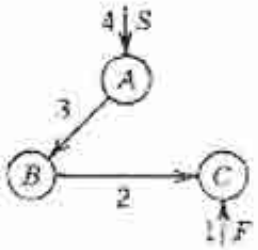
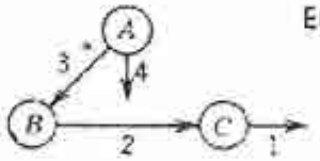


Etapa 1.ª

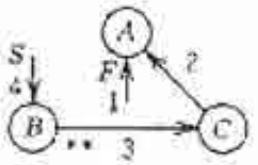
Comienza con la unidad C descargada y las unidades A y B cargadas con solución y sólido; A está casi agotada

1. Se pone en C carga nueva
2. Se pasa la solución de B a C
3. Se pasa la solución de A a B
4. Se llena A con disolvente puro



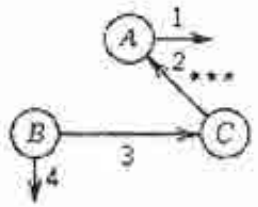
Etapa 2.ª

1. Se separa la solución final de C
2. Se pasa la solución de B a C
3. Se pasa la solución de A a B
4. Residuo sólido agotado, se descarga de A



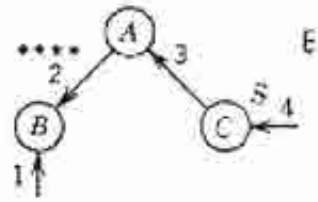
Etapa 3.ª

1. Se pone en A carga nueva
2. Se pasa la solución de C a A
3. Se pasa la solución de B a C
4. Se llena B con disolvente puro



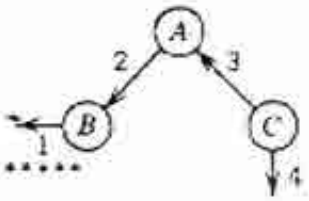
Etapa 4.ª

1. Se separa la solución final de C
2. Se pasa la solución de C a A
3. Se pasa la solución de B a C
4. El residuo sólido agotado, se descarga de B



Etapa 5.ª

1. Se pone en B carga nueva
2. Se pasa la solución de A a B
3. Se pasa la solución de B a A
4. Se llena B con disolvente puro



Etapa 6.ª

1. Se retira la solución final de B
2. Se pasa la solución de A a B
3. Se pasa la solución de C a A
4. El residuo sólido agotado, se descarga de C

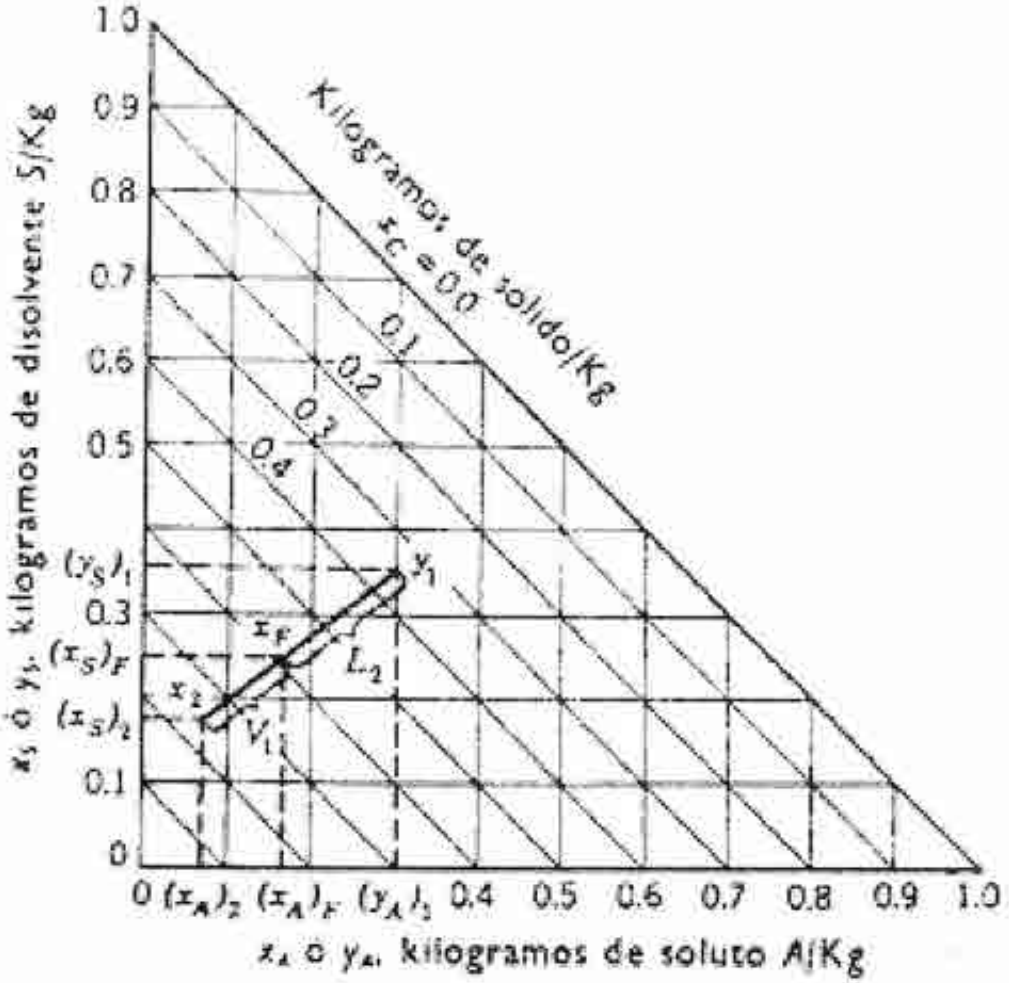


FIG. 294. Representación del balance de materias en diagrama triangular.

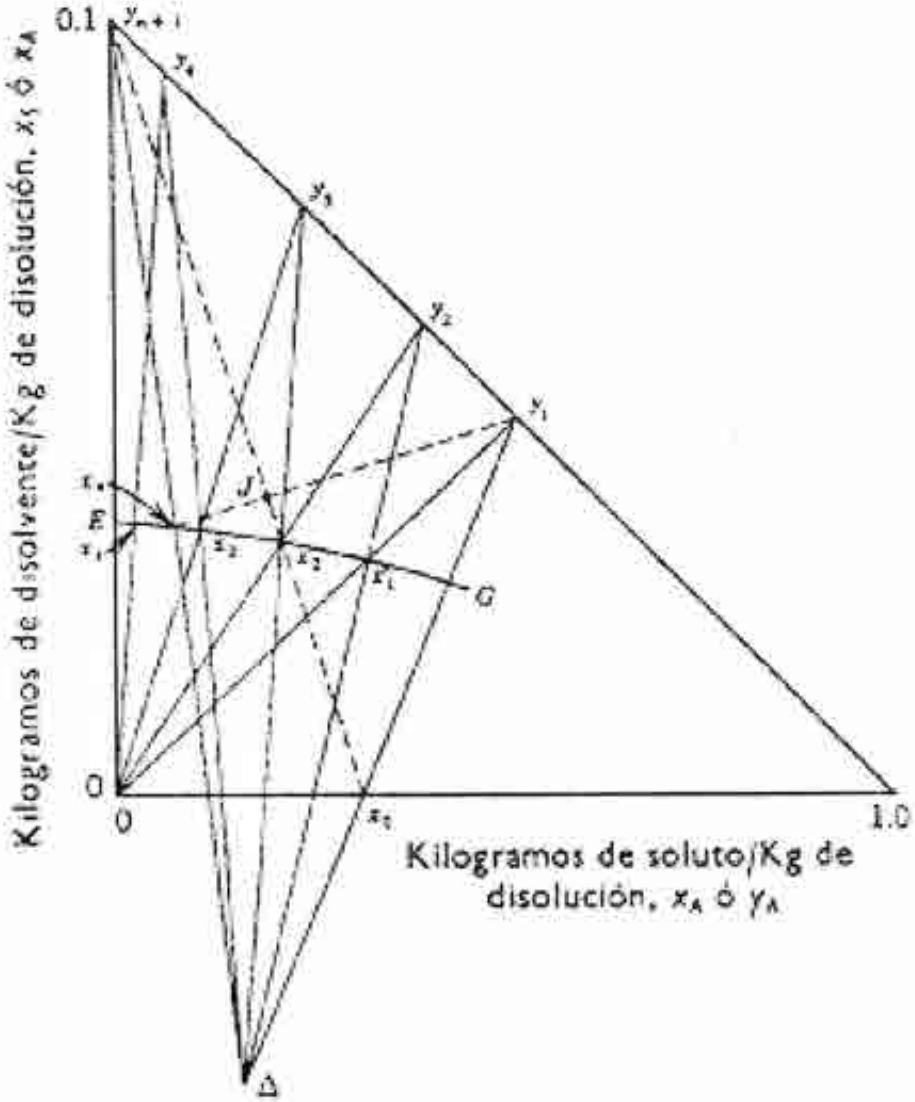


Fig. 300. Resolución gráfica de un proceso de extracción múltiple sólido-líquido en contracorriente.

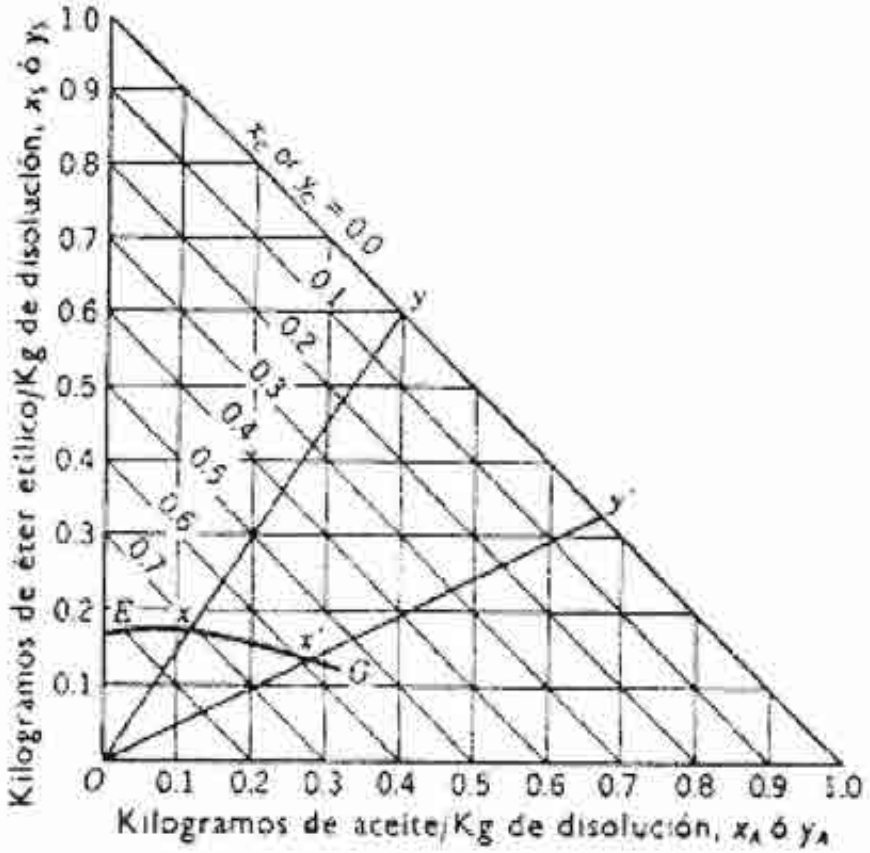


FIG. 301. Determinación gráfica del lugar geométrico de las composiciones de la descarga inferior, en el ejemplo numérico.

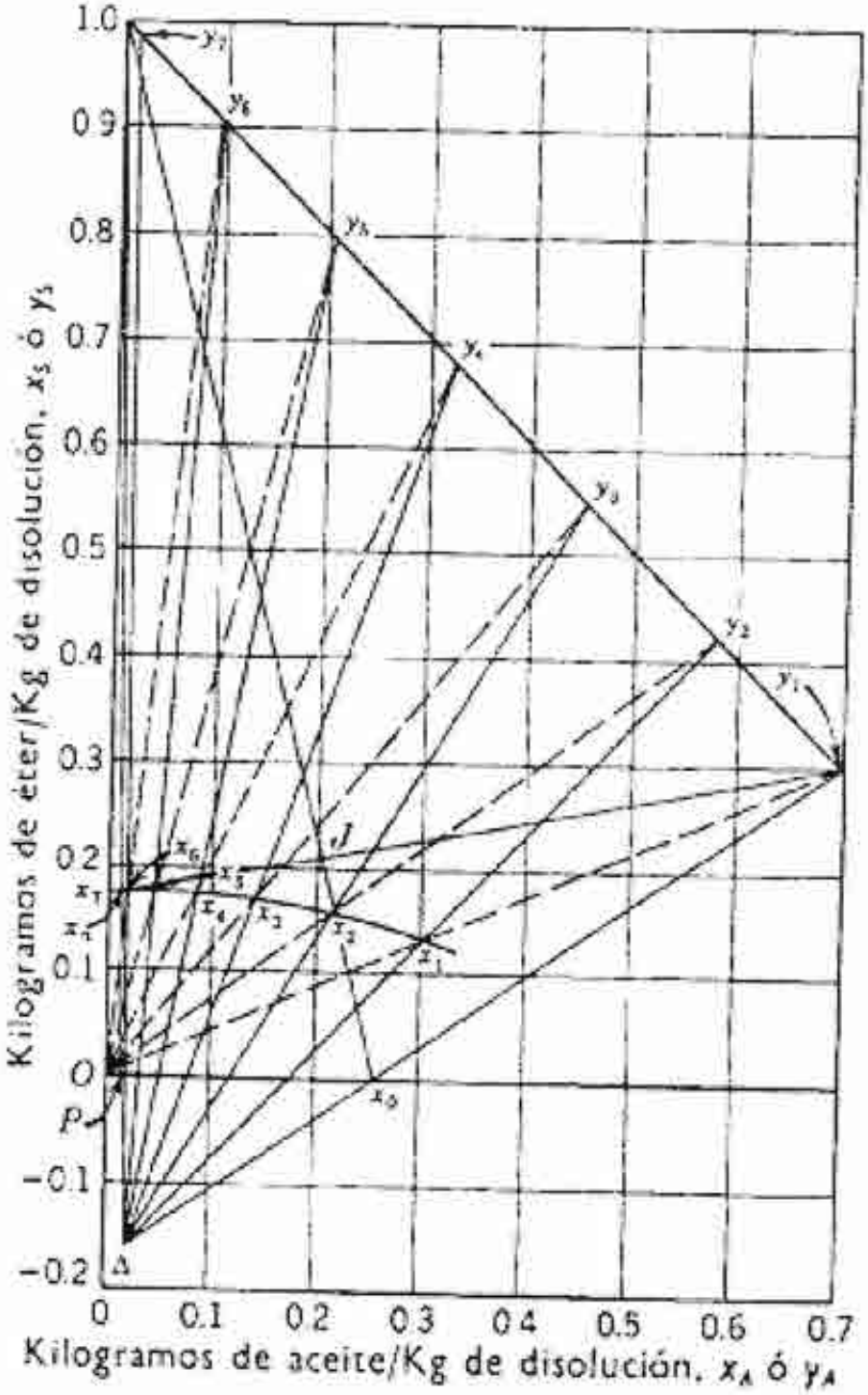


FIG. 302. Resolución gráfica del ejemplo ilustrativo.

- Empleos de la extracción líquido-líquido.

La extracción líquido-líquido se utiliza principalmente cuando la destilación no es práctica o su empleo es demasiado costoso. Puede ser más práctica que la destilación cuando la volatilidad relativa de dos componentes se encuentra entre 1 y 1.2. También puede ser más económica que la destilación o la separación con vapor de una impureza disuelta en el agua de desperdicio cuando la volatilidad relativa del soluto respecto al agua es menor que 4.En un caso, analizado por Robbins, la extracción líquido-líquido fue más atractiva, desde el punto de vista económico, que la adsorción en lechos de carbón o resina como un proceso de pretratamiento para la destoxificación del agua de desperdicio antes del tratamiento biológico.

En otros casos, los componentes a separar pueden ser sensibles al calor, como, por ejemplo, los antibióticos, o relativamente no volátiles como las sales minerales, y la extracción líquido-líquido puede ser el proceso de separación más eficaz desde el punto de vista económico. Sin embargo, el empleo potencial de la destilación debe evaluarse cuidadosamente antes de considerar la extracción líquido-líquido. Por lo general, un proceso de extracción requiere: 1) extracción líquido-líquido; 2) recuperación del disolvente, y 3) desolventación del refinado.

Varios ejemplos de los procesos de extracción líquido-líquido eficaces desde el punto de vista de costos incluyen la recuperación del ácido acético a partir del agua con diversos disolventes.

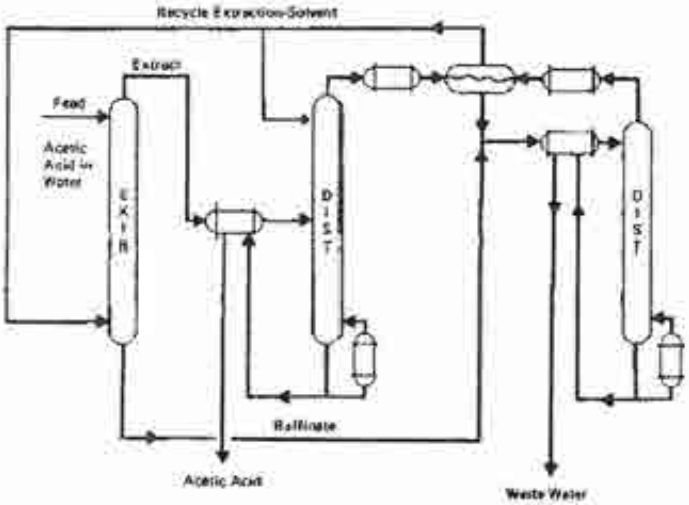


FIG. 15-1 Solvent extraction of acetic acid from water

Fuente: Perry's Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

El disolvente se recupera por destilación y el refinado se desolventiza, mediante separación de vapor. En algunos casos, el disolvente de extracción puede tener un punto de ebullición más elevado que el soluto, para lograr un consumo reducido de energía, pero una acumulación de componentes pesados en el disolvente recirculado puede crear otro problema.

El proceso Udex es un proceso de fraccionamiento líquido-líquido eficaz desde el punto de vista económico para la separación de aromáticos contenidos en alifáticos, como lo describe Grote. En este proceso, el disolvente de extracción, dietilén o trietilenglicol, se recupera por destilación con vapor y las corrientes de refinado y extracto se desolventizan por la extracción con agua. El condensado de agua procedente de la destilación con vapor se utiliza para extraer el disolvente de extracción residual en las corrientes de refinado y extracto, de tal manera que se elimine la destilación para el secado del disolvente de extracción.

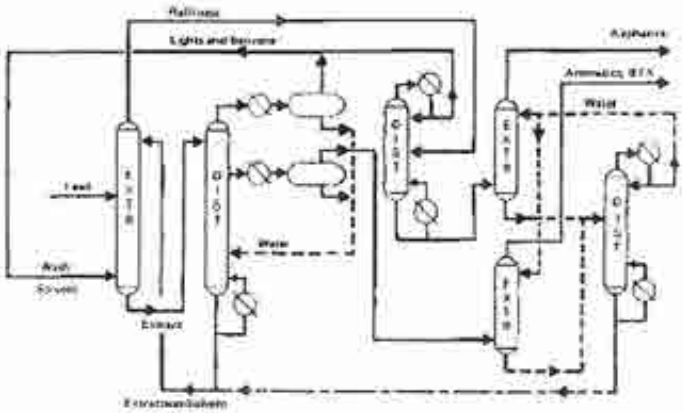


FIG. 15-2 Udex process

Fuente: Perry's Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

- **Definiciones.**

La *alimentación* a un proceso de extracción líquido-líquido es la solución que contiene los componentes a separar. El componente líquido principal en la corriente de alimentación se conoce como *disolventes de alimentación*. Los componentes menores presentes en la solución se conocen a menudo como *solutos*. El *disolvente de extracción* o simplemente el *disolvente* es el líquido inmiscible que se agrega al proceso con objeto de extraer uno o varios solutos de la corriente de alimentación. La fase disolvente de extracción que sale de un contactor líquido-líquido se llama *extracto*. El *refinado* es la fase líquida que queda de la corriente de alimentación después de hacer contacto con la segunda fase. El *disolvente lavador* es líquido agregado a un proceso de fraccionamiento líquido-líquido para lavar o enriquecer la pureza del soluto en la fase del extracto.

Una *etapa teórica* o de *equilibrio* es un dispositivo o combinación de dispositivos que realiza el efecto de mezclar íntimamente dos líquidos inmiscibles hasta alcanzar las concentraciones de equilibrio y, después, se separan físicamente las dos fases en dos capas claras. La *extracción con flujo transversal* es una cascada o una serie de etapas en las que el refinado R procedente de una etapa de extracción hace contacto con disolvente fresco adicional S en la etapa subsecuente.

La *extracción a contracorriente* es un método de extracción en el cual el disolvente de extracción entra a la etapa o extremo de la extracción más alejado de la corriente de alimentación F y las dos fases pasan a contracorriente entre sí. El objetivo es la transferencia de uno o más componentes de la solución de alimentación F hacia el extracto E. Cuando se utiliza un *contactor de etapa*, en las dos fases se mezclan con las gotitas de una fase suspendidas en la otra, pero las fases se separan antes de salir de cada etapa. Cuando se utiliza un *contactor diferencial*, una de las fases puede permanecer dispersa en forma de gotitas en todo el contactor, a medida que las fases pasan a contracorriente. Luego se permite la coalescencia de la fase dispersa, al final del dispositivo, antes de descargarla.

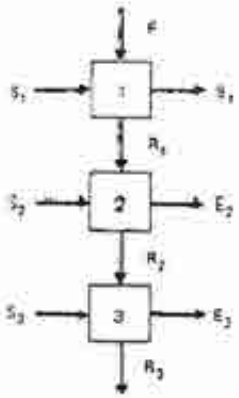


FIG. 15-4 Crosscurrent extraction

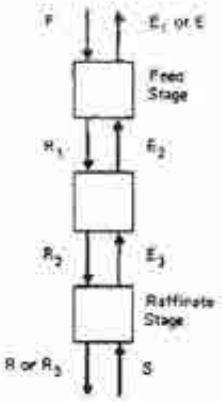


FIG. 15-5 Countercurrent extraction

Fuente: Perry's Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

El *fraccionamiento líquido-líquido* o *extracción fraccionaria* es un método complicado para la separación casi completa de un soluto, a partir de un segundo soluto por extracción líquido-líquido. Los dos líquidos inmiscibles se desplazan a contracorriente a través del contactor, con la alimentación de los solutos cerca del centro del contactor. La relación de las velocidades de flujo de los líquidos inmiscibles se opera de tal manera que una de las fases elimina el primer soluto en un extremo contactor, en tanto que la otra fase elimina el segundo soluto en el extremo opuesto del contactor. Otro modo de describir la operación es que un disolvente primario S extrae o

separa, en forma preferencial, el primer soluto de alimentación F y un disolvente lavador W depura el extracto libre del segundo soluto indeseable. El segundo soluto sale del contactor en la corriente de refinado.

La *extracción por disociación* es el proceso en que se utiliza una reacción química para forzar la transferencia de un soluto de una fase líquida a otra; por ejemplo, el empleo de una solución de hidróxido de sodio para extraer compuestos fenólicos ácidos o mercaptanos a partir de una corriente de hidrocarburos. La transferencia opuesta puede forzarse por la adición de un ácido a la corriente de fenato de sodio para hacer brotar compuesto fenólico y transformarlo en fenol libre, que se puede extraer con un disolvente orgánico. En forma similar, las aminas primarias, secundarias y terciarias pueden protonarse con un ácido fuerte para transferir la amina a una solución acuosa, como, por ejemplo, la sal de la amina hidroclorhídrica. Por el contrario, se puede agregar una base fuerte para convertir la sal de la amina en base libre, que se puede extraer con un disolvente. Este procedimiento es muy común en la producción de medicamentos.

La *extracción por disociación y fraccionamiento* incluye tanto el método de reacción química como el de fraccionamiento, para la separación de componentes mediante se diferencia en las constantes de disociación.

- **Equilibrio de fases.**

La separación de los componentes por medio de la extracción líquido-líquido depende básicamente de la distribución de equilibrio termodinámico de los componentes entre las dos fases líquidas. El conocimiento de estas relaciones de distribución esencial para seleccionar la razón del disolvente de extracción respecto a la alimentación que entra a un proceso de extracción y para la evaluación de las velocidades de transferencia de masa o las eficiencias de las etapas teóricas logradas en el equipo de proceso. Ya que se utilizan dos fases líquidas que son inmiscibles, el equilibrio termodinámico incluye una evaluación considerable de soluciones no ideales. En el caso

más simple, un disolvente de alimentación F contiene un soluto que debe transferirse a un disolvente de extracción S.

- **Coeficientes de distribución.**

La fracción en peso del soluto en la fase del extracto y dividida entre la fracción en peso del soluto en la fase de refinado x en el equilibrio se conoce como *coeficiente de distribución o de separación*, K

$$K = y/x$$

Desde el punto de vista termodinámico, el coeficiente de distribución K° se obtiene en fracciones mol de y° y x°

$$K^{\circ} = y^{\circ}/x^{\circ}$$

Para cálculos abreviados, se prefiere el coeficiente de distribución K' en Bancroft se coordina utilizando la razón de peso del soluto respecto al disolvente de extracción en la fase del extracto Y, y la razón de peso del soluto respecto al disolvente de alimentación en la fase del refinado X

$$K' = Y/X$$

En los cálculos abreviados, también se utiliza la *pendiente de la línea de equilibrio* en Bancroft (la razón de peso), que coordina a m

$$m = dY/dX$$

Para bajas concentraciones, en las que la curva de equilibrio es lineal, el valor de K' es igual a m. El valor de K' es uno de los principales parámetros utilizados para establecer la razón mínima del disolvente de extracción respecto al de alimentación que se puede utilizar en un proceso de extracción. Por ejemplo, si el coeficiente de distribución K' es igual a 4, un extractor a contracorriente requiere 0.25 Kg o más, en el flujo del disolvente de extracción, para eliminar todo el soluto de 1Kg de flujo de disolvente de alimentación.

La *separación relativa o selectividad* entre dos componentes b y c se puede describir como la razón de los dos coeficientes de distribución.

$$\alpha(b/c) = K_b'/K_c' = K_b/K_c = K_b'/K_c'$$

Esto es semejante a la volatilidad relativa en destilación.

- **Diagramas de fases.**

Los datos de *equilibrio ternario de fases* se pueden tabular como aparece en las tablas o presentarse en forma diagramas de *triángulos equiláteros*. El sistema ternario formado por agua, ácido acético y metil isobutil cetona (MIBK) es un sistema del tipo 1, en el cual solo uno de los pares binaros es inmiscible. El sistema ternario etilbenceno, estireno, etilenglicol es un sistema del tipo 2, en el que dos de los pares binarios son inmiscibles. Las líneas de unión conectan los puntos que están en equilibrio.

TABLE 15-1 Water–Acetic Acid–Methyl Isobutyl Ketone, 25°C*

Weight % in raffinate				Weight % in extract			
Water	Acetic acid	MIBK	X	Water	Acetic acid	MIBK	Y
98.15	0	1.53	0	2.12	0	97.88	0
95.40	2.85	1.7	0.0298	2.56	1.87	95.33	0.0199
85.8	11.7	2.5	0.1364	3.4	8.9	85.7	0.1039
75.7	20.5	3.8	0.2708	9.2	17.3	73.5	0.2354
57.8	36.2	6.0	0.5864	14.3	24.6	60.9	0.4038
35.0	52.8	12.2	0.5964	22.0	30.8	47.2	0.6527
42.9	34.6	22.5	0.8065	31.0	33.6	35.4	0.9492

*From Sherwood, Evans, and Longcor (*Ind. Eng. Chem.*, **31**, 569 (1939))

TABLE 15-2 Spreadsheet for Right Triangular Ternary Diagram of Water/Acetic Acid/MIBK Liquid-Liquid-Equilibrium Data at 25°C in Fig. 15-7

Wt. fraction Variable	Acetic acid X	MIBK Y1	MIBK Y2	1 − wt AA Y3
Water	0.0000	0.0155		1.0000
Phase	0.0285	0.0170		0.9715
Line	0.1170	0.0250		0.8830
and	0.2050	0.0380		0.7950
Top of	0.2620	0.0600		0.7380
Triangle	0.3280	0.1220		0.6720
	0.3460	0.2250		0.6540
	1.0000			0.0000
MIBK	0.0000		0.9788	
Phase	0.0187		0.9533	
Line	0.0890		0.8570	
	0.1730		0.7350	
	0.2460		0.6090	
	0.3080		0.4720	
	0.3360		0.3540	
Tie-line 1	0.0285	0.0170		
	0.0187	0.9533		
Tie-line 2	0.1170		0.0250	
	0.0890		0.8570	
Tie-line 3	0.2050	0.0380		
	0.1730	0.7350		
Tie-line 4	0.2620		0.0600	
	0.2460		0.6090	
Tie-line 5	0.3280	0.1220		
	0.3080	0.4720		
Tie-line 6	0.3460		0.2250	
	0.3360		0.3540	

Data from Sherwood, Evans, and Longcor (*Ind. Eng. Chem.*, **31**, 569 (1939))

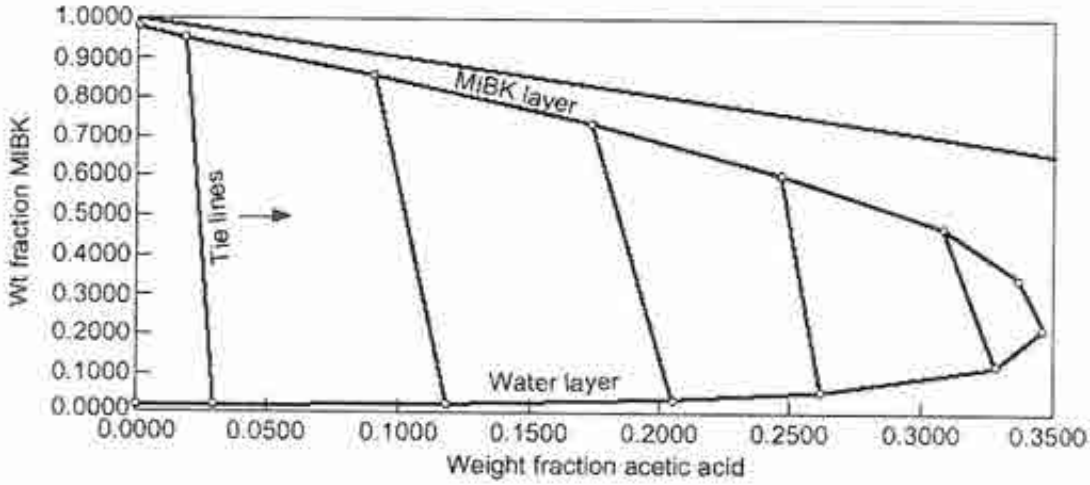


FIG. 15-7 Type I ternary diagram (water-acetic acid-MIBK).

Fuente: Perry's Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

Muchos sistemas de líquidos inmiscibles muestran una *temperatura crítica de disolución* mas allá de la cual el sistema ya no se separa en dos fases líquidas. Esto se muestra en la siguiente figura en la que un incremento en la temperatura puede cambiar un sistema tipo 2 al tipo 1, arriba de la temperatura crítica del sistema binario T_{BS} del soluto y el disolvente de extracción. El sistema se vuelve totalmente miscible arriba de la temperatura critica del binario disolvente de alimentación y disolvente de extracción T_{AS}. En ocasiones, un sistema puede tener también una temperatura inferior critica de disolución, debajo de la cual el sistema será totalmente miscible. Por ejemplo, el sistema binario metil etil cetona y agua. Por lo general, los cambios de presión tienen un efecto despreciable en el equilibrio líquido-líquido. Para el cálculo gráfico del número de etapas teóricas en un sistema ternario conviene utilizar el *diagrama de triángulo recto* que el de triángulo equilátero. Los datos de equilibrio ternario se grafican en papel gráfica común de coordenadas rectangulares, con la fracción en peso del soluto en el eje horizontal y la fracción en peso del disolvente de extracción en el eje vertical. Para bajas concentraciones, la escala horizontal se puede ampliar.

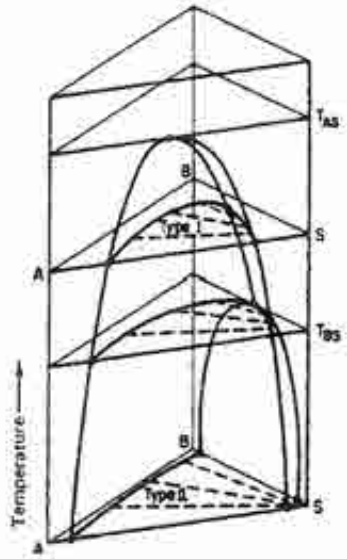


FIG. 15-8 Effect of temperature on ternary liquid-liquid equilibrium. A = feed solvent, B = solute, and S = extraction solvent.

Fuente: Perry s Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

Para los cálculos gráficos tipo McCabe-Thiele y los métodos abreviados, las concentraciones de Bancroft (la razón de pesos) se pueden utilizar en papel ordinario de coordenadas rectangulares. Todo el sistema ternario se puede graficar en las concentraciones de Bancroft (la razón de pesos) en papel log-log y la línea de equilibrio se puede a menudo correlacionar mediante tres segmentos de líneas rectas. La composición del punto triple para un sistema tipo 1 se puede encontrar fácilmente utilizando la gráfica de Hand. Este tipo de gráfica también es útil para la extrapolación e interpolación cuando los datos son escasos. Los *sistemas de componentes multiples* que contienen cuatro o más componentes son difíciles de mostrar en forma gráfica. Sin embargo, a menudo se pueden realizar los cálculos de diseño del proceso para la extracción del componente con el más bajo coeficiente de distribución k' y tratarlo como un sistema ternario. Los componentes con valores más elevados de K' se pueden extraer casi totalmente del refinado, en vez del soluto seleccionado para diseño. O bien se pueden utilizar cálculos por computadora para reducir los cálculos para etapas múltiples de mezclas multicomponentes.

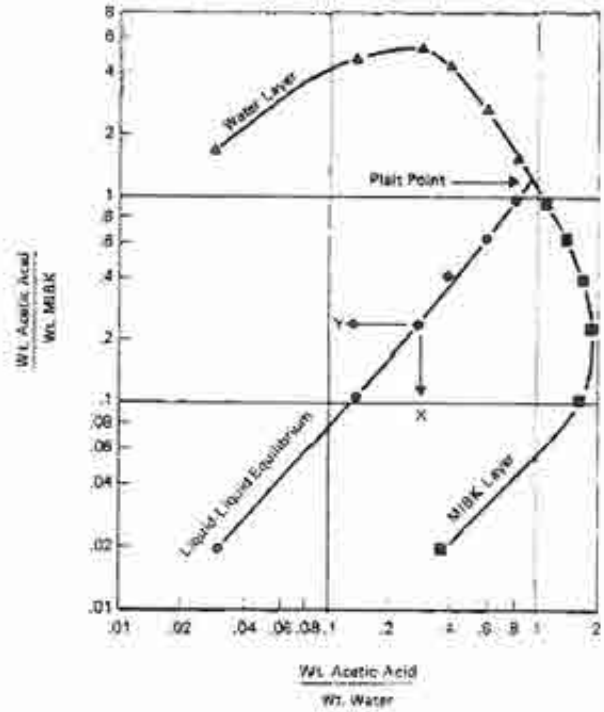


FIG. 15-9 Hand-type ternary diagram for water-acetic acid-methyl isobutyl ketone.

Fuente: Perry's Chemical engineers handbook. Seventh edition. Mc Graw Hill

- **Bases termodinámicas de los equilibrios líquido-líquido.**

En un sistema ternario líquido-líquido, como por ejemplo, el sistema formado por ácido acético, agua, MIBK, los tres componentes están presentes en ambas fases líquidas. En el equilibrio, la actividad A° de cualquier componente es la misma, por definición, en ambas fases

$$A_r^\circ = \gamma_r x^\circ = A_e^\circ = \gamma_e y^\circ$$

where A° = activity of solute
γ = activity coefficient of solute
r = raffinate phase
e = extract phase

En consecuencia, el coeficiente de distribución en unidades de fracción mol K° es el resultado de la relación de los coeficientes de actividad en las dos capas.

$$K^{\circ} = y^{\circ}/x^{\circ} = \gamma_1/\gamma_2$$

El coeficiente de actividad ▯ se puede definir como la tendencia de escape de un componente relativa a la ley de Raoult en el equilibrio vapor-líquido.

- **Datos experimentales de equilibrio.**

En la actualidad, para los sistemas líquido-líquido se *dispone* de varias colecciones grandes de datos experimentales de equilibrio. Sorenson y Arlt (liquid-liquid equilibrium data collection, DECHEMA, Frankfurt, Alemania) informaron en varios volúmenes sobre los datos que han sido correlacionados con las ecuaciones de los coeficientes de actividad.

- **Propiedades deseables del disolvente.**

Las siguientes propiedades de un disolvente potencial se deben considerar antes de utilizarlo en un proceso de extracción líquido-líquido.

1. *Selectividad.* La separación relativa o selectiva ▯ de un disolvente es la razón de los dos componentes en la fase del disolvente de extracción, dividida entre la razón de los mismos componentes en la fase del disolvente de alimentación. El poder de separación de un sistema líquido-líquido está regulado por la desviación de ▯ de la unidad, en forma similar a la volatilidad relativa en destilación. Una separación relativa con ▯ = 1 no proporciona separación de los componentes entre las dos fases líquidas. Por lo general, las concentraciones diluidas de soluto proporcionan los factores más elevados de separación relativa.

2. *Recuperabilidad.* Por lo general, el disolvente de extracción debe recuperarse de la corriente de extracto y de la de refinado, en un proceso de extracción. Ya que a menudo se utiliza la destilación, la volatilidad relativa del disolvente de extracción respecto a los componentes no disolventes debe ser significativamente mayor o menor a la unidad. Para un disolvente volátil es deseable un bajo calor latente de evaporación.

3. *Coeficiente de distribución.* El coeficiente de distribución de un soluto debe ser grande, para que se pueda utilizar una razón baja del disolvente de extracción respecto a la alimentación.

4. *Capacidad.* Esta propiedad se refiere a la carga del soluto por peso del disolvente de extracción que se puede lograr en una capa de extracto, en el punto triple de un sistema tipo 1 o en el límite de solubilidad de un sistema tipo 2.

5. *Solubilidad del disolvente.* Una baja solubilidad del disolvente de extracción en el refinado suele dar como resultado una alta volatilidad relativa en la separación del refinado o una baja pérdida de disolvente si el refinado no se desolventiza. Una baja solubilidad del disolvente de alimentación en el extracto conduce a una alta separación relativa y, por lo general, a un costo menor en la recuperación del soluto.

6. *Densidad.* La diferencia de densidad entre las dos fases líquidas en equilibrio afecta las velocidades de flujo a contracorriente que se pueden lograr en equipo de extracción, así como las velocidades de coalescencia. La diferencia de densidad disminuye a cero en el punto triple, pero en algunos sistemas puede llegar a ser igual a cero en una concentración intermedia del soluto (línea de unión isopícnica o de doble densidad) y puede invertir las fases a concentraciones más elevadas. Los diferentes tipos de

extractores no pueden cruzar dicha concentración del soluto, pero los asentadores mezcladores entre sí.

7. *Tensión de la interfase.* Una tensión elevada en la interfase promueve una coalescencia rápida y, por lo general, requiere una agitación mecánica elevada para producir gotas pequeñas. Una tensión baja en la interfase permite el rompimiento de la gota con agitación de poca intensidad, pero también conduce a bajas velocidades de coalescencia. La tensión de la interfase disminuye por lo general a medida que se incrementan la solubilidad y la concentración del soluto; asimismo, se reduce a cero en el punto triple.

8. *Toxicidad.* Se prefiere una baja toxicidad a la inhalación de los vapores del disolvente o al contacto con la piel, debido a la exposición potencial durante las reparaciones del equipo o mientras se desconecta el aparato después de la transferencia del disolvente. También es deseable una toxicidad baja a los peces y bioorganismos cuando la extracción se emplea para el pretratamiento del agua de desperdicio, antes de entrar a la planta de biotratamiento, que descarga el efluente a un río o lago. A menudo, la toxicidad del disolvente es baja si la solubilidad en agua es elevada.

La regla de las fases.

La regla de las fases fue deducida por vez primera en 1876, por J. W. Gibbs. Se suele escribir usualmente como una ecuación sencilla:

$$F + L = C + 2$$

Donde F es el número de fases, L el número de grados de libertad C el número de componentes; todo ello para un sistema que se encuentra en un estado de equilibrio. A pesar de su simplicidad, la regla es aplicable a todo sistema macroscópico que se encuentre en un estado de equilibrio

heterogéneo y que solamente sea influido por variaciones de presión, temperatura y concentración.

- *Sistemas de dos componentes.*

Cuando hay dos componentes, la expresión de la regla de las fases se expresa:

$$F + L = 4$$

Por lo que L puede valer 0, 1, 2 o 3, dependiendo del número de fases presentes. Ahora el número máximo de grados de libertad es tres (para un componente el número máximo es 2 en cuyo caso se eligirán presión, temperatura y una composición como variables independientes.

- *Sistemas de tres componentes.*

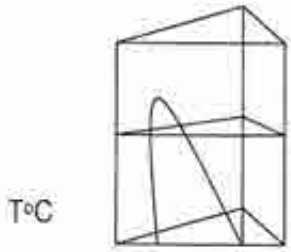
En el caso de sistemas de tres componentes la regla de las fases establece que:

$$F + L = 5$$

Por lo que hay un máximo de cuatro grados de libertad. En los sistemas de una fase, por lo anterior, se tendrán cuatro variables independientes: presión, temperatura y concentraciones de dos componentes. La concentración del tercero queda fijada; si se tiene A por 100 de un componente y B por 100 de otro, el porcentaje del tercero será (100 – A – B) por 100.

Se requieren algunas simplificaciones en estos sistemas, ya que no se pueden representar gráficamente cuatro variables. Generalmente se fija una variable en un valor que resulte práctico, por ejemplo se hace la presión igual a 1 atm, con lo que se consume un grado de libertad. El resto de las variables pueden representarse entonces en un diagrama tridimensional con un triángulo

equilátero como base. Las variables de concentración se representan en los ejes triangulares y la temperatura en el eje vertical. Según esto, una sección horizontal del diagrama prismático representa un sistema de tres componentes a presión y temperatura constantes.



El triángulo equilátero debido a sus propiedades geométricas, es muy adecuado para representar concentraciones en sistemas de tres componentes.

A partir de cualquier punto situado en el interior del diagrama triangular, P, pueden trazarse tres líneas, PO, PT, y PR, paralelas. La geometría indica que:

$$PT + PR + PT = AB$$

Si se considera la longitud AB como unidad o como 100%:

$$PO + PR + PT = 1 \text{ (o sea, 100\%)}$$

Cada vértice del triángulo representa un componente puro, o sea 100% de A, 100% de B y 100% de C, respectivamente. Cada lado representa una mezcla binaria y los puntos del interior del triángulo representan todas las posiciones ternarias posibles. De todo lo anterior se deduce que,

para el punto P, el porcentaje de A vendrá dado por PR, el de B por PT y el de C por PO. A continuación se van a considerar algunas propiedades y formas de utilización de estos diagramas.

1) El punto D representa una mezcla de A y C tal que:

$$\frac{\text{Cantidad de A}}{\text{Cantidad de C}} = \frac{DC}{DA}$$

En el diagrama anterior, D corresponde a 60% de A y 40% de C. De forma semejante E representa 60% de A y 40% de B.

2) Una linea paralela a uno de los lados del triángulo representa UN porcentaje constante para un componente. De esta forma todos los puntos de la recta DE corresponden a mezclas con un 60% de A y cantidades variables de B y C. De forma semejante la recta FG representa todas las mezclas que contengan 20% de C. Las rectas DE y FG se cortan en H que representará entonces 60% de A, 20% de C y por tanto 20% de B.

3) Para representar una composición (50% de C y 30% de A):
   a) Buscar los puntos que, sobre los ejes que confluyen en C (AC y BC), representan 50% de C y unir dichos puntos (Q y R) con una recta (QR).
   b) Buscar, sobre los ejes que confluyen en A (AB y AC), los puntos que representan 30% de A (S y T) y unirlos por otra recta (ST).
   c) El punto de intersección (P) de las rectas antes trazadas (QR y ST) representa la composición deseada: 50% de C, 30% de A y 20% de B.

4) Una recta que pasa por un vértice del triángulo representa todas las mezclas en las que dos componentes se encuentran en proporciones constantes. Así, en la siguiente figura, X

sobre el eje AB representa una mezcla de A y B en proporción BX:XA. Cualquier punto de la recta CX corresponde a una mezcla ternaria en la que la relación A:B será siempre BX:XA. Por tanto la recta XC representa la dilución de una mezcla inicial X en C puro, mientras que la recta YX representa la eliminación progresiva de C a partir de una mezcla ternaria de composición Y.

5) El resultado de unir dos mezclas, P y Q, por ejemplo, se establece mediante la *regla de la palanca*. Sea R el punto de la nueva composición global. Entonces:

$$\frac{\text{Peso de mezcla P}}{\text{Peso de mezcla Q}} = \frac{QR}{PR}$$

O bien:

$$\frac{\text{Peso de mezcla P}}{\text{Peso total de P + Q}} = \frac{QR}{PQ}$$

Para la resolución de algunos problemas particulares se pueden utilizar otras figuras aparte del triángulo equilátero.

Por ejemplo, en los cálculos de sistemas de extracción líquido-líquido se utilizan frecuentemente triángulos rectángulos. Este tipo de construcción es conveniente cuando se trate de disoluciones diluidas, ya que el uso del triángulo rectángulo tiende a concentrar los datos en uno de los ángulos, lo cual limita su utilidad en otros casos.

APLICACIONES EXPERIMENTALES.

- Unidad piloto que permite el estudio de tres diferentes tipos de extracción.
- Extracción sólido - líquido.
- Extracción líquido-líquido con disolvente / medio extractor mas volátil.
- Extracción líquido-líquido con disolvente / medio extractor menos volátil.
- Estudio de la influencia en el uso de solventes para la separación de diferentes tipos de mezclas.
- Selección de solventes más adecuados para los tres diferentes tipos de extracción en el caso sólido - líquido y líquido - líquido.
- Influencia de la temperatura en las condiciones de proceso.
- Diferentes modos de operación en un proceso de transferencia de masa.
- Balances de materia y energía en procesos de separación.
- Balances de materia y energía en el condensador.
- La unidad piloto permite el estudio para la separación de efluentes contaminados y otras aplicaciones ambientales.

Práctica. Extracción de clorofila.

- **Objetivos:**

Llevar a cabo la extracción de clorofila a 83 °C

- **Proceso experimental:**

Es importante que se revise el procedimiento de operación del equipo en la sección 8 de este manual.

1. Llenar la canastilla de extracción con espinaca.
2. Agregar por medio de la válvula de vacio la cantidad suficiente de solvente de extracción para cubrir la espinaca.
3. Encender el equipo.
4. Agregar al recipiente de 10 lts una solución de 0.4 mol de etanol-agua (de se recomienda un volumen máximo de 7 lts), por medio de la bomba de pulsos.
5. Activar las resistencias de calentamiento para empezar a destilar el alcohol.
6. Mantener constante la temperatura a 83 °C.
7. Tomar muestras del recipiente que contiene la espinaca y por espectrometría obtener la concentración de la clorofila, (La **clorofila** A funciona con fotones de **longitud de onda** 450 nm (azules), y la **clorofila** B necesita fotones de 650 nm (rojos).
8. Cuando la concentración se mantenga constante, tomar nota del volumen total de etanol y la cantidad total de clorofila que se extrajo.
9. Poner en "0" las perillas de resistencias.
10. Apagar y desconectar el equipo.

- **Manejo de resultados:**

1. Calcular la cantidad de etanol no destilado y compararlo con la cantidad de etanol no destilado con el teórico.
2. Calcular, con base en la cantidad de alcohol destilado, calcular el calor absorbido por el agua de enfriamiento.

Otras experimentaciónes que se pueden considerar para la extracción sólido-liquido es con zanahoria o con higuerilla. Para la extracción del aceite esencial de higuerilla es necesario utilizar como solvente de extracción hexano y mantener el lecho de extracción a 60°C.

Práctica . Extracción líquido-liquido.

Objetivo.

Realizar la separación de un componente de una mezcla binaria en una columna empacada mediante un solvente de extracción y formar una nueva mezcla que pueda ser separada por métodos no isotérmicos.

Procedimiento experimental.

Se proponen cinco mezclas ternarias para realizar extracciones. **Por ningún motivo introduzca mezclas con acetona o reactivos que generen acetato de etilo. Este compuesto puede dañar los componentes de teflón del equipo.**

Las mezclas de muestran en la siguiente tabla:

Mezclas propuestas.

A	B	C	AB	C
Acido acético	Butanol	Agua	Ac. Acético + Butanol	Agua
Acido acético	Hexano	Agua	Ac. Acético + Hexano	Agua
Acido acético	Tolueno	Agua	Ac. Acético + Tolueno	Agua
Etanol	Tolueno	Agua	Etanol + Tolueno	Agua
Etanol	Hexano	Agua	Etanol + Hexano	Agua

SEGURIDAD E HIGIENE.

INDICACIONES DE TRABAJO.

- Todas las actividades que se realicen con este equipo deberán estar supervisadas por el investigador responsable.
- Es obligatorio que todos los operadores usen:
- Bata y lentes de seguridad durante la operación y limpieza de este equipo.
- Es indispensable estudiar las substancias y su toxicidad antes de iniciar cualquier experimento.
- Es importante verificar que los extractores intercambiables se encuentren perfectamente sujetos a la estructura.
- **No usar como mezcla de experimentación la mezcla Agua, Acetona, Acido acético, ya que se forma acetato de etilo el cual puede dañar algunos de los componentes del equipo.**

UNIDAD DE CALENTAMIENTO.

- La unidad de calentamiento puede calentarse y causarle quemaduras.
- Se debe de probar en frio la unidad de calentamiento para que verificar que no existen fugas. En caso de fugas apagar el equipo y dejar enfriar antes de reparar las fugas.
- Nunca deberá prenderse la unidad sin supervisión.

RIESGO DE CHOQUE TERMICO.

- El riesgo de choque térmico existe cuando se somete a calentamiento el recipiente de vidrio sin liquido y una vez caliente se agregan sustancias frias. Para evitarlo; agregar las sustancias antes de iniciar el calentamiento.