



# **UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS A INGENIERIA**

---

---

**TEMAS SELECTOS DE OPERACIONES  
UNITARIAS PARA LA CARRERA  
DE INGENIERIA INDUSTRIAL.**

**MONOGRAFÍA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA:**  
**P. D. I. I. EDGNER MAER TAVERA RÍOS**

**DIRECTOR: AURELIO CHI GONZALEZ**

**PACHUCA DE SOTO HGO.**

*Estas líneas son de agradecimiento a Dios  
primeramente, por darme la oportunidad  
de haber finalizado este proyecto, por  
tener a unos padres quien me han  
conducido por el camino hacia el éxito  
y a mis tres hermanas por su apoyo, por  
todo esto.*

**GRACIAS**

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día la demanda de productos del consumidor, se ha elevado haciendo que haya una competitividad entre productores, fomentando una cultura de calidad en los productos, esto trae como consecuencia los altos costos debido a los diferentes y múltiples procesos para la elaboración de productos ó subproductos. El ingeniero industrial ha tenido la necesidad de manejar términos, operaciones, así como procesos químicos, dando como resultado que la ingeniería química esté ligada a la ingeniería industrial debido a la demanda de la industria de tener ingenieros industriales que tengan conocimiento de términos y definiciones químicas.

En el presente trabajo se recopilan datos de una parte de las operaciones industriales como son la evaporación, mezclado y destilación, se tiene como contenido la definición de cada proceso así como sus fundamentos, equipos más comunes para llevar a cavo dicho proceso. Cuenta también con sus respectivos balances de materia y de energía, las aplicaciones de de los mismos, problemas resueltos para la comprensión del lector, así como problemas para resolver que tiene como objetivo que el lector aplique sus conocimientos.

### Capitulo I

En la mayoría de los casos la operación unitaria de evaporación se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa. Entre los ejemplos típicos de procesos de evaporación esta la concentración de soluciones acuosas de azúcar, cloruro de sodio, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja. Entre estos casos, la solución concentrada es el producto deseado y el agua evaporada suele desecharse. En otros el agua que contiene pequeñas cantidades de minerales se evaporan para obtener agua libre de sólidos que se emplea en la alimentación de calderas para procesos químicos especiales.

## Capítulo II

El mezclado es un proceso que es esencial en la industria para la transformación de materias primas en productos y para que esto se lleve a cabo se tienen diversos procesos y maquinaria de acuerdo con los elementos que se quieran incorporar. En este tipo de proceso se puede mezclar elementos de distinto estado físico, como puede ser un líquido con un gas, un líquido con un líquido, un sólido con sólido, etc.

## Capítulo III

En este capítulo se verá la composición de una columna de destilación, su balance de materia y de energía, equipos y tipos de destilación, fallas frecuentes y aplicaciones. En la mayoría de las veces se evapora un solvente que posteriormente se puede reutilizar en otro proceso, y el soluto que queda en el fondo de la columna de destilación es el producto esperado. Que a su vez se puede hacer pasar por una siguiente columna para repetir el procedimiento y retirar una sustancia no deseada.

## JUSTIFICACIÓN

El estar preparados para el ámbito laboral es de gran importancia para el ingeniero industrial, puesto que se tiene que contar con dominio de materias básicas en las cuales se encuentra la ingeniería química, esto nos ayuda a la obtención de productos o subproductos que se han tenido que pasar por procesos químicos. El presente trabajo ha sido elaborado, con el propósito de que el alumno cuente con un apoyo didáctico en el aula, siendo que se imparte la materia de operaciones unitarias, la cual ayudara a comprender mejor la diferencia entre un proceso químico y un proceso físico. Así como la utilización de herramientas tales como datos, tablas y diagramas. Para la resolución de problemas. Y por lo consiguiente el mejor dominio de la materia.

## **OBJETIVO**

Contar con un apoyo didáctico para el mejor aprendizaje de los futuros ingenieros industriales en la materia de operaciones unitarias. Así mismo, desea ser un instrumento útil para aquellos que busquen una plataforma sólida en la utilización de diagramas de bloques o de equipos para que describan un proceso o respondan a algunas preguntas aplicando las ecuaciones y hacer los cálculos correspondientes.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Comprender los procesos de operaciones unitarias.
- Contar con una herramienta para la mejor comprensión de la materia de operaciones unitarias.
- Comprender símbolos y términos de la ingeniería química aplicados a la ingeniería industrial.
- Tener el dominio para la utilización de las tablas y diagramas que se presentan en la referencia bibliográfica para resolver problemas de operaciones unitarias.

## ÍNDICE

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| AGRADECIMIENTOS.....       | I   |
| INTRODUCCIÓN.....          | II  |
| JUSTIFICACIÓN.....         | III |
| OBJETIVO.....              | IV  |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | IV  |

### CAPITULO I EVAPORACIÓN

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| DEFINICIÓN.....                                                            | 1  |
| FUNDAMENTOS, CONCEPTOS, BASES Y LEYES.....                                 | 1  |
| EQUIPOS (tipos, características, instrumentación arreglos e información).. | 3  |
| BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....                                         | 11 |
| APLICACIONES.....                                                          | 15 |
| PROBLEMAS.....                                                             | 15 |
| PROBLEMAS PARA RESOVER.....                                                | 23 |

### CAPÍTULO II MEZCLADO

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| DEFINICIÓN.....                                                                                                                                   | 24 |
| EQUIPOS (tipos de mezcladores, impulsores con proporciones típicas, tanques agitados mecánicamente para el contacto gas-liquido Y agitación)..... | 24 |
| BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....                                                                                                                | 45 |
| METODOS Y TECNICAS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE MEZCLADO.....                                                                                       | 48 |
| APLICACIONES.....                                                                                                                                 | 50 |
| PROBLEMAS.....                                                                                                                                    | 51 |
| PROBLEMAS PARA RESOLVER.....                                                                                                                      | 61 |

### **CAPÍTULO III DESTILADO**

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| <b>DEFINICIÓN.....</b>                     | <b>63</b> |
| <b>EQUIPOS Y TIPOS DE DESTILACIÓN.....</b> | <b>64</b> |
| <b>COLUMNA DE DESTILACIÓN.....</b>         | <b>64</b> |
| <b>BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>APLICACIONES.....</b>                   | <b>68</b> |
| <b>PROBLEMA.....</b>                       | <b>68</b> |
| <b>PROBLEMA PARA RESOLVER.....</b>         | <b>75</b> |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>CONCLUSIONES.....</b>         | <b>75</b> |
| <b>GLOSARIO DE TERMINOS.....</b> | <b>76</b> |
| <b>NOMENCLATURA.....</b>         | <b>76</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>         | <b>78</b> |

## **CAPITULO I EVAPORACIÓN:**

### **DEFINICIÓN**

Se entiende por evaporación aquella operación que tiene por objeto concentrar una solución “evaporando” parte del líquido en recipientes calentados con frecuencia se utiliza vapor de agua.<sup>a</sup>

Consiste en separar parte del solvente volátil de una solución de un soluto no volátil, por medio de la vaporización del solvente; para obtener una solución concentrada a partir de una solución diluida.

### **FUNDAMENTOS, CONCEPTOS, BASES Y LEYES<sup>b</sup>**

#### **Factores del proceso**

1. CONCENTRACIÓN EN EL LÍQUIDO
2. SOLUBILIDAD
3. SENSIBILIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES
4. FORMACIÓN DE ESPUMA
5. PRESIÓN Y TEMPERATURA
6. FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES Y MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Las propiedades físicas ó químicas de la solución que se esta concentrando y del vapor que se separa tienen un efecto considerable sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la presión y la temperatura del proceso. A continuación se analizan algunas propiedades que afectan a los métodos de procesamiento.

---

<sup>a</sup> fuente G., Brown., (1965), “Ingeniería química”, Editorial Marín., primera edición, México, pág.499.

<sup>b</sup> Fuente C. J. Geankoplis1.,(1998),”proceso de transporte y operaciones unitarias”, tercera edición, México, Pág.546

1.-CONCENTRACIÓN EN EL LÍQUIDO: Por lo general la alimentación líquida a un evaporador es diluida, por lo que su viscosidad es baja, es similar a la del agua y se opera con coeficiente de transferencia de calor bastante alto.

A medida que se verifica la evaporación, la solución se concentra y puede elevarse notablemente causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor. Debe existir entonces una circulación y/o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente se reduzca demasiado.

2.-SOLUBILIDAD: A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto o sal, puede exceder el límite de solubilidad del material en solución y se forman cristales. Esto puede limitar la concentración máxima que puede obtenerse por evaporación de la solución. En la mayoría de los casos la solubilidad de la sal aumenta con la temperatura; Esto significa que, al enfriar a temperatura ambiente una solución concentrada caliente proveniente de un evaporador, puede presentar una cristalización.

3.-SENSIBILIDAD TÉRMICA DE LOS MATERIALES.- Muchos productos sobre todo alimentos y otros materiales biológicos, pueden ser sensibles a la temperatura y degradarse cuando esta sube o el calentamiento es muy prolongado. Entre estos productos están los farmacéuticos, productos alimenticios como leche, jugo de naranja, de tomate y otros extractos vegetales y materiales químicos orgánicos delicados. El nivel de degradación es una función de la temperatura y del tiempo.

4.-FORMACIÓN DE ESPUMA: Material constituidos por soluciones cáusticas, soluciones de alimentos como leche descremada algunas soluciones de ácidos grasos, forman espuma durante la ebullición. Esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede haber pérdidas de material.

5.- PRESIÓN Y TEMPERATURA.- El punto de ebullición de la solución alimentada está relacionada con la presión de trabajo del sistema. Cuanto más elevada sea la presión del evaporador mayor será la temperatura de ebullición. Además la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración del material disuelto por la acción de la evaporación. Este

fenómeno se llama elevación del punto de ebullición. Para mantener a nivel bajo la temperatura de los materiales termo sensibles suele ser necesario operar a presiones inferiores a una atmósfera, esto es, a vacío.

**6.-FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES Y MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.-**  
Algunas soluciones depositan materiales sólidos llamados incrustaciones sobre las superficies de calentamiento. Estas incrustaciones pueden formarse a causa de los productos de descomposición o por disminución de la solubilidad. El resultado es una reducción del coeficiente de transferencia de calor, lo que obliga a limpiar el evaporador. La selección de los materiales de construcción del evaporador tiene importancia en la prevención de la corrosión.

### **EQUIPOS (tipos, características, instrumentación, arreglos e información)**

La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente que, por lo general, agua. Usualmente, el calor es suministrado por condensación de un vapor (como vapor de agua) en contacto con una superficie metálica, con el líquido del otro lado de dicha superficie. El tipo de equipo usado depende tanto de la configuración de la superficie para la transferencia de calor como de los medios utilizados para lograr la agitación o circulación del líquido.

1. Marmita abierta o artesa.
2. Evaporador de tubos horizontales con simulación natural.
3. Evaporador vertical con circulación natural.
4. Evaporador vertical de tubos largos
5. Evaporador de caída de película
6. Evaporador de circulación forzada
7. Evaporador de película agitada
8. Evaporador solar de artesa abierta

1. Marmita abierta o artesa. La forma masa simple de un evaporador es una marmita abierta o artesa en la cual se hierve el líquido, el suministro de calor proviene de condensación de vapor de agua en una chaqueta o en serpentines sumergidos en el líquido. En algunos casos, la marmita se calienta a fuego directo.

Estos evaporadores son económicos y de operación simple, pero el desperdicio de calor es excesivo. En ciertos equipos se utilizan paletas o raspadores para agitar el líquido.

2. Evaporador de tubos horizontales con simulación natural. El banco horizontal de tubos de calentamiento es similar al banco de tubos de un intercambiador de calor. El vapor de agua entra a los tubos y se condensa; el condensado sale por el otro extremo de los tubos. La solución a ebullición está por fuera de ellos, el vapor se desprende de la superficie líquida; después, casi siempre se hace pasar por dispositivos de tipo deflector para impedir el arrastre de gotas de líquido y sale por la parte superior. Este equipo, relativamente económico, puede utilizarse para líquidos no viscosos con altos coeficientes de transferencia de calor y para líquidos que no formen incrustaciones puesto que la circulación del líquido no es muy buena, son poco adecuados para materiales viscosos. En casi todos los casos, tanto este evaporador como todos los que se estudian posteriormente después operan con régimen continuo, tanto la alimentación como la velocidad es constante. Así mismo la velocidad de salida del concentrado es constante.

3. Evaporador vertical con circulación natural. En este tipo de evaporador se usan tubos verticales en lugar de horizontales y el líquido está dentro de los tubos, por lo que el vapor se condensa en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el líquido se eleva por los tubos con circulación natural y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande. Esta circulación natural aumenta el coeficiente de transferencia de calor por lo que no es útil con líquidos viscosos. Este equipo se llama con frecuencia evaporador de tubos cortos. Una variación de este modelo es el evaporador de canasta, que usa tubos verticales, pero el elemento de calentamiento se cuelga en el cuerpo, de tal manera que haya un espacio anular que sirva de bajada. El modelo de canasta difiere del evaporador vertical de circulación natural, después este tiene un espacio central en vez del anular como bajada. Este equipo se usa con frecuencia en las industrias del azúcar, la sal y la sosa cáustica.

4. Evaporador vertical de tubos largos puesto que los coeficientes de transferencia de calor del lado de vapor es muy alto en comparación con el del lado del líquido que se evapora, es conveniente contar con velocidades altas para

el líquido. En un evaporador de tipo vertical con tubos largos. Estos miden de 3 a 10 m de alto lo que ayuda a obtener velocidades del líquido muy altas. Por lo general, el líquido pasa por los tubos una sola vez y no se recircula. Los tiempos de contacto suelen ser bastantes breves en este modelo. En algunos casos, como cuando la relación entre la velocidad de alimentación y la velocidad de evaporación es baja, puede emplearse recirculación natural del producto a través del evaporador, añadiendo una conexión de tuberías entre la salida del concentrado y la línea de alimentación este es un método muy común en la producción de leche condensada.

5. Evaporador de caída de película. Una variación del modelo de tubos largos es el evaporador de caída de película, en el cual el líquido se alimenta por la parte superior de los tubos y fluye por sus paredes en forma de película delgada. Este modelo se usa mucho para la concentración de materiales sensibles al calor, como jugo de naranja y otros zumos de frutas, debido a que el tiempo de retención es bastante bajo (entre 5 y 10 seg.) y el coeficiente de calor es alto.

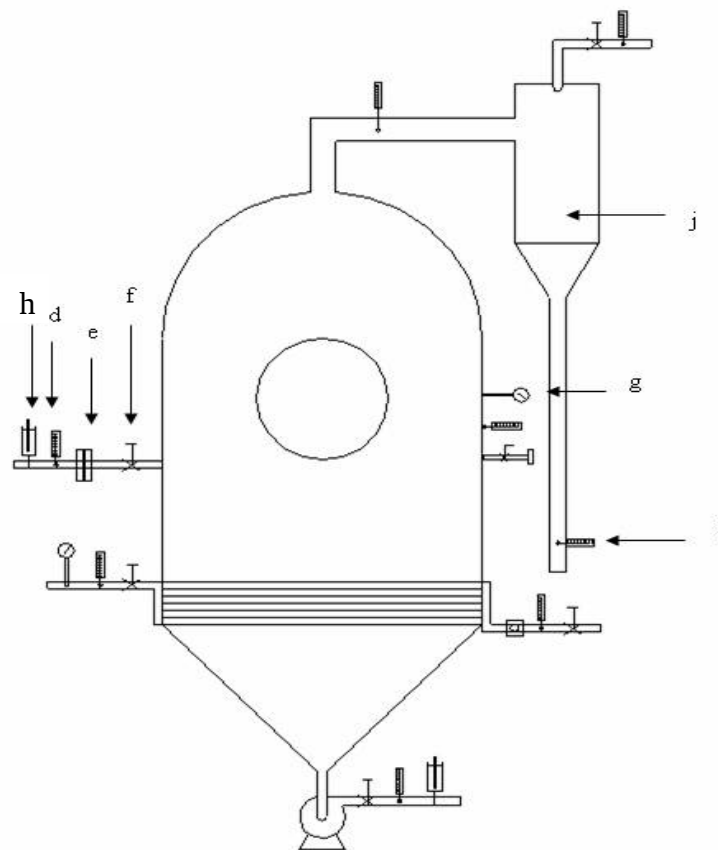
6. Evaporador de circulación forzada. El coeficiente de transferencia de calor de la película líquida puede aumentarse por bombeo provocando una circulación forzada del líquido en el interior de los tubos, para esto se emplea el modelo de tubos verticales largos, añadiendo una tubería conectada a una bomba entre salida del centrifugado y la de alimentación. Sin embargo los tubos de un evaporador de circulación forzada suelen ser más cortos que los tubos largos, este modelo es muy útil para líquidos viscosos. Además en otros casos se usa un intercambiador de calor horizontal externo e independiente.

7. Evaporador de película agitada. La principal resistencia a la transferencia de calor en un evaporador corresponde al líquido. Por tanto, un método para aumentar la turbulencia de la película líquida y el coeficiente de transferencia de calor, consiste en la agitación mecánica de dicha película. Esto se lleva a cabo en un evaporador de caída de película modificado, usando un solo tubo grande enchaquetado que contiene un agitador interior. El líquido penetra por la parte superior del tubo y a medida que fluye hacia abajo se dispersa en forma de película turbulenta por la acción de aspas de agitación vertical. La solución concentrada sale por el fondo y el vapor pasa por un separador para salir por la

parte superior. Este tipo de evaporador es práctico para materiales muy viscosos, pues el coeficiente de transferencia de calor es mayor que en los modelos de circulación forzada. Se usa para materiales viscosos sensibles al calor como el látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugo de frutas. Sin embargo, tiene costo alto y capacidad baja.

8. Evaporador solar de artesa abierta. Un proceso muy antiguo pero que todavía se usa es la evaporación solar en artesas abiertas. El agua salina se introduce en artesas o bateas abiertas y de poca profundidad y se deja evaporar lentamente al sol hasta que cristalice.

### EVAPORADOR<sup>k</sup>



<sup>c</sup> Muestreador

<sup>d</sup> Termómetro

<sup>e</sup> Rotámetro

<sup>f</sup> Válvula de paso

<sup>g</sup> Manómetro

<sup>h</sup> Nivel de condensador

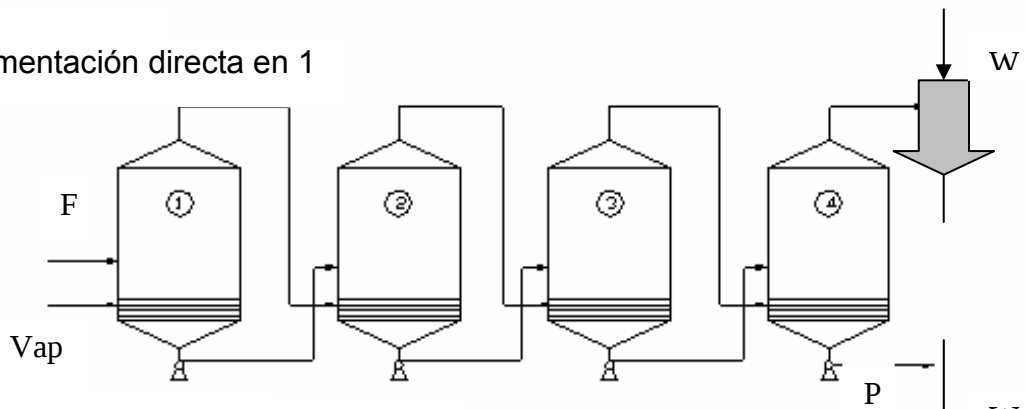
<sup>i</sup> Vacuómetro

<sup>j</sup> Condensador

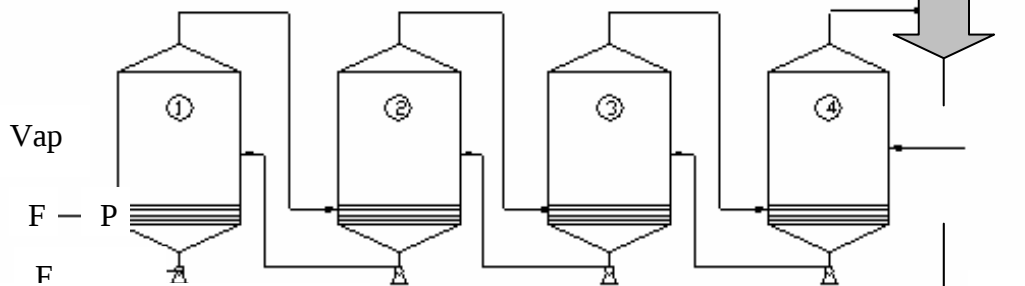
<sup>k</sup>Evaporador elaborado en programa de computadora AutoCAD 2004 , con referencia tomada G.,Brown.,(1965),”ingeniería química”,Editorial Marín., Primera edición, México,

## EVAPORADORES DE MULTIPLE EFECTO<sup>1</sup>

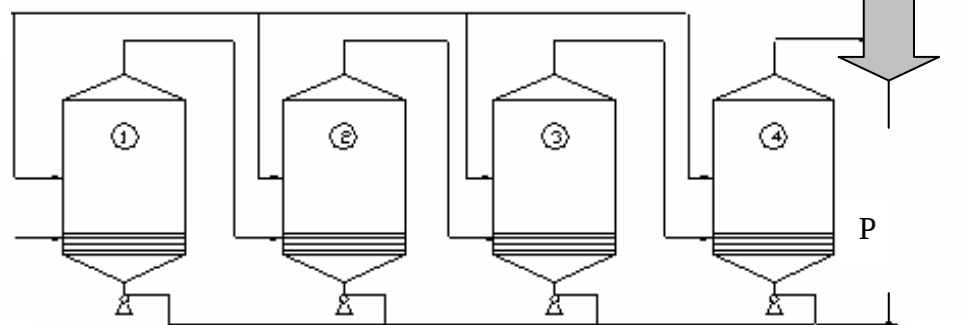
Alimentación directa en 1



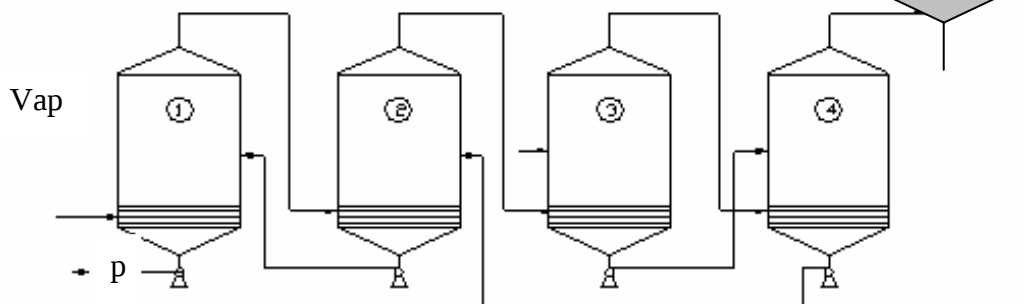
Contra corriente alimentación en 1



Alimentación paralela en 1



Mixta (3,4,2,1)



<sup>1</sup> Figuras elaboradas con base Brown., (1965), "Ingeniería química", Editorial Marín., primera edición, México

## CARACTERISTICAS DE EVAPORADORES TUBULARES CALENTADOS CON VAPOR<sup>m</sup>

|                                                       |                                     | CARACTERISTICAS DE TRANFERENCIA DE CALOR |                   |                                  |                      |                              | CARACTERISTICAS DESEABLES PARA USO CON VARIOS LÍQUIDOS |         |        |             |         |                 |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|--------|-------------|---------|-----------------|
| TIPO                                                  | COSTO RELATIVO                      | RELATIVA LÍQUIDOS DELGADOS               | LÍQUIDOS VISCOSOS | VELOCIDAD DE ENTRADA DEL LÍQUIDO | TIEMPO DE RESIDENCIA | UN SOLO PASO O RECIRCULACION | DELGADO                                                | VISCOSO | ESPUMA | INCRUSTANTE | SALES   | TEMP. SENSITIVA |
| Tubos cortos, circulación natural                     | Mínimo                              | Moderado alto                            | Bajo              | Bajo 1-3 pies/seg.               | Alto                 | Recirculación                | Bueno                                                  | Pobre   | Pobre  | Regular     | Regular | Pobre           |
| Circulación Forzada                                   | Muy alto                            | Moderado alto                            | Alto              | Alto 6-18 pies/seg.              | Moderado             | Uno a otro                   | Bueno                                                  | Bueno   | Bueno  | Bueno       | Regular | Regular         |
| Tubos largos circulación natural (flujo hacia arriba) | Menor que el de circulación forzada | Alto                                     | Moderado alto     | Alto                             | Corto                | Uno u otro                   | Bueno                                                  | Regular | Bueno  | Regular     | Pobre   | Regular         |
| Película descendente                                  | Moderado                            | Regular                                  | Alto              | -----                            | Corto                | Uno u otro                   | Bueno                                                  | Bueno   | -----  | -----       | -----   | Bueno           |
| Película Agitada                                      | Alto                                | Alto                                     | Alto              | -----                            | -----                | Un solo paso                 | Bueno                                                  | Bueno   | -----  | -----       | -----   | Bueno           |

<sup>m</sup>Fuente, esta tabla fue elaborada con datos extraídos de, Warren I Mc Cabe Julian C Smith, (1979), "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc Graw Hill, Third Edition, Pag.427-459.

**Mc (ABE Y SMITH) TABLA (9-1) FACTORES QUE AFECTAN EL FUNCIONAMIENTO DE UN EVAPORADOR<sup>n</sup>**

| CARACTERÍSTICA                     | PRINCIPALMENTE INFLUENCIADA POR:                                                                                                                                                                                                                                          | Ligeramente INFLUENCIADA POR:                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>CAPACIDAD:</p> <p>ECONOMÍA:</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Área de la superficie de calentamiento.(A)</li> <li>- Caída de temperatura. (<math>\Delta T</math>)</li> <li>- Coeficiente total de T. C. (U)</li> <li>- Numero de efectos.</li> <li>- Calentamiento de alimentación.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Calentamiento de la alimentación.</li> <li>- Calor de vaporización del vapor</li> <li>- Calor de vaporización del líquido</li> <li>- Calor de dilución del líquido</li> <li>- Cantidad de sobrecalentamiento a agua</li> <li>- Calor perdido</li> </ul> |

<sup>n</sup> Fuente, esta tabla fue elaborada con datos extraídos de, Warren I Mc Cabe Julian C Smith, (1979), "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc Graw Hill, Third Edition, Pag.427-459.

## EVAPORADORES°

| TIP O                          | VENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | DESVENTAJAS                                                                                                                                                                                                                                                                                          | MEJOR APLICACIÓN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | DIFICULTADES FRECUENTES                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CIRCULACION FORZADA</b>     | 1) Altos coeficientes de Transferencia de calor.<br>2) Circulación positiva.<br>3) Libertad relativa de cristalización, incrustación y ensuciamientos.                                                                                                                                                                                      | 1) Alto Costo.<br>2) Energía adicional para la bomba de circulación.<br>3) Tiempo relativamente alto de permanencia o resistencia.                                                                                                                                                                   | 1) Producto Cristalino.<br>2) Soluciones Corrosivas.<br>3) Soluciones viscosas.                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1) Taponamiento de los tubos por depósitos salinos desperdiciados de las paredes del equipo.<br>2) Circulación pobre debido a más altas pérdidas de altura que las esperadas.                                                 |
| <b>TUBOS CORTOS VERTICALES</b> | 1) Altos coeficientes de transferencia de calor.<br>2) Poca altura del local<br>3) Desincrustación mecánica fácil<br>4) Relativamente económico.                                                                                                                                                                                            | 1) Transferencia de calor pobre bajas diferencias de temperatura y baja temperatura de operación.<br>2) Gran espacio de piso y piso.<br>3) Relativamente alta permanencia.<br>4) Pobre transferencia de calor con líquidos viscosos.                                                                 | 1) líquidos claros (limpios).<br>2) Productos cristalinos, si se usa propela (agitación).<br>3) Líquidos relativamente no corrosivos, ya que el cuerpo es grande y económico si se construye de otros materiales de medio acero y hierro.<br>4) Soluciones semi-inconstantes que requieran limpieza mecánica y los tubos son cortos y de gran decímetro. | 3) Cristalización debida a la ebullición en los tubos.<br>4) Corrección - Erosión.                                                                                                                                            |
| <b>TUBOS LARGOS VERTICALES</b> | 1) Bajo costo.<br>2) Gran superficie de calentamiento en un cuerpo.<br>3) Pequeño espacio en el piso.<br>4) Baja permanencia (retención)<br>5) Buenos coef. De Transf. de calor a todas las diferencias de temperatura (película descendente.<br>6) Buenos coef. De Transf. de calor a diferencia de temp. Razonables (película ascendente) | 1) Gran altura de local.<br>2) Generalmente indeseable para líquidos cristalizables y severamente incrustantes.<br>3) Pobres coef. De Transf. De calor en Ev. De película ascendente a bajas diferencias de temperaturas.<br>4) Requieren usualmente recirculación para las de película descendente. | 1) Líquidos claros.<br>2) Líquidos espumeantes.<br>3) Soluciones corrosivas.<br>4) Cargas grandes de evaporaron.<br>5) Altas diferencias de temperatura en película ascendente te baja diferencias de temperatura en película descendente.<br>6) Baja temperatura de operación – película descendente.                                                   | 1) La sensibilidad en mitades de película ascendente o cambiar en condiciones de operación<br>2) Pobre distribución de alimentación a unidades de película descendente.                                                       |
| <b>TUBOS HORIZONTALES</b>      | 1) Muy baja altura de local.<br>2) Área grande de desocupación vapor – liquido.<br>3) Costo relativamente bajo en el tipo de baja corpolidad y tubos derechos.<br>4) Buenos coef. De Transf. de calor.<br>5) Desincrustacion semiautomática fallo en el tipo de tubos inclinados.                                                           | 1) Indeseable para líquidos cristalizables.<br>2) Indeseables para líquidos muras tantees en los de tubos derechos.<br>3) Alto costo tubos inclinados.                                                                                                                                               | 1) Altura de local limitada.<br>2) Pequeña capacidad.<br>3) Líquidos no cristalizables, no incrustantes en el tipo de tubos derechos.<br>4) Líquidos severamente incrustantes en el tipo de tubos inclinados.                                                                                                                                            | VALORES DE U btu/hr.pt <sup>2</sup><br>TLV. Circ.nat 200-600<br>Circ. For 400-2000<br>T.C Horizontal 200-400<br>Vertical 150-500<br>Película de Tina μ 200-400<br>P liq. 1 c.p 400<br>Aguada 100 c. p. 300<br>10,000 c. p 120 |

° Fuente, esta tabla fue elaborada con datos extraídos de ,Warren I Mc Cabe Julian C Smith, (1979),”Unit Operations of Chemical Engineering”, Mc Graw Hill, Third Edition,Pag.427-459.

## BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Los balances de materia y de energía son la contabilidad de entrada y de salida de materiales o sustancias y de energía en forma de calor, las cuales se fundamentan en la primera ley de la termodinámica.

### Nomenclatura

Tomando en cuenta las siguientes variables. **A**= alimentación, **S**= vapor, **P**= producto, **E**= solvente evaporado, **L**= condensados del vapor,  ${}_aX_A$ = concentración en la alimentación en el componente A,  ${}_aX_S$ = concentración en el vapor del componente A,  ${}_aX_P$ = concentración en el producto del componente A,  ${}_aX_E$ = concentración en la evaporación del componente A,  ${}_aX_L$ = concentración en los condensados del componente A. **Q<sub>A</sub>**= cantidad de calor en la alimentación, **Q<sub>S</sub>**= cantidad de calor que contienen el vapor, **Q<sub>P</sub>**= cantidad de calor que sale en el producto, **Q<sub>E</sub>**= cantidad de calor que sale en la evaporación, **Q<sub>L</sub>**= cantidad de calor que contienen los condensados, **λ**= calor latente del vapor.

### Balance total

**Balance de materia:**

**Balance en base al componente A  
(Sólidos):**

$$A + S = P + E + L$$

$$A^*_a X_A + S^*_a \overset{O}{X}_S = P^*_a X_P + E^*_a \overset{O}{H}_E + L^*_a \overset{O}{X}_L$$

$$\text{Sí } S = L$$

$$A^*_a X_A = P^*_a X_P$$

Sustituyendo A, P

$$A = P + E \text{ despegando } \left\{ \begin{array}{l} P = A - E \\ E = A - P \end{array} \right.$$

$$A = \frac{P^*_a X_P}{{}_a X_P}$$

$${}_a X_P = \frac{P^*_a X_P}{A}$$

$$P = \frac{A^*_a X_A}{{}_a X_P}$$

$${}_a X_P = \frac{A^*_a X_P}{P}$$

**Balance de energía:**

$$Q_A + Q_S = Q_P + Q_E + Q_L$$

$$A \cdot h_A + S \cdot H_S = P \cdot h_P$$

Si  $S = L$

$$A \cdot h_A + S \cdot H_H = P \cdot h_P + E \cdot h_E + S \cdot h_L$$

$$S \cdot H_S - S \cdot h_L = P \cdot h_P + E \cdot h_E - A \cdot h_A$$

$$R_5 = \lambda \cdot (H_5 - h_L)$$

$$S \cdot R_5 = P \cdot h_P + E \cdot h_E - A \cdot h_A$$

$$S = \frac{P \cdot h_P + E \cdot h_E - A \cdot h_A}{\lambda}$$

## Diagramas de Dühring para disoluciones acuosas de hidróxido sódico<sup>P</sup>

### CÁLCULOS

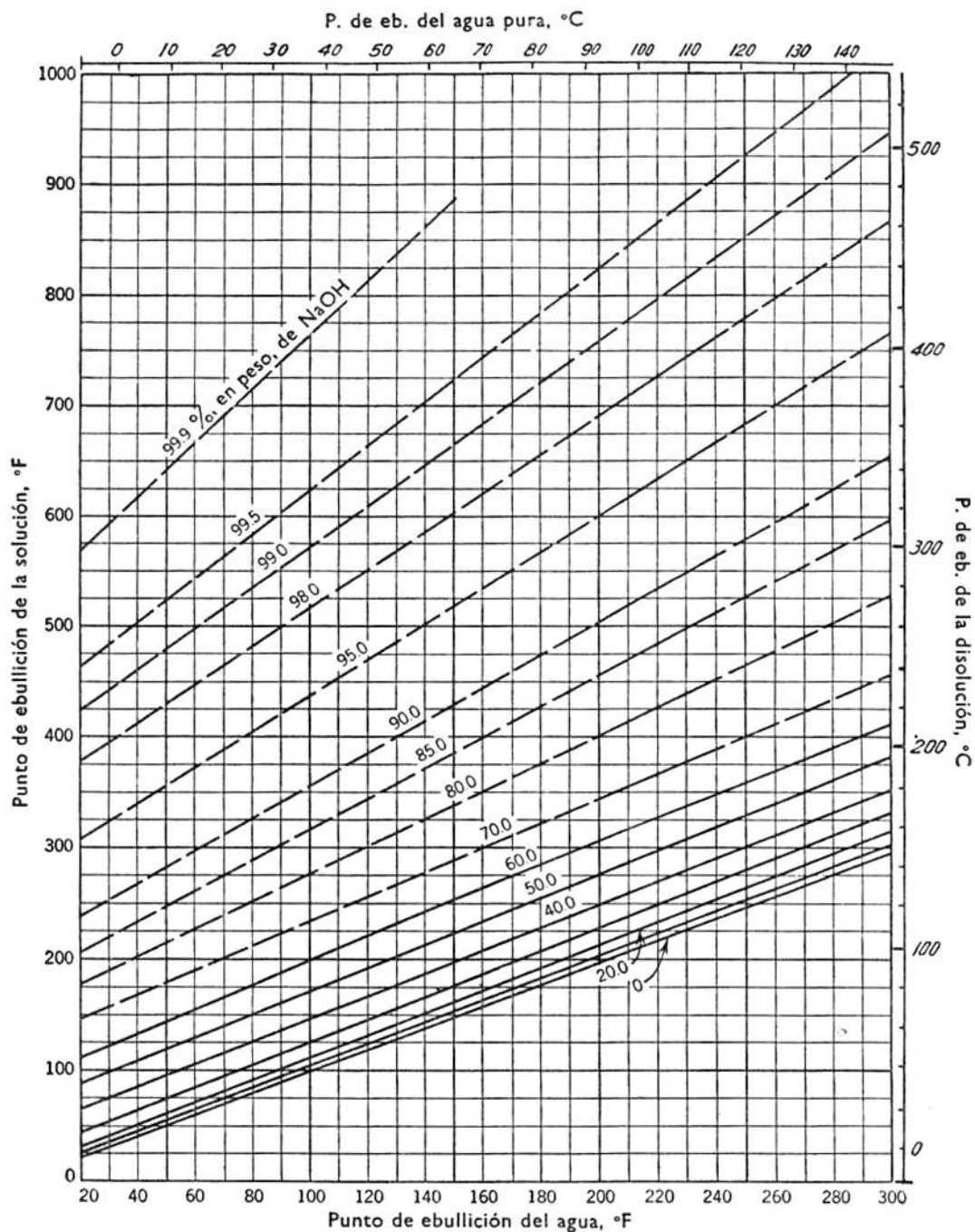


FIG. 467. Diagrama de Dühring para disoluciones acuosas de hidróxido sódico.

<sup>P</sup> fuente E. G. Brown., (1965), "Ingeniería química", Editorial Marín., Primera edición, México, pág. 511.

Diagrama entalpía concentración para soluciones acuosas de sosa. Se ha tomado arbitrariamente, como estado de referencia el agua líquida a 0 °C, a su propia presión de vapor.<sup>9</sup>

512

## EVAPORACIÓN

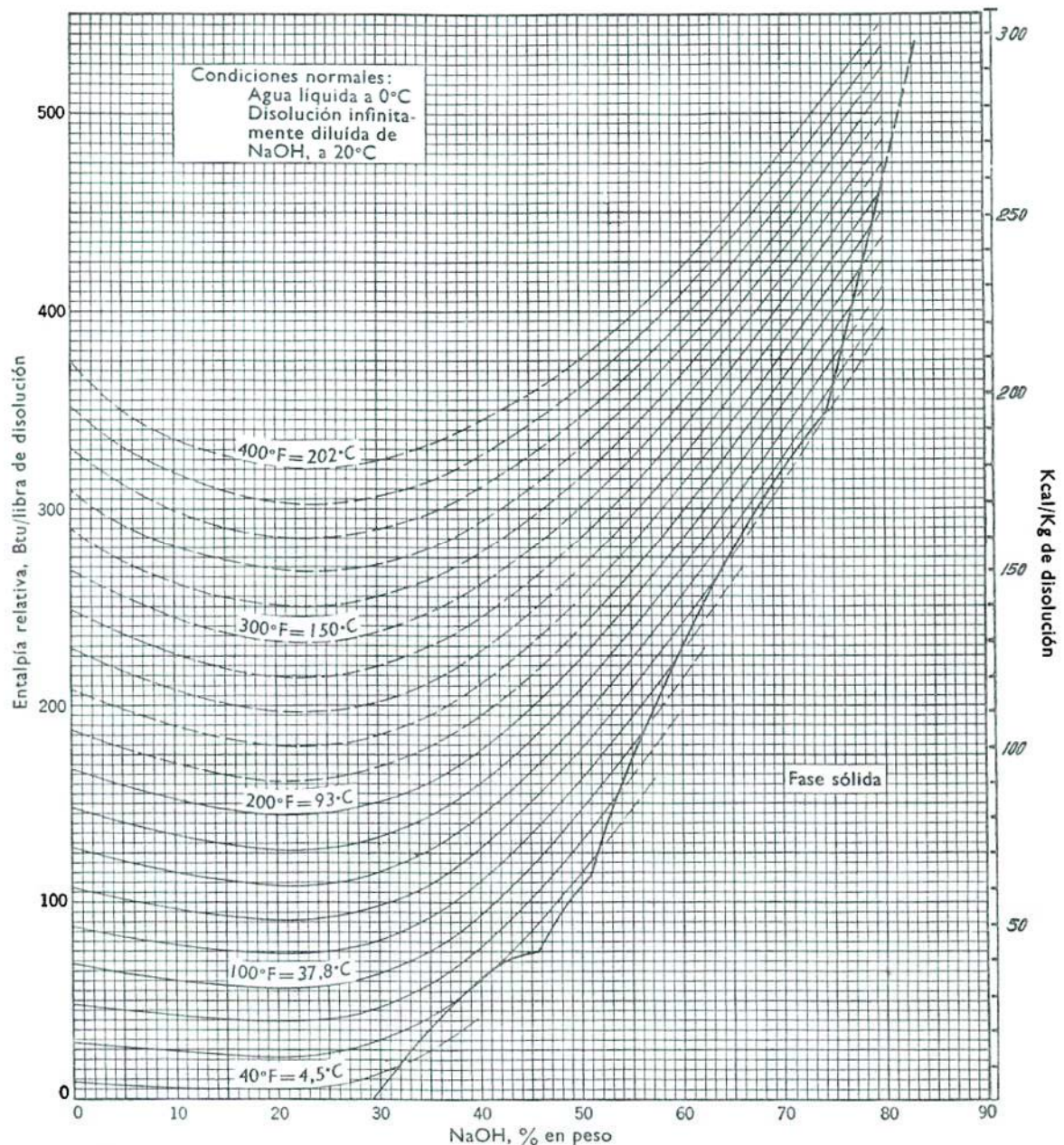


FIG. 468. Diagrama entalpía-concentración para soluciones acuosas de sosa. Se ha tomado, arbitrariamente, como estado de referencia el agua líquida a 0°C, a su propia presión de vapor.

<sup>9</sup> fuente E. G .Brown., (1965), "Ingeniería química", Editorial marin., Primera edición, México, pág.512

## APLICACIONES

En la industria la evaporación es una operación unitaria, en la que se extrae una sustancia líquida a través de la adición de calor, esto permite que se obtenga una solución más concentrada. Como ejemplo se puede tomar el jugo de naranja que en su estado natural contiene una significativa porción de agua, al suministrarle calor al evaporador, el agua que contiene el jugo de naranja se empieza a evaporar en la superficie, que posteriormente se hace pasar por un condensador para la obtención de agua en su forma líquida, y el concentrado de naranja que permanece en el fondo del evaporador puede extraerse por medio de una válvula situada en la parte inferior del evaporador. Cabe mencionar que se puede manejar el porcentaje de la concentración del soluto.

## PROBLEMAS

**Problema # 1: se alimenta a un evaporador. 2,500lb./min, de una solución diluida de sosa cáustica al 10% de sólidos y se obtienen 500lb./min, de solución concentrada, calcular la concentración, la cantidad de agua y la capacidad del evaporador.**

$$F = 2,500 \text{ lb./min.}$$

$$X_F = 10\%$$

$$P = 500 \text{ lb./min.}$$

$$X_P = \frac{F * X_F}{P}$$

$$E = F - P$$

$$X_P = \frac{2,500 * 0.10}{500} = 0.50$$

$$X_P = 50\%$$

$$E = 2,500 - 500 = 2,000 \text{ lb. / min.}$$

$$\text{capacidad} = 2,000 \frac{\text{lb.}}{\text{min}} \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr.}} \right) = 120,000 \text{ lb. H}_2\text{O evaporada / hr.}$$

**Problema # 2 A un evaporador de simple efecto con sistema de eliminación de cristales se le alimenta 25,000kg./hr. De una solución que tiene una composición de 10% de NaOH, 10% de NaCl y 80% de H<sub>2</sub>O obteniéndose una solución de composición 50% NaOH, 2% NaCl y 48% H<sub>2</sub>O por una parte y por otra cristales de 100% NaCl. Calcular: 1) La cantidad de solución concentrada obtenida, 2) La cantidad de cristales de NaCl y 3) La cantidad de agua evaporada.**

Balance total  $F=E+P+C$

$$25,000 = E + P + C$$

$$\text{Balance NaOH} : F * X_F = E * X_{EW} + P * X_P + C * X_C$$

$$25,000 * 0.10 = E * 0 + P * 0.50 + C * 0$$

$$25,00 = 0.50P \therefore P = \frac{2500}{0.50} = 5,000$$

$$\text{Balance NaCl} : F * X_F = E * X_E + P * X_P + C * X_C$$

$$25,000 * 0.10 = E * 0 + 5,000 * 0.02 + C * 1.0$$

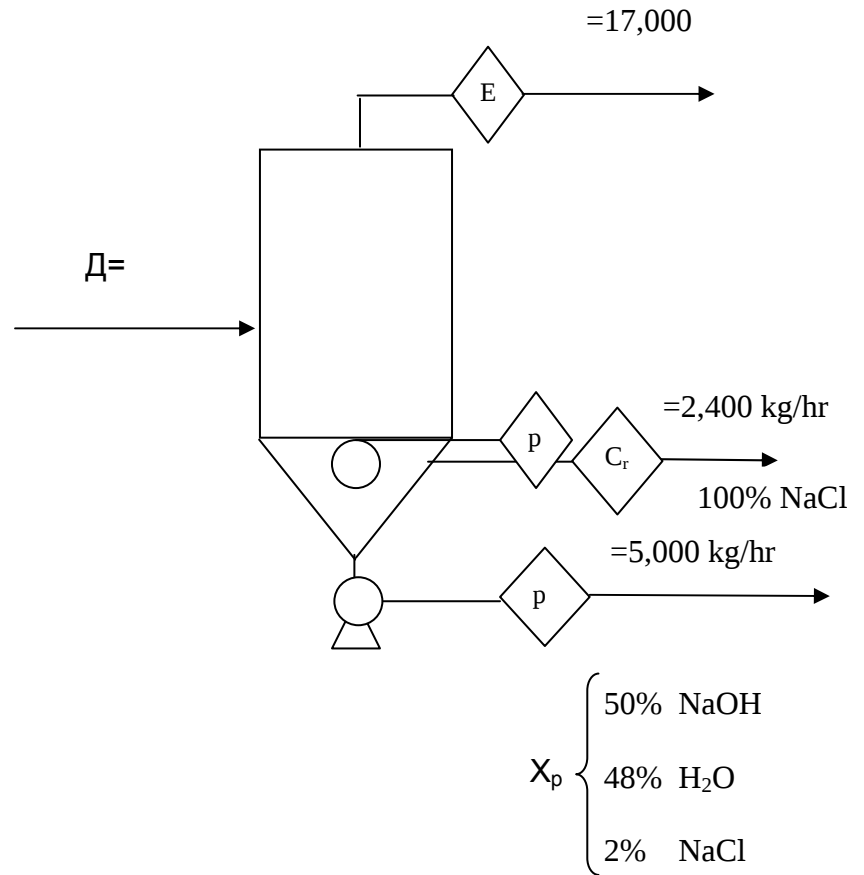
$$2,500 = 100 + C \therefore C = 2,500 - 100 = 2,400 \text{ kg./hr}$$

En..1

$$25,000 = E + 5,000 + 2,400$$

$$E = 25,000 - 5,000 + 2,400$$

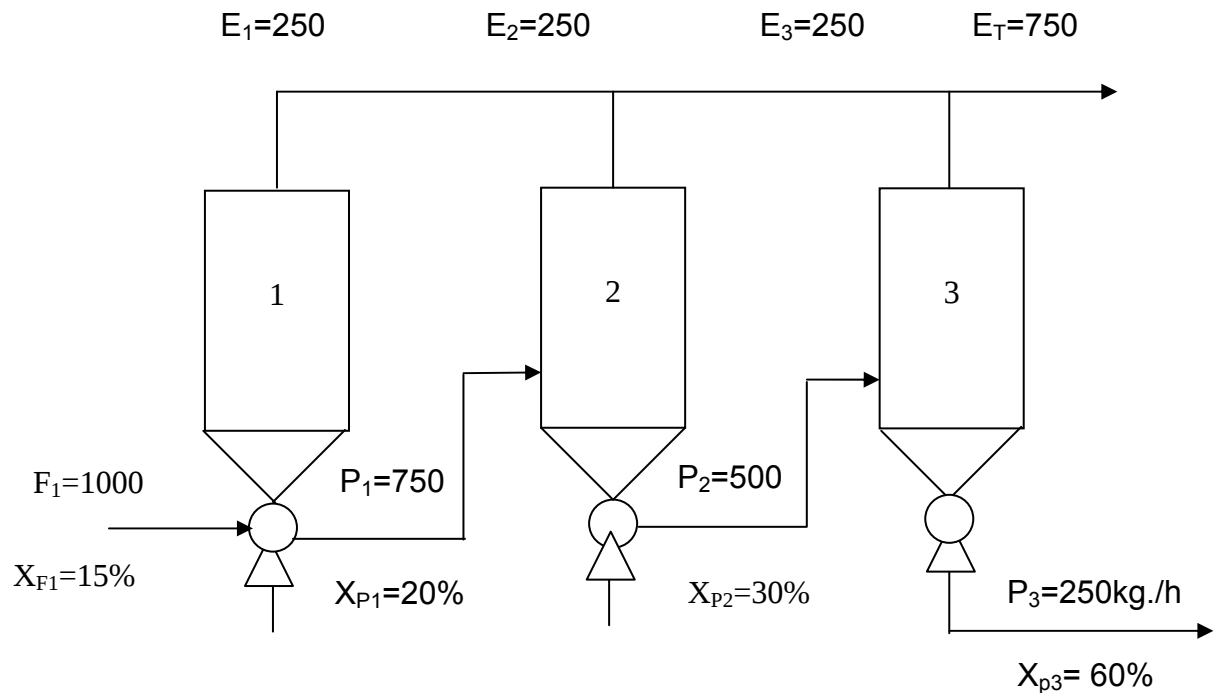
$$E = 17,600 \text{ kg./hr.}$$



$$D = 25,000 \text{ kg./hr.} = F$$

$$X_D \left\{ \begin{array}{l} 10\% \text{ NaOH} \\ 10\% \text{ NaCl} \\ 80\% \text{ H}_2\text{O} \end{array} \right.$$

Problema # 3 Una de las etapas del proceso para la fabricación del azúcar, consiste en concentrar un jugo de caña de azúcar que contiene 15% de sólidos en peso hasta obtener un jarabe que contenga 60% de sólidos en peso en un evaporador de triple efecto; suponiendo que la cantidad de agua evaporada en cada efecto es la misma; calcular cuál será la concentración del jugo de caña a la salida de cada efecto.



Base de cálculos  $F=1,000 \text{ Kg./hr.}$

Balance total  $F_1 * X_{F1} = P_3 * X_{P3}$

$$1,000 * 0.15 = P * 0.60 \therefore P = \frac{1,000 * 0.15}{0.60} = 250 \text{ kg./hr.}$$

$$E_T = 1,000 - 250 = 750 \text{ kg./hr.}$$

Si cada efecto evapora la misma cantidad de agua  $E_1 = E_2 = E_3 = 750/3$

$$E_1 = E_2 = E_3 = 250 \text{ Kg./hr.}$$

*El efecto...1*

$$F_1 * X_{F1} = P_1 * X_{P1}$$

$$1,000 * 0.15 = 750 * X_{P1}$$

$$X_{P1} = \frac{1,000 * 0.15}{750} = 0.20 = 20\%$$

*El.efecto..2*

$$F_2 * X_{F_2} = P_2 * X_{P_2}$$
$$750 * 0.20 = 500 * X_{P_2}$$

$$X_{P_2} = \frac{750 * 0.20}{500} = 0.30 = 30\%$$

*El.efecto..3*

$$f_3 * X_{f_3} = P_3 * X_{P_3}$$
$$500 * 0.30 = 250 * X_{P_3}$$

$$X_{P_3} = \frac{500 * 0.30}{250} = 0.60 = 60\%$$

**Problema # 4: se alimenta un evaporador con 18 000 Kg/hr, de leche fresca que tiene una concentración del 12% de sólidos y se requiere obtener una leche concentrada con 40% de sólidos; calcular la cantidad de leche concentrada que se va a obtener, cuánta agua se tendrá que evaporar y cual será la capacidad del evaporador.**

Datos

$$F = 18,000 \text{ kg/hr}$$

$$X_F = 12\% \dots\dots\dots 0.12$$

$$X_P = 40\% \dots\dots 0.40$$

$$P = \frac{X_F * F}{X_P}$$

$$E = F - P$$

Sustitución

Cantidad de producto obtenido

$$p = \frac{0.12 * 18,000}{0.40} = 5,400 \text{ kg/hr}$$

Cantidad de agua evaporada.

$$E = 18,000 - 5,400 = 12,600 \text{ kg/hr}$$

Capacidad = 12, 600 Kg. de H<sub>2</sub>O evaporada por hr.

**Problema # 5 A un evaporador que tiene una capacidad de 20,000kg. Agua/hr. Se le alimentan 420kg/min, de jugo de toronja concentrado con 27% de sólidos. Calcular cual es la concentración del jugo de toronja alimentado, y cual será la cantidad del jugo de toronja concentrado que se va a obtener en. Kg./min.**

Capacidad= 20,000kg. H<sub>2</sub>O/hr.

F= 420kg/min.

X<sub>p</sub>= 27%

$$E = 20,000 \text{ kg./hr.}$$

$$F = 25,200 \text{ kg./hr.}$$

$$X_p = 0.27\%$$

$$P = 25,200 - 20,000 = 5,200 \text{ kg./hr.} = 86.6667 \text{ kg./min.}$$

$$X_F = \frac{P * X_p}{F}$$

$$X_F \frac{5,200 * 0.27}{25,200} = 0.0557 = 5.57\%$$

**Problema # 6: ¿Con qué concentración se tiene que alimentar a un evaporador si alimentamos 25, 000 lb/hr, de jugo de tomate y se quiere obtener 4,000lb/hr. De puré de tomate con una concentración de 32% de sólidos?, ¿cuanta agua se tiene que evaporar? y ¿cual es la capacidad del evaporador?**

$$F = 25,000 \text{ lb./hr.}$$

$$P = 4,000 \text{ lb./hr.}$$

$$X_p = 32\%$$

$$E = 25,000 - 4,000 = 21,000 \text{ lb./hr.}$$

$$X_f = \frac{4,000 * 0.32}{25,000} = 0.0512$$

$$X_f = 5.12\%$$

$$\text{Capacidad} = 21,000 \text{ lb. de H}_2\text{O evaporada / hr.}$$

**Problema # 7: Con que flujo se tendrá que alimentar a un evaporador de jugo de naranja fresco que tiene una concentración de 6% de sólidos si se quiere obtener 150kg/hr, de jugo de naranja concentrado con 25% de sólidos, ¿Cuánta agua se tiene que evaporar y cuál es la capacidad del evaporador?**

$$X_F = 6\%$$

$$P = 150 \text{ kg./seg.}$$

$$X_p = 25\%$$

$$F = \frac{P * X_p}{X_F}$$

$$E = F - P$$

$$F = \frac{150 * 0.25}{0.06} = 625 \text{ kg./h}$$

$$E = 625 - 1500475 \text{ kg./seg}$$

$$\text{Capacidad} = 475 \text{ Kg. /seg.} \left( \frac{3.600 \text{ seg.}}{1. \text{hr}} \right) = 1'710,000 \text{ Kg, de H}_2\text{O evaporada por hr.}$$

## **PROBLEMAS PARA RESOLVER**

**Problema # 1** Una de las etapas del proceso para la fabricación del azúcar, consiste en concentrar un jugo de remolacha que contiene 15% de sólidos en peso hasta obtener un jarabe que contenga 60% de sólidos en peso en un evaporador de triple efecto; suponiendo que la cantidad de agua evaporada en cada efecto es la misma; calcular cual será la concentración del jugo de remolacha a la salida de cada efecto, si se alimentan 10,000 kg/hr de jugo de remolacha. Que se va a obtener, cuanta agua se tendrá que evaporar y cual será la capacidad del evaporador.

**Problema # 2** Se alimenta un evaporador con 11 000 Kg./hr. de leche fresca que tiene una concentración del 16% de sólidos y se requiere obtener una leche concentrada con 38% de sólidos; calcular la cantidad de leche concentrada

**Problema # 3** A un evaporador que tiene una capacidad de 15,000kg. Agua/hr. Se le alimentan 387 kg. / Min., de jugo de toronja, para obtener jugo concentrado con 25% de sólidos. Calcular cuál es la concentración del jugo de toronja alimentado, y cual será la cantidad del jugo de toronja concentrado que se va obtener. Kg. /min.

**Problema # 4** Con qué concentración se tiene que alimentar a un evaporador si alimentamos 54,000 lb/hr., de jugo de tomate y se quiere obtener 7,000lb./hr., de puré de tomate con una concentración de 37% de sólidos, ¿Cuánta agua se tiene que evaporar y cual es la capacidad del evaporador?

**Problema # 5** Con qué flujo se tendrá que alimentar a un evaporador de jugo de naranja fresco que tiene una concentración de 6% de sólidos si se quiere obtener 150kg./hr., de jugo de naranja concentrado con 25% de sólidos. ¿Cuánta agua se tiene que evaporar y cual es la capacidad del evaporador?

## CAPITULO II MEZCLADO

### DEFINICIÓN

El mezclado es una operación unitaria de ingeniería química que consiste en integrar, reunir, incorporar, juntar, combinar dos o más sustancias con el fin de obtener un producto o subproducto debido a que la mayoría de los procesos de transferencia de masa requiere del mezclado de corriente de fluidos o la separación de uno de ellos.

**EQUIPOS (tipos de mezcladores, impulsores con proporciones típicas, tanques agitados mecánicamente para el contacto gas-liquido Y agitación)**

### MEZCLADORES<sup>r</sup>

#### Chorro de fluido

Los gases a causa de su baja viscosidad, su gran transferencia molecular y turbulencia se mezclan fácilmente a través del movimiento diferencial de los fluidos o de la inyección de una corriente en otra la mezcla intensiva de gases, es una práctica común la inyección de una corriente a velocidad sónica dentro de un segundo gas estancado o de baja velocidad. Esto requiere una presión absoluta en el gas móvil de aproximadamente el doble de la cámara de mezcla.



Un examen del número de Reynolds revela que es posible una turbulencia intensiva comparable de los líquidos que fluyen a una velocidad algo menor que las de los chorros de gas. Sin embargo, por medio de la ecuación de la energía mecánica se puede demostrar fácilmente que las presiones necesarias para lograr las

---

<sup>r</sup> Fuente G. D. Ulrich,(1992), "Procesos de ingeniería química ",Mc Graw Hill, primera edición, México,pag. 180

velocidades comparables son considerablemente mayores en los sistemas de líquidos.

De este modo, se requieren diferenciales de presión de aproximadamente 1, 2 y 3 bar, para la mezcla ligera moderada e intensa por medio de chorros de líquidos que tienen una viscosidad de 0.001 Pa./Seg. Con líquidos más viscosos, la diferencia de presión para una intensidad de mezclado dado que aumenta linealmente con el cuadrado de la viscosidad de esta manera, la mezcla o chorro de gran intensidad a una viscosidad de 0.0 1 Pa. Requiere una diferencial de presión de 300 bares. Lo cual se encuentra muy cerca del límite práctico.

El ángulo de divergencia del chorro que sale de un tubo circular normalmente es de 20 grados para los sistemas de gases de 15 grados para los sistemas de líquidos. De aquí que un elemento cilíndrico de 100 Do de longitud y de aproximadamente 30 Do de diámetro se mezcla con efectividad por medio de una tobera simple de diámetro Do. La mezcla más intensa está cerca del chorro en sí, el cual arrastra fluido rápidamente de la región que rodea tobera. Hay un flujo inverso cerca de la parte exterior del volumen cilíndrico de mezcla conforme se recircula el material de la corriente descendente para reemplazar el fluido arrastrado. El flujo total volumétrico de un chorro aumenta con la distancia, de acuerdo con las relaciones:

$$\frac{q}{q_0} = 0.3 \frac{x}{D_0} \quad (\text{Aire})$$

$$\frac{q}{q_0} = 0.2 \frac{x}{D_0} \quad (\text{Agua})$$

En donde x es la distancia de la corriente descendente de la tobera y  $q_0$  es el flujo volumétrico de la tobera a la presión de la cámara. Un chorro es capaz de arrastrar y mezclar aproximadamente 20 a 30 veces su propio volumen de fluido antes de que se debilite aproximadamente a 100 diámetros de la tobera.

La mezcla por chorro de fluidos se encuentra universalmente en los reactores, las cámaras de combustión en otros equipos donde es necesaria la uniformidad de los gases. A causa de su simplicidad, el costo y el mantenimiento de un mezclador de chorro generalmente son despreciables comparados con los de otros equipos. El consumo relativo de energía de los mezcladores de chorro, basados en el flujo de fluido mezclado.

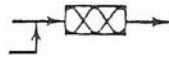
En un diagrama de flujo generalmente aparece por separado la bomba o el compresor: en este caso no son necesarios los valores mostrados. Se incluyen en la tabla sólo para su comparación con otras formas de agitación.

### **Placa de Orificio**

Otro de los dispositivos empleados para provocar la agitación de gases y líquidos no viscosos es una reducción o una válvula parcialmente cerrada dentro de un tubo o canal de flujo. Esto induce la turbulencia y la recirculación, de manera parecida al chorro de fluido descrito antes. Para lograr una mezcla moderada o intensa, la relación del orificio con respecto a los diámetros del tubo estará en el intervalo de 0.5 a 0.2. Esto crea una caída de presión de 0.05 a 0.3 bar en las tuberías de líquidos. La turbulencia creada por un orificio es capaz de dispersar un líquido no miscible dentro de otro.

Con gases o líquidos miscibles que tienen viscosidades menores de 0.1 Pa./s, la mezcla puede efectuarse eficientemente por medio de una placa de orificio seguida de un tubo de una longitud igual a 50 diámetros del tubo.

## Mezclador sin movimiento



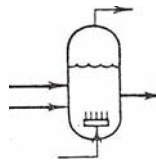
Los mezcladores sin movimiento son dispositivos ingeniosos de tuberías que pueden subdividir y volver a combinar los filamentos de líquidos viscosos, suspensiones o pastas.

El mezclador es una serie de aspas de metal o elementos similares insertados dentro de una sección de tubería. Cada uno de los elementos divide el fluido, lo hace girar lo entrega al segmento siguiente, el cual lo subdivide y lo mezcla aún más. De dos a veinte de estos pasos son suficientes para mezclar por completo inclusive materiales de alta viscosidad. La caída de presión es baja, sólo aproximadamente mayor que la de la tubería simple. La caída de presión típica de un mezclador sin movimiento, se encuentra generalmente dentro del intervalo de 0.01 bar para la mayoría de los líquidos, incrementándose aproximadamente a 1 bar. Para las pastas de 100 Pas, las cuales fluyen sólo con dificultad dentro de las tuberías.

Los mezcladores sin movimiento fueron desarrollados para la mezcla de líquidos viscosos bajo condiciones donde no es necesaria o no se desea la turbulencia. A causa del capital, mantenimiento y costo de operación bajos, se han vuelto muy populares en otra clase de aplicaciones; éstas incluyen el mejoramiento de la transferencia de calor (especialmente para flujos demasiado viscosos), la mezcla de gases, la suspensión líquido-líquido, la dispersión líquido-gas y otras aplicaciones. Con las modificaciones apropiadas pueden servir aun para a mezcla sólido-sólido. Las positivas características de mezcla y baja caída de presión de los mezcladores sin movimiento los hacen superiores a las placas de orificio en casi todas las aplicaciones.

## Rociadores de gases, columnas de burbujeo.

En los servicios de corrosión extrema o en las situaciones que requieren el contacto gas-líquido durante breves periodos y con agitación ligera, comúnmente se emplean los rociadores.



Estos sólo son tubos perforados o elementos porosos sumergidos cerca del fondo de un tanque, a través de los cuales los gases burbujan y se elevan hacia la superficie. En el proceso agitan al líquido, y en algunos casos reaccionan o intercambian masa o calor con él.

Dependiendo del diseño del rociador del flujo de gas, normalmente el intervalo de las burbujas va de 2 a 6 mm de diámetro, subiendo a través de líquidos ligeros a una tasa de 0.15 a 0.30 m/s.

La tasa de gas recomendada es de  $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$  por metro cuadrado de sección transversal de tanque para agitación ligera, 0.008 para una agitación relativamente completa y 0.02 para el movimiento violento. Esto nos da fracciones de volumen de gas que varían desde 2 hasta 10%. La operación de rociado es posible para líquidos tan viscosos como el de 1 Pa./S.

El consumo de energía es el requerido por el compresor, el cual proporciona gas al rociador. La diferencial de presión puede calcularse para una profundidad de líquido más la adición de 0.1 a 0.3 bar., para forzar el gas a través de los orificios del rociador.

Comúnmente se emplean recipientes rociadores para la flotación de los minerales y en los reactores que requieren un contacto entre sólidos, líquidos y gases. Como la fracción del volumen del gas y el tiempo de residencia están estrechamente limitados en los recipientes rociadores, a menudo se añaden agitadores mecánicos para proporcionar un contacto más íntimo y tiempos de residencia mayores.

### **Bomba o mezclador de línea con agitación**

Los agitadores que dependen del movimiento relativo de los fluidos están limitados en versatilidad y en duración del contacto. Para vencer estas desventajas, se puede aplicar energía mecánica directamente a través de diferentes dispositivos.

El más simple es una bomba centrífuga; puede ser instalada directamente en la tubería para mezcla, dispersión o emulsificación. Para la agitación dentro de un recipiente se puede instalar una bomba o un soplador en un circuito externo de tubería que retire líquido o gas del tanque y lo vuelve a inyectar a través de una tobera.

Instalada directamente dentro de la tubería, la bomba se comporta un poco como un orificio o como un mezclador sin movimiento, excepto que los mezcladores de bomba necesitan energía adicional de movimiento. Un recipiente con una bomba o un soplador instalado tiene la agitación característica de un chorro de fluido o de un rociador, dependiendo del diseño de la tobera de reinyección. Las caídas de presión, las intensidades de mezcla y los consumos de energía para los diferentes tipos de agitación por medio de bombas son similares a los de los sistemas no mecánicos que simulan.

Como regla general, debe bombearse un volumen de fluido igual al que se encuentra en el interior del tanque a través del circuito externo, para mezclar adecuadamente un recipiente con la bomba instalada. Esta regla puede emplearse para determinar los tiempos de mezcla en las operaciones por lotes o los tiempos de residencia en las operaciones continuas. Su consumo de energía y su costo son similares a los de las bombas centrífugas que reemplazan.

Aunque las bombas o mezcladores de línea con agitación son simples en cuanto a su instalación, mantenimiento y operación, son mucho menos versátiles que los mezcladores helicoidales o de turbina, los cuales representan la elección mayoritaria para la agitación mecánica de los fluidos de viscosidad baja a media.

#### Agitadores de propela y de turbina

Empleado en las plantas de procesos químicos. Consisten básicamente de un impulsor rotatorio motorizado inmerso dentro de un líquido.

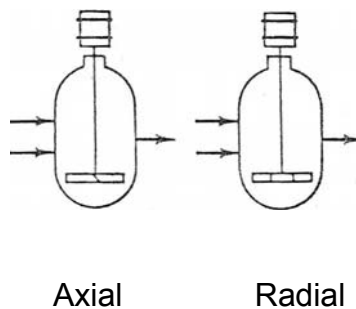
Aun cuando la variedad de los tipos de impulsión y las configuraciones de los recipientes son enormes, solo los agitadores de propela y turbina son significativos para la generalidad de la gente.

Los agitadores de propela se parecen a las propelas marinas de tres aspas que se emplean para la propulsión de barcos, excepto que en el servicio comercial el recipiente permanece estacionario mientras que el fluido es el que se mueve. Estas propelas provocan un flujo paralelo al eje de rotación (flujo axial). Instaladas verticalmente dentro de un tanque, el flujo circula en una dirección a lo largo del eje en dirección inversa a lo largo de las paredes. Los agitadores de propela se emplean extensamente para las aplicaciones flexibles en pequeña escala. A causa del remolino que pueden crear, a menudo se emplean para dispersar gases o sólidos que no se humedecen dentro de líquidos. Los agitadores de propela caracterizados por sus grandes velocidades de rotación rara vez exceden de 1.5 m de diámetro.

Para la agitación en grandes tanques o recipientes de almacenamiento, a menudo se emplean unidades de una o más propelas insertadas a través de uno de los lados. Se encuentran en intervalos de potencia desde tamaños de laboratorio hasta los equipos de 50 Kw. Una aplicación interesante de un mezclador de propela es la combinación dentro del envolvente de un intercambiador de calor para que sirva como reactor de alquilación bien agitado para el procesamiento de petróleo.

Los impulsores de las turbinas están montados sobre ejes parecidos a propelas, pero generalmente son mucho más grandes y giran a baja velocidad. Las turbinas,

disponibles en cierta variedad de diseño del impulsor, son más flexibles y más eficientes que las propelas para cierto número de aplicaciones críticas. Los impulsores más comunes de turbina caen dentro de la categoría de flujo radial o de flujo axial.



Los impulsores radiales pueden observarse como estrellas de aspas planas como los impulsores de las bombas centrífugas, descargan líquido a gran velocidad en dirección radial. Esto actúa como un mezclador de chorro, que arrastra al fluido que lo rodea al mismo tiempo que crea dos sistemas de circulación: uno por encima del impulsor y el otro por debajo. El líquido que fluye hacia afuera se separa en la pared; una parte fluye hacia arriba, hacia la superficie y regresa al centro del impulsor a lo largo del eje. La otra corriente fluye hacia abajo a lo largo de la pared, a través del fondo del recipiente, y regresa al centro del impulsor.

Los impulsores axiales son similares a los radiales, excepto que las aspas están inclinadas generalmente a un ángulo aproximado de 45 grados.

A causa de la uniformidad y del control de la circulación, las turbinas de flujo axial son lo mejor que existe para la suspensión de sólidos, la dispersión de líquidos no miscibles, el mejoramiento de la transferencia de calor y la promoción de las reacciones químicas. Por otro lado, los impulsores radiales son lo mejor que existe para la dispersión de gases.

Aunque es posible tener una combinación infinita de parámetros de escala, la mayoría de los recipientes de agitación por turbina están diseñados con una relación de diámetro del tanque a diámetro del inductor que va aproximadamente de 2 a 5.

En forma característica tienen cuatro deflectores verticales de casi un doceavo del diámetro del tanque. En general, el impulsor está ubicado a un tercio a un cuarto del diámetro del tanque, más arriba del fondo. Como regla general, tanto para los recipientes de agitación por turbina como para los de propela, el intervalo de la altura del líquido va de 0.75 a 1.5 veces el diámetro del recipiente. Si es sustancialmente mayor que esto, se montan dos o más impulsores sobre el mismo eje.

Como la mayoría del equipo de proceso, la elección final de un agitador de fluidos no debe hacerse sin consultar a un especialista. Sin embargo, para el diseño preliminar conviene saber que la mayoría de las aplicaciones comerciales encajan dentro de una diversidad de especificaciones relativamente estrecha, por ejemplo: el consumo de energía cae dentro del intervalo de 0.03 a 0.2 KW/m<sup>3</sup> para la agitación ligera, de 0.2 a 0.5 KW/m<sup>3</sup> para la agitación vigorosa de 0.5 a 2 KW/m<sup>3</sup> para la intensa. Este es el consumo general de energía suponiendo 90% de eficiencia dentro del sistema e reducción de la velocidad del impulsor

En condiciones de turbulencia convencional, los factores de fricción son relativamente constantes con respecto al número Reynolds, y por tanto independientes de la viscosidad. Entonces, los lineamientos son válidos para viscosidades hasta de aproximadamente 25 Pa \* s. generalmente se emplean propelas especiales, como la del tipo ancla o la helicoidal. Para el diseño en este último intervalo debe consultarse a los vendedores o la literatura mas especializada.

## MEZCLA DE SOLUCIONES Y LÍQUIDOS

Para esta operación se recomienda la agitación moderada, de una propela o un impulsor de turbina que requiera un consumo específico de energía de 0.2 a 0.5 Kw. /m<sup>2</sup>. El tiempo de mezcla para un recipiente para operación por lotes tomado de los datos del libro de McCabe y Smith puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta = 12000 \left( \frac{\mu V}{P} \right)^{1/2} \left( \frac{V}{1.0 \text{ m}^3} \right)^{1/5} \text{ s}$$

En donde  $\mu$  es la viscosidad en Pascal \* segundos (Pa \* s),  $P$  es la potencia esta en watts y  $V$  es el volumen en metros cúbicos. Para el agua a temperatura ambiente, en un recipiente de 5 m<sup>3</sup>, agitado con un consumo específico de energía de 500 W/m<sup>3</sup>, el tiempo estimado de mezcla es de 23 seg. Para los recipientes de flujo continuo es adecuado un tiempo de residencia igual a este tiempo de mezcla para el trabajo por lotes.

## DISPERSION DE LÍQUIDOS NO MISCIBLES

Para la extracción (en donde los líquidos tienen que ser separados otra vez por medio de sedimentación), las gotas deben tener entre 0.1 mm y 1 mm de diámetro. Estas pueden ser dispersadas en fracciones de volumen de hasta 0.6 ó 0.7 por medio de impulsores de turbinas axiales, con una agitación que va de moderada a vigorosa. Generalmente es adecuado un tiempo de residencia de 60 seg., para proporcionar 90% o más de extracción de una etapa teórica.

---

<sup>s</sup> Fuente .G. D. Ulrich,(1992), "Proceso de Ingeniería química", Mc Graw Hill, primera edición, México, pag.198

## **SUSPENSION DE PARTICULAS SÓLIDAS**

Los parámetros necesarios para esta aplicación dependen de las características de sedimentación de las partículas. Si la velocidad de sedimentación es menor de  $0.02 \text{ m/seg}$ , será suficiente una agitación ligera por medio de un Impulsor axial o radia de turbina. Para una velocidad de sedimentación de hasta  $0.05 \text{ m/seg.}$ , se recomienda un impulsor axial bajo condiciones de agitación vigorosa. Para una velocidad de sedimentación  $0.05$  a  $0.1 \text{ m/seg}$ , se recomienda la agitación intensa por medio de un impulsor de turbina axial. La suspensión de partículas de sedimentación más rápida requieren una agitación aún más intensa, pero las partículas con velocidades de sedimentación de hasta  $10 \text{ m/s}$  se han podido poner en suspensión con éxito con turbinas de tipo axial,  $60 \text{ seg.}$  (Dentro de un recipiente) es un tiempo de residencia adecuado para los sólidos de reacción rápida o las suspensiones fáciles. La eficiencia de contacto se acercará al  $100\%$  bajo estas condiciones, pero la eficiencia de la etapa es considerablemente menor, ya que el lodo de salida contiene aproximadamente  $50\%$  de líquido.

## **EMULSIFICACIÓN**

Las emulsiones son suspensiones de líquidos no miscibles en las cuales las gotas dispersas (de  $1$  a  $1.5 \text{ }\mu\text{m}$  de diámetro) son demasiado pequeñas para chocar y separarse. Para crear una emulsión se emplean agitadores axiales con una gran energía específica y aspas de alta velocidad. Ocasionalmente se emplea un tubo de circulación forzada con agitadores del tipo propela. Este es un forro cilíndrico abierto por los extremos y sumergido alrededor del impulsor que fuerza a todo el líquido que circula para que pase a través de la zona de mezcla de gran corte, cerca de las aspas de la propela.

## DISPERSIÓN DE GASES

Se emplea agitación mecánica en un tanque rociador cuando se desean mayores tiempos de residencia del gas. En los recipientes con agitación puede aumentarse la retención volumétrica del gas donde 10% (de volumen), mencionado anteriormente para el tanque rociador sin ayuda, hasta 30% con agitación mecánica intensa (aproximadamente de 1.0 a 2.0 Kw./m<sup>3</sup> basándose en el volumen de la mezcla).

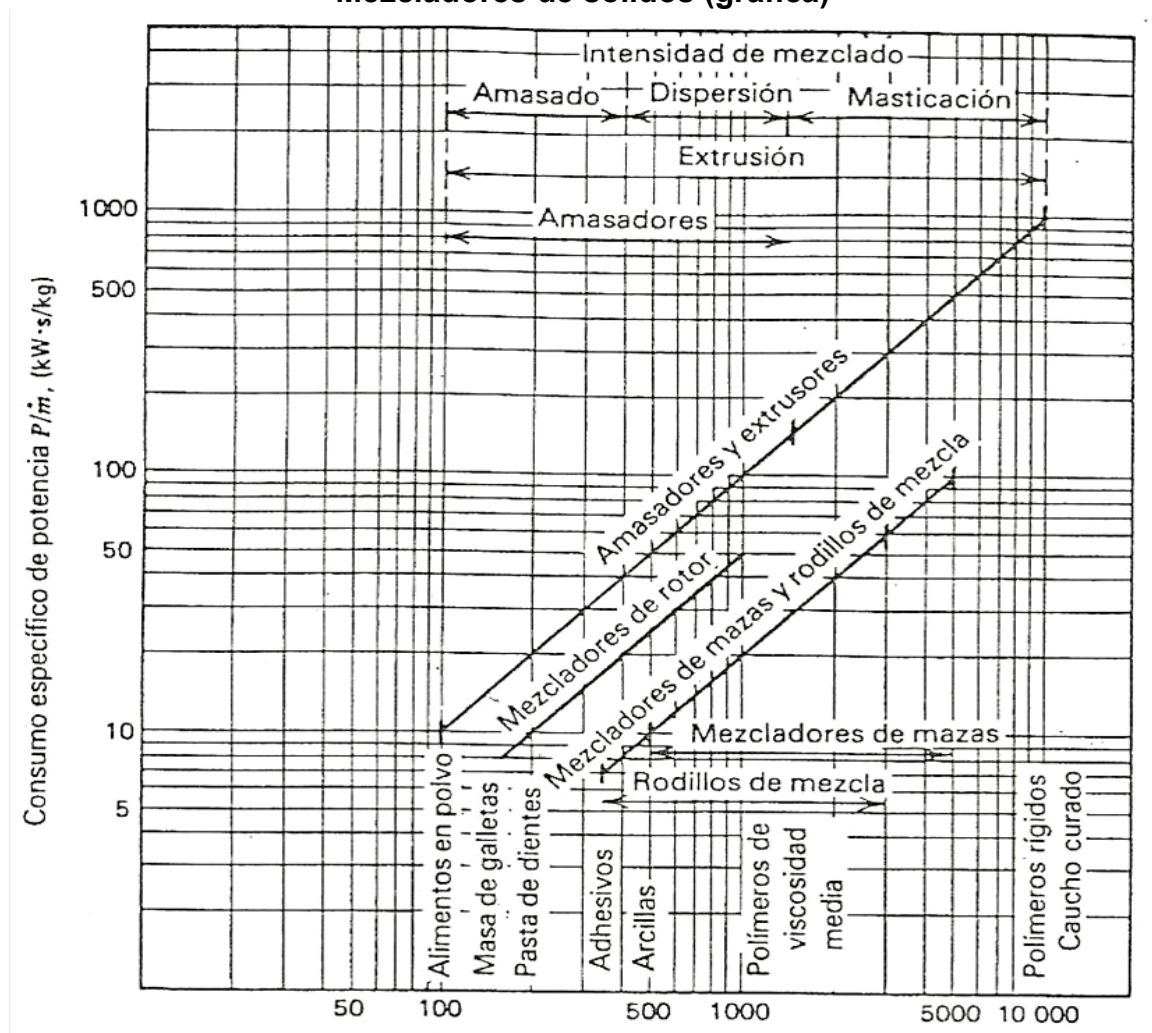
El flujo con la agitación puede ser tan alto como 0.1 m<sup>3</sup>/s. m<sup>2</sup>. El diámetro de las burbujas permanece relativamente constante. (Con una intensidad de agitación que se incrementa) aproximadamente de 1 a 5 mm.

Si se crea un vórtice debido a la agitación intensa de un impulsor axial, el gas que está por encima de la superficie líquida circulará a través de la espuma continuamente como en un recipiente con buena agitación. Esto evita la necesidad de un rociador. El tiempo de residencia promedio puede calcularse teniendo 30 a 40% del recipiente total caracterizado como volumen de residencia del gas.

Las unidades diseñadas especialmente tienen consumos de energía de 0.02 a 0.06 Kw./ m<sup>3</sup> y pueden proporcionar  $3 \times 10^{-4}$  a  $9 \times 10^{-4}$  Kg. de oxígeno por kilowatt-segundo (Kw. s).

La agitación mecánica es económica en los reactores con rociador cuando la rapidez de reacción, sin agitación, es cinco o más veces mayor que el coeficiente de transferencia de masa. Una de las aplicaciones significativas de los tanques con rociador de fluido y con agitación mecánica se encuentra en la separación de minerales por medio de flotación de aire. El consumo de energía en estas operaciones se encuentra dentro del intervalo de 0.002 a 0.003 Kw. por kilogramo de alimentación sólida. Los tanques con rociador con ayuda mecánica se emplean para numerosas operaciones de aireación, hidrogenación y fermentación

### Mezcladores de sólidos (gráfica)<sup>t</sup>



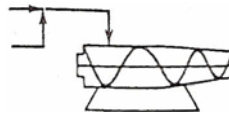
*Intervalos normales de consumo de potencia para mezcladores que procesen pastas de gran viscosidad, pastas y polímeros.*

En un orden de menor a mayor dificultad, como el amasado, la dispersión y la trituración. En la figura se indican los intervalos de viscosidad aproximada para estas subdivisiones. Conforme se incrementa la demanda, las máquinas en sí se vuelven más grandes pesadas. De hecho, el calor generado en estos servicios puede requerir enfriamiento para evitar los años al material del proceso o las máquinas; se

<sup>t</sup> Fuente: G. D. Ulrich.,(1992), "procesos de Ingeniería química", Mc Graw Hill, Primera edición, México, pag.200

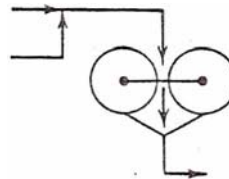
puede aplicar fácilmente un balance de energía como verificación. Con los polvos secos, el consumo de energía es considerablemente menor y el costo de los equipos se reduce según esto.

Los *extrusores* empleados comúnmente para la fabricación de plásticos también pueden servir como mezcladores. Un tornillo de paso y diámetro variables que gira dentro de un barril recto o multicónico forma la cámara de mezcla.

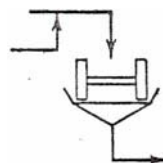


La forma de extrusión es ideal para las pastas o semisólidos no abrasivos que están razonablemente bien dispersos pero que requieren gran acción de corte bajo presión para dar una mejoría de consistencia.

Los *rodillos de mezcla* son similares a los molinos de rodillos, esto es, son tambores múltiples rotatorios que aplastan al medio de proceso conforme pasa a través de la se acción entre ellos.



Estos rodillos a menudo giran a velocidades diferentes para crear tanto el corte como la compresión. Generalmente no son tan versátiles para las operaciones compuestas como los "amasadores" o los extrusores; se emplean comúnmente para dispersar aditivos y pigmentos en suspensiones de polímeros pesados.



Los *mazos trituradores*, casi idénticos a las quebradoras de charolas, trituran por medio de una acción embarradora parecida a la de los morteros. Las ruedas ruedan sobre la pasta, golpeándola y tallándola contra la superficie de las charolas. Una de las unidades diseñada para operación continua esta compuesta de dos, charolas y ensambles de mazos trituradores diseñados para proporcionar tiempos de residencia razonables y flujo uniforme.

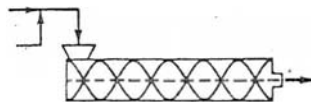
El *mezclador de rotor* representa otra de las muchas variaciones del transportador de tornillo sinfín. Los mezcladores de rotar en sí pueden encontrarse con numerosos tipos de rotor, con uno o dos de éstos dentro de una simple cubierta. Estos rotores pueden ser hélices, como en los transportadores de tornillo sinfín.

En los mal llamados molinos amasadores (realmente no es un molino sino un mezclador), los rotores tienen aspas como hélices que cortan y mezclan al mismo tiempo que transportan.

Los mezcladores de rotor son eficaces con las pastas no pegajosas de viscosidad intermedia y con los sólidos suaves aterronados o aglomerados. También pueden usarse eficazmente para la mezcla de polvos.

El consumo de potencia con las pastas cae ligeramente por debajo del nivel mostrado para los amasadores y la intensidad de la mezcla también es un poco menor.

Otra variación de la transportación por tornillo sinfín se encuentra en la mezcladora de aspas, donde las aspas concéntricas de doble hélice que giran en sentido contrario elevan, dispersan y mezclan polvos secos. Los mezcladores de aspas no son adecuados para pastas pegajosas o para líquidos.



## EQUIPOS

En las ilustraciones siguientes se presentan equipos de impulsores con o sin mamparas

- a) Impulsor marino Turbinas
- b) De hojas planas
- c) En tanques llenos sin una interfase gas-líquido(flujo continuo)

|                                                                              | Fluido agitado   |                             |                          |                 |                                       |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------------------|
|                                                                              | Chorro de fluido | Placa de orificio (tubería) | Mezclador sin movimiento | Rociador de gas | Mezclador de bomba o de línea agitada |
| Intervalo de tamaños del equipo                                              |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Diámetro del recipiente, Dt (m)                                              | 30 Da            | 0.005-0.5                   | 0.003-2.0                | 0.01-5          | 0.01-0.5                              |
| Longitud o altura del recipiente, L (m)                                      | 100 Da           | 50 Dt                       | 0.03-80                  | 0.03-5          | 0.3-2                                 |
| Diámetro del agitador, Da (m)                                                | 0.001 -0.1       | 0.2Dt-0.5Dt                 |                          |                 | 0.05-0.5                              |
| Volumen del recipiente, V (m <sup>3</sup> )                                  |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Flujo del fluido mezclado m (kg/s)                                           |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Gases                                                                        | 0.001-100        | 0.03-300                    | 0.001-100                | _a              |                                       |
| Líquidos                                                                     | 0.1 -10000       | 0.16-16                     | 0.01-1000                |                 | 0.1-400                               |
| Tiempo típico de residencia $\theta$ (s)                                     |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Mezcla                                                                       | 0.1-200          | 0.16-16                     | 0.02-5.0                 | _a              | 0.15-l <sup>b</sup>                   |
| Extracción líquido-líquido                                                   |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Suspensión de sólidos                                                        |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Reacción Química                                                             |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Intervalo de viscosidad (Pa - s)                                             | 0.0-0.01         | 0-0.1                       | 0-1000                   | 0-1.0           | (-)-1.0                               |
| Fracción de volumen del medio disperso $\phi$                                | <0.4             | <0.4                        |                          | <0.1            | <0.8                                  |
| Adecuabilidad                                                                |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Mezcla gas -gas                                                              | A                | A                           | A                        | X               | D                                     |
| Mezcla gas-líquido                                                           | E                | D                           | B                        | A               | B                                     |
| Mezcla líquido-líquido (miscible)                                            | A                | A                           | A                        | B               | A                                     |
| Dispersión líquido-líquido (inmiscible)                                      | B                | B                           | D                        | D               | B                                     |
| Suspensión líquido-sólido                                                    | B                | B                           | B                        | D               | E                                     |
| Mezcla pasta-pasta                                                           | X                | X                           | A                        | X               | X                                     |
| Mezcla sólido-sólido                                                         | X                | X                           | D                        | _d              | X                                     |
| Mejoramiento de la transferencia de calor                                    | A                | 8                           | D                        | B               | D                                     |
| Reacción química                                                             | A                | B                           | D                        | A               | B                                     |
| Mezcla líquido-sólido                                                        | D                | D                           | D                        | B               | D                                     |
| Mezcla de materiales pegajosos                                               | E                | E                           | A                        | X               | D                                     |
| Diferencial de presión, $\Delta p$ (bar)                                     |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Gases                                                                        | 0.3-1.0          | 0.0002-0.001                | $6 \times 10^{-6}$       | _e              |                                       |
| Líquidos                                                                     | 1-3              | 0.05-0.3                    | 0.006-0.6                | _e              |                                       |
| Consumo de potencia, P (kW) f                                                |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Gas-gas                                                                      | 1.5m-5th         | 0.03m-0.15m                 | 0.001m                   |                 | 0.15m-1.5m                            |
| Gas-líquido                                                                  |                  | 0.007 m-0.04m               | 0.001 m                  | _e              | 0.04m                                 |
| Líquido-líquido                                                              |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Suave                                                                        | 0.007m           | 0.007 m                     | 0.001 m                  | _e              | 0.007 m                               |
| Vigorosa                                                                     | 0.01 m           | 0.02 m                      |                          |                 | 0.02 m                                |
| Intensa                                                                      | 0.02 m'          | 0.04 m                      |                          |                 | 0.04m                                 |
| Líquido-sólido                                                               | 0.007 m - 0.02 m | 0.007 m-0.04                | 0.001m 0.1 m             | _e              | 0.007 m 0.04m                         |
| Pasta-pasta                                                                  |                  |                             | 0.1 m                    |                 |                                       |
| Sólido-sólido                                                                |                  |                             |                          |                 |                                       |
| Coefficientes globales de transferencia de calor U (J/s. m <sup>2</sup> . K) |                  |                             |                          |                 |                                       |

## Criterios y datos para el diseño preliminar de los agitadores y mezcladores<sup>u</sup>

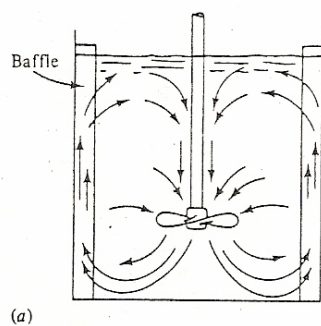
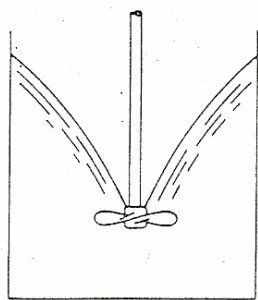
<sup>u</sup> Tabla :G. D. Ulrich,(1992), "Procesos de ingeniería química", Mc Graw Hill, Primera edición, México, Pag.188

Clave de la tabla 1: **A** Excelente o sin limitaciones. **B** Limitaciones modestas. **C** Unidades especiales disponibles a un costo mayor para reducir problemas al mínimo. **D** Limitado en este aspecto. **E**. Demasiado limitado en este aspecto. **X** Inaceptable.

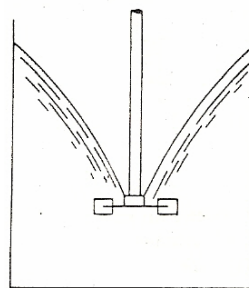
### TIPOS DE MEZCLADOR<sup>v</sup>

| Agitado mecánicamente                         |                                                                                                                                                  |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------|
| Propela                                       | Turbina                                                                                                                                          |                  | Amasador                                                     | Extrusor         | Rodillo          | Maza Trituradora | Rotor sencillo y doble | Molinos de agitación y jaula de martillo | Banda            | Molinos de Choro de esferas Vibratorios Y de tambor |
|                                               | Axial                                                                                                                                            | Radial           |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| <50<br><20<br><1.5<br><40.000                 | <20<br><40<br><5<br><1200                                                                                                                        |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
|                                               |                                                                                                                                                  |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| 12000 (μVIP) <sup>-1/2</sup> V <sup>0.2</sup> |                                                                                                                                                  |                  | 20-200                                                       | 20-200           | 2-10             | 100-200          | 20-200                 | _c                                       | 20-200           | _c                                                  |
| 60-20 000<br>60                               | 60-1000<br>60                                                                                                                                    |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| Del análisis cinético                         |                                                                                                                                                  |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| 0-5<br><0.8                                   | 0-500<br><0.8                                                                                                                                    |                  | 200-2000                                                     | 200-10,000       | 500-2000         | 500-5000         | 100-1000               | _c                                       |                  |                                                     |
| E<br>D<br>B<br>B                              | E<br>D<br>A<br>A                                                                                                                                 | E<br>A<br>B<br>B | X<br>X<br>X<br>X                                             | X<br>X<br>X<br>X | X<br>X<br>X<br>X | X<br>X<br>X<br>X | X<br>X<br>X<br>X       | X<br>X<br>X<br>X                         | X<br>X<br>X<br>X | X<br>X<br>X<br>X                                    |
| B<br>X<br>X<br>B                              | A<br>C<br>X<br>A                                                                                                                                 | B<br>X<br>X<br>B | X<br>A<br>X<br>B                                             | X<br>A<br>X<br>A | X<br>D<br>X<br>D | X<br>A<br>D<br>D | X<br>B<br>B<br>A       | X<br>D<br>B<br>E                         | X<br>E<br>A<br>C | X<br>E<br>A<br>B                                    |
| B<br>B<br>E                                   | A<br>A<br>D                                                                                                                                      | B<br>B<br>B      | B<br>A<br>B                                                  | B<br>D<br>A      | E<br>B<br>E      | E<br>B<br>E      | A<br>A<br>D            | E<br>B<br>B                              | D<br>D<br>E      | B<br>D<br>E                                         |
|                                               |                                                                                                                                                  |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| 1.0 V - 3.0 V                                 |                                                                                                                                                  | 1.0 V – 2.0 V    |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| 0.17V-0.3V<br>0.7V-1.0V<br>1.0V-3.0V          | 0.1V <sup>0.8</sup> _<br>0.2V <sup>0.8</sup> _<br>0.4V <sup>0.8</sup> _<br>0.8V <sup>0.8</sup> _<br>0.8V <sup>0.8</sup> _<br>2.0V <sup>0.8</sup> |                  |                                                              |                  |                  |                  |                        |                                          |                  |                                                     |
| 1.0V-3.0V                                     | 0.8V <sup>0.8</sup> _<br>2.0V <sup>0.8</sup>                                                                                                     |                  | <div>← Véase en la figura 1 →</div> <div>1m-5m        </div> |                  |                  |                  |                        | _c<br>_c                                 | 1m-6m            | _c                                                  |
|                                               |                                                                                                                                                  |                  | 50-500                                                       | 50-500           |                  |                  | 20-300 <sup>g</sup>    |                                          |                  |                                                     |

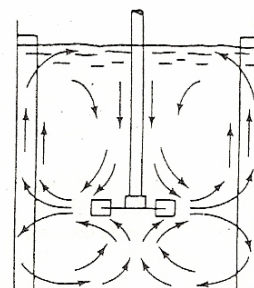
<sup>v</sup> Tabla :G. D. Ulrich,(1992),”Procesos de ingeniería química”, Mc Graw Hill, Primera edición, México, Pag.189



(a)

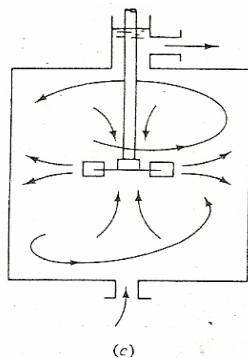


(b)



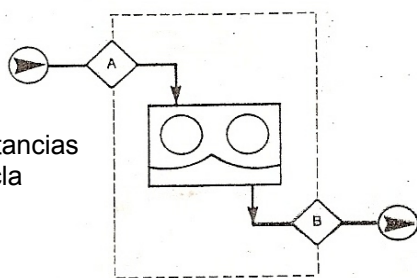
a) Impulsor marino

b) Turbinas de hojas planas



(c)

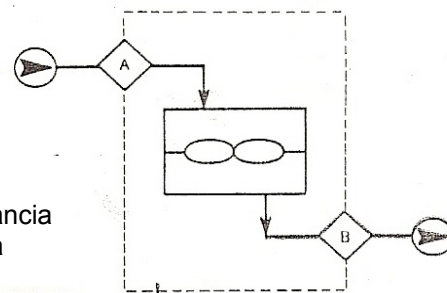
d) En tanques llenos sin una interfase gas/líquido (flujo continuo).



A – sustancias  
B – mezcla

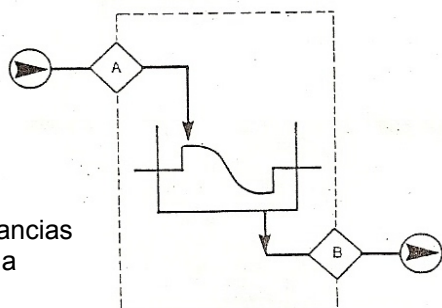
Mezclador de rodillos

### Mezcladores:



A – sustancia  
B - mezcla

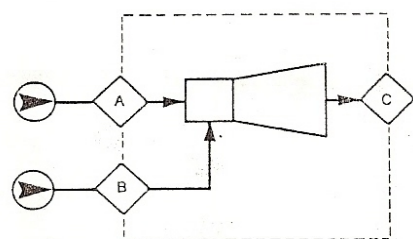
Mezclador de banda



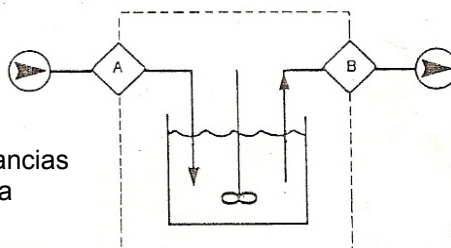
A – sustancias  
B – mezcla

Mezclador de hojas sigma

A - gas  
B - gas  
C - mezcla



Mezclado de venturi

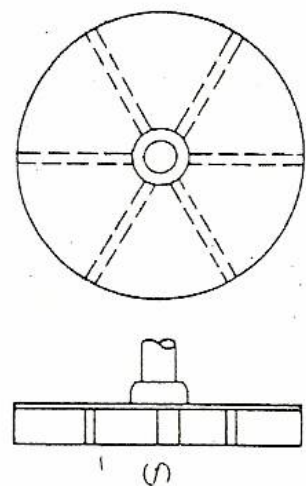
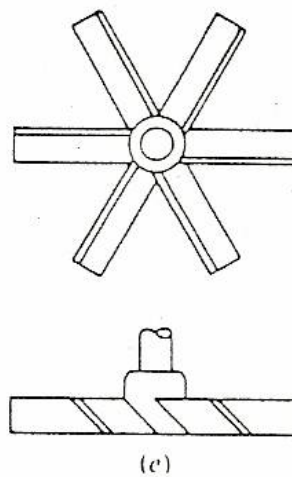
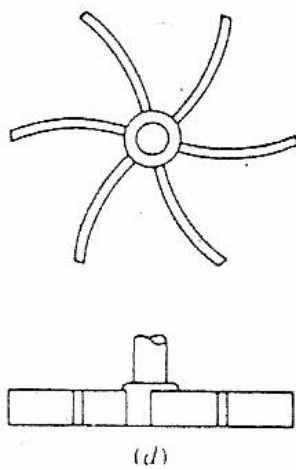
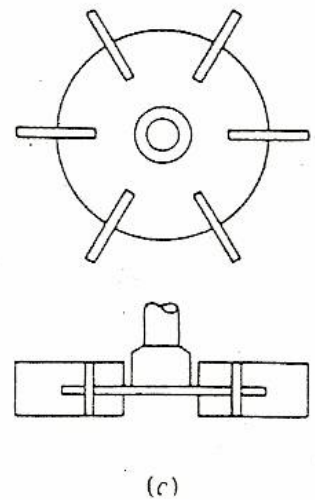
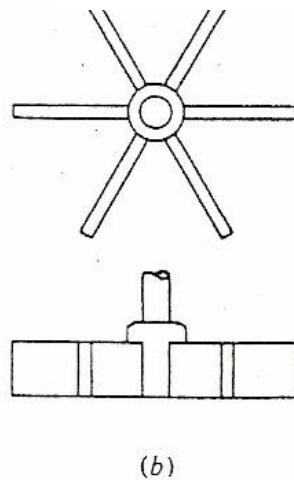
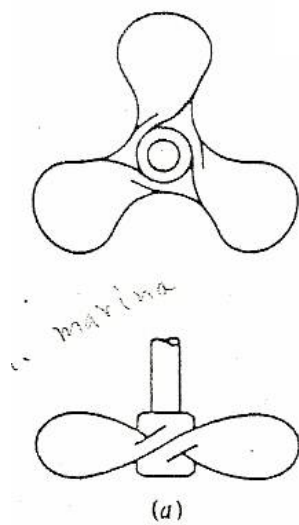


A – sustancias  
B – mezcla

Mezclador por agitación

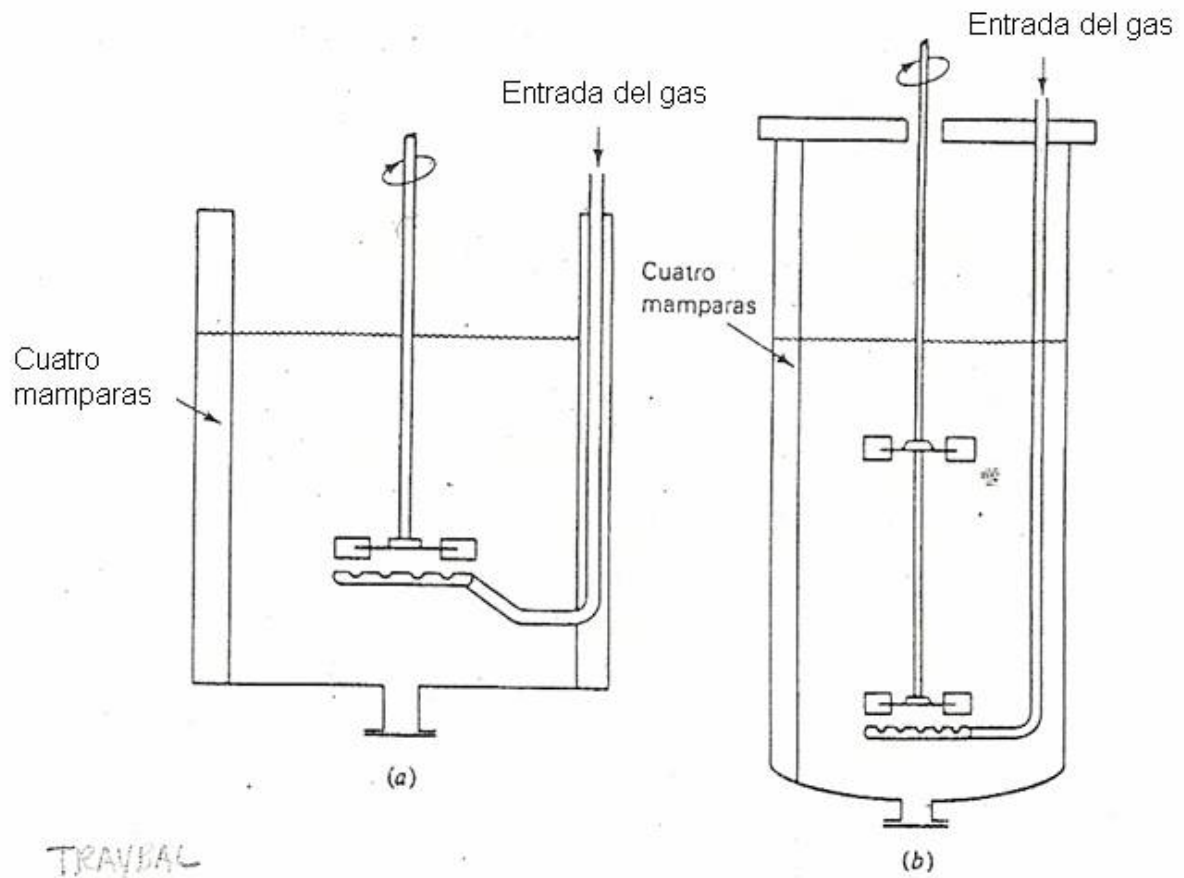
### Impulsores con proporciones típicas<sup>w</sup>

- Propulsores de hélice marina (a)
- Turbinas (b a la f)



<sup>w</sup> Fuente, Warren I Mc Cabe Julian C Smith, (1979), "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc Graw Hill, Third Edition, Pag. 224 Y 225

### Tanques agitados mecánicamente para el contacto gas/líquido<sup>x</sup>.

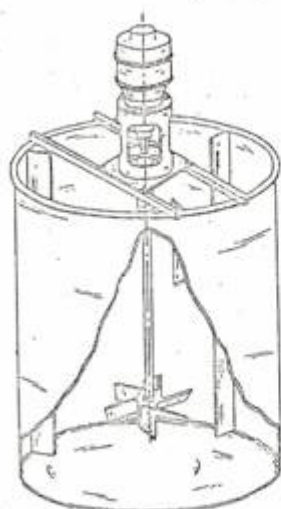


a) Estándar.

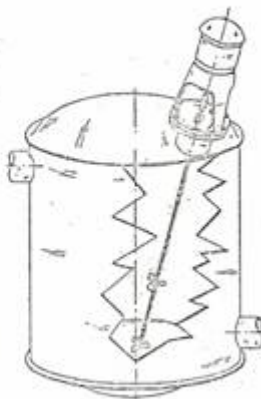
b) Impulsores múltiples para tanques profundos

<sup>x</sup> Fuente, Warren I Mc Cabe Julian C Smith, (1979), "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc Graw Hill, Third Edition, Pag. 226 Y 229

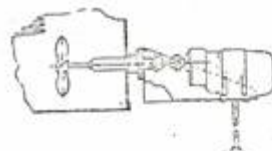
## AGITACIÓN<sup>y</sup>



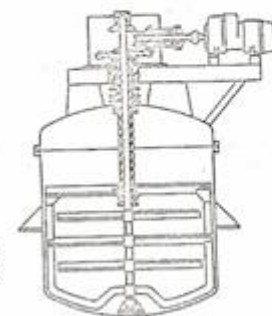
Rodete de seis palas, productor de flujo axial, con cortacorrientes.



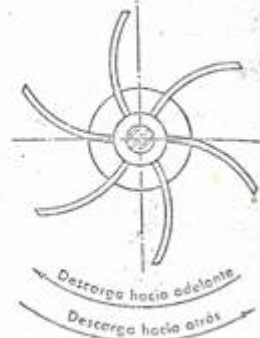
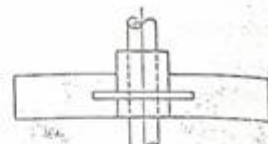
Montaje excéntrico de un agitador de dos rodets de hélice.



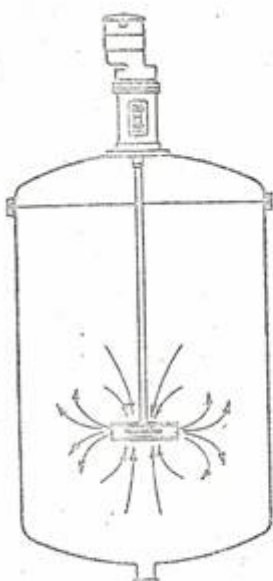
Montaje lateral de un agitador de hélice.



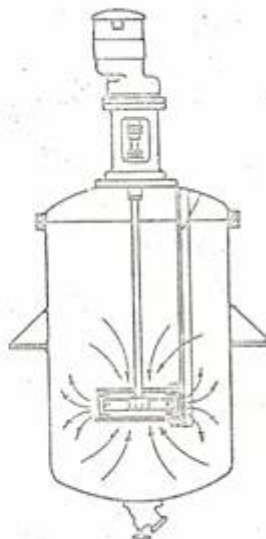
Combinación de paletas y ancla en un mismo sistema.



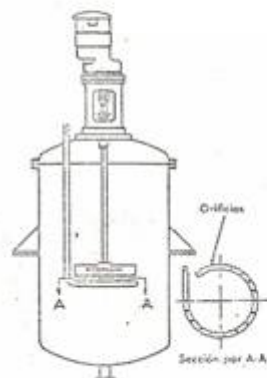
Rodete turbo para flujo radial.



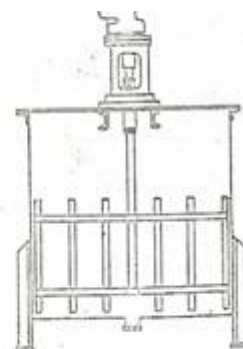
Turbina cubierta



Turbina cubierta, con un anillo cortacorriente fijo.



Turbina de flujo radial, con tubo para la introducción de un gas.



Mezclador de bastidor

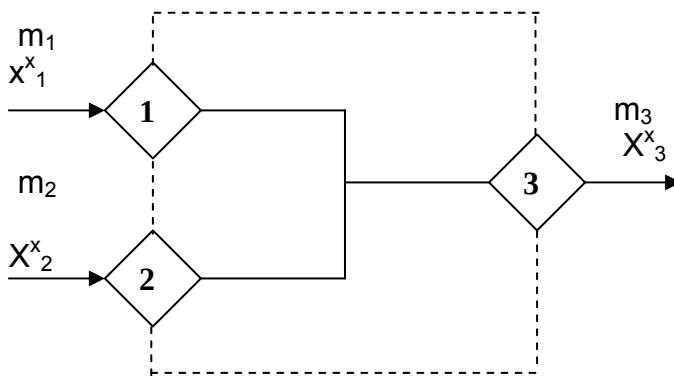
<sup>y</sup> fuente E. G. Brown.,(1965),“Ingeniería química”,Editorial marín.,primera edición, México, pág.530

## BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA:

### BALANCE DE MATERIA:

**A**= componente 1, **B**= componente 2, **C**= producto, **m**= masa, **X**= componentes que puede ser precio, concentración, # de gérmenes, % humedad, %grasa, etc. **Q<sub>A</sub>**= cantidad de calor en el componente A, **Q<sub>B</sub>**= cantidad de calor en el componente B, **Q<sub>C</sub>**= cantidad de calor en el producto, **Cp<sub>A</sub>**= capacidad calorífica a presión constante del componente A.

Rapidez de entrada de componentes = rapidez de salida de la mezcla.



Balance total

$$m_1 + m_2 = m_3$$

balance total

1 ley de conservación de la materia.

Para la sustancia <sup>x</sup>

$$m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = m_3 \cdot x_3 \dots\dots\dots 2$$

$x_1 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Composición} \\ \text{Precio \$} \\ \text{Concentración.} \end{array} \right.$

$x_1 = \left\{ \begin{array}{l} \text{\# Gérmenes} \\ \text{\%Humedad} \\ \text{\%Grasa} \end{array} \right.$

El régimen transitorio es:

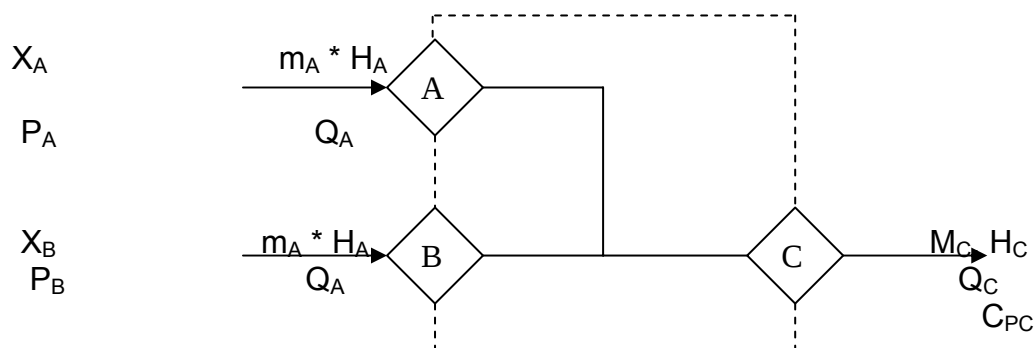
Rapidez de entrada de componentes – rapidez de salida de la mezcla - rapidez neta de la acumulación de mezcla = 0

La acumulación podrá ser positiva o cero según se haga el incremento o decremento de la cantidad de mezcla acumulada.

### BALANCE DE ENERGÍA:

Cuando se mezclan dos o mas corrientes de proceso en una planta industrial y aquellas están a temperaturas diferentes, la corriente resultante tendrá una temperatura distinta a cualquiera de las corrientes originales.

Aplicando el balance general de la energía al sistema indicado a continuación, en el que no hay acumulación ni adición de calor ni de trabajo y las perdidas por fricción despreciables, tendremos:



Se puede hacer por entalpía o por Cp.

$$\begin{aligned} Q_A + Q_B &= Q_C \\ m_A \cdot H_A + m_B \cdot H_B &= m_C \cdot H_C \quad (M_A \cdot C_{pA} \cdot \Delta t_A) + (M_B \cdot C_{pB} \cdot \Delta t_B) = (M_C \cdot C_{pC} \cdot \Delta t_C) \end{aligned}$$

$$H_A = \int_{T_0}^{T_A} C_{pA} \cdot dT$$

$T_0$  = temperatura base para computar las entalpías

$$Cp_C = Cp_A \cdot X_A + Cp_B \cdot X_B$$

$Cp_A$  = Capacidad calorífica a presión constante del fluido A

$X_B$  = fracción masa del compuesto B

Si en el proceso hay acumulaciones

$$m_C \cdot H_C - m_A \cdot H_A - m_B \cdot H_B + \frac{d(H)}{dt} = 0$$

Mezcla de líquidos reales: en muchos casos, al mezclarse dos líquidos o dos soluciones se desprende o se absorbe calor, cuando esto sucede se dice que hay un calor de disolución.

El cambio de entalpía que se produce al mezclar dos líquidos a la misma temperatura se denomina calor de disolución

El calor integral estándar de disolución se define como el cambio en la entalpía de un sistema cuando un mol de soluto se disuelve en n moles de disolvente manteniendo la temperatura de 25<sup>0</sup>c y 1 atm. De presión.

Los calores integrales de disolución se presentan en graficas generalmente:

La entalpía de una solución a la temperatura T será:

$X_1$  = entalpía del disolvente a T y P

$X_2$  = entalpía del soluto T y P

$\Delta X_5$  = entalpía de la disolución por mol de soluto.

CAPACIDAD CALORÍFICA DE DISOLUCIONES

a P = C te.

En ciertas disoluciones en las que un sólido inorgánico está disuelto en agua, los calores específicos de la mezcla se pueden obtener a partir de gráficas.

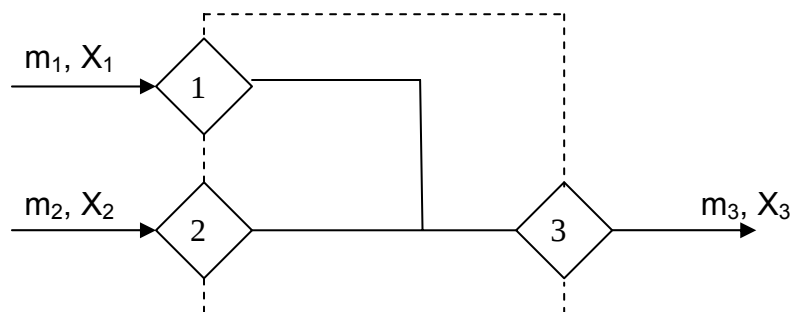
### Métodos y técnicas para resolver problemas de mezclado

- Ley de la palanca
- Diagrama triangular

#### LEY DE LA PALANCA<sup>z</sup>:

Los problemas de mezclado se pueden resolver también por medios gráficos. Estos se basan en la utilización de la regla de la palanca.

Si una corriente de concentración  $X_2$  se mezclan. La composición final de la mezcla resultante caerá sobre la línea recta que conecta las composiciones  $X_1$  y  $X_2$  de tal manera que la relación  $m_1/m_2$  será igual a la distancia desde  $X_2$  a  $X_3$  dividida por la distancia desde  $X_1$  a  $X_3$  o sea:



#### Balance total.

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$m_1 \cdot X_1 + m_2 \cdot X_2 = (m_1 + m_2) X_3 = m_1 \cdot X_3 + m_2 \cdot X_3$$

$$m_1 / m_2 = (X_3 - X_2) / (X_1 - X_3) = (X_3 \cdot X_2) / (X_1 \cdot X_3)$$

$$m_1 X_1 - m_1 X_3 = m_2 X_3 - m_2 X_2 \quad ; \quad m_1 (X_1 - X_3) = m_2 (X_3 - X_2)$$

<sup>z</sup> Fuente, Antonio Valiente y Rudi Primo Stivalet, (1982), "problemas de balance de materia", Editorial Alambra Mexicana, Primera Edición, México, Pag. 90

Aplicando la formula simple se obtiene.

### BALANCE PARCIAL DEL COMPONENTE X DE LA MEZCLA

$$M_A Z_A^I + M_B Z_B^I = M_C Z_C^I$$

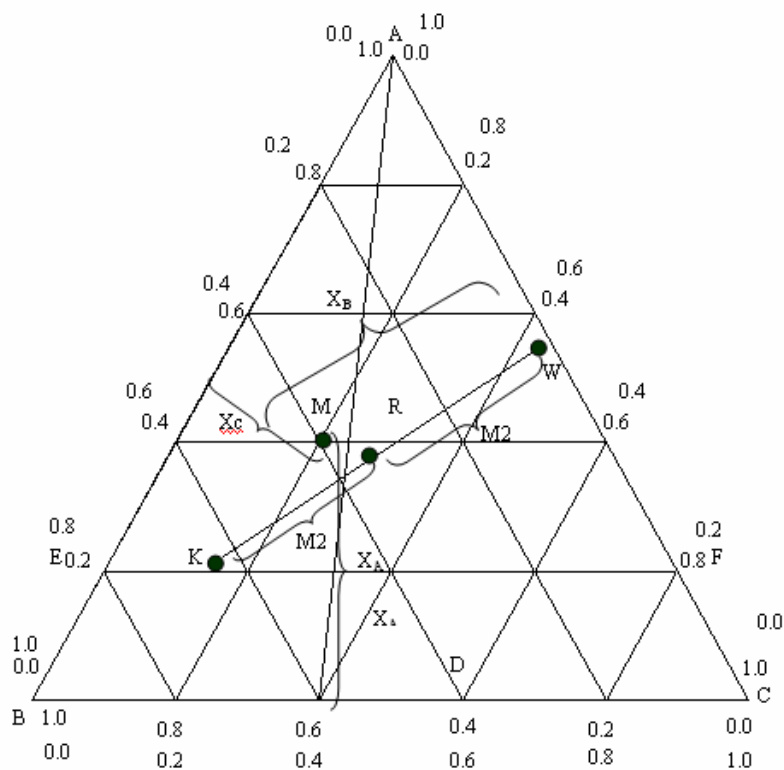
Siendo  $X_A^I$  = relación masa de la sustancia (x) de la corriente A

### DIAGRAMA TRIANGULAR:<sup>aa</sup>

Las coordenadas triangulares son convenientes para representar la composición de un sistema de tres componentes. En el diagrama triangular los vértices representan componentes puros, y los lados mezclas de dos componentes.

El punto A representa el 100% del componente A, el punto D, de acuerdo con la regla de la palanca, representa una mezcla binaria de 40% de B y 60% de C.

Si la altura del triángulo se toma como la unidad, la suma de dos distancias perpendiculares desde un punto situado en el interior del triángulo a los lados da igualmente la unidad y esas distancias pueden usarse para representar las concentraciones individuales de los tres componentes.



<sup>aa</sup> Diagrama tomado al azar de un problema resuelto, como referencia.

En el diagrama de la distancia  $X_B$  representa la concentración de la sustancia B en punto M.

Todos los puntos de la línea que unen un vértice con un punto del lado opuesto representan mezclas de una misma relación entre las concentraciones de los componentes situados en los otros dos vértices.

En el segmento A G,  $X_B / X_C = \text{constante}$ .

La mezcla cuya composición corresponde a puntos sobre una recta paralela a un lado tiene una concentración constante del componente situado en el vértice opuesto.

En el segmento E F  $X_A = \text{constante}$

Si a  $m_1$  Kg. De una mezcla situada en el punto K, se le añade  $m_2$  Kg. De una mezcla situada en el punto N, la nueva mezcla contendrá una composición dada por R.

$$m_1 / m = \tilde{RN} / \tilde{RK} \pm (X_N^i - X_R^i) / (X_R^i - X_K^i)$$

### APLICACIONES:

La operación de mezclado es frecuente en los procesos de ingeniería química, ya que por regla general en estos se trata más con mezclas de materiales que con sustancias puras.

El mezclado se usa para preparar una combinación uniforme de dos o más sustancias o materiales; las sustancias que se mezclan pueden ser: sólidos líquidos y gases.

La operación de mezclado se utiliza para preparar soluciones, pinturas, alimentos, cerámicas o como medio para aumentar la superficie de contacto entre las fases en otras operaciones como absorción, extracción secado, etc.

La mayoría de los procesos de transferencia de masa requieren del mezclado de corrientes fluidas ya sea líquidas vapores o gases.

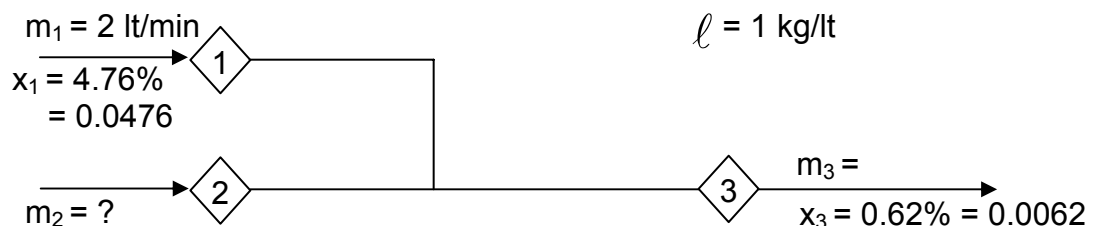
En muchos procesos químicos se deben mezclar dos o más corrientes para dar un producto que puede ser el final o el punto de partida para una reacción química o una separación.

La mezcla de líquidos con sólidos puede efectuarse de la misma forma que la de líquidos con líquidos cuando la relación líquido a sólido es grande, si esta relación es pequeña, el proceso es similar a la mezcla de sólidos con sólidos.(amasar)

### PROBLEMAS:

**Problema # 1.- A una corriente se le añade una sustancia de manera que la concentración sea de 4.76% en masa de esa sustancia. La corriente se une a otra y corriente abajo se toma una muestra de las corrientes mezcladas que dan a una concentración de 0.62% en peso de la sustancia. Si el flujo de la primera corriente es de 2 lt/min., ¿Cuál será el caudal de la otra corriente?**

1.- DIAGRAMA:



2.- BALANCES:

$$\begin{aligned} \text{- Total de sólidos} \quad m_1 + m_2 &= m_3 \\ m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 &= m_3 \cdot x_3 \end{aligned}$$

3.- CÁLCULOS:

$$2 \text{ kg/min} \cdot (0.0476 \frac{\text{kg.subs.}}{\text{kg.total}}) + x_2 \cdot m_2 = (0.0062 \frac{\text{kg.subs.}}{\text{kg.total}}) \cdot m_3$$

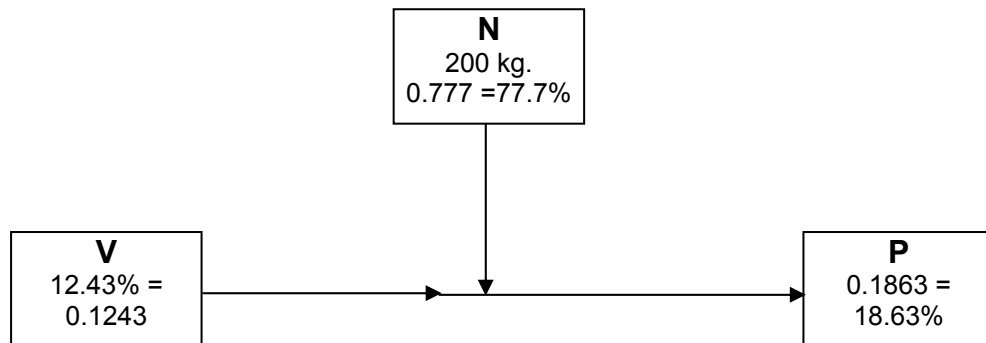
$$x_2 = 0\% \quad 0.0952 \frac{\text{kg.subs.}}{\text{kg.total}} = m_3 \cdot 0.0062 \frac{\text{kg.subs.}}{\text{kg.total}}$$

$$m_3 = 15.35 \text{ kg/min} \quad \therefore m_2 = 15.35 - 2 = 13.35 \text{ kg/min}$$

Problema # 2.- En las estaciones de servicio se añade ácido sulfúrico diluido a las baterías que se han secado, para activarlas; se requiere preparar una solución de ácido como sigue: un tanque con ácido sulfúrico al 12.43% (el resto es agua pura). Si al tanque se añaden 200 kg. de ácido sulfúrico al 77.7% y la solución final tiene 18.63% de ácido.

¿Cuántos kg. de ácido de batería se habrán preparado?

Base: 200 kg. de solución  $H_2SO_4$  al 77.7%



Balance total:  $200 + V = P \dots\dots\dots 1$   
 $V = (P - 200) \dots\dots\dots 1'$

Base componentes:

$H_2SO_4 \quad V (0.1243) + 200(0.777) = P (0.1863) \dots\dots\dots 2$   
 o  $H_2O \quad V (0.8757) + 200(0.223) = P (0.8137) \dots\dots\dots 3$

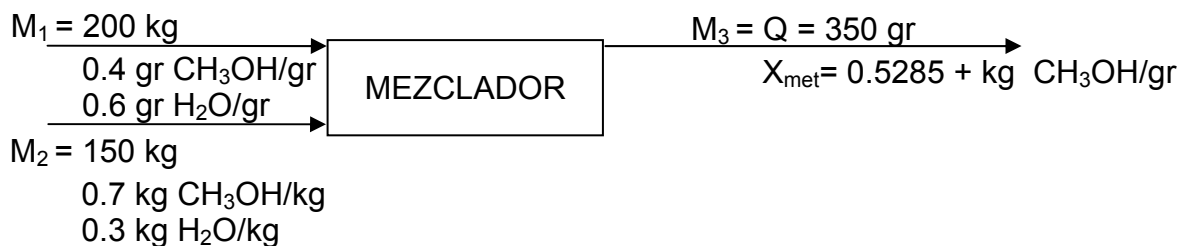
Sustituyendo 1' en 2 o 3

$$(P - 200) (0.1243) + 200(0.777) = P(0.1863)$$

$$P = \frac{130.54}{0.062} = 2,105 \text{ kg.}$$

$$V = 1,905 \text{ Kg.}$$

Problema # 3.- Se tienen dos mezclas de metanol-agua en recipientes separados. La primera mezcla contiene 40% en peso metanol, mientras que la segunda contiene 70% en peso. Si se combinan 200 kg de la primera mezcla con 150 kg de la segunda, ¿Cuál será la masa y la concentración de la mezcla?



Balance total:  $M_1 + M_2 = M_3$   
 $200 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = \underline{350 \text{ kg.}}$

Balance para el metanol:

$$M_1 \cdot X_{1 \text{ met}} + M_2 \cdot X_{2 \text{ met}} = M_3 \cdot X_{3 \text{ met}}$$

$$(200 \times 0.4) + (150 \times 0.7) = 350 (X_{3 \text{ met}})$$

$$80.0 + 105.0 = 350 \cdot X_3 \quad \therefore X_3 = \frac{185}{350} = 0.52857$$

52.857% metanol

Balance para el agua:

$$M_1 \cdot X_{1 \text{ H}_2\text{O}} + M_2 \cdot X_{2 \text{ H}_2\text{O}} = M_3 \cdot X_{3 \text{ H}_2\text{O}}$$

$$(200 \times 0.6) + (150 \times 0.3) = 350 \cdot X_{3 \text{ H}_2\text{O}}$$

$$120.0 + 45.0 = 350 \cdot X_{3 \text{ H}_2\text{O}} \quad \therefore X_{3 \text{ H}_2\text{O}} = \frac{165}{350} = 0.47143$$

47.143% H<sub>2</sub>O

Entran 165 kg de agua y salen 165 kg de agua.

Entran 185 kg de alcohol y salen 185 kg de alcohol.

Problema # 4.- Una solución acuosa de NaOH contiene 20% de NaOH en peso. Se desea producir una solución al 8%, diluyendo la corriente de 20% con una corriente de agua pura.

- Calcular las proporciones (gr H<sub>2</sub>O/gr de solución de alimentación) y (gr de solución producto/gr de solución de alimentación).
- Determinar los flujos de alimentación de la solución al 20% y de agua de dilución necesarios para producir 2310 lb/min de la solución al 8%.

Podríamos tomar como base de cálculo 2310 lb/min de producto terminado, pero para mayor comodidad tomamos como base: 100 gr de solución de alimentación.



Balance para NaOH:

$$(\text{gr NaOH}) \text{ entrada} = (\text{gr NaOH}) \text{ salida}$$

$$0.2 \times 100 = 0.08 \times Q_2 \quad \therefore \quad Q_2 = 250 \text{ gr}$$

Balance total:  $100 \text{ gr} + Q_1 = Q_2 \quad \therefore \quad Q_1 = 250 - 100 = 150 \text{ gr}$

a) Proporciones:  $\frac{Q_1(\text{gr.H}_2\text{O})}{100\text{gr.solución\_a\ limento}} = \frac{150}{100} = 1.5 \text{ gr H}_2\text{O/gr sol. alim.}$

$$\frac{Q_2(\text{gr.producto})}{100\text{gr.sol.a\ lim.}} = \frac{250}{100} = 2.5 \text{ gr H}_2\text{O/gr sol. alim.}$$

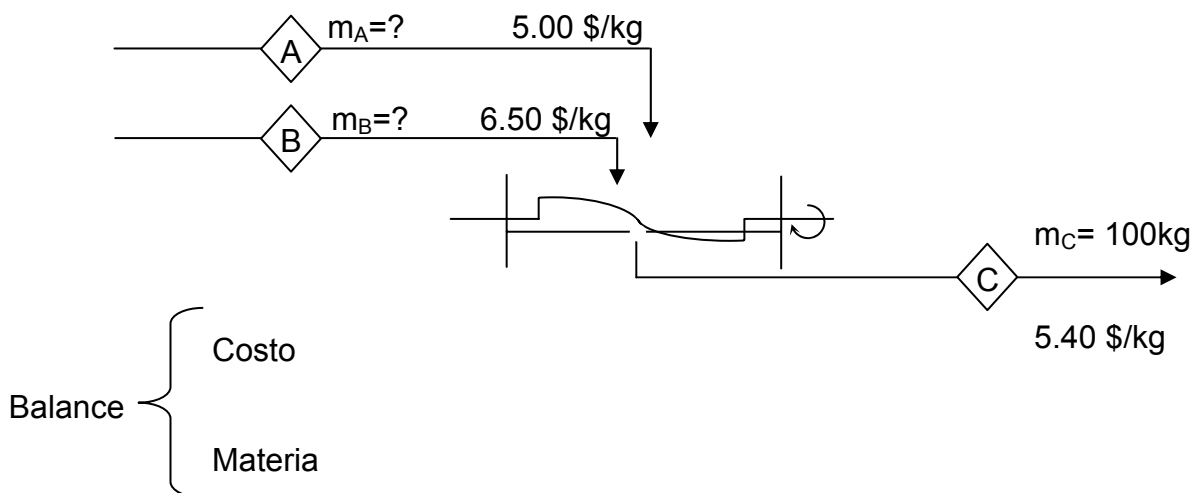
b)  $\frac{2310\text{lb.prod / min}}{250\text{gr.prod.}} = 9.24 \frac{\text{lb / min}}{\text{gr}}$

- Flujo de alimentación de la solución:  $100\text{gr.} \cdot \left| \frac{9.24\text{lb/min}}{\text{gr.}} \right| = 9.24 \frac{\text{lb/min}}{\text{gr}}$
- Flujo agua de dilución:  $150\text{gr.} \cdot \left| \frac{9.24\text{lb/min}}{\text{gr.}} \right| = 1386 \text{ lb.H}_2\text{O/min.}$
- Verificación:  $(924 + 1386) \text{ lb/min} = 2310 \text{ lb/min}$

Problema # 5.- **Se tienen dos tipos de alimento para ave, uno de 5.00 \$/kg y el otro de 6.50 \$/kg.; para hacer una mezcla de 100 kg. y de un precio de 5.40 \$/kg.**

**¿Cuántos kg. de cada alimento se deben mezclar ?**

1.- DIAGRAMA:



2.- FORMULAS O ECUACIONES:

Balance de materia

$$m_A + m_B = m_C$$

3.- CÁLCULOS:

$$m_A + m_B = 100 \text{ kg} \xrightarrow{m_A \cdot \$A + m_B \cdot \$B = m_C \cdot \$C} m_A = 100 - m_B$$

$$m_A \cdot 5.00 + m_B \cdot 6.50 = 100 \times 5.40$$

$$(100 - m_B) \cdot 5.00 + m_B \cdot 6.50 = 540.00$$

$$6.50 \times m_B + 500.00 - 5.00 m_B = 540.00 \quad \therefore \quad 1.50 m_B = 40.00$$

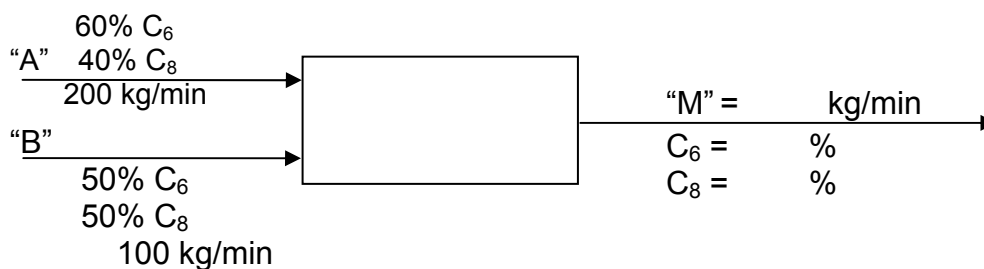
$$m_B = 26.667 \text{ kg}$$

$$m_A = 100 - 26.667 = \underline{73.333 \text{ kg}}$$

Problema # 6.- En el diagrama indicado se ve que la nafta pesada proveniente del crudo fraccionado después de la desulfuración (llamémosla A) se combina con nafta pesada proveniente del fraccionador catalítico del hidrocraqueo (llamémosla B) y después de mezclarlas, este combinado alimenta al reformador catalítico. Supóngase que “A” contiene 60% de C<sub>6</sub> y 40% de C<sub>8</sub>, mientras que “B” contiene 50% de C<sub>6</sub> y 50% de C<sub>8</sub>.

Si se mezclan 200 kg de “A” con 100 kg de B por minuto,

- ¿Cuántos kg se producen por minuto de mezcla?
- ¿Cuál es la composición de la mezcla?



Balance de materia:

$$\text{"A"} + \text{"B"} = \text{"M"}$$

$$200 \text{ kg/min} + 100 \text{ kg/min} = 300 \text{ kg} = \text{"M"}$$

$$\text{Base C}_6 (200 \times 0.60) + (100 \times 0.50) = 170 \text{ kg/min} \times \text{C}_6$$

$$\text{Base C}_8 (200 \times 0.40) + (100 \times 0.50) = 170 \text{ kg/min} \times \text{C}_8$$

$$\underline{300 \text{ kg. / min. MEZCLA}}$$

$$\text{XC}_6 = (170/300) 100 = \underline{56.7\%} \quad \text{Composición}$$

$$\text{XC}_8 = (130/300) 100 = \underline{43.3\%}$$

Problema # 7.- Si se tienen las mismas composiciones de "A" y "B" (del problema anterior).

a) ¿Qué cantidades deben mezclarse de "A" y "B" si se quiere obtener una mezcla con 53% de  $C_6$  y 47% de  $C_8$ ?

b) ¿Qué proporción de nafta "A" y "B" pesadas deben de ser mezcladas?

Base de cálculos: 100 kg. de mezcla.

Balance de materia:

$$\text{"A"} + \text{"B"} = \text{"M"} \quad \underline{1}$$

$$C_6 \quad 0.60\text{"A"} + 0.50\text{"B"} = 0.53 (100) = 53 \quad \underline{2}$$

$$C_8 \quad 0.40\text{"A"} + 0.50\text{"B"} = 0.47 (100) = 47 \quad \underline{3}$$

$$\text{De } \underline{2} \quad 0.50\text{"B"} = 53 - 0.60\text{"A"}$$

$$\text{"B"} = 53/0.50 - 0.60/0.50\text{"A"}$$

Sustituyendo en 3

$$0.40\text{"A"} + 0.50 (100 - 1.2\text{"A"}) = 47$$

$$0.40\text{"A"} + 53 - 0.60\text{"A"} = 47$$

$$6 = 0.20\text{"A"} \quad \therefore$$

Resultados

$$\left. \begin{array}{l} \text{"A"} = 30 \text{ Kg.} \\ \text{"B"} = 70 \text{ Kg.} \end{array} \right\} \text{ a)}$$

$$\text{b) } \frac{\text{"A"}}{\text{"B"}} = \frac{30}{70} = 0.42857$$

Problema # 8.- Con objeto de satisfacer ciertas especificaciones, un vendedor mezcla una resina seca, cuyo precio es de 50.00 \$/kg con resina de 22% de humedad de 27.50 \$/kg. , de tal manera que la mezcla contenga 16% de humedad. ¿A qué precio resultará la mezcla?

Base de cálculo:  $P = 100 \text{ Kg.}$

Balance de materia:

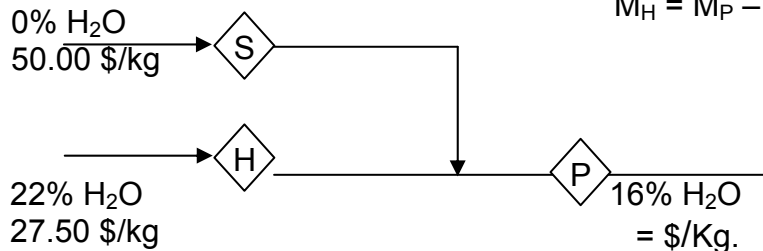
$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} \quad S(0.0) + H(0.22) &= P(0.16) \\ 0.22 H &= 0.16 P \\ H &= \frac{0.16 \times 100}{0.22} = 72.73 \\ S &= 27.27 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \$ \quad S(50.00) + H(27.50) &= P(X) \\ (27.27 \times 50.00) + (72.73 \times 27.50) &= 100(x) \\ X &= \frac{1363.50 + 200008}{100} = \$ / \text{kg} \quad 33.6357 \end{aligned}$$

$$M_S + M_H = M_P$$

$$M_S = M_P - M_H$$

$$M_H = M_P - M_S$$

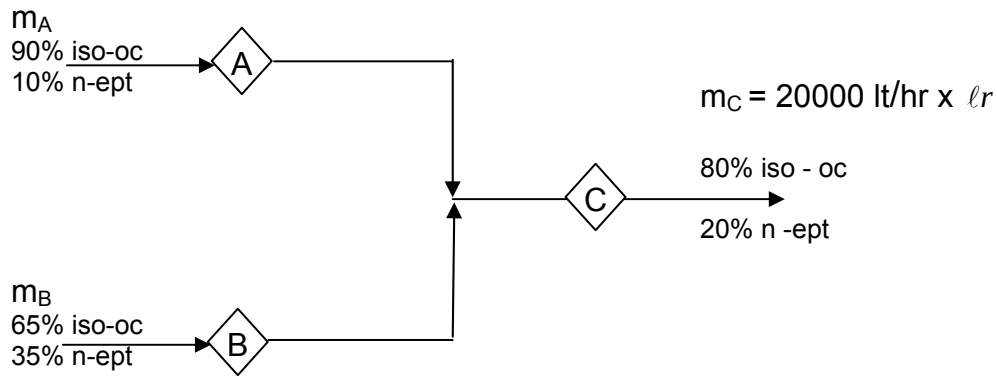


**Problema # 9.- ¿Cuántos litros de gasolina premium de 90% de iso-octano y 10% de n-heptano se deben mezclar con una gasolina magna de 65% de iso-octano y 35% de n-Heptano para producir 20000 lt/hr de una gasolina magna que contenga 80% de iso-octano y 20% de n-heptano?**

La densidad de las gasolinas es semejante e igual a 53° API

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\ell r} - 131.3$$

$$\ell r \text{ a } 60^{\circ} \text{ F } / 60^{\circ} \text{ F}$$



Balance total:

$$m_A + m_B = m_C \dots\dots\dots 1$$

Componentes:

Iso-octano  $m_A(0.9) + m_B(0.65) = m_C(0.8) \dots\dots\dots 2$

n-eptano  $m_A(0.1) + m_B(0.35) = m_C(0.2) \dots\dots\dots 3$

$$\ell r = \frac{141.5}{184.3} = 0.7677$$

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\ell r} - 131.3 \quad \therefore$$

$$\ell r = 0.7677 = \frac{0.7677}{\text{kg} / \text{lt}}$$

$$\frac{\text{lt}}{\text{hr}} 20000 \times 0.7677 \frac{\text{kg}}{\text{lt}} = \underline{15355.4 \text{ kg/hr}}$$

$$m_A + m_B = 15355.4 \dots\dots\dots 1 \quad m_A = 15355.4 - m_B$$

Sustituyendo en 2

$$(15355.4 - m_B) (0.90) + m_B (0.65) = \underline{15355.4} (0.80)$$

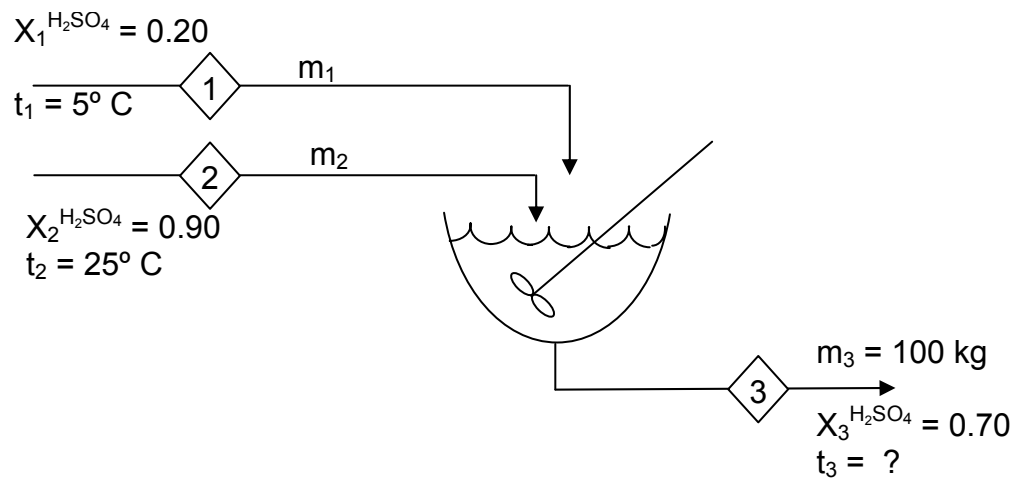
$$m_B = 6142.4 \text{ kg} = 8\,000 \text{ lt}$$

$$m_A = 9213.0 \text{ kg} = \underline{12,000 \text{ lt}}$$

$$\underline{20,000 \text{ lt}}$$

Problema # 10.- Para formar un ácido de 70% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se parte de un ácido al 20% en peso que está a  $5^\circ \text{C}$  y otro de 90% y  $25^\circ \text{C}$ .

¿Qué cantidades de cada ácido se deberán usar para formar 100 kg del ácido al 70% y a qué temperatura se encontrará el producto?



$$m_1 + m_2 = m_3 = 100 \text{ kg.} \quad ; \quad m_1 = (100 - m_2)$$

$$m_1 X_1^{\text{H}_2\text{SO}_4} + m_2 X_2^{\text{H}_2\text{SO}_4} = m_3 X_3^{\text{H}_2\text{SO}_4}$$

$$(100 - m_2) 0.20 + (m_2) 0.90 = 100 \times 0.70 = 70$$

$$20 - 0.20m_2 + 0.90m_2 = 70$$

$$0.70 m_2 = 50 \quad ; \quad m_2 = \frac{50}{0.7} = 71.42857 \text{ kg.}$$

$$m_1 = 100 - 71.42857 = 28.5714 \text{ kg.}$$

### **PROBLEMAS PARA RESOLVER**

**Problema # 1.- El programa de producción para el próximo mes es de 10,500 cajas de sopa de papa con espinacas.**

**1 caja = 24 sobres**

**1 sobre = 125 gramos**

**Se considera que: La pérdida de mezclado = 0.5%**

**La pérdida de envase = 0.5%**

**Muestras para laboratorio = 0.05%**

**Calcular la cantidad de materias primas si la receta es la siguiente:**

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| <b>9.00%</b>  | <b>espinaca deshidratada</b> |
| <b>76.00%</b> | <b>papa deshidratada</b>     |
| <b>0.20%</b>  | <b>ajo deshidratado</b>      |
| <b>0.70%</b>  | <b>glutamato monosodico</b>  |
| <b>1.00%</b>  | <b>cebolla deshidratada</b>  |
| <b>1.90%</b>  | <b>harina de algarroba</b>   |
| <b>11.20%</b> | <b>sal yodatada</b>          |

**Problema # 2.- Para producir pólvora se necesitan tres sustancias que son: azufre, carbón y nitrato de potasio en la proporción 10, 15 y 75 en peso respectivamente.**

**Estas sustancias se deben moler finamente y después mezclarse con cuidado para dar el producto final.**

**¿Qué cantidad de cada sustancia se debe moler para producir 4 toneladas de pólvora por día?**

**Problema # 3.- Para el próximo mes, el programa de producción será de 12,500 cajas de sopa de papa con jitomate.**

**1 caja = 24 sobres**

**1 sobre = 150 gramos**

**Se considera que: La pérdida de mezclado = 0.5%**

**La pérdida de envase = 0.5%**

**Muestras para laboratorio = 0.05%**

**Calcular las necesidades de materias primas si se utiliza la siguiente receta:**

|               |                             |
|---------------|-----------------------------|
| <b>35.00%</b> | <b>jitomate en polvo</b>    |
| <b>50.00%</b> | <b>papa deshidratada</b>    |
| <b>0.20%</b>  | <b>ajo deshidratado</b>     |
| <b>0.12%</b>  | <b>pimienta</b>             |
| <b>0.75%</b>  | <b>glutamato monosodico</b> |
| <b>0.80%</b>  | <b>cebolla deshidratada</b> |
| <b>2.10%</b>  | <b>harina de algarroba</b>  |
| <b>11.00%</b> | <b>sal yodatada</b>         |
| <b>0.03%</b>  | <b>color rojo</b>           |

**Problema # 4.- Un tanque contiene 5000 Kg. de OLEUM al 20%, un oleum al 20% significa que en 100 Kg. de oleum hay 20 Kg. de  $\text{SO}_3$  disueltos en 80 Kg. de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puro.**

**¿Cuántos Kg. de agua deben adicionarse al tanque para obtener un  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 93% en peso?**

**Problema # 5.- Se tienen dos tanques de almacenamiento de gas combustible el tanque A contiene una mezcla de 85% de propano y 40% de butano; se necesitan para sustituir al mezclado 25,000 Kg de gas 75% propano-25% butano; cuanto se necesita mezclar de cada tanque.**

## Capítulo III DESTILACIÓN

### DEFINICIÓN

Es una operación unitaria de ingeniería química que tiene por objeto la separación de los componentes que forman una mezcla de líquidos, mediante la aplicación de calor, se fundamenta en los distintos puntos de ebullición vaporización y posterior condensación de dichos componentes.

#### Definición según Brown<sup>bb</sup>

La destilación se define específicamente como la operación de separar los vapores desprendidos por los líquidos (o sólidos), por ejemplo, al calentarlos en una retorta o alambique, y condensarlos de nuevo. Comprende, por tanto, la evaporación y condensación. Las operaciones de transferencia vapor-liquido que dependen de la destilación, cual la producción de vapor y el liquido del producto en tratamiento, se denomina también destilación.

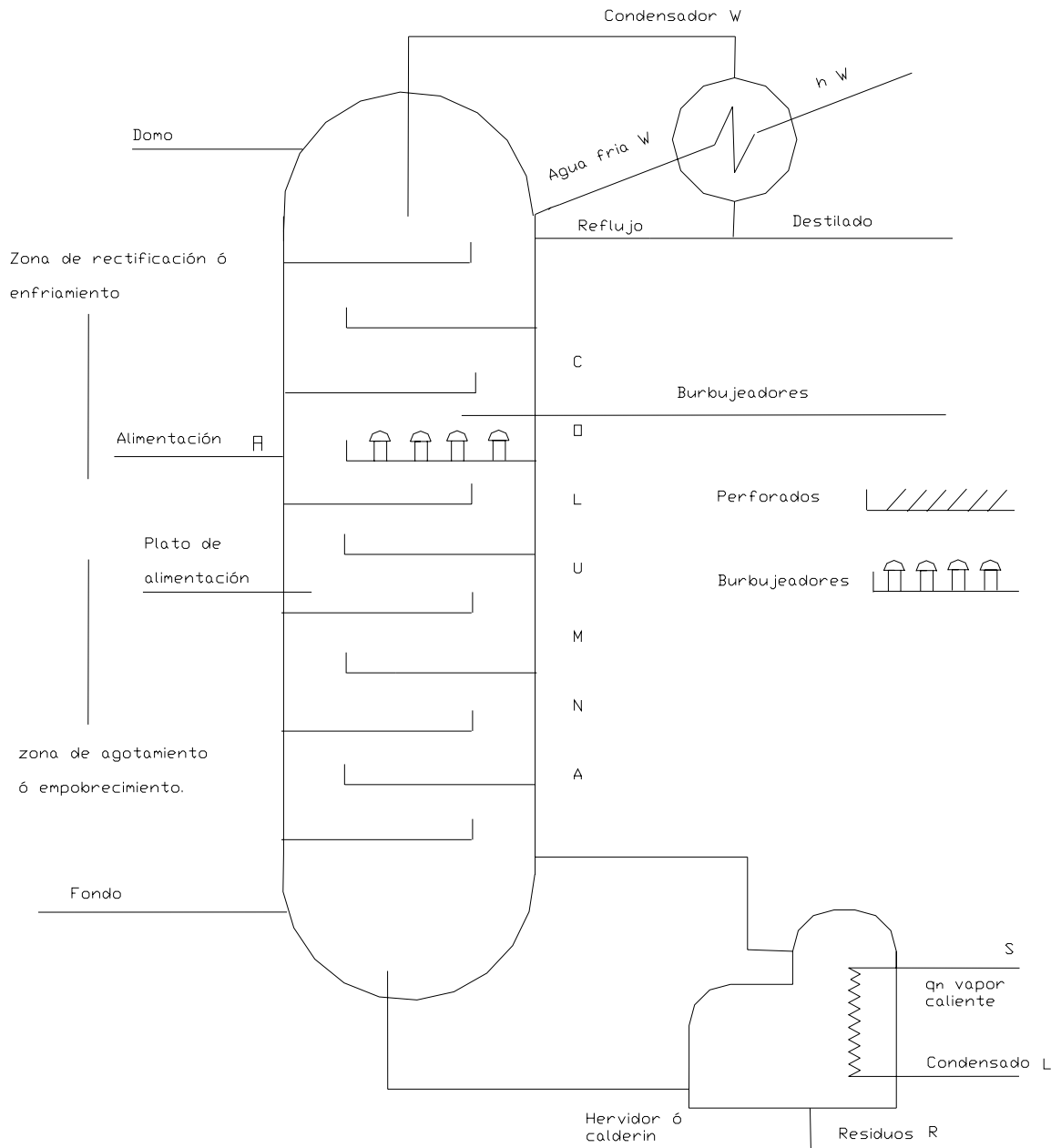
La destilación se puede realizar en la práctica siguiendo dos métodos fundamentales. El primero de ellos se basa en la producción de un vapor mediante la ebullición de la mezcla líquida que se desea separar, procediendo posteriormente a la condensación de vapor sin que nada de liquido retorne al calderón y se ponga en contacto con el vapor. El segundo métodos se basa en el retorno de parte del condensado al destilador, en condiciones tales que el líquido que desciende se pone en íntimo contacto con el vapor que va hacia el condensador. Cualquiera de estos dos métodos se puede conducir indistintamente en forma continua o discontinua.

---

<sup>bb</sup> Fuente : E. G .Brown., (1965), "Ingeniería química", Editorial marín., Primera edición, México, pág.341

## EQUIPOS Y TIPOS DE DESTILACIÓN:

### COLUMNA DE DESTILACIÓN<sup>cc</sup>



<sup>cc</sup> Ejemplo de una columna de destilación con sus componentes.

## TIPOS DE DESTILACIÓN

Existen varios tipos de destilación de acuerdo con: las propiedades de los componentes y condiciones de operación.

- a) Al vacío: se efectúa a presión reducida, la temperatura de ebullición disminuye y se evita la descomposición de los componentes.
- b) Fraccionada o Rectificación: Con reflujo, se separan los componentes en fracciones sucesivas.
- c) Molecular: Para obtener vitaminas, aceites esenciales y otros termolábiles.
- d) Seca: Descomposición de una sustancia sólida por acción de calor y después separa gases y líquidos condensables que se desprenden, ejemplo: madera (acetona, aceite acético y metanol),
- e) Por arrastre con vapor: Se utiliza vapor de agua a presión el cual calienta y arrastra el componente más volátil y así sale separado el componente insoluble de la mezcla.
- f) Diferencial, Abierta o Sencilla: Aplicación en laboratorios, normalmente es sin reflujo.
- g) Instantánea: Calentamiento a alta presión manteniendo el líquido y vapor el tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio.
- h) Azeotrópica: Se adiciona a la mezcla típica un disolvente que forme un azeótropo con uno de los componentes clave en el destilado o en el residuo.
- i) De Equilibrio o Cerrada: El líquido se llena a una temperatura intermedia entre la de principio y fin de la ebullición, dejando que la fase vapor alcance el equilibrio con la fase líquida a esta temperatura.

Los equipos en que se lleva a cabo esta operación se llaman columnas de destilación; hay dos tipos de columnas:

- a) Empacadas: Contienen en su interior "empaques" o "relleno".

- b) De Platos: Pueden ser perforadas o con burbujeadores o borboteadores.

Hay varios tipos de empaques: material, tamaño y forma. Así como también hay varios tipos de burbujeadores en forma y tamaño.

Las columnas pueden operar. Con o sin reflujo, en una o varias etapas

## BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

### BALACE DE MATERIA

a) Total  $A = D + R$        $D = A - R$        $R = A - D$ .....1

b) Balance en base del componente A

$A X_A = D^* D X_A + R^* R X_A$ .....2

Sustituyendo 1 en 2

$$A^* A X_A = (A - R)^* D X_A + R^* R X_A$$

$$A^* A X_A = A^* D X_A - R^* D X_A + R^* R X_A$$

$$A^* A X_A - A^* D X_A = R^* R X_A - R^* D X_A$$

$$A^* (A X_A - D X_A) = R^* (R X_A - D X_A)$$

De 1  $D = A - R$

$$R = \frac{A^* (A X_A - D X_A)}{(R X_A - D X_A)} \dots\dots\dots 3$$

$$A^* A X_A = D^* D X_A + (A - D) R X_A$$

$$A^* A X_A = D^* D X_A + A^* R X_A - D^* R X_A$$

$$A \cdot A X_A - A \cdot R X_A = D \cdot D X_A - D \cdot R X_A$$

$$A(A X_A - R X_A) = D (D X_A - R X_A)$$

$$D = \frac{A(A X_A - R X_A)}{(D X_A - R X_A)}$$

$$\text{de 1 } R = A - D$$

## BALANCE DE ENERGIA

### Nomenclatura

**A**= alimentación, **D**= destilado, **R**= residuo, **Q<sub>A</sub>**=cantidad de calor en la alimentación, **Q<sub>D</sub>**= cantidad de calor en el destilado, **Q<sub>R</sub>**= cantidad de calor en el residuo, **Q<sub>V</sub>**= cantidad de calor en el agua fría que entra al calderón. En el condensador **r**= reflujo, **G**=vapores que entran al condensador, **D**= cantidad de destilado que sale del condensador.

(Calor entálpico)

a) Balance total  $Q_A + q_w = Q_D + Q_R + q_C$ .....4

$$.q_w = Q_D + Q_R + Q_A + q_C$$

b) Entalpico  $A \cdot h_A + m_s \cdot \lambda_s = D \cdot h_D + R h_R + m_W \Delta h_w$ .....4

$$.q_C = m_W \cdot C_{PW} \cdot \Delta t$$

$$.q_C = m_W (\Delta h_w)$$

$$S_{VAPOR} = \text{Coold}$$

### CONDENSADOR

a) Balance de materia total  $G = D + r$

b) Balance componente A  $G \cdot Y_A = D \cdot X_A + r \cdot X_A$

## **APLICACIONES**

Es muy común que en la industria se utilice la palabra destilación, puesto que es un proceso muy utilizado, por ejemplo, en la industria vinícola o también en una planta de refinación de petróleo se aplica la destilación en procesos en los cuales se desea separar un componente de una mezcla.

### **PROBLEMA:**

**Problema 1.-** una columna de fraccionamiento continua va a ser diseñada para separar 30,000 Lb. / hr. De una mezcla de 40% de benceno, y 60% de tolueno, en un producto del domo contenido 97% de benceno y en el fondo un producto contenido 98% de tolueno. Estos porcentajes son en peso, una relación de reflujo de 3.5 moles a un mol. de producto va a ser aislada. El calor latente de ambos benceno y tolueno es de 7,240 cal/g<sub>mol</sub>.

- a) Calcular los moles del producto en el domo y en el fondo por hora.
- b) Determinar el numero de platos ideal y la posición del plato de alimentación;
  - i) Si la alimentación es líquida y a su plato de alimentación.
  - ii) Si la alimentación es un líquido a 20 °C ( $C_p = 0.44$ ).
  - iii) Si la alimentación es una mezcla de 2 terceras partes de vapor y una tercera parte líquida.
- c) si el vapor de calentamiento es de 20 Psig, cuanto vapor es necesario por hora, para cada uno de los 3 casos anteriores despreciando las pérdidas y considerando que el reflujo es un líquido saturado.
- d) Si el agua que entra al condensado tiene 80°F y sale a 150°F cuanta agua de enfriamiento es requerida en G.P.M.

P. M = 78 Benceno

P. M.= 92 Tolueno

Las concentraciones de alimentación, domo y fondo en fracción mol de benceno son:

$$X_F = \frac{\frac{40}{78}}{\frac{40}{78} + \frac{60}{92}} = \frac{0.5128205}{0.5128205 + 0.6521739} = \frac{0.5128205}{1.1649944} = 0.4402$$

$$X_D = \frac{\frac{97}{78}}{\frac{97}{78} + \frac{3}{92}} = \frac{1.2435897}{1.2435897 + 0.0326086} = \frac{1.2435897}{1.2761983} = 0.9744$$

$$X_R = \frac{\frac{2}{78}}{\frac{2}{78} + \frac{98}{92}} = \frac{0.025641}{0.025641 + 1.0652173} = \frac{0.025641}{1.0908583} = 0.0235$$

Peso molecular medio de la alimentación. (40+60)

$$\frac{100}{\frac{40}{78} + \frac{60}{92}} = \frac{100}{0.5128205 + 0.6521739} = \frac{100}{1.1649944} = 85.84$$

El gasto alimentado F es de 30,000/85.84 = 349.5 mol/hr.

$$0.4167$$

$$D = 349.5 \frac{0.4402 - 0.0235}{0.9744 - 0.0235} = 153.16 \text{ mols / hr.}$$
$$0.9509$$

$$R = 349.50 - 153.16 = 196.34 \text{ mols / hr.}$$



La pendiente de la línea de alimentación  $(1-0.667)/-0.667 = 0.5$

TABLA DE DATOS DEL PROBLEMA<sup>ee</sup>

|    | TEMPERATURA    | Presión de vapor           |                            | Volatilidad relativa                | Benceno        |                | Tolueno        |                |
|----|----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|    | Temperatura °C | P <sub>B</sub><br>Mm de hg | P <sub>T</sub><br>Mm de hg | α<br>P <sub>B</sub> /P <sub>T</sub> | X <sub>1</sub> | Y <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | Y <sub>2</sub> |
| 1  | 80.4           | 760                        | 300                        | 2.53333333                          | 0.65217391     | 1.65217391     | 1.53333333     | -0.65217391    |
| 2  | 82.0           | 811                        | 314                        | 2.58280255                          | 0.63179074     | 1.63179074     | 1.58280255     | -0.63179074    |
| 3  | 84.8           | 882                        | 345                        | 2.55652174                          | 0.6424581      | 1.6424581      | 1.55652174     | -0.6424581     |
| 4  | 88.0           | 957                        | 378                        | 2.53174603                          | 0.65284974     | 1.65284974     | 1.53174603     | -0.65284974    |
| 5  | 90.8           | 1037                       | 414                        | 2.50483092                          | 0.66452648     | 1.66452648     | 1.50483092     | -0.66452648    |
| 6  | 93.0           | 1123                       | 452                        | 2.48451327                          | 0.67362146     | 1.67362146     | 1.48451327     | -0.67362146    |
| 7  | 95.8           | 1214                       | 494                        | 2.45748988                          | 0.68611111     | 1.68611111     | 1.45748988     | -0.68611111    |
| 8  | 99.0           | 1310                       | 538                        | 2.43494424                          | 0.69689119     | 1.69689119     | 1.43494424     | -0.69689119    |
| 9  | 101.8          | 1412                       | 585                        | 2.41367521                          | 0.70737606     | 1.70737606     | 1.41367521     | -0.70737606    |
| 10 | 104.0          | 1520                       | 635                        | 2.39370079                          | 0.71751412     | 1.71751412     | 1.39370079     | -0.71751412    |
| 11 | 106.8          | 1625                       | 689                        | 2.35849057                          | 0.73611111     | 1.73611111     | 1.35849057     | -0.73611111    |
| 12 | 110.0          | 1756                       | 747                        | 2.35073628                          | 0.74033697     | 1.74033697     | 1.35073628     | -0.74033697    |
| 13 | 110.6          | 1800                       | 760                        | 2.36442015                          | 0.73076923     | 1.73076923     | 1.36842105     | -0.73076923    |

$$X_1 = \frac{P_{total}}{P_B - P_T} \dots\dots\dots 1$$

$$Y_1 = \frac{P_B * X_1}{P_{total}} \dots\dots\dots 2$$

$$X_2 = (1 - X_1) \dots\dots\dots 3$$

$$Y_2 = (1 - y_1) \dots\dots\dots 4$$

Columna continúa de fraccionamiento

P= 1 atm.

=760mm.Hg.

B-T

F=30,000kg/hr

<sup>ee</sup> Tabla de datos para la resolución del problema, los datos se obtienen con las formulas expuestas debajo de la tabla.

$X_F = 40\% = 0.40$  fracción en peso B -----  $X_F = 0.60$  fracción en peso de T

$X_D = 97\% = 0.97$  fracción en peso de B ----- y  $0.03$  fracción en peso T

$X_R = 98\% = 0.98$  fracción en peso de t ----- y  $0.02$  fracción en peso de B

$$R = \frac{F(X_F - X_D)}{(X_R - X_D)}$$

$$D = F - R$$

$$R = F - D$$

$$D = A \frac{{}_B X_A - {}_B X_R}{{}_B X_D - {}_B X_R}$$

$$Q_C = D (r / D + 1) (H_G - h_r)$$

$$h_F = \underline{40.87}$$

$$F h_F + q_h = D h_D + R h_R + q_C$$

$$h_r = \underline{16.01}$$

$$q_C = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$H_G = \underline{129.0}$$

$$q_C = m_i \lambda v$$

$$K/D = 3.5 \text{ Kg. / Kg.}$$

F líquido en su punto de ebullición

$$K \text{ t } 0 \text{ } 38^\circ \text{C}$$

$$D = ? \quad D = 30,000 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \frac{0.40 - 0.20}{0.97 - 0.02}$$

$$R = ? \quad D = 30,000 * \frac{0.38}{0.95} = 30,000 * 0.4 = 12,000 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$q_h = ?$$

$$q_C = ?$$

$$q_C = 12,000(3.5 + 1.0) (129.00 - 16.01) = \underline{6101460 \text{ kcal/hr}}$$

$$.q_h (12,000 \cdot 16.01) + (18,000 \cdot 48.15) - (30,000 \cdot 40.87) + 6101.460 \text{ kcal/hr}$$

$$.q_h = 192120 + 866700 - 1226100 + 6101460 = \underline{5934180 \text{ k cal/hr}}$$

Si el vapor para el hervidor es saturado con 160°C calcular la cantidad de vapor necesaria

$$P_{\text{abs}} = 6.3 \text{ kg/cm}^2 \text{ -----} \lambda_s = 497.2 \text{ k cal / kg}$$

$$.q_h = m_s \cdot \lambda_s; m_v = \frac{5934180 \text{ kcal/hr}}{497.2 \text{ kcal/kg}} = 11935.2 \text{ kg/hr}$$

Si el agua para el condensador se dispone a 15°C y su descarga se permite a 55°C  
Calcular la cantidad de agua necesaria

$$E = 15 + 55/2 = 35^\circ\text{C} \text{ --- } C_p = 0.99865 \text{ k cal / kg}^\circ\text{C}$$

$$.q_c = m_w \cdot C_p \cdot \Delta t \quad m_w = \frac{6101.460 \text{ kcal/hr}}{0.99865 \text{ kcal/kg} \cdot (55 - 15)^\circ\text{C}} = 152742.7 \text{ kg/hr}$$

$$q_c = m_w \cdot \Delta h_w \quad m_w = \frac{6101460}{40.3} = 151401.0 \text{ kg/hr}$$

$$h_w \text{ a } 15^\circ\text{C} = 15 \text{ kcal/kg}$$

$$m_w = \frac{6101460}{40.3} = 151401.0 \text{ kg/hr}$$

$$\Delta h_w = 40.3$$

$$h_w \text{ a } 55^\circ\text{C} = 55.3 \text{ kcal/kg}$$

$$w_f = 151.4 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O/hr}$$

$$D = 30,000 \left( \frac{0.40 - 0.02}{0.97 - 0.02} \right) = \frac{0.38}{0.95} = 12,000 \text{ kg/hr}$$

$$R = 30,000 \left( \frac{0.40 - 0.97}{0.02 - 0.97} \right) = \frac{-0.57}{-0.95} = 18,000 \text{ kg/hr}$$

No. de platos

No. de platos de alimentación

B 40%

T 60%

P. M.

B = 78  $40/78 = 0.513 \text{ mols de B}$

T = 92  $60/92 = 0.652 \text{ mol de T}$   
1.165

$${}_B X_D = 0.513 / 1.165 = 0.44 \text{ fracción mol.}$$

DESTILADO

$$B = 97\%$$

$$T = 3\%$$

$$97/78 = 1.2436$$

$$3/92 = \frac{0.0326}{1.2762}$$

$${}_B X_D = 1.2436 / 1.2762 = 0.974 \text{ fracción mol.}$$

RESIDUO

$$B = 2\%$$

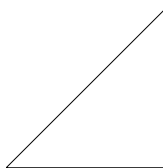
$$T = 98\%$$

$$2 / 78 = 0.0256$$

$$98 / 92 = \frac{1.0652}{1.0908}$$

$${}_B X_R = 0.0256 / 1.0908$$

Línea q = liq. A punto de ebullición vertical.



$$3.5 = L/D$$

$$Q \left( \frac{{}_B X_D}{F/D + 1} \right) = \frac{0.974}{4.5} = 2.16$$

$$\frac{(3.5+1)}{(L/D + 1)}$$

$$q = \frac{129.00 - 40.87}{129.00 - 16.01} = \frac{88.13}{112.99}$$

## PROBLEMA PARA RESOLVER

Problema 1) Una mezcla de 50mol % de benceno y 50mol % de tolueno es sometida a una destilación instantánea en un separador a presión de 1 atm. Graficar las siguientes cantidades todo en función de  $f$ . la vaporización fraccional: a) la temperatura en el separador b) la composición del líquido saliendo del separador y c) la composición del vapor saliendo del separador.

Para cada uno de algunos valores de  $f$  cantidades correspondientes ( $1/f-1$ ) son calentadas usando estas cantidades como pendientes, una serie de líneas rectas cada una pendiendo del punto ( $X_D$  \* $Y_D$ ) es trazada sobre la curva de equilibrio, antes lineal entre la intersección de la curva de equilibrio a los valores correspondientes de  $X_R$  Y  $X_D$ .

## CONCLUSIONES

Las operaciones unitarias no solo se aplican en la ingeniería química sino que, en la industria también son exigidas. Por lo consiguiente es una herramienta útil para el ingeniero industrial que requiere resolver problemas que tengan que ver con procesos en la transformación de su estructura química, siendo que para obtener un producto se tiene que separar, mezclar, destilar, o cualquier operación unitaria que se utilice.

Dentro de un proceso se pueden utilizar uno o varios procesos químicos, y estos pueden ser de distinto estado físico de la materia.

La evaporación es una operación unitaria muy requerida en la industria de la transformación de una materia prima en un producto terminado, así mismo el mezclado y la destilación que son operaciones unitarias pero de distintos polos mientras que el mezclado su principal función es unir dos o más componentes la destilación es separarlos.

En nuestra vida diaria sin querer o sin darnos cuenta utilizamos este tipo de operaciones básicas, vivimos en un mundo en el cual la química esta relacionada estrechamente con nuestro modo de vida.

## GLOSARIO DE TERMINOS

**Propela.** El termino se uso para distinguir el tipo de propulsor de tipo marino para la operación unitaria de mezclado.

**Coeficiente de transferencia.** Es la capacidad de un material para la transferencia de calor

**Bares** unidad que se utiliza para medir la presión

**Emulsificación** proceso que se utiliza para unión ó mezcla de elementos viscosos.

**Hidro craqueo** romper una cadena de carbono para obtener dos o más cadenas esto se logra suministrando hidrogeno a la cadena.

**Burbujeadores** dispositivo que permite el paso de burbujas de vapor.

**Miscibles.** Características de algunas sustancias para mezclarse con otra.

**Gusano o sin fin.** Mecanismo mecánico para la transportación de material.

**Solvente** sustancia de mayor proporción de acuerdo con en soluto.

**Soluto** sustancia disuelta en un una solución normalmente conocida como solvente

**Fraccionador.** Sustancia utilizada para realizar el hidro craqueo.

## NOMENCLATURA

### EVAPORADOR

A alimentación

S stean=vapor

P producto

E solvente evaporado

L condensados del vapor.

$aX_A$  =concentración en la alimentación en el componente A

$aX_S$  =Concentración en el vapor del componente A

$aX_P$  =concentración en el producto del componente A

$aX_E$  =concentración en la evaporación del componente A

$x_L$  = concentración en los condensados del componente A

$Q_A$  = cantidad de calor en la alimentación.

$Q_S$  = cantidad de calor que contiene el vapor.

$Q_P$  = cantidad de calor que sale en el producto.

$Q_E$  = cantidad de calor que sale en la evaporación.

$Q_L$  = cantidad de calor que contienen los condensados.

$\lambda$  = calor latente del vapor.

## MEZCLADO

A= componente 1

B= componente 2

C= producto

m= Masa

X = componentes que puede ser precio, concentración, # de gérmenes, % humedad, % grasa, etc.

$Q_A$  = cantidad de calor en el componente A

$Q_B$  = cantidad de calor en el componente B

$Q_C$  = cantidad de calor en el producto.

$C_{pA}$  = capacidad calorífica a presión constante del componente A

## DESTILACIÓN

A = alimentación

D = destilado

R = residuo

$Q_A$  = cantidad de calor en la alimentación

$Q_D$  = cantidad de calor en el destilado

$Q_R$  = cantidad de calor en el residuo.

$Q_w$  = cantidad de calor del agua fría que entra al calderín.

r = reflujo

G = vapores que entran al condensador

D =cantidad de destilado que sale del condensador.

Biblioteca del ingeniero químico.

- John H. Perri.
- Robert H. Perri.
- Mc Graw Hill.

# Operaciones Unitarias de ingeniería química

- Foust, Wensel Mams clamp y anderson
- Unit operations of chemical engineering      Mc Cabe, Smith y Harriot  
Cap. 6
- Problemas de balance de material y de energía      Valiente y Stivalet  
Pág. 11 Pág.4
- Operaciones de transferencia de masa      R.E. Treybal  
Pág. 165-179
- Biblioteca del ingeniero químico      R.H. Perry  
secc. 19 y 21.
- Principio de los procesos químico      Hougen, Watson y Reetz  
Pág. 20-26 y 261-282
- Manual de cálculos de ingeniería química      Chopey y Hicks  
secc. 12
- Diseño y economía de los procesos de ingeniería química      ULRICH  
Pág. 37,180-203 y 475-476
- Procesos de transporte y operaciones unitarias      C. J. Geankoplis  
Pág. 125-131 y 605

- Operaciones básicas de ingeniería química G. G. Brown  
Pág. 3
- Introducción a la ingeniería química Thompson y Ceckler  
Pág. 258-269.