para seleccionar la optima depende del numero de productos.

En un posible caso donde existan 3 separadores y 4 productos de salida el numero de secuencias posibles es 5. para ello es importante usar la **Técnica Heurística** que consiste en seleccionar la secuencia que maximice el factor de separación, es decir que separe los componentes de forma mas eficiente.

1. Al inicio de la secuencia se reitran los compuestos químicos inestables, corrosivos o químicamente reactivos es decir aquellos que puedan suponer peligro.
2. Los productos finales se retiran uno a uno como productos destilados de cabeza
3. Al principio de la secuencia se retiran los componentes de mayor porcentaje molar en la alimentación
4. Debe hacerse la separación mas difícil en ausencia de otros componentes.
5. Se deja para mas adelante en la secuencia las separaciones que producen los productos finales de mas alta pureza
6. se selecciona la secuencia que favore cantidades aproximadamente equimolares de cabeza y cola en cada columna.

**Example 1.1.3** (5 corrientes de productos en 3 separadores, hidrocarburos)



1. como no hay ningun compuesto inestable, se pasa al siguiente paso
2. la secuencia 1 es la que da un mayor numero de productos por cabeza
3. en la 3 y 4 se elimina los de mayor porcentaje es decir la mezcla binaria
4. las especies que tengan volatilidades cercanas, es decir puntos de ebullición cercano, y por tanto isómeros serán complicados de separar
5. se desconoce la pureza de los productos, por lo que no se puede aplicar
6. tanto la 3 como la 4 serían óptimas

Por tanto la seleccionada debería ser la 4 puesto que la separación del n-butano en la secuencia 3 es mas difícil de realizar que la del isobutano en la secuencia 4 aunque probablemente la secuencia 3 sea necesario por una extracción líquido líquido.

### 1.1.9 Selección de Separaciones posibles

Para seleccionar una operación de separación es necesario tener en cuenta:

### 1. Condiciones de la alimentación

- Composición, en especial de las especies a separar o recuperar
- Caudales

### 2. Condiciones de los productos

- Purezas requeridas

### 3. Aprovechamiento de las diferencias de propiedades

- Moleculares
- Termodinámicas
- De transporte

### 4. Características de la operación

- Facilidad de cambio de escala
- Facilidad de puesta en marcha
- Requerimientos de temperatura, presión y estado de agregación

### 5. Económicos

- Coste de la operación
- Coste de la inversión

## 1.1.10 Questionario

### Question 4: ¿Cuáles son las dos operaciones clave en la ingeniería química?

Son aquellas que modifican la composición química de la sustancia: reacciones químicas y separaciones de mezclas (de productos que están en equilibrio termodinámico)

### Question 5: ¿Cuáles son las principales operaciones auxiliares en la ingeniería química?

No involucran cambios en la composición química de la sustancia, pero son necesarias para el éxito de las operaciones clave. Son separaciones de fases (de productos que no están en equilibrio termodinámico), intercambiadores de calor, bombas o compresores, mezclado o división de corrientes, aglomeración de sólidos, reducción del tamaño de sólidos y separación de sólidos por tamaño.

### Question 6: ¿Cuáles son las cinco técnicas básicas de separación y qué tienen todas ellas en común?

- Separación por adición de fase con un AMS
- Separación por creación de fase con un AES
- Por el uso de una barrera(membrana) que actúa en base a propiedades moleculares entre fases o sustancias relacionadas por el equilibrio termodinámico.
- Separación por agente sólido
- Separación por campo de fuerza o gradiente

Todas ellas tienen en común que requieren energía y que transforman una única corriente de entrada (alimentación, mezcla) en varias corrientes de salida (fases o productos que difieren en composición) por la acción del proceso de separación.

**Question 7: ¿Por qué es la transferencia de masa un factor importante en los procesos de separación?**

La velocidad de transferencia de masa o de materia por difusión determina directamente el tamaño del equipo requerido para el proceso de separación.

**Question 8: ¿Qué limita el grado en que se puede lograr la separación de una mezcla?**

El aprovechamiento de las diferencias en las propiedades moleculares y/o globales o macroscópicas (termodinámicas y de transporte)

**Question 9: ¿Cuál es el método más común usado para separar dos fases fluidas?**

La destilación

**Question 10: ¿Cuál es la diferencia entre un AES y un AMS? Da tres desventajas de usar un AMS.**

El AMS es una sustancia que añade una nueva fase a la alimentación y se suele solubilizar mejor con uno de los componentes y de este modo lo separa del resto (posteriormente el AMS se debe separar del componente que ha retirado); mientras que el AES provoca la generación de una nueva fase por la acción de trabajo mecánico o energía.

**Desventajas AMS:**

- generación de pérdidas, es necesaria una separación adicional (normalmente con un AES) para separar el AMS de la sustancia retirada de la mezcla.
- recirculación o recuperación del AMS, para minimizar las pérdidas se debe recircular o recuperar y se deben emplear medios para ello.
- Posible contaminación del producto por el AMS, ninguna separación alcanza el 100% de éxito, luego el AMS puede impurificar el producto final que se retiró de la mezcla.
- Procedimientos de diseño más difíciles, las operaciones con AMS son más difíciles de diseñar que aquellas con AES.

**Question 11: ¿Cuál es la operación de separación industrial más extensamente usada?**

La destilación, es la operación con mayor madurez tecnológica y de uso tiene y es la más extendida y más normalizada en cuanto a equipos, etc

**Question 12: ¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción?**

La técnica por la que se genera la nueva fase: En la absorción, por adición de fase con un AMS (líquido absorbente) y en la adsorción, por el contacto con un agente sólido adsorbente.

- La absorción se aplica a fases vapor-líquido y la adsorción a fases fluido-sólido. Por lo tanto, la interfase generada y la transferencia de materia en cada una será diferente.

**Question 13**

El grado de separación en una operación de separación suele ser especificado en términos de recuperación de componentes y/o de purzas de productos. ¿En qué se diferencia estos dos?

**Solution:** La recuperación de un componente en un aparato en el que se lleva a cabo una operación de separación se define como el caudal molar individual del componente en la corriente de salida del aparato (más rica en las especies más volátiles) entre el caudal molar individual de dicho componente en la alimentación inicial del sistema; mientras que la pureza del producto se define como el caudal molar individual del componente en la corriente de salida del aparato (más rica en las especies más volátiles) entre el caudal total que entra a dicho aparato.

#### Question 14: ¿Qué es un componente clave?

Los componentes claves son sustancias para las cuales se diseña el dispositivo de separación con el interés de separarlas y/u obtenerlas. Normalmente se eligen dos compuestos clave; para el caso de dicha columna, si se ordenan en orden decreciente de volatildades, los compuestos claves son adyacentes; el del menor punto de ebullición es llamado clave ligero y el de mayor punto de ebullición clave pesado.

#### Question 15: ¿Qué es un producto multicomponente?

Producto final obtenido que está formado por varias sustancias

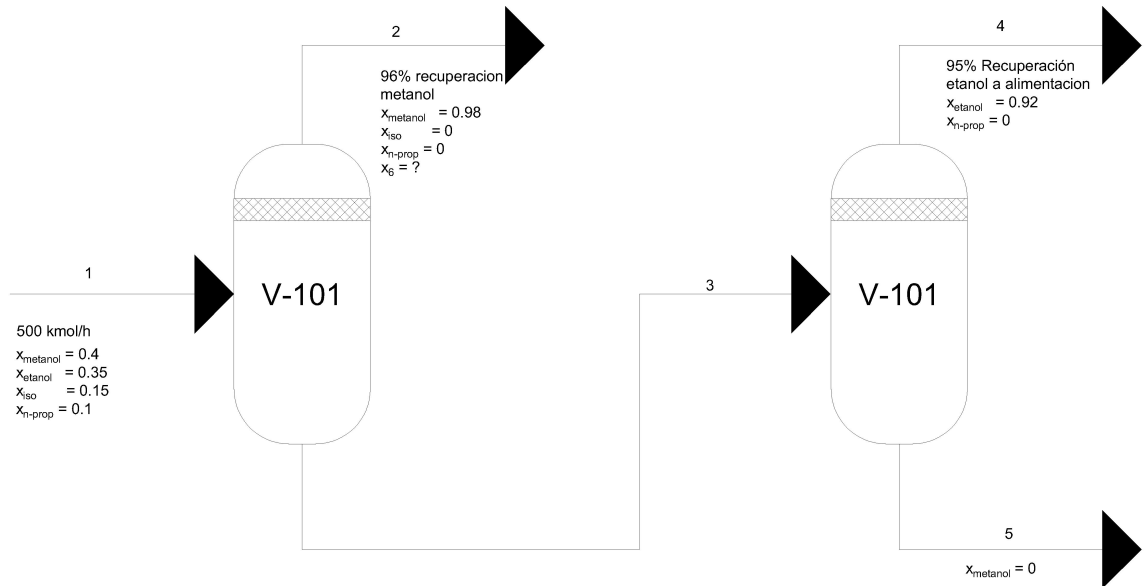
## 1.2 Problemas

### Problema 01-01:

Se destilan 500kmol/h de una mezcla de alcoholes, contenido 40%<sub>mol</sub> de metanol, 35%<sub>mol</sub> de etanol, 15%<sub>mol</sub> de isopropanol y 10%<sub>mol</sub> de n-propanol. en dos columnas para su separación. El destilado de la primera columna es metanol con una pureza y recuperacion del 98%<sub>mol</sub> y 96% respectivamente, El destilado de la segunda columna es etanol con una pureza del 92% mol y una recuperacion del 95%<sub>mol</sub> respecto de la alimentación. Asíumase la ausencia de propanoles en el destilado de la primera columna, ausencia de metanol en los residuos de la segunda y ausencia de n-propanol en el destilado de la segunda columna.

- Dibuje el diagrama de bloques del proceso numerando las columnas y corrientes. Calcule los caudales molares totales y de cada componente en todas las corrientes y construya una tabla con los resultados obtenidos.
- Calcule la pureza en propanoles en base molar del residuo de la segunda columna.
- ¿Cuál sería la maxima pureza del etanol alcanzable en el destilado de la segunda columna si se mantiene su recuperación en el 95%?
- ¿Cuál sería la maxima recuperación (respecto de la alimentación) posible de etanol en el destilado de la segunda columna si su pureza se mantiene fija en el 92%<sub>mol</sub>? En este caso, ¿cuál sería el caudal molar total y de isopropanol en el destilado de la segunda columna?
- Si se mantiene la recuperación total de etanol en el destilado de la segunda columna en el 95% y la razon de separacion de isopropanol en la segunda columna fuera 0.2 (destilado respecto a residuo), ¿cuál sería la pureza del etanol en el destilado de la segunda columna?

**Solution:**



A)

**Corriente1 :** metanol  $500 \cdot 0.4 = 200$  kmol/h, etanol  $500 \cdot 0.35 = 175$  kmol/h, isopropanol  $500 \cdot 0.15 = 75$  kmol/h, n-propanol  $500 \cdot 0.1 = 50$  kmol/h.

**Corriente2 :** metanol  $200 \cdot 0.96 = 192$  kmol/h, Recuperacion  $192 \cdot 0.98 = 195.92$  kmol/h totales  $\xrightarrow{x_{etanol}}$   $195.92 \cdot 0.02 = 3.92$  kmol/h

**Corriente3 :** metanol  $200 \cdot$  Caudal total  $= 500 - 195.92 = 304.08$  kmol/h, BM:  $\rightarrow 200 - 192 = 8$  kmol/h, etanol  $175 - 3.92 = 171.08$  kmol/h, isopropanol  $75$  kmol/h, n-propanol  $50$  kmol/h.

**Corriente4 :** etanol  $175 \cdot 0.95 = 166.25$  kmol/h  $\xrightarrow{x_{et}=92\%}$   $\frac{166.25}{0.92} = 180.71$  kmol/h totales

como todo el metanol de la corriente 3 se queda en la corriente 4, caudal de metanol  $= 8$  kmol/h , isopropanol  $= 180.71 - 8 = 172.71$  kmol/h.

**Corriente5 :** BM total  $= C3 - C4 = 304.08 - 180.71 = 123.37$  kmol/h, metanol  $8$  kmol/h , etanol  $171.08 - 166.25 = 4.83$  kmol/h, isopropanol  $75 - 6.46 = 68.54$  kmol/h, n-propanol  $50$  kmol/h.

| Corriente   | Met (kmol/h) | Et (kmol/h) | Isoprop (kmol/h) | N-Prop (kmol/h) | Total (kmol/h) |
|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|----------------|
| Corriente 1 | 200          | 175         | 75               | 50              | 500            |
| Corriente 2 | 192          | 3.92        | -                | -               | 195.92         |
| Corriente 3 | 8            | 171.08      | 75               | 50              | 304.08         |
| Corriente 4 | 8            | 166.25      | 6.46             | -               | 180.71         |
| Corriente 5 | 0            | 4.83        | 68.54            | 50              | 123.37         |

Table 1.1: Caudales molares de cada corriente en kmol/h

B)

Pureza de propanoles:

$$P_{IP+NP} = \frac{68.54 + 50}{123.37} \cdot 100 = 96.08\%$$

C)

misma pureza del etanol , al recuperarse el 95% Isopropanol = 0

$$P_{et,4} = \frac{\text{kmol/h de etanol}}{\text{kmol/h totales}} = \frac{166.25 + 8}{180.71} \times 100 = 95.41\%$$

**Note:-**

Debido a que el metanol permanece en la corriente 4 y al conseguir que el isopropanol salga por 5

D)

hay que suponer que el etanol de la corriente 3 = 4, es decir 171.08 kmol/h al dividirlo por la alimentacion del primer separador:

$$\frac{171.08}{175} \cdot 100 = 97.76\%$$

Al aumentar la pureza del isopropanol para maximizar la recuperacion del etanol manteniendo la pureza, hay que modificar la corriente de entrada para diluir la concentracion.

$$\frac{171.08}{0.92} = 185.96 \text{ kmol/h}$$

de donde  $185.96 - 171.08 - 8 = 6.88 \text{ kmol/h}$  de isopropanol

E)

Usando la razón de separación:

$$SR_{IP} = \frac{n_{IP}^4}{n_{IP}^5} = 0.2$$

$$\text{BM IP. : } \text{nip}_{C1}^1 = \text{nip}_{C2}^4 + \text{nip}_{C2}^5 = 75 \text{ kmol/h}$$

Donde tenemos un sistema de 2 ecuaciones con 2 incognitas.

- $\text{nip}_{C2}^5 = 62.5 \text{ kmol/h}$
- $\text{nip}_{C2}^4 = 12.5 \text{ kmol/h}$

La corriente 5 debe tener un caudal de 117.33kmol/h ya que el isopropanol ha variado de 68.54 a 62.5 kmol/h.

al modificar el caudal a  $166.25 + 8 + 12.5 = 186.75 \text{ kmol/h}$  en la corriente 4.

$$\text{Pureza de etanol en la corriente 4} = \frac{166.25 + 8}{186.75} \cdot 100 = 89.02\%$$

### Problema 01-02:

Se pretende recuperar hidrógeno de una mezcla de gases mediante un proceso de permeación gaseosa en la membrana. La mezcla gaseosa está compuesta por 42.4 kmol/h de  $H_2$ , 7.0 kmol/h de  $CH_4$  y 0.5 kmol/h de  $N_2$ . La membrana utilizada no es permeable al  $N_2$ . Conociendo que el factor de separación del hidrógeno respecto del metano es 34.13 (en base molar) y que la fracción de separación del hidrogeno en el permeado es de 0.6038

- Dibuje el diagrama de bloques del proceso. Calcule los caudales molares totales y de cada componente en las corrientes de permeado y retentato , y construya una tabla con los resultados obtenidos.
- Calcule la pureza en, en base molar, del hidrógeno en el permeado.

**Solution:**

A)

$$nH_2^F = 42.4 \text{ Kmol/h}$$

$$nH_2^P = 0 \text{ Kmol/h}$$

$$nCH_4^F = 7 \text{ Kmol/h}$$

$$SP_{H_2,CH_4} = 34.13$$

$$nN_2^F = 0.5 \text{ Kmol/h}$$

$$SF_{H_2}^P = 0.6038$$

$$SF_{H_2}^P = nH_2^P = SF_{H_2}^P \cdot nH_2^F = 0.6038 \cdot 42.4 = 25.6 \text{ Kmol/h}$$

Por balance de materia en la membrana:  $nH_2^F = nH_2^P + nH_2^R$

es decir  $nH_2^R = 42.4 - 25.6 = 16.8 \text{ Kmol/h}$

Usando el factor de separación:

$$SP_{H_2,CH_4} = \frac{nH_2^P/nH_2^R}{nCH_4^P/nCH_4^R} = 34.13$$

y por BM:  $nCH_4^R = nCH_4^F - nCH_4^P = 7 - nCH_4^P$

Lo cual es un sistema de 2 ecuaciones con 2 incognitas.

| Componente            | Alimentación | Retenido    | Permeado    |
|-----------------------|--------------|-------------|-------------|
| $H_2$ (Kmol/h)        | 42.4         | 16.8        | 25.6        |
| $CH_4$ (Kmol/h)       | 7            | 6.7         | 0.3         |
| $N_2$ (Kmol/h)        | 0.5          | 0.5         | 0           |
| <b>Total (Kmol/h)</b> | <b>49.9</b>  | <b>24.0</b> | <b>25.9</b> |

Table 1.2: Flujo molar en cada corriente

se puede comprobar como la suma del retenido y el permeado es igual a la alimentación.

B)

la pureza del  $H_2$  en el permeado es:

$$P_{H_2}^P = \frac{n_{H_2}^P}{n_T^P} \cdot 100 = \frac{25.6}{25.9} \cdot 100 = 98.84\%$$



# Chapter 2

## Transferencia de masa

### 2.1 Introducción

**Transferencia de materia:** movimiento de una especie en una mezcla dada desde un punto a otro. dicho transporte se da a través de una interfase. (ejemplo: en una destilacion la interfase se trata de la superficie de contacto entre el liquido y el vapor)

#### Mecanismos

- Difusión molecular
  - Difusión turbulenta
  - Transporte másico
1. **Difusión molecular:** movimiento macroscopico y espontaneo de las moleculas como resultado de la agitación termica.
  2. **Difusión turbulenta:** Producido por el movimiento aleatorio del fluido a escala macroscópica, debido a que el fluido se encuentra en régimen de circulación turbulento.
  3. **Transporte másico:** producido por el porpio desplazamiento global del fluido.

Comparamos la difusion turbulenta (mas usada) con la molecular, la difusión turbulenta es mucho más rápida, por lo que en las operaciones de separación sera la que mas nos interese, ademas buscamos maximizar las superficies de contacto para aumentar la velocidad de transferencia de la materia.

Para sistemas multifasicos el equilibrio de las fases determina la extension de la separación a mayor extension ( mas facil sera de separar/mas cantidad podemos separar) Tambien debemos ver con que velocidad vamos a realizar dicha extensión (Para cineticas rapidas nos basamos en el equilibrio mientras para lentas en la transferencia de materia)

#### Note:-

Las membranas usan transferencia de materia

#### Lenma 2.1.1

Fuerzas impulsoras de la transferencia de materia: Gradiente de concentración, Presión, Temperatura, Campos de fuerza....

#### Transferencia de materia por gradiente de concentración:

- **Fluido en reposo:** La transferencia de materia se da por difusión molecular.
- **Fluido en movimiento:** Depende del régimen en el que se encuentre.
  - **Régimen laminar:** Difusión molecular y transporte másico.

- **Régimen turbulento:** Difusión turbulenta, difusión molecular y transporte másico (aunque la difusión turbulenta desaparece en cercanías de la interfase).

### 2.1.1 Difusión molecular en Estado estacionario

- Dicha transmisión de materia por difusión molecular ordinaria en una mezcla es producida por gradiente de concentración en dirección opuesta a la concentración, es decir sigue aquella en la que disminuye la concentración.
- La velocidad de transmisión de materia es proporcional a la dirección de la transmisión de materia.
- —

con estas 3 bases se obtiene la primera ley de Fick de la difusión.

el gradiente de concentración es negativo en la dirección de difusión porque va de A a A', es decir de mayor concentración a menor conforme se avanza por Z.

$$c_i = x_i \cdot c$$

### 2.1.2 Velocidades de las especies en difusión

1. Velocidad media molar de la mezcla respecto a ejes estacionarios.

$$V_m = \frac{N}{C} = \frac{\text{mol}/\text{Sm}^2}{\text{mol}/\text{m}^3} = \text{m/s} = \frac{NA + NB}{C}$$

2. Velocidad de la especie i respecto a ejes estacionarios.

$$V_i = \frac{N_i}{C} \rightarrow \text{Como } x_i = C_i/c \rightarrow V_m = x_a \cdot V_a + x_b \cdot V_b$$

3. Velocidad difusión de la especie i respecto a  $v_m$ .

$$V_{Di} = V_i - V_m$$

Si lo combinamos se obtiene la siguiente expresión

$$N_i =$$

de donde sale la siguiente ecuación

$$N = \frac{n_i}{A}$$

$$NA = x_A \cdot N + J_A, NB = x_B \cdot N + J_B$$

De donde obviamente  $N_T = N_A + N_B$

### 2.1.3 Contradifusión molecular EMD

Las densidades de flujo molares iguales pero en sentidos contrarios. es decir  $N_A = -N_B$

También es obvio que no hay transporte másico y solo se da la difusión molecular.

$$N_a = x_a \cdot N^0 + J_a$$

$$N_b = x_b \cdot N^0 + J_b$$

como  $N_A = -N_B$  entonces  $J_A = -J_B$

si desarrollamos las ecuaciones vemos como el flujo cambia con la distancia  $x$  y también como varían las concentraciones con la distancia.

**Note:-**

Para mezclas binarias como  $c = \text{cte} \rightarrow D_{A,B} = D_{B,A}$

### 2.1.4 Difusión unimolecular UMD

A se transfiere a través de B, estático.

$$V_B = \frac{N_B}{C_B} = 0 \rightarrow N_B = 0 \rightarrow N = N_A$$

$$N_A = x_A \cdot N$$

en la expresión  $1-x_A$  explica el efecto del transporte másico si  $x_A$  es un valor muy pequeño  $J \ll X_A$  no cambia, sin embargo si  $x_A$  es considerable afecta.

Transporte másico componente = - transporte molecular del componente.

$$X_B \cdot N_A = -J_B$$

Con  $z = z_2$  media logarítmica

$$(1 - x_A)_{ml} = \frac{(1 - x_{A1}) - (1 - x_{A2})}{\ln(x_{A1}/x_{A2})}$$

es decir el numerador sería  $x_{A2} - x_{A1}$

### 2.1.5 Transferencia de materia a través de un medio estático:

- En un medio estático:
- con fluidos en régimen laminar:
- con fluidos en régimen turbulento:

a) Suponemos que mov en solo  $z$  para una mezcla binaria,  $N_A = X_A \dots$

- A experimenta una transferencia de materia pero B está estático, asumimos que  $C$  es constante y  $X_A$  es muy pequeño entonces no hay transporte másico.
- Se puede aplicar la EDO para distintas geometrías considerando E.E., Difusión unidireccional,  $D_{A,B} = \text{CTE}$

Se obtiene 3 expresiones para 3 geometrías distintas.

**Difusión en Estado no estacionario:** ecuación global de balance de materia Entrada + Salida = Acumulación

Segunda ley de Fick para la difusión unidireccional en estado no estacionario.

## 2.2 Problemas

### Problema 02-01:

Un tubo y un condensador de vidrio aislados térmicamente están montados sobre un calderín que contiene benceno y tolueno. El calderín proporciona una corriente de vapor que asciende por el tubo hasta el punto del tubo, la temperatura es de 170°F, el vapor contiene un 30% mol de tolueno, y el reflujo contiene un 40% mol de tolueno. Considérese que toda la resistencia a la transferencia de materia entre el líquido y el vapor la ejerce una capa de vapor estacionaria de 0.1 inch de espesor adyacente a la fase líquida. los calores latentes molares

de benceno y tolueno son iguales. Calcular el caudal de transferencia de materia por unidad de superficie ( $\text{lbmol/h ft}^2$ ) para el tolueno y el benceno en ese punto del tubo.

**Datos:**

Difusividad del gas tolueno en benceno:  $0.2\text{ft}^2/\text{h}$

presión en el tubo: 1 atm

Presión del vapor del tolueno a  $140^\circ\text{F}$ : 400torr

$$R = 0.7302 \text{ atm ft}^3 \cdot \text{lbmol}^{-1} \cdot ^\circ\text{R}^{-1}$$

**Problema 02-02:**

Dos cubetas están conectadas por un tubo de 0.002m de diámetro y 0.20m de largo. La cubeta(1) contiene argón, y la cubeta(2) contiene xenón. La presión y la temperatura se mantienen a 1 atm y  $105^\circ\text{C}$ . La difusividad es de  $0.180 \text{ cm}^2/\text{s}$ . En un instante de tiempo determinado, posterior al inicio de la difusión, la fracción molar de argón en el extremo(1) del tubo es 0.75 y 0.2 en el otro extremo. Determinar para ese instante del tiempo:

- Los caudales molares y el sentido de la transferencia de materia de xenón y argón.
- La velocidad de transporte de cada especie;
- La velocidad media molar de la mezcla.

**Datos:**

$$R = 82.06 \text{ atm cm}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

**Problema 02-03:**

Un tanque abierto, de 10ft de diámetro, que contiene benceno a  $25^\circ\text{C}$  se expone al aire. Por encima de la superficie del líquido hay una película estacionaria de aire de 0.2 inch de espesor que ejerce toda la resistencia a la transferencia de materia. Si la presión es de 1 atm y la temperatura del aire es  $25^\circ\text{C}$ , ¿cuál es la pérdida de benceno en  $\text{lb/día}$ ? La concentración de benceno fuera de la película es insignificante. Para el benceno, la presión de vapor a  $25^\circ\text{C}$  es 100 torr, y la difusividad en aire es de  $0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

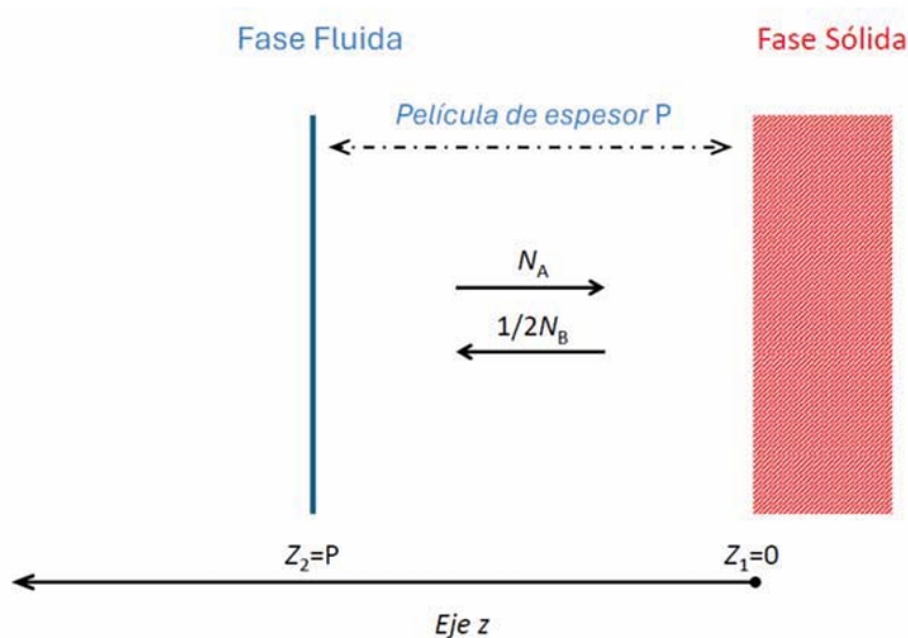
**Datos:**

$$R = 82.06 \text{ atm cm}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Peso molecular del benceno: 78 g/mol

**Problema 02-04:**

En un proceso de catálisis heterogénea se da la siguiente circunstancia, en la fase fluida la especie A se transporta y una vez en la superficie del catalizador (fase solida) se transforma en 0.5B. La especie generada ahora se transporta en la fase fluida. Considerando que todos los fenómenos de transferencia de materia ocurren en una película donde  $x_A = Z/P$  en el intervalo  $Z = [0, P]$ , obténgase las densidades de flujo neta, por transporte másico y por difusión molecular ordinaria de la especie A.



#### Problema 02-05:

Una corriente de aire a  $100^{\circ}\text{C}$  y 1 atm circula con un número de Reynolds de 50.000 perpendicularmente a un cilindro largo, de 1 inch de diámetro, hecho de naftaleno. Si las propiedades físicas a  $100^{\circ}\text{C}$  y 1 atm son las abajo mencionadas, Calcular la densidad de flujo media de sublimación del naftaleno en  $\text{kmol/s m}^2$ . Suponer despreciable el efecto del transporte másico y que sólo el aire ofrece resistencia a la transferencia de materia, Si en vez de un cilindro fuera una esfera de naftaleno con un diámetro inicial de 1 inch, ¿Cuál sería la velocidad media inicial de sublimación del naftaleno en  $\text{kmol/s m}^2$ ?

#### Datos:

- Presión de vapor del naftaleno: 10 torr
- Peso molecular del aire: 29 g/mol
- Viscosidad del aire: 0.0215 cP
- Densidad molar del aire:  $0.0327 \text{ kmol/m}^3$
- Difusividad del naftaleno en aire:  $0.94 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

#### Problema 02-06:

Se han obtenido los siguientes datos en un test de vaporización de agua en aire en una columna de paredes mojadas:

- Presión total de la columna: 1 atm
- Temperatura de la columna:  $24^{\circ}\text{C}$
- diámetro de la columna: 1.46cm
- Longitud de tubo mojado: 82.7cm
- Caudal de gas a la entrada a la columna a  $24^{\circ}\text{C}$  y 1 atm:  $720 \text{ cm}^3/\text{s}$
- Presión de vapor del agua a  $24^{\circ}\text{C}$ :  $P_w^s = 0.435 \text{ psia}$
- Presión parcial del agua a la entrada del gas  $p_w = 6.27 \text{ torr}$ , y a la salida del gas  $p_w = 20.1 \text{ torr}$

- Difusividad del vapor de agua en aire a 0°C y 1 atm:  $0.22 \text{ cm}^2/\text{s}$

Suponiendo que el efecto del transporte másico es insignificante, calcular:

- a) El caudal molar de agua transferido al aire, en (mol agua/s)
- b)  $K_G$  para la columna de paredes mojadas