

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
MANUFACTURERA

EXTRACCIÓN LÍQUIDO LÍQUIDO DE  
SOLUCIONES DE COBRE USANDO  
LIX - 984

## TESIS

Para optar el título profesional  
de Ingeniero Químico

Cesar Ceferino Berto Vega  
César Augusto Silva Mendoza

Lima - Perú

1995

# EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO DE SOLUCIONES

## DE COBRE USANDO LIX 984

INDICE

RESUMEN

INTRODUCCION

CAPITULO I : PRINCIPIOS TEORICOS

1.1 Extracción Líquido - Líquido

1.1.1 Teoría

1.1.2 Ley de Distribución

1.1.3 Equilibrio de Fases

1.1.4 Diagrama de Fases Ternarios

1.1.5 Sistema de dos líquidos parcialmente solubles y un sólido

1.1.6 Curvas de Distribución

1.2 Intercambio Iónico

1.2.1 Antecedentes

1.2.2 Definiciones

1.2.3 Tipos de Intercambiadores Iónicos

1.2.4 Intercambio Iónico con formación de Quelatos

1.3 Métodos de Extracción Líquido - Líquido

1.3.1 Contacto Simple

1.3.2 Contacto Simple de Etapas Múltiples

- 1.3.3 Contacto de Etapas Múltiples a Contracorriente
- 1.3.4 Contacto Diferencial Continuo a Contracorriente
- 1.3.5 Extracción de Etapas Múltiples a Contracorriente por lotes
- 1.3.6 Extracción a Contracorriente con Reflujo
- 1.3.7 Extracción con Doble Solvente
  
- 1.4 Equipos de Extracción Líquido - Líquido
  - 1.4.1 Columnas no Agitadas
  - 1.4.2 Columnas Agitadas con Rotor
  - 1.4.3 Columnas Agitadas Pulsantes
  - 1.4.4 Extractores Horizontales
  - 1.4.5 Características de los Equipos de Extracción Comerciales y Aplicaciones Típicas
  
- 1.5 Extracción con disolventes aplicada a la hidrometalurgia del cobre

## CAPITULO II : RECUPERACION DE METALES USANDO LIX

- 2.1 Reseña Histórica
- 2.2 Estructura de los Reactivos LIX utilizados en la recuperación de Cobre
- 2.3 Trabajo del Reactivo en la extracción y reextracción
- 2.4 Recuperación del Cobre de soluciones lixiviadas con Acido Sulfúrico

2.5 Requerimientos para el trabajo eficiente de los reactivos LIX

2.6 Reactivos LIX - 984

2.6.1 Descripción

2.6.2 Propiedades Típicas

CAPITULO III : ESTUDIO TEORICO-EXPERIMENTAL DE LA EXTRACCION Y REEXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DE COBRE USANDO LIX 984 -NIVEL DE LABORATORIO

3.1 Ensayos de Laboratorio

3.1.1 Equipos

3.1.2 Materiales

3.1.3 Reactivos

3.1.4 Procedimientos Experimentales

3.1.5 Resultados de las Pruebas

3.2 Discusión de Resultados

3.2.1 Extracción Líquido - Líquido de Cobre con LIX-984

3.2.1.1 Evaluación del máximo de cobre cargado

3.2.1.2 Evaluación de la Velocidad de Extracción

3.2.1.3 Estudio de las Curvas de Equilibrio

3.2.1.4 Evaluación del Efecto de la Concentración

3.2.1.5 Estudio de las Constantes de  
Distribución

3.2.2 Reextracción Líquido - Líquido de Cobre  
con LIX-984

3.2.2.1 Evaluación de la velocidad de reex-  
tracción

3.2.2.2 Estudio de las Curvas de Equilibrio

CAPITULO IV : ESTUDIO TEORICO EXPERIMENTAL DE LA  
EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DE COBRE  
USANDO LIX-984 - PLANTA PILOTO

4.1 Mezcladores Decantadores

4.1.1 Características Generales

4.1.2 Ecuaciones de Diseño

4.2 Pruebas de Extracción a nivel de Planta Piloto

4.2.1 Consideraciones para el diseño de la prueba

4.2.2 Descripción del Sistema

4.2.3 Procedimientos Experimentales

4.2.3.1 Calibración de Rotámetros

4.2.3.2 Prueba de Dispersión

4.2.3.3 Prueba de Extracción

4.2.4 Resultados

4.2.4.1 Calibración de Rotámetros

4.2.4.2 Equilibrio de Fases durante la  
extracción

#### 4.3 Cálculos

4.3.1 Determinación de las Constantes que gobiernan las curvas de equilibrio de fases

4.3.2 Determinación de la variación de las concentraciones de cobre con respecto al tiempo para la prueba piloto

4.3.3 Simulación de la Prueba en Planta Piloto, aplicando Métodos Numéricos (Runge Kutta)

4.3.4 Resultados de la Simulación

#### 4.4 Discusión de Resultados

4.4.1 Prueba en Planta Piloto

4.4.2 Solución de la Ecuación Diferencial por el Método Runge Kutta.

### CAPITULO V : ANTEPROYECTO PARA LA INSTALACION DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCION DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO A PARTIR DE SOLUCIONES POBRES DE COBRE

5.1 Descripción del Proceso

5.2 Criterios de Diseño

5.3 Diagrama de Flujo

5.4 Proyección Económica

## CAPITULO VI : CONCLUSIONES

6.1 Con respecto a las Pruebas de Laboratorio

6.2 Con respecto a las Pruebas de Planta Piloto

## BIBLIOGRAFIA

## APENDICE

1. Métodos de Cálculo Utilizados

2 Aplicación del Programa Runge Kutta para la Determinación de la Variación de Concentración de Cobre con respecto al Tiempo durante la Extracción

3, Definiciones Previas

4. Estimación Económica

5. Análisis de Terceros

## RESUMEN

El presente trabajo, "EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DE SOLUCIONES DE COBRE USANDO LIX 984", investiga el comportamiento del reactivo LIX 984, perteneciente a una variedad de reactivos de la serie LIX de la Cia. HENKEL INDUSTRIES. Dichos reactivos son en la actualidad desarrollados para el trabajo de extracción líquido-líquido de soluciones diluidas de cobre, que son remanentes del tratamiento de los minerales.

Para la realización de este trabajo se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de J.R. Lindley e Hijos y el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química de la UNI cuyos responsables brindaron el apoyo necesario para la culminación de este trabajo.

Así en base a informaciones obtenidas, se elaboró un plan de trabajo que nos permitió evaluar características de extracción y re-extracción a diferentes condiciones de pH, concentraciones y relaciones de mezcla, estas características permitieron conocer mejor el reactivo lo que ayudó a generar curvas de equilibrio y distribución para poder estimar comportamientos a otras condiciones de mezcla y pH.

Se ha determinado que cada curva de equilibrio tiene un comportamiento que se aproxima a una ecuación exponencial, lo que simplifica su manejo para la solución de ecuaciones de diseño que permiten evaluar



el comportamiento de la extracción con respecto al tiempo. Para la realización de las pruebas de planta piloto se han tomado en cuenta consideraciones de tipo teórico-prácticas que permitieron realizar pruebas con buena eficiencia de extracción sin dañar a los reactivos (formación de emulsiones) lo que indica que el reactivo es capaz de trabajar en ciertas condiciones.

En la práctica el reactivo es fácilmente regenerable lo que indica que su reutilización es viable para varios ciclos, similar a lo que sucede con las resinas de intercambio iónico. Las pruebas de planta piloto permitieron determinar que en condiciones de mezcla y agitación controlada es posible obtener resultados de extracción cercanos al 80% de eficiencia con respecto al equilibrio.

Finalmente las condiciones de la prueba a nivel de planta piloto fueron simulados mediante una ecuación diferencial, la misma que fue resuelta por el método numérico de Runge Kutta.

Para determinar las posibilidades económicas del uso del reactivo en la producción de sulfato de cobre, se realizó la estimación económica para dicho proceso, obteniéndose un perfil económico muy favorable, lo que servirá como referencia para proyectos futuros.

## INTRODUCCION

La creciente necesidad por aprovechar al máximo el cobre de los minerales ha traído como consecuencia el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten la extracción hidrometalúrgica del cobre las cuales además de su probada eficiencia permiten reducir grandemente la contaminación ambiental que se produce cuando se utiliza el proceso convencional (pirometalúrgico).

Dentro de los procesos hidrometalúrgicos se ha desarrollado la extracción líquido-líquido de cobre de soluciones muy diluidas de este metal. Este método de recuperación, permite aprovechar el cobre que normalmente no puede ser recuperado por métodos convencionales.

Desde 1964 cuando la Cia. General Mills Inc. (actualmente Henkel Corporation) lanzó al mercado un reactivo comercialmente llamado LIX-64 altamente selectivo para cobre, se fueron mejorando las propiedades de extracción y selectividad, pH de trabajo, etc., lo que ha permitido la aparición de nuevos reactivos con propiedades mejoradas, como el LIX-984.

El presente trabajo pretende investigar el comportamiento del reactivo LIX-984 durante la extracción y re-extracción de soluciones diluidas de cobre teniendo en cuenta consideraciones ideales del proceso para diferentes concentraciones de cobre, pH y

relaciones de mezcla, las cuales permiten establecer con las relaciones de equilibrio de fases para posteriores estimaciones en el proceso real.

Asimismo se investiga a través de pruebas de planta piloto, si se cumplen las características que se hallan en las pruebas de laboratorio y si existen relaciones matemáticas que puedan predecir el comportamiento de la extracción en estado estacionario.

Se realizará un estudio económico breve, del uso del reactivo LIX 984, para la elaboración de sales de sulfato de cobre que nos permitirá saber la posible rentabilidad del proyecto.

## CAPITULO I

### PRINCIPIOS TEORICOS

#### 1.1 EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO

##### 1.1.1 TEORIA

Se conoce con el nombre de procesos de extracción líquido - líquido, al proceso de separación de los componentes de una solución que depende de la distribución desigual de los componentes entre dos líquidos inmiscibles.

El requisito mínimo para la extracción de líquidos, es el contacto íntimo de dos líquidos inmiscibles, con el fin de que se produzca la transferencia de masa de constituyentes de un líquido (o una fase) a otro, seguida por la separación física de los dos líquidos inmiscibles.

##### 1.1.2 LEY DE DISTRIBUCION

Esta ley enunciada por Nerst, indica que un soluto se distribuye entre dos solventes

inmiscibles en equilibrio, de tal manera que la proporción de las concentraciones del soluto en las 2 fases, a una temperatura dada es una constante si la condición molecular del soluto en las dos fases es la misma.

Se tiene:

$$K = X_{BS} / X_{BA}$$

donde K : coeficiente de distribución.

$X_{BS}$  : fracción en peso de B en una solución rica en S.

$X_{BA}$  : fracción en peso de B en una solución rica en A.

Sin embargo, en esta simple ley de distribución se han encontrado defectos, ya que falla al tratar de acomodarse con los principios termodinámicos.

También falla cuando el soluto distribuido complica el resultado, mostrando tendencias de asociación o disociación en cualquiera de las fases.

### 1.1.3 EQUILIBRIO DE FASES

El conocimiento de las relaciones de equilibrio de fases es vital para las consideraciones cuantitativas de los procesos de extracción. Estos datos establecen las cantidades de solventes que se requieren (y de reflujo, si

se utiliza). Asimismo, esas consideraciones termodinámicas rigen las fuerzas impulsoras que determinan los índices de transferencias de masa. Puesto que la formación de dos fases líquidas estables en contacto una con la otra es un requisito esencial, al menos una de las fases es casi seguro que tendrá solutos que se comportarán termodinámicamente de un modo muy alejado de lo ideal. De hecho, un solvente que tenga una elevada selectividad para un componente debe ser un material en el que los otros componentes tengan grandes coeficientes de actividad y del cual se excluyen esos otros componentes. Por tanto, la expresión cuantitativa de relaciones de equilibrio de fases líquido - líquido implica, de modo inevitable, el uso de métodos para representar propiedades termodinámicas de soluciones no ideales. En el caso más simple, esas soluciones tienen tres componentes: los dos que constituyen la solución de alimentación (A es el solvente de alimentación y B es el soluto) y el solvente S. Sólo si el solvente y el componente A son completamente inmiscibles (una condición que sólo se puede presentar si el sistema permanece muy diluído en B), se podrían emplear relaciones simples, aplicables a mezclas de dos componentes, excepto cuando se pretende utilizar una aproximación burda.

#### 1.1.4 DIAGRAMA DE FASES TERNARIOS

Los equilibrios de fase se suelen presentar en una gráfica triangular equilátera, como en la figura 1.1. Esas gráficas representan isoterms a una presión suficiente para mantener el sistema totalmente líquido. El más común es el tipo I (fig 1.1-a) en el cual la región de inmiscibilidad toca sólo un lado del triángulo. Los pares de líquidos A-B y B-S son completamente miscibles. A y S se disuelven hasta un punto limitado, para proporcionar las soluciones saturadas G y H.

La adición de B a esa mezcla tiende a hacer que A y S se vuelvan más solubles. En el punto crítico P, las dos fases se convierten en una. El soluto B se distribuye entre las fases saturadas, propiciando líquidos en equilibrio, como los que aparecen en M y N, conectados por una línea de unión. Para esta última, el coeficiente de distribución K se define como sigue:

$$K = \frac{X_{BN}}{X_{BM}} \quad \text{ó} \quad K' = \frac{X_{BN}}{X_{EM}}$$

Donde:

$X_{BN}$ : fracción en peso de B en la solución N

$X_{EM}$ : fracción en peso de B en la solución M

$x_{BN}$ : fracción molar de B en la solución N

$x_{BM}$ : fracción molar de B en la solución M

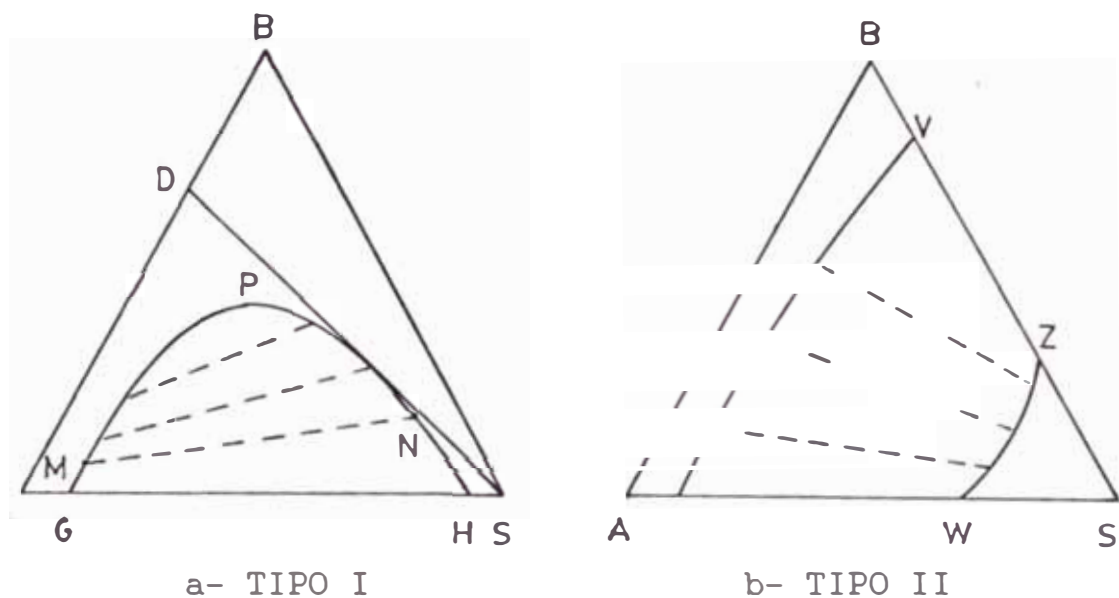


Fig. 1.1 Diagrama de fases ternarios

Por lo común, pero no siempre, las líneas cambian continuamente de inclinación en una dirección, como se muestra en la figura 1.1-a.

Los sistemas en los cuales la pendiente cambia de signo con la concentración de B son solútropos. De todos modos el valor de  $K$  ó  $(K')$  cambia, en general con la concentración de B, convirtiéndose finalmente en la unidad en el punto crítico.

Las soluciones de alimentación se encuentran en la línea AD, las alimentaciones en



el intervalo DB no se pueden procesar con S, puesto que la adición de S a esos líquidos no producirá una mezcla de 2 fases, los refinados estarán en la curva GMP y los extractos HNP.

En los sistemas de tipo II, S sólo es parcialmente miscible tanto con A como con B y se debe procesar una alimentación de cualquier proporción de A y B. Los refinados están en la curva UV y los extractos en WZ.

#### 1.1.5 SISTEMA DE DOS LIQUIDOS PARCIALMENTE SOLUBLES Y UN SOLIDO

Cuando el sólido no forma compuestos como hidratos con los líquidos, el sistema tiene frecuentemente la isoterma de la figura 1.2, un ejemplo es el sistema naftaleno (B), anilina (A), isooctano (S). El sólido B se disuelve en el líquido A para formar una solución saturada en K, y en el líquido S para dar una solución saturada en L. A y S sólo son solubles al grado que se muestra en H y J. Las mezclas en las regiones AKDH y SLGJ son soluciones líquidas homogéneas. Las curvas KD y GL muestran el efecto de agregar A y S sobre la solubilidad del sólido.

En la región HDGJ se forman dos fases líquidas: si se agrega B a los líquidos insolubles

H y J para dar una mezcla M, las fases líquidas en el equilibrio serán R y E, unidas por una línea de unión.

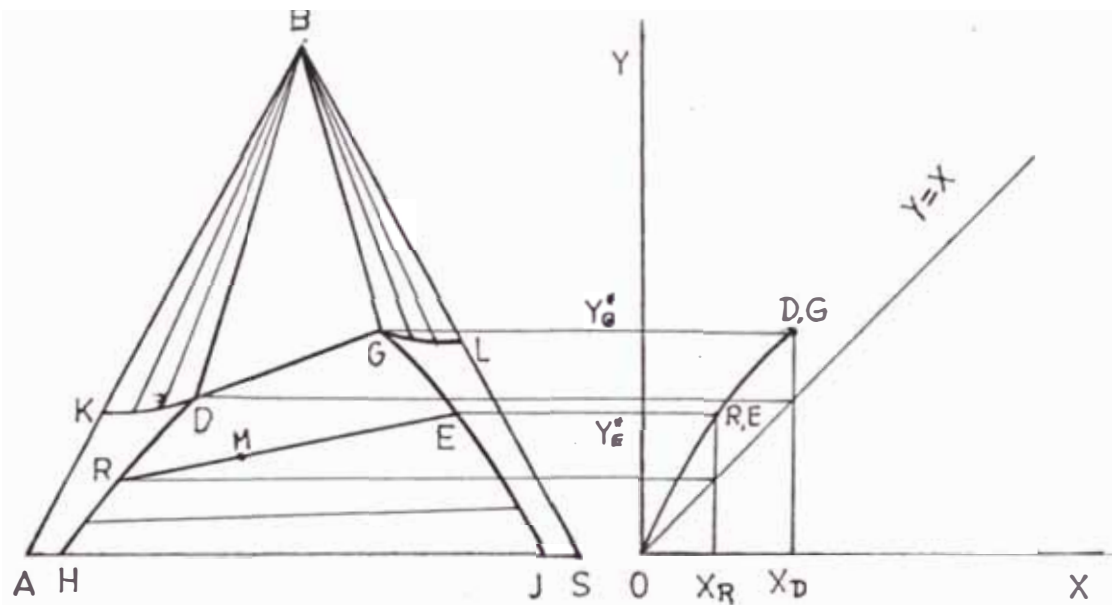


Fig. 1.2 Sistema de dos líquidos parcialmente solubles A, S y un sólido B.

Todas las mezclas en la región BDG constan de tres fases: sólido B y soluciones líquidas saturadas D y G. De ordinario, las operaciones de extracción líquida están confinadas a la región de las dos fases líquidas, que es la que corresponde a la curva de distribución que se muestra.

### 1.1.6 CURVAS DE DISTRIBUCION

Los datos de equilibrio pueden ser representados también por una curva de distribución, obtenida ploteando la composición de equilibrio del soluto en la fase rica en el solvente (Extracto) contra la composición de equilibrio del soluto en la fase rica en el diluyente (Refino).

En la figura 1.3 se muestran diagramas de distribución correspondientes a algunos sistemas típicos:

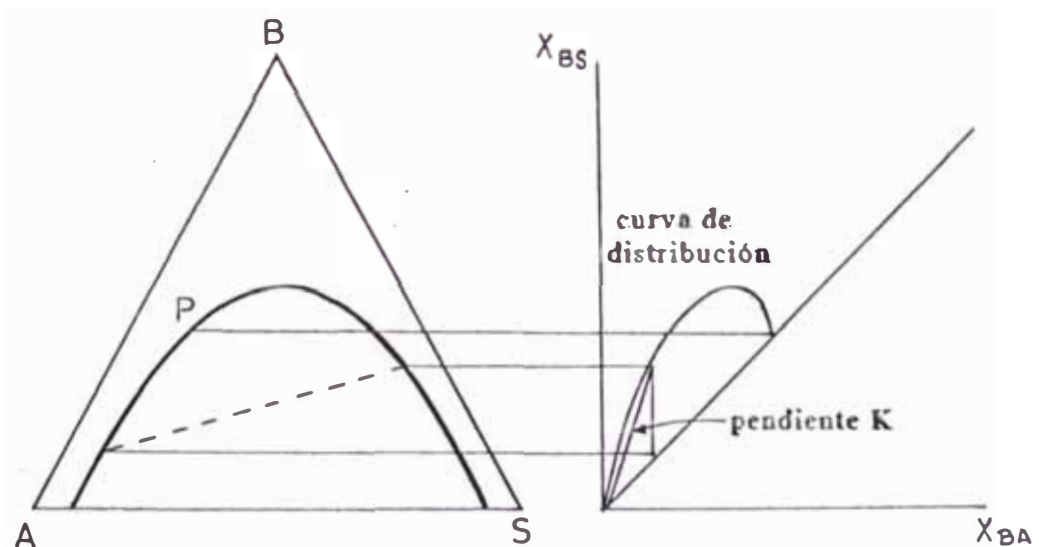


fig. 1.3-a

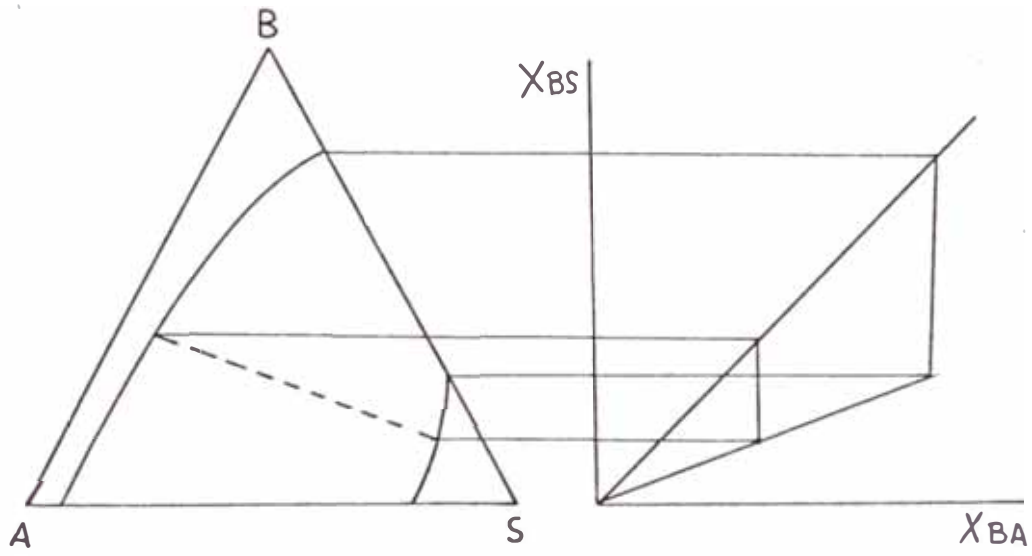


fig. 1.3-b

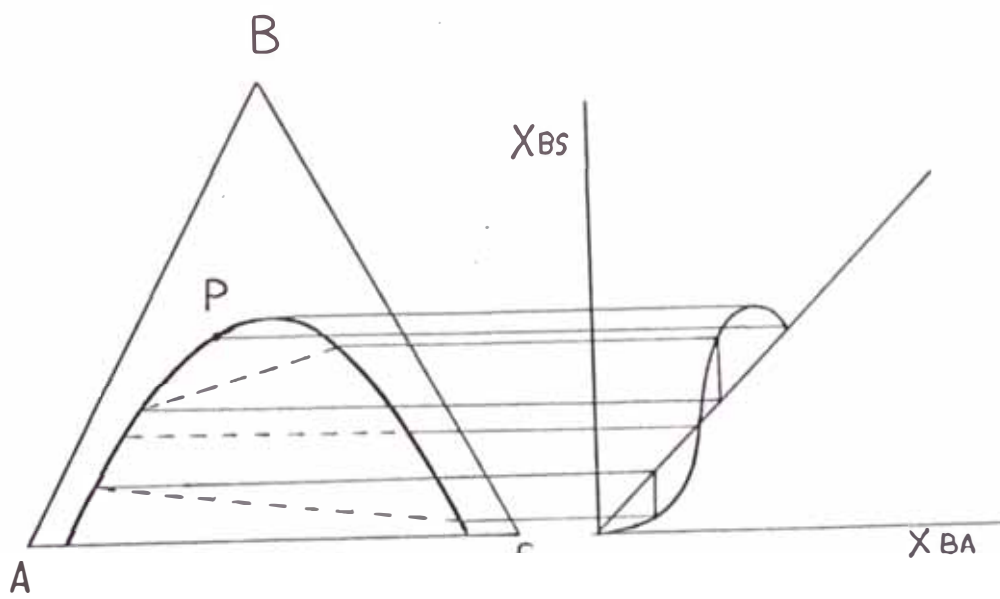


fig. 1.3-c

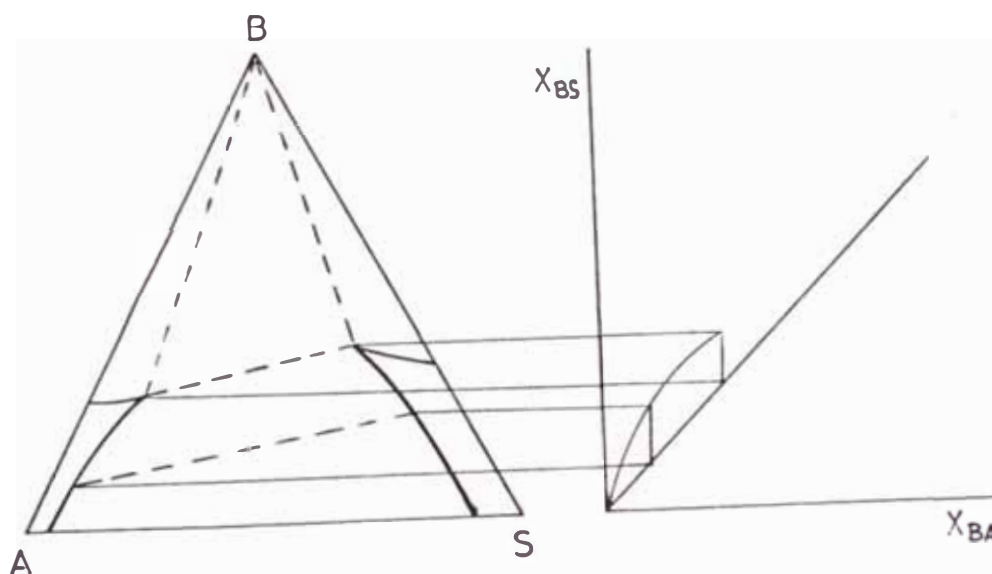


fig. 1.3-d

Fig. 1.3 Curvas de distribución más comunes

La pendiente de una cuerda trazada desde un punto en la curva de distribución al origen proporciona el coeficiente de distribución "K".

Si la distribución favorece a la fase rica en el solvente (Extracto), entonces la curva es localizada por encima de la línea de 45° indicando que la proporción de distribución es mayor que la unidad.

La curva tiende a ser recta a bajas concentraciones cerca del origen, pero termina en

el punto de pliegue sobre la recta  $X_{BS} = X_{BA}$  como se muestra en la figura 1.3-a.

La curva pasa a través de un máximo si el punto de pliegue no está exactamente en el pico de la curva binodal.

## 1.2. INTERCAMBIO IONICO

### 1.2.1 ANTECEDENTES

Aún cuando el fenómeno del intercambio iónico fue notado y reportado vagamente a principios de la historia del hombre, se registraron las observaciones sin tener un conocimiento de las leyes químicas fundamentales que gobiernan estos fenómenos o de las aplicaciones prácticas y comerciales de ellos.

Se le atribuye a H.S. Thompson el inicio práctico de materiales cambiadores de iones, quien observó e informó en 1845, que el peso de un líquido conteniendo amoníaco a través del suelo la sal de amoníaco era absorbida y que cuando el suelo era tratado posteriormente con cal, el amoníaco se desprendía.

El estudio original de Thompson fue continuado por Thomas Way durante los años de 1850 a 1856, Way informó sus descubrimientos en un extenso reporte ante la Royal Agricultural Society of Londres.

Entre estos descubrimientos figuran los siguientes:

- Los descubrimientos de Thompson de que los iones de calcio y magnesio pueden ser removidos al pasar a través de algunas clases de suelo, han

sido confirmados.

- La velocidad de intercambio es menor, tanto por la influencia del coeficiente de temperatura como lo requerido para la reacción química verdadera
- Las propiedades de intercambio iónico se destruyen al calentar el material.

El intercambio de iones es debido a la adsorción física.

Continuando los experimentos básicos de Way, un gran grupo de investigadores llevaron a cabo trabajos de experimentación en este campo. Way no reconoció todo el valor de la acción reversible de los silicatos dobles, que es una función preponderante en la regeneración de los lechos de intercambio, lo que hace práctico este proceso.

Este descubrimiento se debe a Eichorn cuya investigación esclareció y estableció la teoría esencial del intercambio de bases sobre el que el ablandamiento de agua con zeolitas se practica actualmente.

En 1905 Robert Gaus, un químico alemán, produjo minerales cambiadores de iones sintetizados mediante la fusión de arcilla, arena y carbonato de sodio. Gaus llamó a estos productos "PERMUTITAS", del latín 'permuto' que significa 'intercambio'. El nombre "zeolita" se ha



usado mas ampliamente para describir tales minerales ablandadores, ya sea que procedan de arcillas naturales o de materiales sintetizados.

Durante los comienzos del intercambio iónico hasta alrededor de 1936 el proceso fue utilizado únicamente para suavización por remoción del calcio y magnesio y en menor grado, del hierro y magnesio.

Se conocen muchos compuestos de origen natural y también sintéticos, que contienen bióxido de silicio y trióxido de aluminio, con sodio, potasio, calcio, magnesio, bario, estroncio y otros iones alcalinos intercambiables.

El término "zeolita" describe con exactitud estos materiales pero no es verdaderamente aplicable a una amplia variedad de cambiadores de iones que actualmente dominan este campo y se emplean extensamente no sólo para acondicionamiento de agua, sino también para procesar muchas soluciones, para la concentración y recuperación de metales y para procedimientos analíticos.

## 1.2.2 DEFINICIONES

### 1.2.2.1 INTERCAMBIO IONICO

Se conoce como intercambio iónico a la reacción entre dos fases no miscibles: un compuesto con ciertas propiedades y una solución acuosa iónica.

Los iones de la solución acuosa están en contacto con la sustancia llamada "cambiador de iones" y son adsorbidos por éste, el cual libera a cambio otros iones de carga eléctrica (+ ó -) los que son adsorbidos a su vez por la solución.

Las operaciones de intercambio iónico son en esencia reacciones químicas de metátesis entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble en contacto.

### 1.2.2.2 INTERCAMBIADOR IONICO

Los intercambiadores iónicos son materiales que intercambian reversiblemente los iones que contienen, siendo insolubles en los solventes en los cuales se aplican.

Sus características más importantes son:

a) Selectividad: En el intercambio iónico, la

selectividad es una propiedad que consiste en la afinidad que poseen los intercambiadores iónicos por cierto tipo de iones lo que permite aprovecharlos para la separación específica de cierto tipo de iones beneficiosos de los perjudiciales para un proceso determinado, con alta eficiencia.

La expresión cuantitativa de la selectividad puede ser realizada como partes del ión contaminante o viceversa.

b) Regeneración: Es una operación mediante la cual se logra que un intercambiador agotado por la carga de iones quede de nuevo apto para el intercambio iónico. Como regenerante las instalaciones de intercambio utilizan sustancias con alta concentración de iones característicos que liberan los intercambiadores durante su operación normal de adsorción.

En la mayoría de procesos de regeneración de intercambiadores catiónicos se utilizan ácido clorhídrico, sulfúrico o cloruro de sodio, según el catión a reponer en la resina de intercambio.

Para los intercambiadores aniónicos generalmente se usan soluciones de soda cáustica, aunque es posible emplear carbonato

de sodio o amónico.

La regeneración total de un intercambiador depende de las condiciones de operación a las que se somete el intercambiador. En la práctica no se somete a una regeneración total a un intercambiador, debido a lo costoso de ésta.

c) Capacidad de Intercambio: Indica la cantidad de iones que puede adsorber un litro de intercambiador a partir de una solución. En un intercambiador iónico se hallan incorporados un determinado número de grupos activos de intercambio que le permite cambiar iones con el líquido, con el que se contacte. La capacidad es una medida del poder máximo de adsorción, pero en la práctica por diversas razones no es posible aprovechar del todo la capacidad total, por ello se opera a "capacidad útil" que depende de las variables de operación y por lo tanto no es una magnitud constante.

La capacidad total se suele expresar en equivalente por litro de resina o también **gramos** de carbonato de calcio por litro de resina.

### 1.2.3 TIPOS DE INTERCAMBIADORES IONICOS

#### 1.2.3.1 POR EL TIPO DE ION

a) Intercambiadores Catiónicos: Son aquellos que tienen iones negativos "fijos", capaces de intercambiar iones positivos contrarios.

b) Intercambiadores Aniónicos: Son aquellos que tienen iones positivos "fijos" intercambiando iones negativos contrarios.

c) Intercambiadores Específicos para cada tipo de ión: Este tipo de intercambiadores son por ejemplo los intercambiadores por quelación o los llamados intercambiadores por electrones los cuales cambian el numero de oxidación de los iones intercambiados.

d) Intercambiadores Anfotéricos: Generalmente son resinas que contienen grupos tanto ácidos como básicos y son capaces de capturar varios iones dependiendo del pH.

### 1.2.3.2 POR EL TIPO DE MATERIAL DE QUE ESTAN FORMADOS

Los intercambiadores iónicos se fabrican de una variedad de materiales, ya sea naturales o sintéticos, por ejemplo:

a) Resinas: Son compuestos poliméricos macroporosos que contienen grupos específicos, que permiten separar cierto tipo de iones (cationes o aniones), además de fijar sustancias para luego cederlas durante la regeneración, éstos compuestos suelen tener elevada estabilidad química, térmica y mecánica.

Son muy usados en la industria para el ablandamiento de agua, purificación de soluciones de productos orgánicos, decoloración de soluciones, adsorción de cationes muy grandes, etc.

El intercambio iónico en estos casos se produce entre una fase sólida (resina) y otra líquida (solución).

b) Intercambiadores Iónicos Líquidos: Un proceso de intercambio iónico puede proceder no solamente entre una fase líquida y una fase sólida, sino también entre dos soluciones inmiscibles. Una solución de una

base insoluble en agua en un solvente inmisible con agua, puede ser usado como un intercambiador catiónico para iones en soluciones acuosas.

El benceno, tolueno, kerosene, tetracloruro de carbono, éter de petróleo, n-heptano, octano, ciclohexano, etc., son usados como solventes inmiscibles en agua.

Un ión extraído por un intercambiador de ión líquido, puede ser reextraído en una segunda fase acuosa luego de la separación de las dos fases originales. La reextracción puede ser llevada a cabo con una solución alcalina acuosa débil en el caso de los intercambiadores aniónicos y con un ácido débil en el caso de los intercambiadores catiónicos.

Los intercambiadores iónicos líquidos pueden utilizarse para la separación de niobio-tantalio y radio-uranio (cada uno del otro) o del uranio, zirconio, cesio, cinc, cobre, etc.

c) Membranas de Intercambio Iónico: Para propósitos técnicos se producen placas delgadas o membranas a partir de las resinas de intercambio iónico.

La principal característica de las membranas

de intercambio iónico en contraste con las membranas convencionales semipermeables, es aquella de ser selectiva para un solo tipo de ión. Una membrana de intercambio catiónico separando dos soluciones una de la otra, es permeable a cationes bajo ciertas concentraciones, mientras una membrana de intercambio aniónico es sólo permeable a aniones.

d) Papeles de Intercambio Iónico: Estos pueden usarse ventajosamente para la separación cromatográfica rápida o el examen cualitativo rápido de pequeñas cantidades de sustancias

Aún los papeles comunes de filtro tienen algunas propiedades de intercambio iónico, debido a que contienen grupos carboxílicos. Las propiedades de intercambio iónico de los papeles pueden jugar un rol importante en las separaciones cromatográficas con papel.

Los papeles comunes de filtro pueden ser convertidos en papel de intercambio iónico de alta capacidad mediante agentes oxidantes (hipobromito, tetraóxido dinitrógeno) lo cual incrementa el número de grupos carboxilos.

El papel de intercambio iónico preparado de esta manera no es resistente y se disuelve en



álcali. Es mas ventajoso introducir en el material celulósico del papel, grupos carboximetil,  $(-O.CH_2COOH)$  por medio del ácido monocloroacético e hidróxido de sodio, o alternativamente grupos:

*Sulfoetil*  $(-O-C_2H_4-SO_3H)$

*Diethylaminoetil*  $(-O-C_2H_4.N(C_2H_5)_2)$

*ó Fosfato*  $(-O.PO_3H_2)$

Los papeles de intercambio iónico pueden ser preparados también de otra manera, por inmersión del papel de filtro común en una solución coloidal de resina de intercambio iónico o en un intercambiador de iones líquido.

Por medio del papel de intercambio iónico se puede determinar el contenido de óxidos de metales alcalinos y alcalinos térreos de vidrios, la composición de proteínas hidrolizadas, el contenido de alcaloides del tabaco, etc.

## 1.2.4 INTERCAMBIO IONICO CON FORMACION DE QUELATOS

### 1.2.4.1 INTRODUCCION

Muchos reactivos orgánicos conocidos como agentes quelantes pueden extraer, selectivamente iones metálicos y a su vez cederlos a una fase acuosa.

En los sistemas de extracción de quelatos, los agentes orgánicos quelantes actúan como ácidos débiles y contienen un grupo donador de manera que forma con el metal un quelato bidentado.

El complejo de la fase orgánica metálica debe contener un número de moléculas quelantes igual a la carga real en el ión metálico para producir especies eléctricamente neutras (5)

La extracción de quelatos metálicos puede ser representada por la reacción de fase heterogénea:



con una constante de equilibrio:

$$K_{11} = \frac{[MX_m][H^+]^m}{[M^{m+}][HX]^m}$$

En términos del tratamiento de la ley de

acción de masas del proceso de extracción, la extracción de metales por agentes quelantes ácidos es el más simple de los equilibrios de extracción heterogéneos y es esencialmente el único tipo de extracción inorgánica, de tratamiento cuantitativo fácil.

La magnitud de la constante de equilibrio  $K_{11}$  es la medida de estabilidad del quelato metálico  $MX_m$  y también una medida de su formación a un pH dado en la fase acuosa.

Para una serie dada de extractantes quelantes cercanamente relacionados, existen relaciones entre la constante de disociación  $K_{Hx}$  del ácido y las constantes de los complejos formados en cualquier metal dado.

En la tabla 1.1 se menciona los principales grupos de extractantes quelantes, los cuales han demostrado ser buenos agentes extractantes, bajo condiciones experimentales dadas.

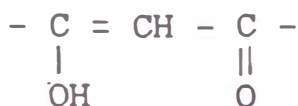
Aún cuando la extracción por solventes fue principalmente diseñada como un método de separación, actualmente se le utiliza en Química Analítica para la separación y concentración de un metal y su determinación cuantitativa. Estos son objetivos obvios, ya que en muchos casos, los extractos son directamente apropiados para la determinación

cuantitativa del metal extraído utilizando métodos espectrales.

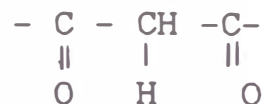
TABLA 1.1

ALGUNOS EXTRACTANTES QUELANTES VERSATILES

$\beta$  - Diketonas

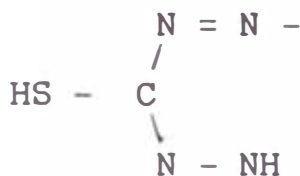


Enol

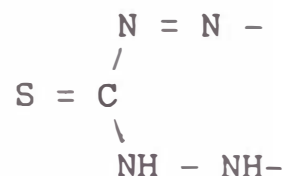


Ceto

Ditizona

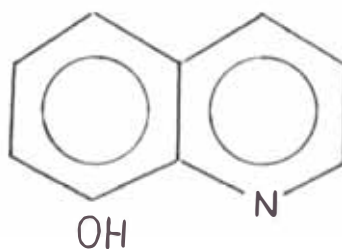


Enol



Ceto

8-Hidroxiquinoleína



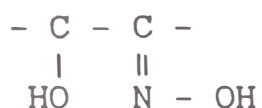
Monooximas



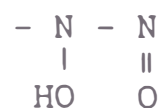
Dioximas



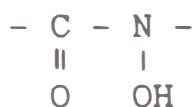
Nitrosofenol



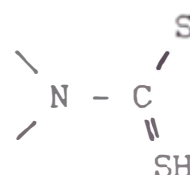
Nitrosoarilhidroxilamina



Acido Hidroxámico



Ditiocarbomato



#### 1.2.4.2 CARACTERISTICAS DE EXTRACCION DE LOS SISTEMAS DE QUELATOS

a) Parámetros de la Fase Acuosa: Aunque casi todos los agentes quelantes que forman complejos metálicos extractables reaccionan con un gran número de metales, la reacción puede ser considerada selectiva o aun específica para ciertos metales, mediante un ajuste apropiado de la solución acuosa inicial.

La mayor parte de reactivos nombrados anteriormente son ácidos débiles o muy débiles, debido a esto, la formación de complejos extractables depende del pH de la solución acuosa. Es decir una manera simple de afectar el equilibrio se logra mediante el ajuste del pH de la fase acuosa.

Este procedimiento es útil para la separación por extracción de los metales, siempre que las constantes de equilibrio sean suficientemente diferentes para los metales en cuestión.

Así, la extractibilidad de metales es directamente proporcional a la potencia "m" de la concentración de iones hidrógeno:

$$D = \frac{K_{11} [HX]^m}{[H^+]^m}$$

La proporción de distribución se incrementará por un factor de 10 para un catión monovalente, por un factor de 100 para un divalente, 1000 para un trivalente y 10000 para un catión tetravalente cuando el pH de la solución es alterado en una unidad.

b) Parámetros de la Fase Orgánica: Los agentes quelantes que forman quelatos metálicos extractables no cargados tienen por lo menos dos grupos funcionales ingresando en la reacción con el ión metálico.

Uno de los grupos de la molécula quelante, es un grupo OH ó SH y no necesariamente un átomo de carbono. El otro es un grupo básico

funcional capaz de coordinar por sus propiedades de donador de metal. El hidrógeno del OH es reemplazado por un equivalente de metal y se forma un anillo estable, usualmente de 5 ó 6 miembros.

La estabilidad del quelato dependerá por supuesto de la naturaleza básica de la coordinación y la acidez del grupo OH además de la naturaleza ácida del número de coordinación y la habilidad de coordinación del metal. El último factor es usualmente común a todos los agentes quelantes y formadores de complejos.

Factores estructurales afectan tanto a la acidez del grupo OH y la fuerza básica del átomo donador. Adicionalmente la posición relativa de los dos miembros activos en la molécula quelante, afectarán la efectividad de extracción del agente, determinando el tamaño del anillo quelato formado.

Además del efecto de la acidez del agente quelante en su eficiencia de extracción, dos aspectos diferentes deben considerarse:

1. Un agente quelante más básico formará un quelato metálico más estable.
2. De otro lado, un agente quelante más ácido con un valor de pK muy bajo, será más útil para la extracción de metales de la

solución acuosa ácida. Así, por ejemplo, la acetil-acetona ( $pK = 8,93$ ) no extraerá torio cuantitativamente de una solución acuosa por debajo de  $pH = 5,0$ ; en cambio fenolyl.trifluoro.acetona ( $pK = 6,31$ ) extraerá el metal completamente a un  $pH$  tan bajo como 1. Un  $pH$  bajo frecuentemente es necesario para evitar la hidrólisis de los iones metálicos.

### **1.3. METODOS DE EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO**

Para la extracción líquido - líquido se pueden utilizar cualquiera de los métodos operacionales, por medio de los cuales se pueden realizar procesos de transferencia de masa.

Generalmente en los procesos industriales se utilizan contactos continuos a contracorriente, de etapas múltiples en una serie de mezcladores y decantadores o una torre de platos, o bien el contacto diferencial a contracorriente en una torre continua del tipo empacado o con agitación mecánica.



### 1.3.1 CONTACTO SIMPLE

El método más simple y el más común a escala laboratorio es reunir las cantidades totales de solvente y alimentación en un contacto y, a continuación, recuperar el producto y solvente sin extracción adicional (ver Fig. 1.5). Este método es el menos eficaz y raramente resulta factible a escala industrial. Tal como se lleva a la práctica, en general se obtiene una aproximación cercana al equilibrio, por tanto la cantidad de soluto extraído se fija sólo mediante relaciones de equilibrio y la cantidad de solvente que se utiliza.

La recuperación de soluto es pequeña, a menos que se utilice una proporción muy alta de solvente, en cuyo caso, la concentración de la capa de extracto es pobre. Las operaciones pueden ser continuas o por lotes.

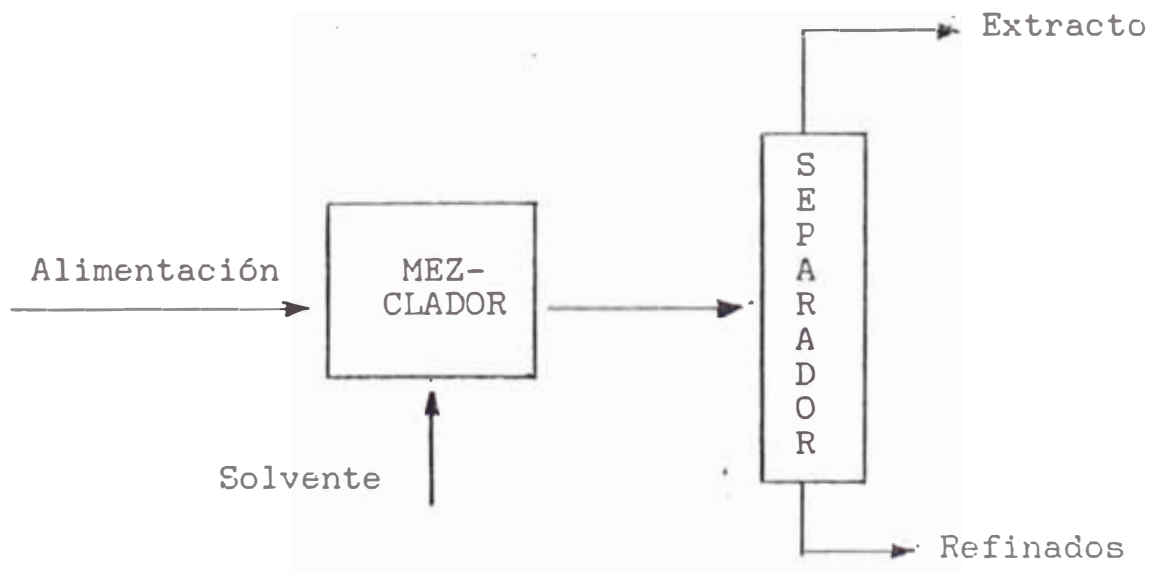


Fig. 1.5 Extracción de Contacto Simple

### 1.3.2 CONTACTO SIMPLE DE ETAPAS MULTIPLES

En la figura 1.6 se ilustra esquemáticamente este procedimiento (a veces denominado contacto de etapas múltiples de corriente cruzada). La cantidad total de solvente que se debe utilizar se divide en varias porciones. A continuación, esa alimentación se trata con cada una de esas porciones de solvente fresco, en una serie de operaciones y etapas sucesivas; el refinado procedente de la primera etapa de extracción se trata con solvente nuevo en una segunda etapa, y así sucesivamente.

Si se utilizan un número suficiente de etapas y una cantidad suficiente de solvente, el refinado se puede separar del componente extraído hasta un punto elevado, pero con cualquier cantidad especificada de solvente, se obtiene una extracción finita del extracto, conforme el número de etapas tiende al infinito. Los resultados varían por la distribución proporcional del disolvente entre etapas. Si es válida la ley de distribución ideal, se obtendrán mejores resultados con cantidades iguales de disolvente en cada etapa. A menos que el portador de la alimentación sea en gran parte inmiscible con el disolvente de extracción, la separación entre los componentes de la alimentación tenderá a ser

deficiente. Se necesita una proporción excesivamente grande de disolvente para obtener un grado elevado de extracción por este método y la concentración del soluto en la capa de extracto se hace cada vez más diluída en las etapas sucesivas.

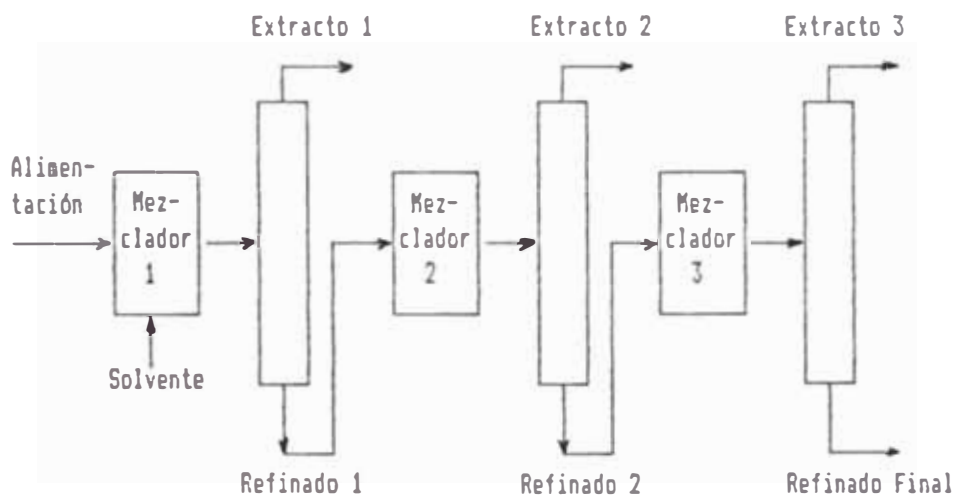


Fig. 1.6 Extracción Simple de Contacto, en Multietapas

### 1.3.3 CONTACTO DE ETAPAS MÚLTIPLES A CONTRACORRIENTE

Este método es mostrado en la figura 1.7. El solvente limpio y el material de alimentación entran por extremos opuestos y de una serie de etapas de extracción.

Las capas de extracto y refinado pasan continuamente y a contracorriente de una etapa a

otra a través del sistema. Se puede emplear cualquier número de etapas y los números más comunes son tres y seis. El sistema se puede componer de una serie de mezcladores, cada una de ellos con su decantador, o bien, se puede utilizar algún tipo de columnas de platos.

El método corresponde al de una columna de destilación de platos, para una cantidad dada de solvente y un número fijo de etapas, su eficiencia sobrepasa a la del contacto simple de etapas múltiples.

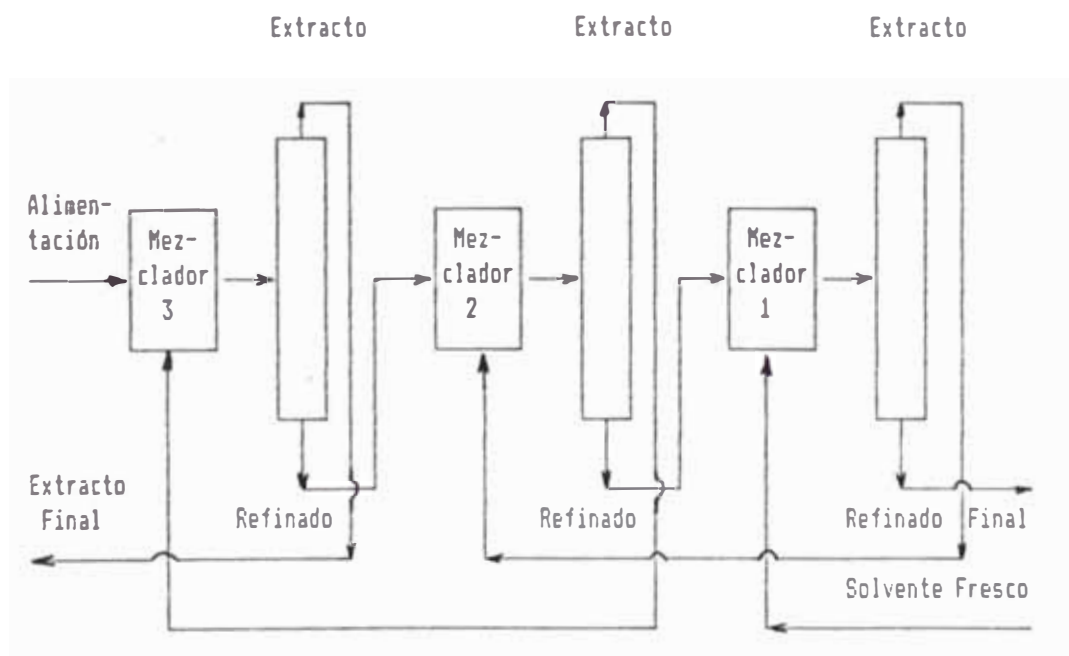


Fig. 1.7 Extracción de multietapas a contracorriente, 3 etapas

#### 1.3.4 CONTACTO DIFERENCIAL CONTINUO A CONTRA-CORRIENTE

Este método se ilustra en la figura 1.8 . Si se subdivide una de las fases y se permite que pase en forma continua y a contracorriente a través de la otra fase, que no está dispersa se obtiene una operación diferencial continua a contracorriente. Ya sea el solvente o la alimentación se pueden subdividir y dejar que pasen a través del otro. Esto se puede realizar ya sea en una columna empacada o en torres con agitación mecánica.

Si se llega aproximadamente al equilibrio, este sistema operacional da teóricamente la máxima "eficiencia". Sin embargo los resultados reales se ven regidos por la rapidez de extracción y la eficiencia de contacto que se puede obtener en equipos que sean verdaderamente del tipo continuo a contracorriente. Al evaluar la eficiencia de este método no sólo se deben tomar en consideración los tamaños de las unidades del equipo, sino también sus costos iniciales y de operación.

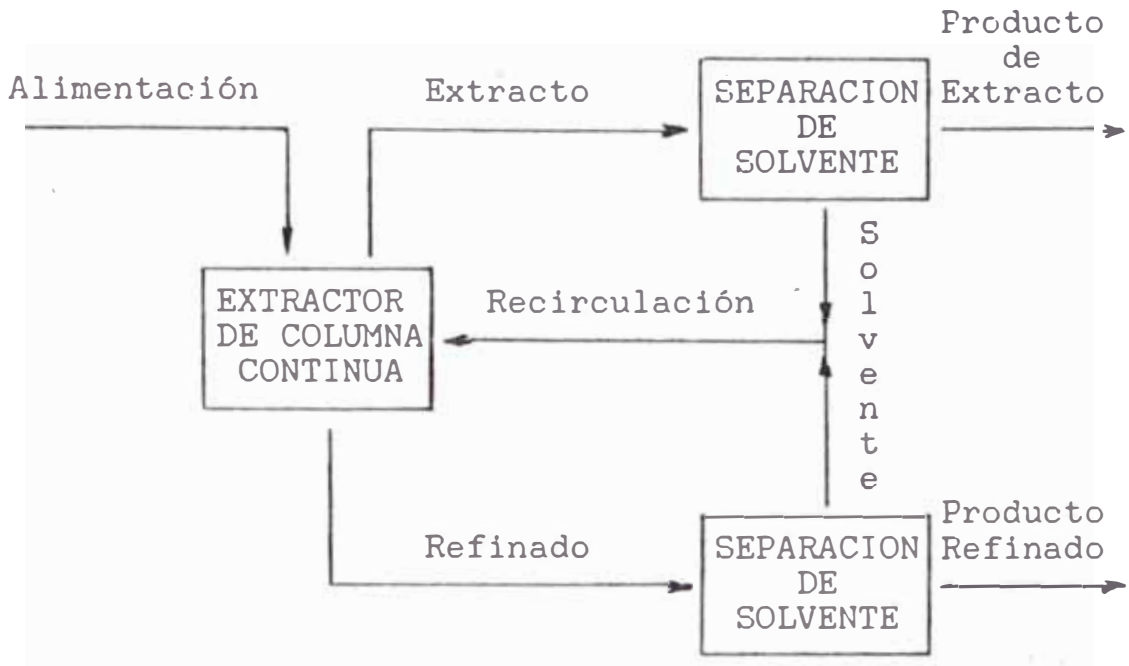


Fig. 1.8 Extracción a contracorriente continuo.

### 1.3.5 EXTRACCION DE ETAPAS MULTIPLES CONTRA-CORRIENTE (PSEUDO) POR LOTES

Para poder simular en el laboratorio una extracción continua de etapas múltiples, se puede utilizar un esquema operacional, como el que aparece en la Fig. 1.9. En este caso, cada uno de los círculos representa una extracción por agitación en equilibrio.

Los productos (en el extremo derecho), E1, E2, E3, R, R1 y R2 representan con los resultados finales e intermedios de un esquema continuo que corresponden a las Figuras 1.7 y 1.8 después que

se hayan realizado suficientes ciclos para que ya cambien las propiedades del extracto y refinado.

El método corresponde al de una columna de destilación de platos y para una cantidad dada de solvente y un número fijo de etapas, su efectividad supera al de contacto simple de etapas múltiples.

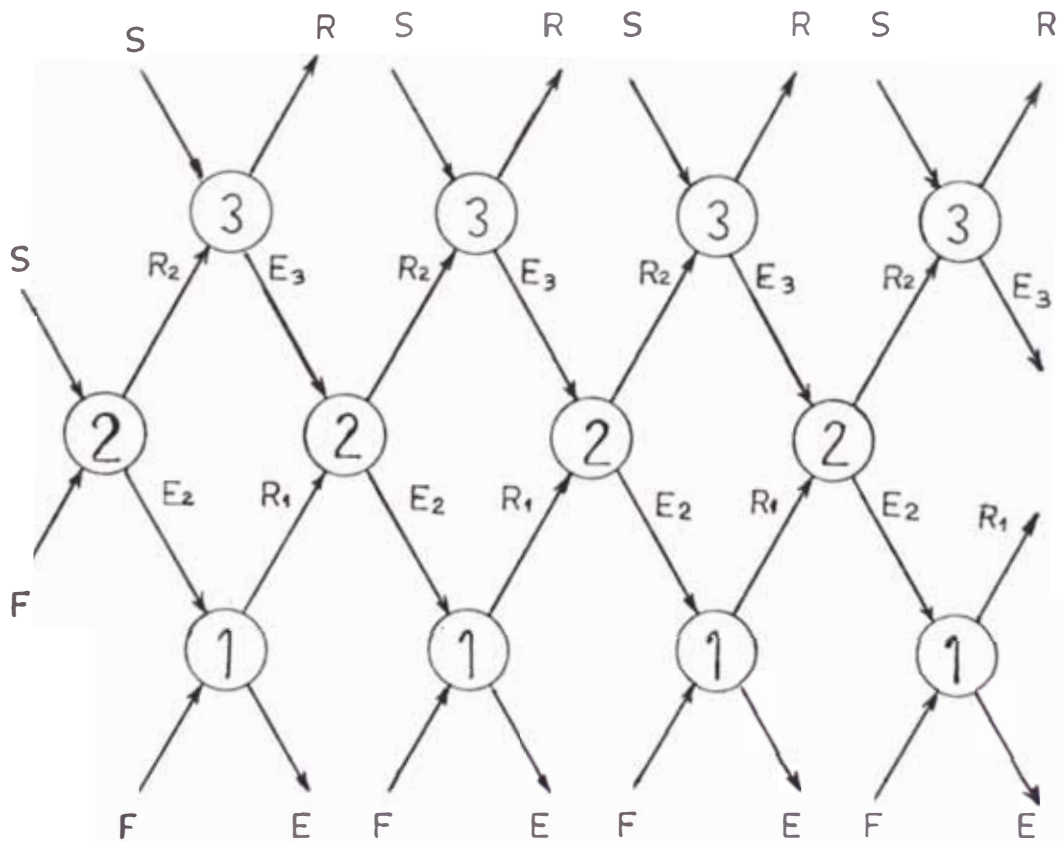


Fig 1.9 Diagrama esquemático de flujo para una simulación por lotes a contracorriente.

### 1.3.6 EXTRACCION A CONTRACORRIENTE CON REFLUJO

En el caso de los sistemas de flujo de las Figuras 1.7 y 1.8 aplicados a diagramas de fases ternarios del tipo ya analizado, es teóricamente posible con un número infinito de etapas a una altura infinita de torre, obtener un refinado libre de B, a condición de que el solvente que se utilice se encuentre libre de B. Sin embargo, el valor teórico limitante de la composición del extracto, en esas condiciones, está en equilibrio con la alimentación y con una alimentación diluída en B.

La composición del extracto se puede elevar más allá del equilibrio simple con la alimentación, proporcionando reflujo en el extremo de extracto en el sistema. El reflujo se proporciona al regresar al extractor una porción de la capa extracto de la cual se ha retirado total o parcialmente el solvente (al menos hasta el punto en que el extracto esté saturado de solvente en el lado rico en A del diagrama de fases).

Esto exige que el material de alimentación entre en un punto intermedio de la torre o el sistema, como se muestra en la Fig. 1.10



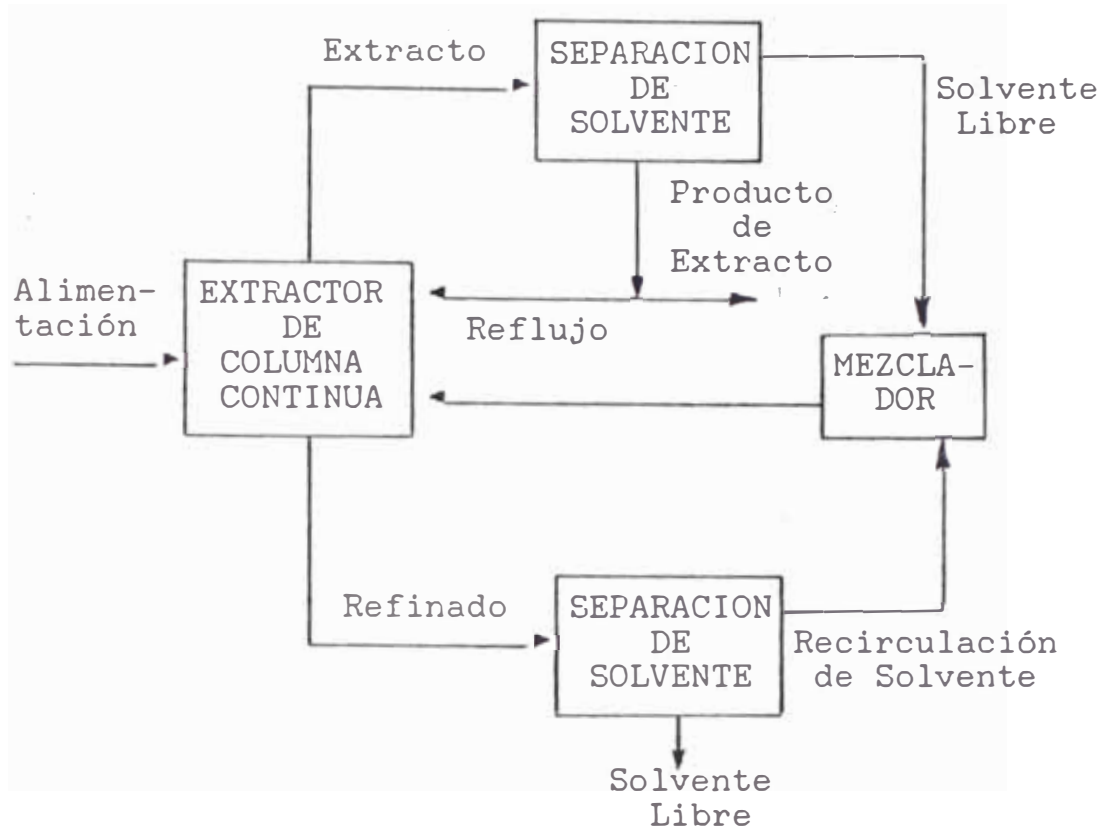


Fig. 1.10 Extracción Continuo a Contracorriente con Reflujo del Extracto

### 1.3.7 EXTRACCION CON DOBLE SOLVENTE

Una mezcla de los componentes B y C que se deben separar, se puede someter a la extracción continua a contracorriente, con los solventes inmiscibles A y D. Entonces se alimenta un extractor de etapas múltiples, en un punto más o menos central con B y C frecuentemente disueltos en una pequeña cantidad de uno de los solventes, sobre todo si las sustancias que se deben separar

son sólidos. Los solventes A y D entran por extremos opuestos del extractor y fluyen a contracorriente, de modo que el componente B se va de preferencia con el solvente A y el C con el D. El reflujó de solutos separado se puede utilizar en cualquiera de los dos extremos del extractor, lo que reduce el número de etapas que se requieren.

Si la alimentación es una mezcla de multicomponentes que contiene "n" componentes, cada uno de los cuales se tiene que recuperar esencialmente puro, se necesitarán "n-1" cascadas a contracorriente. En la Fig. 1.11, se muestra el esquema para una alimentación de tres componentes. Si se desea, se puede utilizar solventes distintos en las dos cascadas.

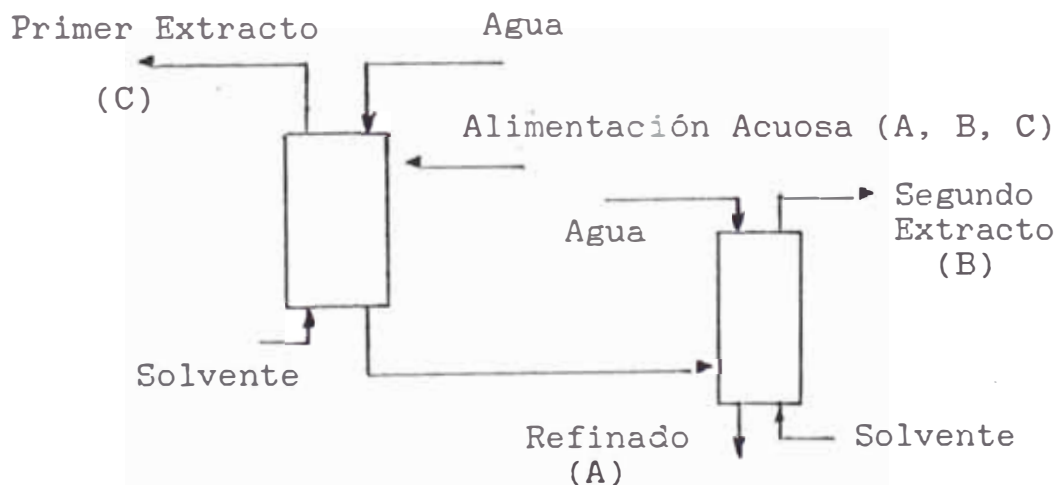


Fig. 1.11 Dos cascadas de doble solvente a contracorriente

#### 1.4. EQUIPOS DE EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO

En un proceso de extracción líquido-líquido el contacto íntimo de la mezcla de alimentación con el solvente y la separación de la mezcla resultante en dos fases son esenciales y el equipo utilizado para la extracción debe ser capaz de cumplir con estos requerimientos.

El equipo de extracción líquido-líquido puede clasificarse de acuerdo a la construcción y características operacionales, en dos amplios grupos: Contactores por etapas y contactores diferenciales.

En el tipo de contactores por etapas hay un número discreto de etapas en las cuales dos fases son equilibradas y luego separadas antes de ser pasadas a contracorriente a cada etapa; mientras que en los contactores diferenciales la composición de fase cambia continuamente.

En el caso de contactores por etapas, desde que el número de ellas puede ser reconocida exactamente y la eficiencia de las etapas son esencialmente altas, el diseño y el escalamiento de los contactores es comparativamente simple.

Como las fases han sido separadas, luego de conseguirse el equilibrio en cada etapa, los compartimientos de sedimentación tienen que ser grandes y de allí que las unidades totales pueden llegar a ser voluminosas especialmente si los sistemas son de

separación simple.

Los contactores diferenciales son más compactos para un proceso continuo dado y usualmente requiere una pequeña área, teniendo normalmente la forma de columnas verticales. Pero el diseño y escalamiento de cada unidad son en general complicados, ya que las dos fases nunca están en equilibrio en los contactores diferenciales.

Los equipos de extracción líquido-líquido pueden ser clasificados también en: tipo columna vertical y extractores horizontales. Estos tipos son a su vez divididos de acuerdo a la forma de agitación proveída por la interdispersión de líquidos en: columna no agitada, agitada por rotor y columnas agitadas pulsantes.

Los principales tipos de contactores son clasificados de acuerdo a este método en la tabla 1.2

TABLA 1.2

CLASIFICACION DE EXTRACTORES LIQUIDO - LIQUIDO

I.- Extractores tipo Columna Vertical

A. No agitados

1. Columna Spray (aspersión)
2. Columna empacada
3. Columna de platos

B. Agitados por Rotor

1. Contactor de disco rotatorio (RDC)
2. Contactor de disco rotatorio asimétrico
3. Contactor Mixco-Lightning
4. Extractor Scheibel
5. Columna anular rotatoria

C. Agitados Pulsantes

1. Columna pulsante spray
2. Columna empacada pulsante
3. Columna de platos perforados pulsantes

II.- Extractores Horizontales

- A. Mezcladores Sedimentadores
- B. Extractores Centrífugos
- C. Contactores de Disco Rotatorio Horizontal
- D. Contactor Raining Bucket

1.4.1 COLUMNAS NO AGITADAS

Estos extractores representan el tipo más simple de contactores disponibles para la extracción líquido - líquido. Ocupan una pequeña área y son de construcción y mantenimiento baratos.

La eficiencia de estos contactores es relativamente baja y son más apropiados para aplicaciones donde el número de etapas requerido

es bajo. Las columnas: spray, empacada, de platos, pertenecen a esta clase.

#### 1.4.1.1 COLUMNA SPRAY

El contactor más simple posible es la columna spray, consiste de una columna vertical en la cual la fase dispersa es sometida a dispersión a través de la fase continua hasta el tope o fondo dependiendo de la densidad de la fase dispersada. Las columnas spray son baratas y tienen una alta capacidad de flujo pero tienen eficiencias pobres. Esto es principalmente debido al alto grado de retromezcla de la fase continua que tiene lugar en la columna.

Es generalmente difícil obtener un equivalente de más que unas pocas etapas teóricas en la instalación de una columna spray simple.

#### 1.4.1.2 COLUMNAS EMPACADAS

La eficiencia de la columna spray podría ser incrementada por el uso de un empaque adecuado en la coraza vacía del contactor donde la retromezcla de la fase continua es reducida sustancialmente.

La columna es usualmente rellena al azar

con empaques tales como anillos rasching y monturas Bearl. Los empaques también promueven opalescencia y redispersión de la fase dispersada. Es necesario seleccionar un empaque que sea de preferencia humedecido por la fase continua. El diámetro de la columna es determinado de la capacidad de flujo deseada y de las características de inundación del empaque.

Las columnas empacadas han sido utilizadas extensivamente en la industria, particularmente en casos donde el número de unidades de transferencia es pequeño. Estas generalmente no son adecuadas cuando los líquidos contienen sólidos suspendidos.

#### 1.4.1.3 COLUMNA DE PLATOS BAFFLE

En este tipo de columnas el baffle horizontal suprime considerablemente la retromezcla de la fase continua.

Los baffles dirigen el flujo de la fase dispersada, en la columna depende de su rearreglo. Las velocidades de inundación en la columna depende de las propiedades de los líquidos y de la geometría de la torre.

#### 1.4.1.4 COLUMNA DE PLATOS PERFORADOS

Esta columna consiste de platos de orificio múltiples, los platos eliminan la retromezcla de fase continua casi completamente. El líquido ligero (menos denso) es dispersado en gotas permitiendo que fluya a través de las perforaciones y las gotas dispersadas suben a través de la fase continua, la cual fluye a través del plato.

El líquido pesado también puede ser dispersado invirtiendo la columna. La fase dispersada recorre la columna hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la densidad de la fase dispersada. Esta coalesce y sedimenta bajo o sobre el plato hasta que suficiente altura hidráulica sea lograda, para forzar al líquido a través de la fase continua.

Esta repetida coalescencia y dispersión de la fase dispersada incrementa la velocidad de extracción considerablemente. Esta acción es generalmente una etapa en la operación, pero un diseño cuidadoso provee excelentes capacidades de flujo para este tipo de columnas. Las columnas de platos perforados pueden ser consideradas como una **serie** de columnas cortas, ubicadas una encima de la otra.



#### 1.4.2 COLUMNA AGITADAS CON ROTOR

La **energía** disponible para dispersar un líquido en otro y también para mantener la alta turbulencia necesaria para la rápida transferencia de masa, es debida a la diferencia de densidades en columnas no agitadas y ésta es una seria limitación.

El grado de dispersión y consecuentemente la performance de la columna puede ser considerablemente mejorada por la introducción de algunas formas de agitación mecánica. Esto puede ser hecho por las aplicaciones de un mecanismo de agitación consistente de un eje central rotatorio con impulsores.

Ya que la fuerza de gravedad es utilizada para producir flujo a contracorriente, la agitación mecánica puede también promover retromezcla. Esto es, sin embargo reducido a baffles adecuados. Tales contactores han incrementado los costos de mantenimiento especialmente cuando se manipulan líquidos corrosivos.

Muchos tipos de columnas rotatorias agitadas son actualmente utilizadas en las industrias de procesamiento debido a su alta eficiencia y flexibilidad. La eficiencia de tales extractores depende de la geometría del sistema y de la

potencia de entrada del impulsor. Las propiedades físicas del sistema son también de gran importancia.

Los contactores mas importantes pertenecientes a esta clase son:

- Contactor de disco rotatorio
- Columna anular rotatoria
- Contactor Mixco-Lightning CM
- Extractor Scheibel
- Oldshue-Rushton

#### 1.4.2.1 CONTACTOR DE DISCO ROTATORIO

El contactor de disco rotatorio (RDC) es una de las columnas agitadas con rotor mas ampliamente utilizadas para extracción líquido-líquido. Utiliza la acción cortante de un disco, rotando rápidamente para dispersar los líquidos.

El RDC consiste de una columna cilíndrica separada en compartimientos por medio de anillos planos. Un eje rotatorio montado centralmente, rota por medio de una unidad de engranaje de velocidad variable que lleva un número de discos espaciados igualmente de tal forma que cada disco opera en la parte central de un compartimiento, formado por los anillos del contactor.

El equipo es más versátil ya que su capacidad puede ser variada como se desee y el escalamiento es más fácil cuando es comparado con otros contactores. Una modificación del RDC, en el cual la retromezcla es considerablemente reducida, es el contactor de disco rotatorio asimétrico (ARD).

#### 1.4.2.2 EXTRACTOR CM MIXCO-LIGHTNING

Este difiere en construcción del RDC, en que los discos rotatorios son reemplazados por impulsores de turbina de 4-6 hojas en medio de los compartimientos con buffles. La altura del compartimiento es normalmente seleccionada para que sea igual al diámetro de la columna en forma diferente al RDC y la apertura del anillo del extractor es también mantenida pequeña para proveer mejor distribución de compartimientos.

Treybal ha desarrollado un contactor combinando las ventajas de este extractor y la alta eficiencia del mezclador-sedimentador

#### 1.4.2.3 EXTRACTOR SCHEIBEL

Esta fue la primera columna rotatoria agitada a ser introducida comercialmente. Scheibel ha

desarrollado dos diseños de columnas internamente mezcladas para la Compañía de Equipos para Proceso York, USA.

El diseño preliminar consistió de un tanque cilíndrico con secciones alternas empacadas y no empacadas que sirven como cámaras de mezcla y sedimentación con impulsores tipo turbina centralmente espaciados, funcionando con secciones no empacadas y sin buffles, (este prototipo existe en el Laboratorio de Operaciones Unitarias - #23 -FIQM-UNI).

Las cámaras de sedimentación empacadas fueron normalmente llenadas con empaques York, con aproximadamente 98% de espacios huecos. La última versión de la columna Scheibel incluye una modificación en la cual el impulsor utilizado es cubierto manteniendo los buffles tipo anillo estacionario a cada lado de la paleta en cada compartimiento del rotor. Estos buffles tipo anillo ayudan al fluido a ser dispersado radialmente hacia las paredes. La pared fuerza al fluido a retornar a la entrada central del impulsor a través de la próxima sección empacada.

#### 1.4.2.4 COLUMNA ANULAR ROTATORIA

Esta trabaja sobre el principio de producir la dispersión requerida de una de las fases líquidas, por el esfuerzo cortante que se da en el espacio anular entre la coraza de la columna y el cilindro rotatorio central que funciona por medio de un motor de engranajes.

El espacio anular entre el rotor y la coraza podría ser alterado cambiando el rotor. El tiempo de residencia en este equipo es corto.

#### 1.4.3 COLUMNAS AGITADAS PULSANTES

Mediante la aplicación de una pulsación oscilante a los líquidos en la columna de extracción tal como una columna empacada y una columna de platos perforados, la eficiencia de extracción puede ser incrementada apreciablemente. La mejora de la eficiencia es debida al incremento en ambas de la turbulencia y el área interfacial causadas por la rotura de la fase dispersa.

Los extractores pulsantes fueron creados por Van Dijck. La pulsación puede ser producida por un mecanismo recíprocamente conectado, ya sea al equipo o alejado de él. La alta eficiencia de las columnas pulsantes y la posibilidad de crear la

pulsación lejos del equipo ha hecho que tales columnas sean importantes en la industria nuclear.

En una columna pulsante de platos perforados la pulsación es continuada por toda la columna. La fase dispersada coalesce debajo o encima del plato dependiendo de la fase dispersada y se previene por las fuerzas de tensión superficial que fluye a través de las perforaciones, hasta que una manipulación la empuje a través de los agujeros y la disperse nuevamente luego de vencer a las fuerzas de tensión superficial.

En el otro ciclo de la pulsación la fase continua es drenada a través de las perforaciones. Las unidades pulsantes de aire comprimido han sido propuestas para superar las limitaciones de generar la pulsación por un mecanismo recíprocante en operaciones de gran escala.

#### 1.4.4 EXTRACTORES HORIZONTALES

En esta clase están incluidos: mezcladores-sedimentadores, extractores centrífugos, contactores horizontales de disco rotatorio y contactores de Raining Bucket (cubo derramante).

Estos contactores, con excepción de los

contactores centrífugos, ocupan gran area superficial comparados con los contactores de columna. El espacio vertical ocupado por éstos es pequeño. En general, su eficiencia es alta, particularmente cuando son manipulados sistemas líquidos especiales.

#### 1.4.4.1 MEZCLADOR SEDIMENTADOR

Entre los extractores líquido-líquido, los mezcladores sedimentadores podrían ser considerados como uno de los tipos mas simples. Los líquidos están continuamente en contacto en el mezclador, agitándose completamente y luego, fluyen a otro compartimiento del mismo recipiente o a otro recipiente donde se separan las fases. Los mezcladores-sedimentadores son frecuentemente utilizados en un arreglo de cascada para operación continua. Una cascada de mezcladores - sedimentadores requiere una gran área, la cual depende generalmente de las características de sedimentación de la mezcla líquida.

La agitación intensa requerida para una extracción eficiente, tendrá que ser balanceada contra la formación de una emulsión estable. Las bombas y el sistema de

tuberías incluidas en las instalaciones de los mezcladores-sedimentadores incrementan el costo inicial del equipo.

A pesar de muchas desventajas el uso de contactores mezcladores-sedimentadores está en incremento debido a su flexibilidad y confianza.

Algunas de las características útiles de estos equipos son su capacidad para manipular lodos, la facilidad con la cual la intensidad de agitación puede ser variada independiente de las velocidades de flujo de líquido y la alta eficiencia de sus etapas.

#### 1.4.4.2 CONTACTORES CENTRIFUGOS

En estos contactores la interdispersión de líquidos y la separación de fases son afectadas por la fuerza centrífuga en vez de la fuerza de gravedad utilizada en otros tipos de extractores. Además, en estos equipos, la columna de líquido disponible para forzar los líquidos a través del equipo, es alta de manera que la masa de líquido es rápidamente rotada como en una centrífuga. Por este proceso se obtuvieron velocidades muy altas lo cual resulta en un tiempo más corto de contacto y también menor área



ocupada.

Los extractores centrífugos pueden ser ventajosamente usados para procesar líquidos con tendencias emulsificantes o altas viscosidades o tensiones interfaciales que son difíciles de manipular en otros extractores.

Estas son ventajas importantes, que han hecho que los extractores centrífugos sean muy útiles en la extracción de productos farmacéuticos. Las desventajas son el alto costo inicial y el costo de mantenimiento. El más exitoso y mejor reconocido extractor centrífugo es el extractor Podbielniak.

#### 1.4.4.3 CONTACTOR DE DISCO ROTATORIO HORIZONTAL

En este mecanismo una serie de platos circulares verticales están montados sobre un eje central de una coraza horizontal. El material de los platos rotatorios es humedecido sólo por una fase.

La producción de finas dispersiones de una fase en la otra es, evitada en este extractor y de aquí que es muy útil para sistemas en los cuales una de las fases es muy valiosa.

#### 1.4.4.4 CONTACTOR RAINING BUCKET

Consiste de una carcaza cilíndrica horizontal con un eje central rotatorio, en la cual los buckets son montados entre una serie de discos. El flujo entre las etapas dentro del contactor es por medio de los pequeños espacios periféricos entre la coraza y el borde de los discos.

Durante la operación cada fase es dispersada en la otra, lo cual no es posible en otros tipos de extractores. Este contactor fue originalmente desarrollado para manipular sistemas difíciles de sedimentación, encontrados en la industria del carbón.

Se ha probado que es muy útil para otros sistemas que forman emulsiones estables.

#### 1.4.5 CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS DE EXTRACCION COMERCIALES Y APLICACIONES TIPICAS

En la tabla 1.3 se resumen las principales características de operación de los equipos de extracción más comerciales y sus aplicaciones típicas en los procesos.

## 1.5 EXTRACCION CON DISOLVENTES APLICADA A LA HIDROMETALURGIA DEL COBRE

En la industria de extracción líquido-líquido de  $\text{Cu}^{2+}$  se utilizan reactivos quelantes de tipo ácido, éstos son agentes de extracción específicos para el cobre, que los extraen de soluciones acuosas, según el siguiente mecanismo general de los reactivos de tipo ácido (7):



donde R representa el radical orgánico del agente de extracción. Pero a su vez este grupo de reactivos contienen grupos donadores de electrones capaces de formar complejos bidentados con los iones metálicos.

Por consiguiente, con estos agentes de extracción se combinan las propiedades de extracción mediante intercambio catiónico de los reactivos ácidos y la capacidad para formar compuestos quelatos, específica de estos reactivos.

La mayor parte de los agentes de extracción disponibles actualmente o de los que están bajo consideración para la extracción de cobre son los siguientes:

### REACTIVOS LIX

Fueron los primeros reactivos de extracción con disolventes específicamente diseñados para la extracción selectiva del cobre (II) de disoluciones diluidas de este metal producidos por la Henkel Co. (antes General Mills Inc.). Se han ido desarrollando reactivos desde LIX 63 hasta LIX 984, cada uno de ellos mejorados con respecto a ciertas características de cinética de extracción, capacidad de extracción, selectividad, mínima cantidad de lodos formados con licores de lixiviación, pH, temperatura de trabajo, etc. Esencialmente son hidroximas, salicilaldoximas acompañados de otros reactivos quelantes.

Como cada licor de lixiviación tiene sus características específicas, se tienen reactivos LIX que pueden usarse en forma más favorables que otros, tal como se muestra en la siguiente tabla 1.4.

### REACTIVOS KELEX

Son reactivos fabricados por la compañía Sherex. En 1968 comenzo a disponerse de estos reactivos a escala mas o menos comercial. Sin embargo, su aplicación no ha sido tan frecuente ni tan rápida como la de los reactivos LIX. Solo existen 2 reactivos comercialmente disponibles: el KELEX 100 y KELEX 120.

La composición básica de estos reactivos contiene hidroxiquinoleína, oxima y p-nonilfenol.

A continuación en la tabla 1.5 los detallamos.

### REACTIVOS SME

Son reactivos fabricados por la Shell Chemicals. Recientemente Shell ha vendido los derechos de fabricación y patente del SME 529 a Henkel que los ha redesignado como LIX 84 para la extracción de cobre.

El SME 529 se puede usar para la extracción de cobre amoniacal, aunque también se extraen los metales que puedan formar los complejos aminados  $M(NH_3)_n^{m+}$ .

Estos reactivos se muestran en la tabla 1.6 .

### REACTIVOS ACORGA

Estos reactivos son fabricados por la Cia. Acorga Ltda. La composición de estos reactivos está basada en la 5-nonilsalicilaldoxima. El primer reactivo creado, el P-50, presentaba una serie de características nuevas respecto a las cetoximas como el LIX 64N, aunque tiene una capacidad de transferencia relativamente baja y requiere o bien una reextracción con una concentración de ácido superior a 225 g/l de  $H_2SO_4$ , o un diseño de planta en el que se pueda tolerar la pequeña capacidad de transferencia a expensas de una relación O/A superior a 2/1.

Afortunadamente la mezcla del reactivo P-50 con el nonilfenol o el tridecanol mejora considerablemente las propiedades cinéticas y la facilidad en la reextracción.

A continuación mostramos la tabla 1.7.

TABLA 1.6

REACTIVOS SME (7)

NOMBRE	COMPOSICION	USOS Y PROPIEDADES	LIMITACIONES
SME 529 (LIX 84)	2-hidroxi-5-nonil acetofenona oxima	Similar al LIX 64N ac - tualmente comercializado por la Hankel como LIX 84, mejora las propiedades del antiguo reactivo	En principio cinética lenta
SME 530	Mezcla de SME 529 y 1% de dodecilfenil-n-hexilglioxima	Similar al SME 529. Me - sus propiedades con respecto a la cinética y separación de fases	
LIX 64N	Mezcla de LIX 65N y LIX 63	Muy usado para disoluciones con bajo contenido medio cobre y ácidas. También utilizado en medio amoniacal	Cinética de Extracción media lenta en medio ácido. Se envenena con Cobalto (III) en medio amoniacal
SME 573	Mezcla de 33% de p-dodecilfenil -n - hexilglioxima y 50% de TBP en el dilu -	Mezclado con hidroxioxi - mas, agente sinérgico para la extracción de cobre	Posible competencia en presencia de níquel.

TABLA 1.7

REACTIVOS ACORGA (7)

NOMBRE	COMPOSICION	USOS Y PROPIEDADES	LIMITACIONES
ACORGA P1	5 -nonil salicil - aldoxima	Reactivo base para la serie Acorga P5000 y PT5050	
ACORGA P5000	Mezcla de P50 y nonilfenol	Buenas características para la extracción de cobre	Incompatible con recubrimientos engomados. Posible degradación de modificador.
ACORGA P5100	Mezcla de P50 y nonilfenol en una relación de 1/1	Como el P5000, útil para el tratamiento de disoluciones concentradas de cobre y muy ácidas. Cinética rápida	Incompatible con recubrimientos engomados. Requiere electrolitos muy ácidos en la extracción
ACORGA P5300	Mezcla de P50 y nonilfenol en una relación de 1/3	Cinética más rápida que el LIX 64N. El poder quelante del reactivo está debilitado por la mayor presencia de nonilfenol	Incompatibilidad con recubrimientos engomados. La etapa de reextracción es más difícil que con LIX 64N
ACORGA PT5050	Mezcla de P50 y tridecanol en una relación de 2/1	Similar al P5100, pero compatible con recubrimientos engomados	
ACORGA DG5443	No se ha descrito	Agente de extracción muy selectivo del cobre en medio cloruro.	

## CAPITULO II

### RECUPERACION DE METALES USANDO LIX

#### 2.1. RESEÑA HISTORICA

En 1935 se introdujo la utilización de carbonos sulfonatados que permitieron la captación de los cationes de soluciones de concentraciones altas, pudiendo después, regenerarse el reactivo con un ácido fuerte obteniéndose al mismo tiempo el catión en forma de una solución concentrada, tratable por métodos industriales conocidos.

Al iniciarse la era atómica se desarrolló e impulsó ampliamente el uso de la extracción por solventes para la recuperación de uranio, vanadio y para la obtención de tierras raras y productos de fisión.

Durante la Segunda Guerra Mundial, en 1942, en Estados Unidos a solicitud de la Atomic Energy Comission, se trabajó en procedimientos de extracción por solventes, que permitieron mejorar los rendimientos de las plantas de metales radioactivos.

En 1945 se autorizaron las publicaciones de los informes de los estudios de la extracción por solventes, para emplearse en la hidrometalurgia de



uranio, involucrándose además el empleo de resinas orgánicas, principalmente del tipo amónico (amonio cuaternario, alquilaminas y alcoholaminas).

Además del uranio, en 1952, se logra también la aplicación de la extracción por solventes para licores de lixiviación de metales como cromo, níquel y vanadio.

En 1963 la CIA. General Mills de EE.UU., anuncia el desarrollo de LIX-63, el primer reactivo altamente selectivo para la extracción del cobre. A pesar de su alta selectividad, no era conocido el uso de este reactivo para el tratamiento de licores de lixiviación por estar limitado a pH mayores que 3.

En 1965 la misma compañía, en la actualidad Henkel Co., logra desarrollar un reactivo económicamente aplicable a la hidrometalurgia del cobre, al cual denominó LIX-64. Se trata de una oxima soluble en diversos hidrocarburos y de gran poder selectivo del cobre.

La aplicación de la tecnología con disolventes al tratamiento por vía hidrometalurgia de depósitos de cobre se presentó finalmente a la industria en 1964 con motivo de la reunión anual del AIME donde se describe el comportamiento de LIX-63 como reactivo de la extracción de cobre.

El LIX-63 presentaba dos inconvenientes, el primero de los cuales era que su pH de aplicación mayor que 3 para la extracción del cobre, era muy alto para ser utilizado en la mayoría de licores de lixiviación y el

segundo inconveniente era que la selectividad Cu-Fe no era lo suficientemente buena como la práctica exigía.

Al LIX-63 le siguió en 1965 el LIX-64, el estudio de este reactivo a escala de planta piloto se desarrolló con gran éxito porque se mejoró la selectividad del cobre a pH tan bajos como  $\text{pH} = 1$ . Sin embargo, presentaba el inconveniente de su lenta cinética de extracción.

El siguiente reactivo fue el LIX-64N, introducido en 1969 que mejoraba las características cinéticas de la extracción respecto al LIX-64.

A continuación de estos primeros se diseñaron otros reactivos LIX, cuya misión era posibilitar el tratamiento de otras disoluciones de lixiviación, además de las iniciales que procedían de los procesos de lixiviación en montones.

Así, en 1971 se fabricó el LIX-70 con el fin de ser usado en la extracción de disoluciones ácidas, modificaciones posteriores dieron como resultado la aparición de otros reactivos, capaces de extraer el cobre de diferentes licores de lixiviación (7) tal como se muestra en la tabla 2.1.

TABLA N° 2.1 ORDEN CRONOLOGICO DE APARICION  
DE LOS REACTIVOS LIX (7)

REACTIVOS LIX	AÑO
LIX 63	1963
LIX 64	1965
LIX 64N	1969
LIX 65N	1969
LIX 70	1971
LIX 71	1972
LIX 73	1973
LIX 34	1976
LIX 54	1976
LIX 26	1978 - 79
LIX 622	1981
LIX 860	1983
LIX 864	1983
LIX 865	1983
LIX 84	1985 - 86
LIX 984	1985 - 86

## 2.2. ESTRUCTURA BASICA DE LOS REACTIVOS LIX UTILIZADOS EN LA RECUPERACION DE COBRE

Los reactivos LIX pueden ser clasificados en dos clases distintas, por su estructura y propiedades. Las salicilaldoximas, las cuales son extractantes muy fuertes del cobre y la cetoximas que son extractantes moderados del cobre.

La fuerza de un extractante de cobre está basada en el grado en el cual el equilibrio de extracción y reextracción, mostrado abajo, es alcanzado (9).



Una nueva clase de extractantes combina una cetoxima con una salcilaldoxima en una proporción de 1/1 mol. Esta tercera clase no está basada en la estructura, sino mas bien en la supresión de propiedades desventajosas que las mezclas poseen.

### 2.2.1 SALICILALDOXIMA

Estos reactivos son extractantes de cobre muy fuertes, los cuales muestran rápida cinética de transferencia de cobre y excelente selectividad de cobre sobre fierro.

Los extractantes activos y sus complejos

respectivos de cobre son muy solubles en diluyentes tipo kerosene; muestran separación rápida de fases y no transfieren ácido en exceso de la etapa de reextracción a la de extracción.

Los reactivos son, sin embargo, tan fuertes como los extractantes de cobre que son frecuentemente usados en combinación con un modificador tal como el tridecanol o nonifenol, de manera que pueden ser reextraídos con una solución de sulfato de cobre acidificada, de la cual el cobre de alta calidad puede ser electrodepositado.

El uso de modificadores de equilibrio presenta problemas. Por ejemplo, el uso de nonifenol es conocido por acelerar la degradación del reactivo, así como por tener efectos deteriorantes en ciertos materiales de construcción.

Además, las soluciones lixiviadas conteniendo sílice disuelta frecuentemente tienden a formar emulsiones cuando están en contacto con soluciones extractantes de metales y el problema de sensibilidad de extractantes de cobre a sílice durante operaciones continuas de soluciones acuosas, es intensificada por la presencia de nonifenol.

Una propiedad final de este reactivo que debe ser discutida es la estabilidad. Las

salicilaldoximas son mucho menos estables que las cetoximas y dentro de este grupo el derivado nonil es menos estable que el derivado dodecil, el cual es utilizado en los reactivos LIX.

En circuitos de operación a temperaturas normales, la degradación del reactivo con 5-nonilsalicilaldoxima ha sido calculada aproximadamente al 10% de la recuperación total del reactivo, pero los resultados de la degradación real en circuitos de operación no han sido publicados.

Con circuitos en caliente, la degradación del reactivo podría ser mas significativa y debe ser determinada experimentalmente.

Debe señalarse que ésta es una discusión de las propiedades generales de los reactivos. Las soluciones lixiviadas en forma individual pueden variar su comportamiento de acuerdo al diseño del mezclador, temperaturas y procedimientos de operación.

Todos estos factores de acuerdo al reactivo y al diluyente son importantes para la forma como trabaja una planta.

En la tabla 2.2 se menciona la composición de algunos extractantes de cobre más comerciales.

TABLA 2.2  
COMPOSICION DE ALGUNOS EXTRACTANTES DE  
COBRE COMERCIALES

EXTRACTANTE	COMPOSICION
HS-LIX 64N/CETOXIMA	Una mezcla de 2- hidroxí- 5-nonilbenzofenona oxima y 5, 8 dietil-7 hidróxi- 6 dodecanona oxima en kerosene.
HS-LIX 65N/CETOXIMA	2-hidroxí-5nonilbenzofe- nona oxima en kerosene.
LIX 860/SALICILALDOXIMA	5-dodecilsalicilaldoxima en kerosene.
LIX 864/MEZCLA	Una mezcla de HS-LIX 64N con LIX 860
LIX 865/MEZCLA	Una mezcla de HS-LIX 65N con LIX 860
LIX 622/SALICILALDOXIMA	Una mezcla de 5-dodecil. salicilaldoxima y tride- canol en kerosene.
LIX 984/MEZCLA	Una mezcla de LIX 860 y LIX 84 en proporción volumétrica 1:1

### 2.3. TRABAJO DEL REACTIVO EN LA EXTRACCION Y RE-EXTRACCION

Los reactivos LIX en sus diversas presentaciones, tienen grupos orgánicos, que trabajan como agentes de quelación, éstos realizan la captura del ión metálico en ciertas condiciones de pH, relaciones de mezcla y concentraciones del reactivo LIX y del ión metálico en las dos fases; las cuales inciden en la mayor o menor capacidad de extracción.

Los reactivos LIX presentan reacciones semejantes a las de intercambio iónico. Se puede invertir la reacción alterando la concentración de uno de sus componentes.

Las ecuaciones de equilibrio para el LIX y los cationes en solución son descritos como:

#### Extracción



#### Re-extracción



La constante de equilibrio de extracción puede expresarse en función de las concentraciones:



$$K_{EXT} = \frac{[R_2M]_{org} [H^+]^2_{ac}}{[M^{+2}]_{ac} [RH]^2_{org}} \dots (1)$$

y la constante de equilibrio de re-extracción está dada por:

$$K_{RE-EXT} = \frac{1}{K_{EXT}} = \frac{[M^{+2}]_{ac} [RH]^2_{org}}{[R_2M]_{org} [H^+]^2_{ac}} \dots (2)$$

Las reacciones de extracción y re-extracción dependen de la concentración de ácido. A bajas concentraciones de ácido (pH : 1-3) se realiza la extracción y a altas concentraciones de ácido sulfúrico (150 - 200 g/l) en la fase acuosa, se produce la re-extracción.

#### 2.4. RECUPERACION DEL COBRE DE SOLUCIONES LIXIVIADAS CON ACIDO SULFURICO

La recuperación de cobre en el Perú se ha obtenido de minerales sulfurados, mediante una serie de procesos de tratamiento de los minerales y concentrados del metal. Sin embargo, la necesidad de aprovechar minerales oxidados de cobre o minerales de baja ley que dan lugar a disoluciones muy diluidas en el metal, hizo que se estudiase la posibilidad de tratar estas materias primas mediante procedimientos hidrometalúrgicos

En el caso de las disoluciones diluidas se aplicó en principio la cementación como un medio para recuperar el cobre, pero una serie de inconvenientes aconsejó que se considerase la posibilidad de utilizar un proceso que junte las etapas como se muestra en la Fig. 2.1.

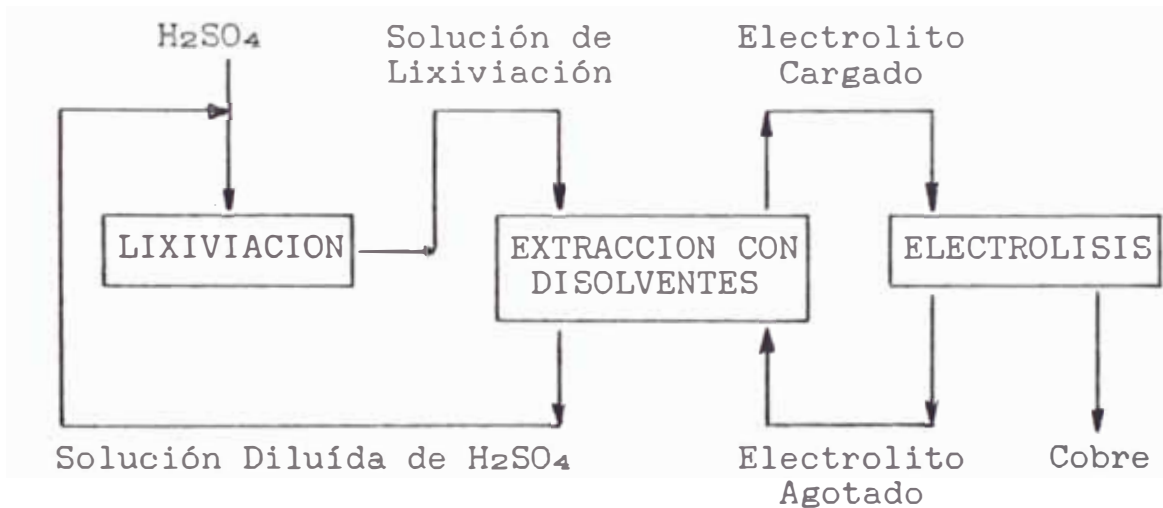


Fig. 2.1 Recuperación de cobre mediante los ciclos de lixiviación extracción con disolventes y electrólisis.

Este sistema ideal se concibió como uno en el que el licor de lixiviación se tratase mediante la técnica de extracción con disolventes con el fin de concentrar y purificar la disolución de cobre recuperándose el metal mediante un proceso de electrólisis.

El rápido desarrollo y utilización de un esquema de tratamiento como el que se muestra en la figura, se debe además a que en teoría no se producían efluentes líquidos o gaseosos que pudieran degradar el medio ambiente.

La mayor parte del cobre se encuentra en forma de **minerales** sulfurados que tradicionalmente se han fundido con el fin de producir cobre sin refinar, 99% de pureza, después de una etapa previa de concentración del mineral por métodos físicos.

En algunos depósitos de minerales sulfurados se encuentran ciertas capas de óxidos que contienen una determinada cantidad de cobre, además que en determinadas localizaciones existen minerales muy oxidados en los que es inviable un tratamiento de flotación.

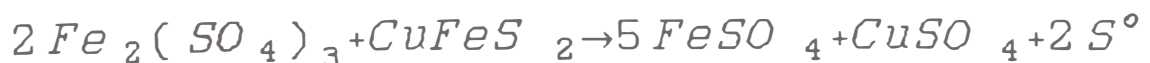
En estos casos el mineral se lixivía directamente con ácido sulfúrico y el licor de lixiviación resultante que contiene generalmente 40-60 g/l de cobre y 60 g/l de ácido, sirve para alimentar las plantas de electrólisis, mientras que el electrolito gastado se suele reciclar a posteriores operaciones de lixiviación.

En aquellos minerales de baja ley en los que es difícil llevar a cabo un enriquecimiento mediante flotación con el fin de producir un material adecuado para el proceso de fusión o en los que son tan pobres en cobre, que un enriquecimiento sería antieconómico,

se ha empleado técnicas de lixiviación en los que el mineral generalmente se apila y se lixivia mediante percolación de una solución diluída de ácido sulfúrico a través del montón.

El método convencional de tratamiento de éstos licores de lixiviación, fue en principio la cementación del cobre sobre chatarra de hierro como se muestra en la figura 2.2. El cobre cementado se recupera, se seca y se envía al horno de fusión de forma que se obtiene cobre sin refinar.

Cuando el mineral contiene sulfuros, la lixiviación presenta una característica peculiar, puede realizarse con ayuda de bacterias que contribuyan a la lixiviación del cobre. Así la presencia de pirita, da lugar al crecimiento de estas bacterias descritas en principio como THIOBACILLUS FERROOXIDANS que oxidan el sulfuro a ácido sulfúrico y el hierro II a hierro III. El sulfato de hierro III formado interviene en la reacción de lixiviación del cobre:



Por lo tanto los licores de lixiviación que se producen tienen cobre, hierro II y III y ácido sulfúrico. Teniendo en cuenta la naturaleza de estas operaciones, las disoluciones son diluidas y contienen 1-2 g/l de Cu y su pH es de 2 a 2,5.

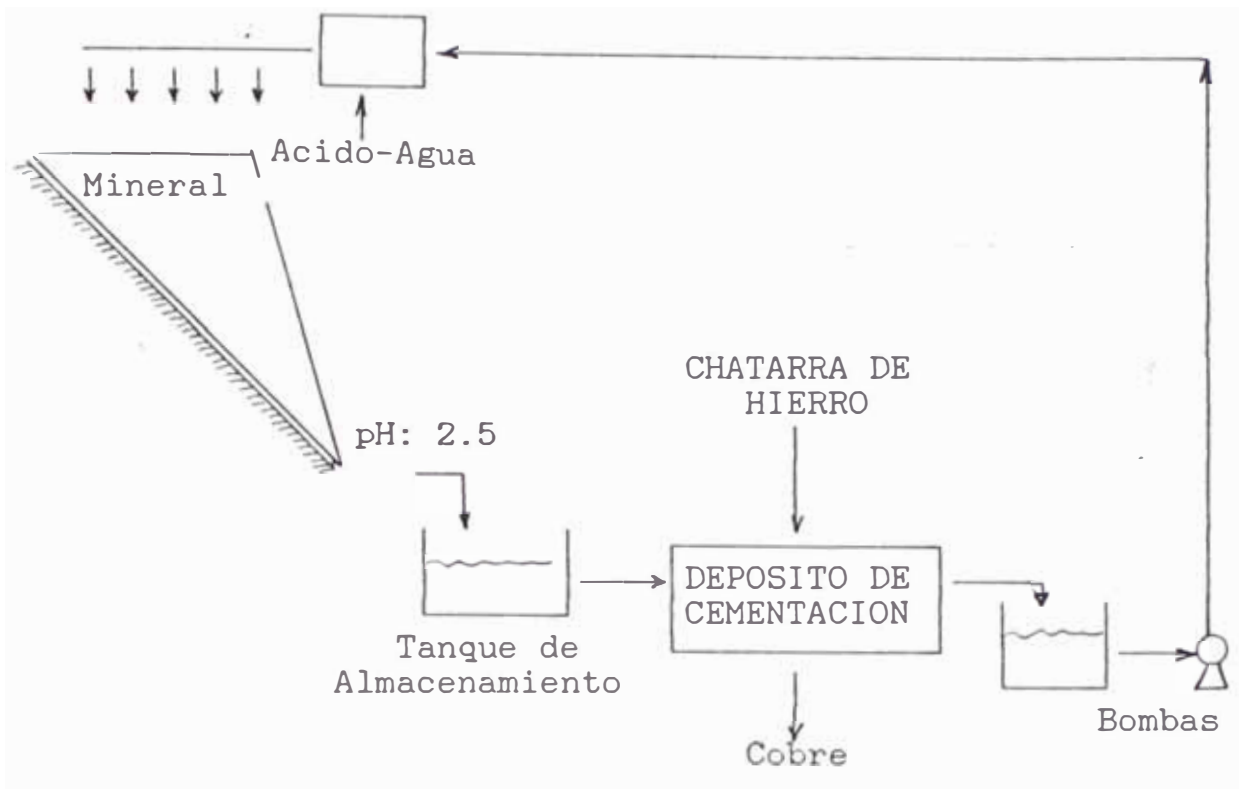


Fig.2.2 Recuperación de cobre mediante lixiviación y cementación

La presencia de hierro es un inconveniente ya que el hierro III reacciona con la chatarra de hierro usada en la cementación, aumenta el consumo de ésta e incrementa por consiguiente el costo del proceso. A la vez, la concentración de hierro en la disolución aumenta rápidamente y puede precipitar el hidróxido férrico en el montón y reducir la eficiencia en el proceso de lixiviación. Por esta razón se hizo necesario añadir un sistema de purga o control del hierro presente en el proceso para controlar la cantidad de éste en el mismo, lo que añade un nuevo costo al proceso, a pesar de estos inconvenientes este método de obtención del cobre se ha empleado profusamente debido al bajo costo de la operación de lixiviación.

Como indica la figura 2.1 se optó por el esquema lixiviación-extracción con disolventes y electrólisis, compuestos por tres ciclos cerrados, que dan lugar a un residuo en la etapa de lixiviación y a un producto final: el cátodo de cobre; además de esta forma se conseguía una alternativa a los procesos de fusión, aceptable desde el punto de vista de la solución.

La consideración de la etapa de extracción con disolventes mostró que el agente de extracción elegido, debía ser capaz de separar selectivamente el cobre de todas las impurezas presentes en el licor de lixiviación en especial del hierro III y permitir emplear el electrolito gastado como agente de reextracción del cobre de la fase orgánica.

Los agentes de extracción entonces disponibles como ácidos carbóxicos, alquilfosfóricos, las aminas o reactivos de solvatación mostraban una serie de desventajas para su aplicación práctica. A pesar de que los reactivos de tipo ácido, ninguno lo extrae selectivamente del hierro III, todos lo extraen a valores de pH por encima de los que presentan los licores de lixiviación.

La serie de inconvenientes para extraer cobre con estos reactivos hicieron necesaria la creación de un nuevo tipo de agentes de extracción específicos para cobre que presenten las características adecuadas para su uso en el tratamiento de disoluciones que lo contengan.

Así se tiene en el mercado a los siguientes reactivos:

- 1.- Reactivos LIX
- 2.- Reactivos KELEX
- 3.- Reactivos SME
- 4.- Reactivos ACORGA

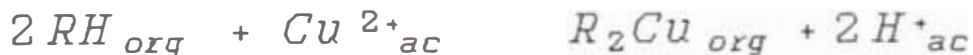
## 2.5. REQUERIMIENTOS PARA EL TRABAJO EFICIENTE DE LOS REACTIVOS LIX (9)

- 1) Extraer selectivamente el cobre de la solución lixiviada.
- 2) Reextraer el cobre en forma consistente con una eventual recuperación del metal.
- 3) Ser estable a las condiciones del circuito.
- 4) Tener cinéticas de extracción y reextracción aceptables.
- 5) Ser solubles en solventes baratos.
- 6) No debe promover emulsiones estables.
- 7) No debe promover formación de óxidos.
- 8) No debe transferir exceso de ácido de la reextracción a la extracción.
- 9) Ser seguro para ser usado.
- 10) Tener un costo aceptable.

## 2.6. REACTIVO LIX - 984

### 2.6.1 DESCRIPCION

El reactivo LIX 984 es una mezcla en la proporción volumétrica 1:1, de LIX 860 (5-dodecil-salicilaldoxima en kerosene) y LIX 84 (2-hidroxi-5-nonil-acetofenona oxima en kerosene), la cual forma complejos insolubles en agua con varios cationes metálicos en una manera similar a la que se muestra en la siguiente reacción:



### 2.6.2 PROPIEDADES TIPICAS (9)

#### A.- Propiedades Físicas y Químicas Generales:

- Color del Extractante : Líquido Ambar
- Gravedad Específica : 0,91 - 0,92
- Solubilidad en Comple-  
jo de Cobre : Completamente Soluble.
- Máxima carga de Cobre  
10 v/v % : 5,2 g/l Cu a pH 2,0



## B.- Parámetros de Trabajo:

<u>Propiedad</u>	<u>Promedio Pesado</u>
- Punto Isotérmico de Extracción	≥ 4,20 g/l Cu
- Cinética de Extracción	≥ 95% a 60 segundos
- Selectividad de Extrac- ción Cu/Fe	≥ 2000
- Separación de Fases	≤ 90 segundos
- Punto de Reextracción	≤ 1,45 g/l Cu
- Transferencia de Cobre	≤ 90 segundos
- Transferencia de Cobre Neto	≥ 2,80 g/l Cu

### CAPITULO III

#### ESTUDIO TEORICO-EXPERIMENTAL DE LA EXTRACCION Y REEXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DE COBRE USANDO LIX- 984 - NIVEL DE LABORATORIO

#### 3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

##### 3.1.1 EQUIPOS

- Balanza Analítica
- Agitador Magnético
- Agitador Portátil de Hélice
- pHmetro

##### 3.1.2 MATERIALES

- Buretas de 10, 25 y 50 ml.
- Fiolas de 100, 500 y 1000 ml.
- Matraces de 250 ml.
- Peras de Decantación de 250 y 500 ml.
- Pipetas Graduadas de 5,10 ml.
- Vasos de 50 y 100 ml.
- Pipetas Volumétricas de 5, 10 y 20 ml.
- Probetas de 50, 100, 250 y 500 ml.
- Vaso de 5 l.

### 3.1.3 REACTIVOS

- Agua Destilada
- Acido Sulfúrico 2N
- Acido Sulfúrico Concentrado
- Almidón 1% (P/V)
- Hidróxido de Sodio 1N
- Hidróxido de Sodio en lentejas (98% pureza)
- Ioduro de Potasio al 5% (P/V)
- Sulfato de Cobre Pentahidratado
- Tiosulfato de Sodio 0,1N y 0,02N

### 3.1.4 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

En este acápite del presente capítulo se detalla todas las evaluaciones experimentales, realizadas a nivel de laboratorio las mismas que son indispensables para determinar los parámetros físico-químicos de la extracción.

Así se tienen:

#### I. PREPARACION DE MUESTRAS

Se preparan las siguientes soluciones:

- Soluciones de Sulfato de Cobre de 1,5; 3,0; 6,0; 9,0 y 12,0 g/l en cobre,
- Se regula el pH de cada una de las soluciones a 1,5; 1,8; 2,0 y 3,0
- Soluciones de Sulfato de Cobre de 30,0 g/l

en cobre y 150 a 200 g/l de Acido Sulfúrico

- Soluciones de LIX 984 en Kerosene doméstico al 10%, 20% y 30% (V/V)

## II. DETERMINACION DE MAXIMO COBRE CARGADO

- Se utiliza soluciones de LIX al 10, 20 y 30% en kerosene y soluciones de sulfato de cobre al 6,02 g/l de cobre a pH: 1,5; 2,0; 2,5 y 3,0
- Se agita vigorosamente en una pera, un volumen de solución de LIX con un volumen de solución de sulfato de cobre por 3 minutos, se decanta la fase acuosa y se adiciona nuevamente otro volumen de sulfato de cobre; se repite la operación anterior por 5 veces.
- Luego de cada mezcla la fase acuosa es analizada y por diferencia se obtiene la concentración de cobre en la fase orgánica.
- La sumatoria de cobre extraído de la fase acuosa es el máximo cobre extraído por la fase orgánica

## III. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE EXTRACCION

- Se utiliza solución de LIX al 10% en kerosene y solución de sulfato de cobre al 6,0 g/l de cobre y pH = 2,0
- Una alícuota de cada una de las soluciones se mezclan a 1600 r.p.m., se extraen muestras de la dispersión para análisis de cobre cada 15 ó 30 seg.

- El equilibrio de la extracción se logra cuando la concentración en la fase acuosa es constante en dos o más valoraciones consecutivas.

#### IV. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE RE-EXTRACCION

- Se utiliza solución de LIX al 10% en kerosene, previamente cargada con 4,37 g/l de cobre y solución de 30,31 g/l de cobre en 170 g/l de ácido sulfúrico.
- Se mezclan en relación 1:1 en un agitador a 1600 r.p.m., cada 15 ó 30 seg. se extraen de la dispersión muestras para análisis de cobre.
- El equilibrio se logra cuando la concentración de cobre en la fase acuosa es constante en dos o más valoraciones consecutivas.

#### V. DETERMINACION DE LAS CURVAS DE EQUILIBRIO EN LA EXTRACCION (ISOTERMAS DE EXTRACCION)

- Se miden volúmenes de LIX al 10% y soluciones de sulfato de cobre en proporciones 10/1, 7/1, 5/1, 3/1, 1/1, 1/2, 1/3, 1/5, 1/7 y 1/10.
- Las soluciones se vierten en una pera de decantación en donde se agitan vigorosamente por 3 minutos.
- Se deja reposar por 2 a 5 minutos, hasta que se separen las fases.
- Seguidamente se valora la fase acuosa y se calcula la concentración de cobre en la fase

orgánica.

- Con las concentraciones en el equilibrio se grafica la concentración de cobre en la fase orgánica vs. concentración de cobre en la fase acuosa.

#### VI. DETERMINACION DE LAS CURVAS DE EQUILIBRIO EN LA REEXTRACCION (ISOTERMAS DE RE-EXTRACCION)

- Se miden soluciones de LIX al 10% previamente cargadas con 4,67 g/l de cobre y soluciones de sulfato de cobre con 30 g/l de cobre y 150 a 200 g/l de ácido sulfúrico, al igual que en la extracción se miden volúmenes en relación 1/10 a 10/1
- Las soluciones se vierten a una pera de decantación en donde se agitan vigorosamente por 3 minutos, luego se deja reposar por 2 a 5 minutos hasta que se separen las fases orgánica y acuosa.
- Se valora la fase acuosa y se calcula la concentración de cobre en la fase orgánica.
- Con las concentraciones en el equilibrio se grafica la concentración de cobre en la fase orgánica vs. concentración de cobre en la fase acuosa.

VII. DETERMINACION DEL EFECTO DE LA CONCENTRACION DE LIX EN LA EXTRACCION DE COBRE

- Se miden soluciones de LIX al 5, 10, 15, 20, 25 y 30% y se mezclan con alícuotas de sulfato de cobre de 6,0 g/l en cobre y pH: 2,8; en relación 1:1.
- Luego se separan las fases acuosa y orgánica, se analizan y se determinan las concentraciones de cobre en ambas fases.
- Con las concentraciones en equilibrio se determinan los porcentajes de cobre extraído en las soluciones orgánicas.
- Se grafican:
  - . % LIX 984 Vs. % de Extracción de cobre en la fase orgánica.
  - . % LIX 984 Vs. Concentración de cobre en la fase acuosa agotada.

VIII. DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE DISTRIBUCION ( $K_d$ )

- De las concentraciones de cobre en la fase acuosa y orgánica en equilibrio se obtienen las constantes de distribución, las cuales están representadas como:

$$K_d : [Cu^{2+}]_{ac} / [Cu^{2+}]_{org}$$

- Con los datos de las constantes de distribución hallados, se procede a generar las curvas de

distribución manteniendo el pH, concentración de LIX y flujos constantes, pero variando la concentración de cobre en el acuoso antes de la mezcla.

- Se grafica:

$$K_d \text{ VS. } [Cu^{2+}]_{ac}$$

### 3.1.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Los resultados de las pruebas experimentales se muestran en los cuadros y gráficas siguientes:



CUADRO 3.1

DETERMINACION DEL MAXIMO COBRE CARGADO  
EN DIFERENTES % DE LIX 984

[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>org</sub> (g/l)				
pH LIX V/V %	1,5	2,0	2,5	3,0
10	5,36	5,54	5,58	5,65
20	10,05	10,66	10,90	11,05
30	15,67	16,02	16,05	16,35

CUADRO 3.2

DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE EXTRACCION  
DEL LIX 984 AL 10% (V/V)

t	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>ac</sub>	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>org</sub>	% Extracción
0	5,95	0	0
5	3,65	0,3	52,60
15	2,15	3,80	86,90
30	1,78	4,21	96,33
60	1,62	4,34	100,00
90	1,62	4,34	100,00
180	1,62	4,34	100,00
300	1,62	4,34	100,00

donde:

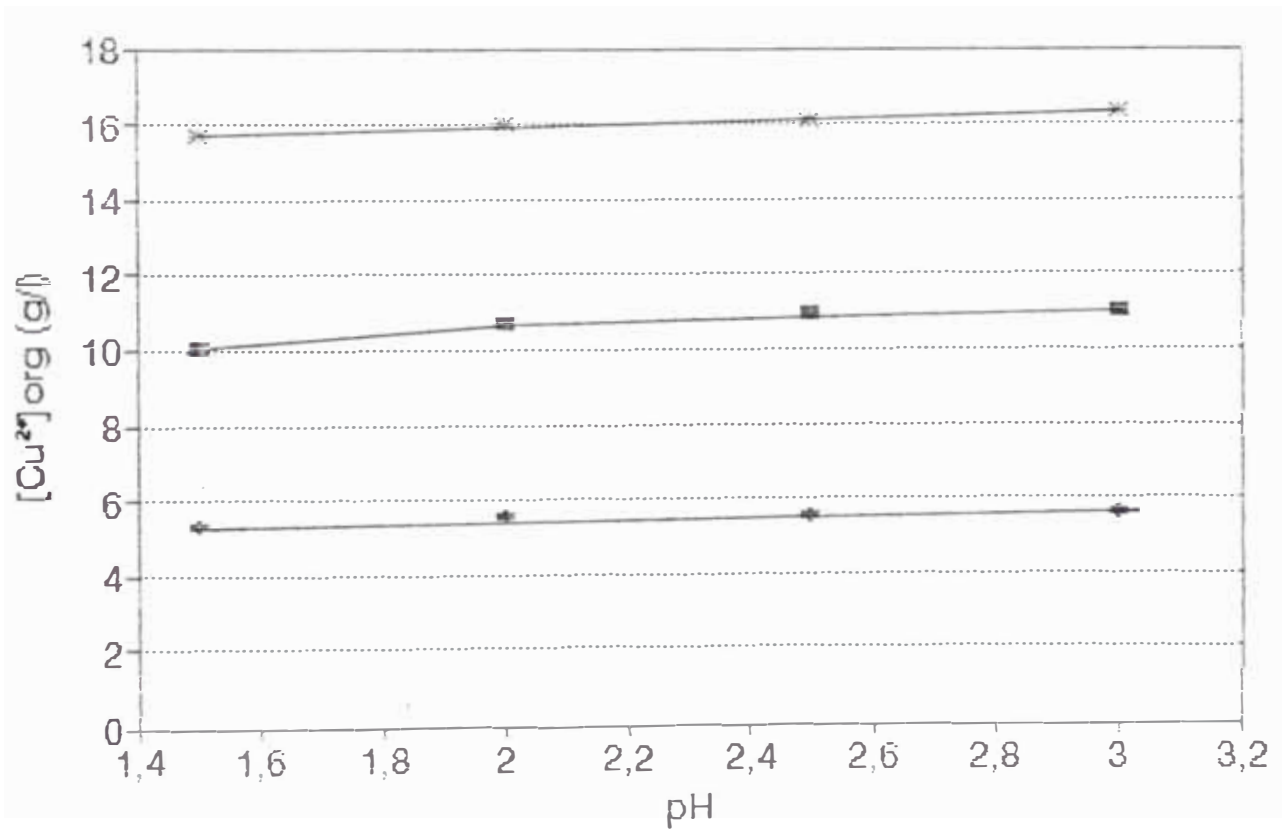
t : expresado en segundos

[Cu<sup>2+</sup>] : en g/l de solución

### GRAFICO 3.1

MAXIMO COBRE CARGADO EN EL LIX 984

RESPECTO AL pH DEL ACUOSO



LIX 10% ■ LIX 20% ♦ LIX 30% \*

DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE DISTRIBUCION

A PH CONSTANTE

CUADRO 3.23

Condiciones:

pH : 1,5  
 [Cu<sup>2+</sup>] : Variable  
 O/A : Variable  
 [LIX] : 10% (V/V)

[Cu <sup>2+</sup> ] O/A	1,50	3,05	5,97	9,05	11,99
	Kd				
2/1	0	0,097	0,211	0,575	1,043
1/1	0,008	0,188	0,504	1,022	1,514
1/2	0,024	0,315	0,786	1,345	1,881
1/3	0,041	0,409	0,891	1,416	1,986
1/5	0,097	0,485	1,039	1,560	2,064

CUADRO 3.24

Condiciones:

pH : 1,8  
 [Cu<sup>2+</sup>] : Variable  
 O/A : Variable  
 [LIX] : 10% (V/V)

[Cu <sup>2+</sup> ] O/A	1,50	3,05	5,97	9,05	11,99
	Kd				
2/1	0,0	0,033	0,167	0,531	0,993
1/1	0,004	0,093	0,428	0,950	1,479
1/2	0,010	0,239	0,766	1,249	1,820
1/3	0,029	0,327	0,867	1,385	1,943
1/5	0,069	0,404	1,000	1,560	2,064

### 3.2. DISCUSION DE RESULTADOS

#### 3.2.1 EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO DE COBRE CON LIX- 984

##### 3.2.1.1 Evaluación de Máximo Cobre Cargado

- Como se observa en el cuadro y gráfico 3.1, el máximo cobre cargado es proporcional a la concentración de LIX y es igual a 56,5 g/l de LIX 984 puro.
- Para la misma concentración de LIX, se obtiene capacidades ligeramente mayores de extracción a pH más altos (2,5 - 3,0)

##### 3.2.1.2 Evaluación de la Velocidad de Extracción

- Se observa en el cuadro y gráfico 3.2 que a condiciones de agitación elevada (1600 RPM) la reacción de intercambio es muy rápida y la separación de fases también, no formándose emulsiones indeseadas. El tiempo de contacto mínimo fue de 60 seg.

##### 3.2.1.3 Estudio de las Curvas de Equilibrio

De acuerdo a los cuadros y gráficos 3.4 al 3.18 se observa lo siguiente:

- Como se determinó en la prueba de máximo cobre cargado, las extracciones son mas favorables a mayor pH.

- Las mayores eficiencias de extracción de cobre en la fase orgánica ocurren cuando las relaciones de mezcla O/A son de 1/10 a 1/1
- Las curvas de equilibrio han sido generadas a condiciones ideales, es decir, sin interferencia de iones extraños por lo que los valores de extracción se pueden considerar como máximos. Para condiciones reales es necesario determinar cual sería el factor numérico por el cual se tendría que multiplicar a las condiciones en equilibrio para obtener los valores reales en equilibrio.
- Los datos de las curvas de equilibrio nos permiten obtener las constantes y curvas de distribución.
- Las curvas de equilibrio nos permiten establecer el número de etapas ideales a usar para una extracción determinada (según las condiciones iniciales del proceso).

#### 3.2.1.4 Evaluación del Efecto de la Concentración del LIX

- Para la determinación del porcentaje de LIX a usar y, para obtener la mínima concentración de cobre en la fase acuosa agotada y la máxima extracción de cobre en la fase orgánica (en una sola etapa), se pueden

establecer pruebas de extracción para soluciones de LIX al 5, 10, 15, 20%, que permiten generar la curva que indica la mejor concentración de LIX a usar.

#### 3.2.1.5 Estudio de las Constantes de Distribución

De acuerdo a los cuadros y gráficos 3.23 al 3.26 se observa que:

- A partir de las curvas de distribución generadas y mediante balances de masa, se puede determinar cuáles serían las concentraciones en el equilibrio de una mezcla de LIX al 10% y soluciones de cobre, para diferentes relaciones de mezcla O/A.
- Con las curvas de distribución también se pueden generar los datos de equilibrio para una determinada mezcla orgánica-acuosa a partir de la cual se pueden trazar curvas de equilibrio.

### 3.2.2 REEXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO DE COBRE CON LIX 984

#### 3.2.2.1 Evaluación de la Velocidad de Reextracción

- Comparando los cuadros y gráficos 3.3 se deduce que la velocidad de re-extracción es mayor que la velocidad de extracción y el tiempo necesario para llegar al equilibrio es de 30 segundos en la re-extracción, mientras que en la extracción es de 60 seg.
- Con las velocidades de extracción y de reextracción se puede tener una idea clara del número de extractores y reextractores que pueden ser necesarios para un diseño determinado

#### 3.2.2.2 Estudio de las Curvas de Equilibrio

De acuerdo a los cuadros y gráficos 3.19 al 3.21 se puede concluir lo siguiente:

- Existe una mejor re-extracción a mayor concentración de ácido sulfúrico en la solución reextractante.
- Las pendientes de la recta de equilibrio de re-extracción decrecen con el incremento

de la concentración de Acido Sulfúrico en la solución re-extractante.

$$\textit{Pendiente de la recta de Re-extracción} = \frac{\Delta [Cu^{2+}]_{org (out)}}{\Delta [Cu^{2+}]_{ac (out)}}$$

- Las mejores reextracciones se realizan cuando la relación O/A es menor a 1 (se obtienen bajas concentraciones de cobre en el orgánico).



## CAPITULO IV

### ESTUDIO TEORICO EXPERIMENTAL DE LA EXTRACCION LIQUIDO - LIQUIDO DE COBRE USANDO LIX 984 - PLANTA PILOTO

#### 4.1. MEZCLADORES - DECANTADORES (6)

##### 4.1.1 CARACTERISTICAS GENERALES

Para lograr que una unidad de mezcladores-sedimentadores sea compacta, es necesario seleccionar un diseño de compartimiento rectangular.

En la celda rectangular aproximadamente 1/3 a 1/4 del espacio es ocupado por el compartimiento de mezcla y el resto forma el compartimiento de sedimentación, dependiendo de las características de sedimentación del sistema.

La alimentación de dos fases normalmente ingresa cerca del centro al compartimiento mezclador y luego la mezcla pasa a través de los buffles al compartimiento de sedimentación.

En la parte final del decantador las fases ligera y pesada son drenadas a la parte superior e inferior del compartimiento y son conducidas a los

compartimientos de mezcla de las celdas anterior y posterior respectivamente. Los buffles ayudan a reducir el tiempo de decantación.

El tiempo de sedimentación puede también reducirse utilizando mallas metálicas o coalescedores electrostáticos. Es esencial que el material de las mallas metálicas sea de preferencia humedecida por la fase dispersa.

Otro diseño del mezclador-decantador horizontal conocido como el diseño de Windocale, evita el bombeo interetapas.

El flujo de las fases líquidas es efectuado por la gravedad tomando ventaja de la diferencia de densidades en los diferentes compartimientos como se muestra en la Fig. 4.1.

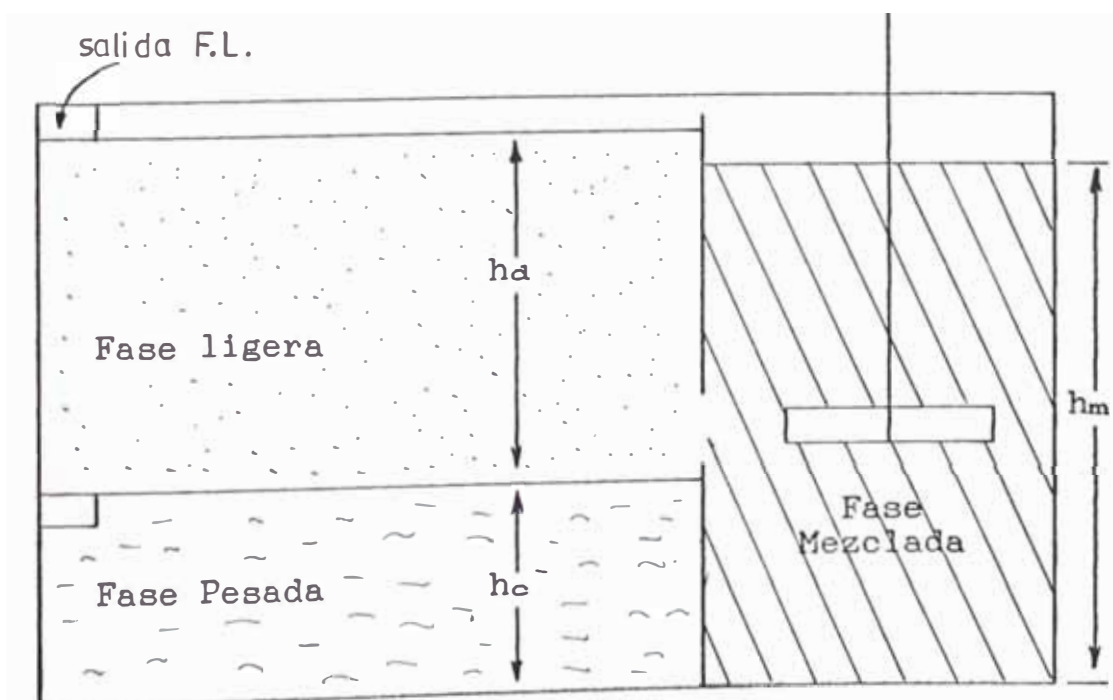


Fig. 4.1 Esquema del Mezclador-Sedimentador tipo caja

La altura  $h_m$  de la fase mezclada en el compartimiento de mezcla, está relacionada a las alturas  $h_d$  y  $h_c$  de la fase dispersa y la fase continua, así tenemos:

$$\rho_m h_m = \rho_d h_d + \rho_c h_c$$

El nivel superficial en el mezclador sera siempre más alto que en los compartimientos respectivos del mezclador en cada unidad.

El nivel de la interfase en los decantadores puede ser mantenido constante debajo de la salida del mezclador localizando apropiadamente la salida de la fase continua y controlando la altura de la salida del último decantador.

Es esencial que los compartimientos decantadores estén adecuadamente diseñados para un buen rendimiento. Las eficiencias de cada etapa de tales contactores están generalmente por encima de 90% y se ha encontrado que son independientes de cambios moderados en las velocidades y de razones de alimentación de los solventes . Un nuevo tipo de unidad mezcladora-decantadora horizontal ha sido reportado por Coplan, quien ha recomendado el bombeo interetapas para superar las limitaciones de flujo mediante el uso de extractor "pump-mix".

Tanto el bombeo interetapas y el íntimo contacto de las fases están hechos por agitadores

de impulsores , tipo rueda dentada (anillo centrífugo).

Un esquema típico de este equipo es mostrado en la Fig. 4.2 . El impulsor del rotor hace la función de una bomba centrífuga con la diferencia de que no posee carcaza.

Las fases ligera y pesada ingresan a través de la entrada central del ojo del impulsor, mientras están mezcladas íntimamente dentro del succionador del impulsor; la energía cinética es impartida debido a la fuerza centrífuga a la mezcla de dos fases.

Las fases líquidas son trasladadas radialmente al compartimiento mezclador donde son forzadas a través de placas deflectoras verticales separando los compartimientos mezclador y decantador. Así, el bombeo interetapas y la mezcla de las fases son hechas simultáneamente en la misma unidad.

La entrada regulada de las fases mezcladas dentro del mezclador facilita la rápida sedimentación de las fases antes que alcancen el final, donde las salidas para los líquidos ligero y pesado, están ubicadas en el tope y en el fondo del decantador, respectivamente.

El diseño de los compartimientos mezclador y decantador requiere experimentación y recolección de datos para definir el tamaño

apropiado del impulsor, la velocidad, las proporciones de flujo de las fases en contacto y la longitud del compartimiento de decantación.

Coplan reporta eficiencias de extracción por encima del 95% en una unidad a escala piloto de 8 etapas.

El escalamiento de tales unidades puede ser hecha usando tiempos de residencia de las fases para unidades geoméricamente similares. Una ventaja mayor de la unidad de bombeo y mezcla arriba mencionada es que puede ser construida para satisfacer varias necesidades y para manipular pequeñas o grandes capacidades.

#### 4.1.2 ECUACIONES DE DISEÑO (10)

La aplicación de la tecnología de lixiviación puede proveer un método eficiente de recuperación de cobre de sus minerales.

El éxito de estas operaciones, es en la mayor parte de casos sólo posible mediante la tecnología desarrollada de la extracción por solventes de soluciones muy diluidas, previa a la electrodeposición

Esta tecnología ha recibido considerable atención durante las últimas décadas. Sin embargo,

los modelos de este proceso han estado basados, principalmente, en tratamientos empíricos de los datos de planta. Estos modelos se obtienen bajo ciertas condiciones operacionales en forma tal que las extrapolaciones a diferentes condiciones era casi imposible. Otras desventajas de este procedimiento son:

- La perturbación de la operación en planta debido a la gran cantidad de datos requeridos.
- Alto costo debido a análisis químicos.

El modelo matemático basado en la fenomenología evita estos atrasos.

Esta herramienta desarrollada hace tres décadas, ha experimentado gran progreso debido a la necesidad de respuestas rápidas del proceso y al desarrollo acelerado de las computadoras.

En este punto se tratarán los modelos en estado estacionario y dinámico para unidades de mezcladores-decantadores para procesos de extracción de cobre por solventes (10).

#### a) MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO

El sistema de extracción por solventes puede representarse como sigue, (Fig. 4.3) usando las etapas de transferencia de masa.

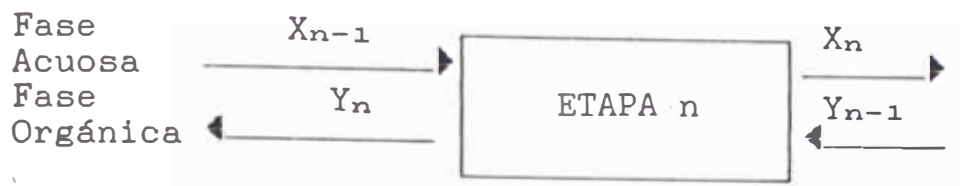


Fig. 4.3 Etapas de Transferencia de Masa

Se asume lo siguiente:

- Cada etapa de transferencia de masa contiene dos fases completamente inmiscibles.
- El proceso de transferencia de masa se lleva a cabo a velocidad alta de manera que el equilibrio es alcanzado en cada etapa.
- El sistema opera a una condición de estado estacionario.
- No ocurre la mezcla entre etapas.

Luego los equilibrios global e individual y las relaciones de balance de masa son presentados.

Balance Global de Masa

$$A_0 \rho_0 + B_A \rho_A - (F_A \rho_A + F_0 \rho_0) = 0 \dots (1)$$

Balance de Masa para el Cobre

$$A_0 Y_{Cu} + B_A X_{Cu} - F_{Cu} = 0 \dots (2)$$

Ecuación de Equilibrio

$$Y_{Cu} = K X_{Cu} \dots (3)$$

Donde:

- $A_o$  : Flujo másico del orgánico al ingreso  
 $B_A$  : Flujo másico del acuoso al ingreso  
 $F_o$  : Flujo másico del orgánico a la salida  
 $F_A$  : Flujo másico del acuoso a la salida  
 $P_o$  : Densidad del orgánico al ingreso y salida  
 $P_A$  : Densidad del acuoso al ingreso y salida  
 $Y_{Cu}$  : Concentración de Cobre en la fase orgánica  
 $X_{Cu}$  : Concentración de Cobre en la fase acuosa  
 $F_{Cu}$  : Flujo másico de cobre que ingresa

Para obtener las concentraciones de fase de las expresiones anteriores, las cuales generan un proceso iterativo, debido a la recirculación del orgánico a la etapa de extracción, es necesario definir un error iterativo, SIG, como sigue:

$$\text{SIG} = \left[ \begin{array}{l} \text{Concentración de cobre} \\ \text{en la alimentación en la} \\ \text{última etapa hipotética} \\ \text{de extracción} \end{array} - \left[ \begin{array}{l} \text{Concentración de Cobre a la} \\ \text{salida en la etapa hipotética} \\ \text{final de la reextracción} \end{array} \right] \right] \dots \dots (4)$$

Fase Orgánica

#### b) MODELO DINAMICO

Un modelo dinámico permite el conocimiento de las características del estado transitorio. Esto es especialmente importante en:

- Problemas de arranque, para conocer el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario.
- Problemas de control, para determinar la



respuesta de las variables de control de un proceso debido a perturbaciones de la alimentación y otras.

- Unidades Mezcladoras - Decantadoras

Una unidad mezcladora-decantadora y sus componentes hidrodinámicos se muestran esquemáticamente en la Fig. 4.4

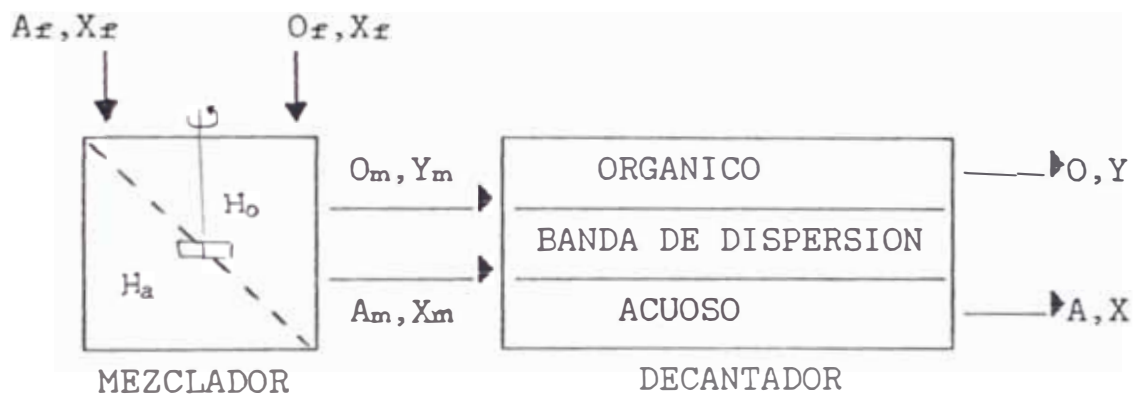


Fig. 4.4 Esquema de una unidad Mezcladora-Decantadora

Se asumió lo siguiente:

- Movimiento de retromezcla en el mezclador.
- Inmiscibilidad de ambas fases líquidas.
- Velocidades de flujo constantes de ambas fases.
- El equilibrio es alcanzado en el mezclador.
- Flujo de conexión de cada fase en el decantador.

- Mezclador

El flujo acuoso  $A_m$  a la salida es:

$$A_m = \frac{A_f + O_f}{H_a + H_o} H_a \dots \dots \dots (5)$$

Similarmente, para el flujo orgánico  $O_m$  a la salida es:

$$O_m = \frac{A_f + O_f}{H_a + H_o} H_o \dots \dots \dots (6)$$

El balance de masa del soluto en la fase acuosa es:

$$\frac{d(H_a X_m)}{dt} = A_f X_f - A_m X_m - O_m \dots \dots \dots (7)$$

Similarmente, para la fase orgánica:

$$\frac{d(H_o Y_m)}{dt} = O_f Y_f - O_m Y_m + O_m \dots \dots \dots (8)$$

De las ecuaciones (7) y (8):

$$\frac{d(H_a X_m + H_o Y_m)}{dt} = A_f X_f + O_f Y_f - A_m X_m - O_m Y_f \dots \dots \dots (9)$$

En el caso del cobre, la isoterma de equilibrio puede representarse por:

$$Y_m = C \exp(-B/X_m) \dots \dots \dots (10)$$

Diferenciando la ecuación (10) da:

$$\frac{dY_m}{dt} = \frac{CB}{X_m^2} \exp(-B/X_m) \frac{dX_m}{dt} \dots \dots \dots (11)$$

Combinando las ecuaciones (9) y (11) resulta una ecuación diferencial ordinaria que puede resolverse para  $X_m$  por métodos numéricos (Método de Runge Kutta).

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{A_f X_f + O_f Y_f - A_m X_m - O_m (C \exp(-B/X_m))}{H_a + H_o \frac{CB}{X_m^2} \exp(-B/X_m)} \dots (12)$$

Donde:

$A_f$  : flujo de fase acuosa al ingreso (l/min)

$O_f$  : flujo de fase orgánica al ingreso (l/min)

$X_f$  : concentración de cobre en la fase acuosa al ingreso del mezclador (g/l)

$Y_f$  : concentración de cobre en la fase orgánica al ingreso del mezclador (g/l)

$H_a$  : volumen de la fase acuosa en el mezclador en estado estacionario

$H_o$  : volumen de la fase orgánica en el mezclador en estado estacionario

$A_m$  : flujo de la fase acuosa a la salida del mezclador (l/min)

$O_m$  : flujo de la fase orgánica a la salida del mezclador (l/min)

$X_m$  : concentración de cobre en la fase acuosa a la salida del mezclador (g/l)

$Y_m$  : concentración de cobre en la fase orgánica a la salida del mezclador (g/l)

$B$  y  $C$  : constantes de la curva de equilibrio.

## 4.2. PRUEBAS DE EXTRACCION A NIVEL DE PLANTA PILOTO

### 4.2.1 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA PRUEBA

a) AGITACION : Para efectuar la extracción líquido-líquido se ha considerado que ésta se debe realizar a velocidades moderadas (350 - 500 rpm), que permitan realizar un buen contacto entre las fases, evitando que se forme una emulsión, lo que facilitará su posterior separación (decantación) además de producir un menor consumo de energía por el agitador (10).

b) TIPO DE IMPULSOR : Se ha considerado que el impulsor de turbinas planas sería el mejor. de acuerdo a las consideraciones realizadas por A.H. Skelland (11).

Los agitadores de turbinas son especialmente eficaces para producir corrientes radiales, pero al mismo tiempo inducen flujos verticales, especialmente cuando se disponen placas deflectoras dan resultados excelentes en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa.

Asimismo se ha establecido que para diámetros mayores del impulsor, el número de revoluciones por unidad de tiempo puede disminuir, obteniéndose la misma calidad de dispersión.

c) POSICION DEL IMPULSOR : Se tomaron en cuenta las mismas consideraciones del artículo de A.H. Skelland (11), estableciéndose que la posición del impulsor dentro de ambas fases sera más efectiva cuando éste se ubica en la mitad de la altura total de la mezcla. En esta condición las revoluciones por unidad de tiempo seran mínimas para obtener el contacto deseado.

d) PLACAS DEFLECTORAS : La colocación de placas deflectoras obedecen a que éstas evitan la formación de vórtice y permite obtener una turbulencia adecuada para el mejor contacto de las fases.

#### 4.2.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema de extracción está compuesto por los siguientes equipos:

- 2 tanques de alimentación de reactivos
- 2 rotámetros
- 1 tanque de extracción o mezcla
- 1 agitador de velocidad variable
- 1 tanque de decantación

### Descripción de la Prueba

Las soluciones de LIX 984 y sulfato de cobre son cargados en los tanques de alimentación, los cuales se hallan conectados a los rotámetros calibrados, que permitan regular el flujo de alimentación hacia el tanque de reacción en donde se realiza la extracción de cobre de la fase acuosa por la fase orgánica.

La disposición del impulsor en ambas fases permite una efectiva mezcla de fases, por ello éste se halla ubicado en la mitad de la altura total de ambas fases.

La mezcla de fases abandona en forma continua el tanque de mezcla y pasa al tanque de decantación en el cual ocurre la separación de fases.

El caudal de salida del tanque reactor es equivalente a la suma del caudal de ingreso de LIX 984 y sulfato de cobre. La mezcla pasa a un tanque de decantación donde se separan las fases.

Durante toda la prueba de extracción, se mantienen constantes los caudales de las soluciones y de las mezclas, de forma tal que el volumen en el tanque de reacción es constante.

### 4.2.3 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

#### 4.2.3.1 CALIBRACION DE ROTAMETROS

##### A. Materiales

- 1 probeta de 100 ml.
- 1 cronómetro
- Vaso de 500 ml.
- Solución de sulfato de cobre 6 g  $\text{Cu}^{2+}/\text{l}$
- Solución de LIX 984 al 10% en kerosene

##### B. Procedimiento

1. Se prepara 5 litros de solución de sulfato de cobre de 6 g  $\text{Cu}^{2+}/\text{l}$  ó LIX 984 al 10%
2. Se llena el tanque de alimentación y se conecta al rotámetro
3. Manipulando la válvula del rotámetro, se verifica que la bolita indicadora se desplaza sin ninguna restricción a través de la escala
4. Se comienza la calibración en forma ascendente
5. Para cada valor de la escala se mide el volumen de solución que fluye por unidad de tiempo
6. Se toman los datos y se grafican: Escala del rotámetro Vs. Flujo (ml/min)

#### 4.2.3.2 PRUEBAS DE DISPERSION

##### A. Materiales

- Solución de sulfato de cobre 6 g  $\text{Cu}^{2+}$ /l y LIX 984 10% en kerosene
- Vaso de 4 litros provisto con 4 placas deflectoras
- Impulsor de turbina plana de 2,5" y 3,5" de diámetro
- Agitador con velocidad variable
- Muestreador de solución

##### B. Procedimiento

1. Se colocan 1 litro de solución de sulfato de cobre y 1 litro de solución de LIX al 10% en el vaso
2. Se procede a agitar, variando la velocidad en forma ascendente, observando que la dispersión sea total y uniforme
3. Luego de 2 minutos se procede a extraer 100 ml de muestra, utilizando el muestreador, se deja separar (decantar) y se determina los volúmenes de cada fase
4. Si los volúmenes no son iguales se reponen las fases extraídas, se eleva la velocidad de agitación y se procede como en el ítem N° 3
5. Cuando los volúmenes son iguales, sin cambiar la velocidad se muestrean los



diferentes puntos del vaso para verificar la homogeneidad de la dispersión (volúmenes de las fases iguales)

#### 4.2.3.3 PRUEBA DE EXTRACCION

##### A. Materiales

- 10 litros de solución de sulfato de cobre al 6 g  $\text{Cu}^{2+}$ /l y LIX 10%
- 2 tanques de alimentación de 15 litros
- 2 rotámetros
- 1 vaso de 4 litros con 4 placas deflectoras y muestreador (tanque de extracción)
- 1 agitador con velocidad variable
- 1 impulsor de turbina de paleta plana
- 1 tanque de decantación de 20 litros de capacidad
- 1 cronómetro
- 1 pinza o válvula de regulación

##### B. Procedimiento

1. Se realizan las conexiones según la Fig. 4.5
2. Se llenan los tanques de alimentación con cada una de las soluciones de prueba  $\text{CuSO}_4$  de 6 g  $\text{Cu}^{2+}$ /l y LIX 984 al 10%
3. Se carga el tanque de extracción (reactor)
4. Se pone en funcionamiento el agitador a los rpm calculados, para obtener una

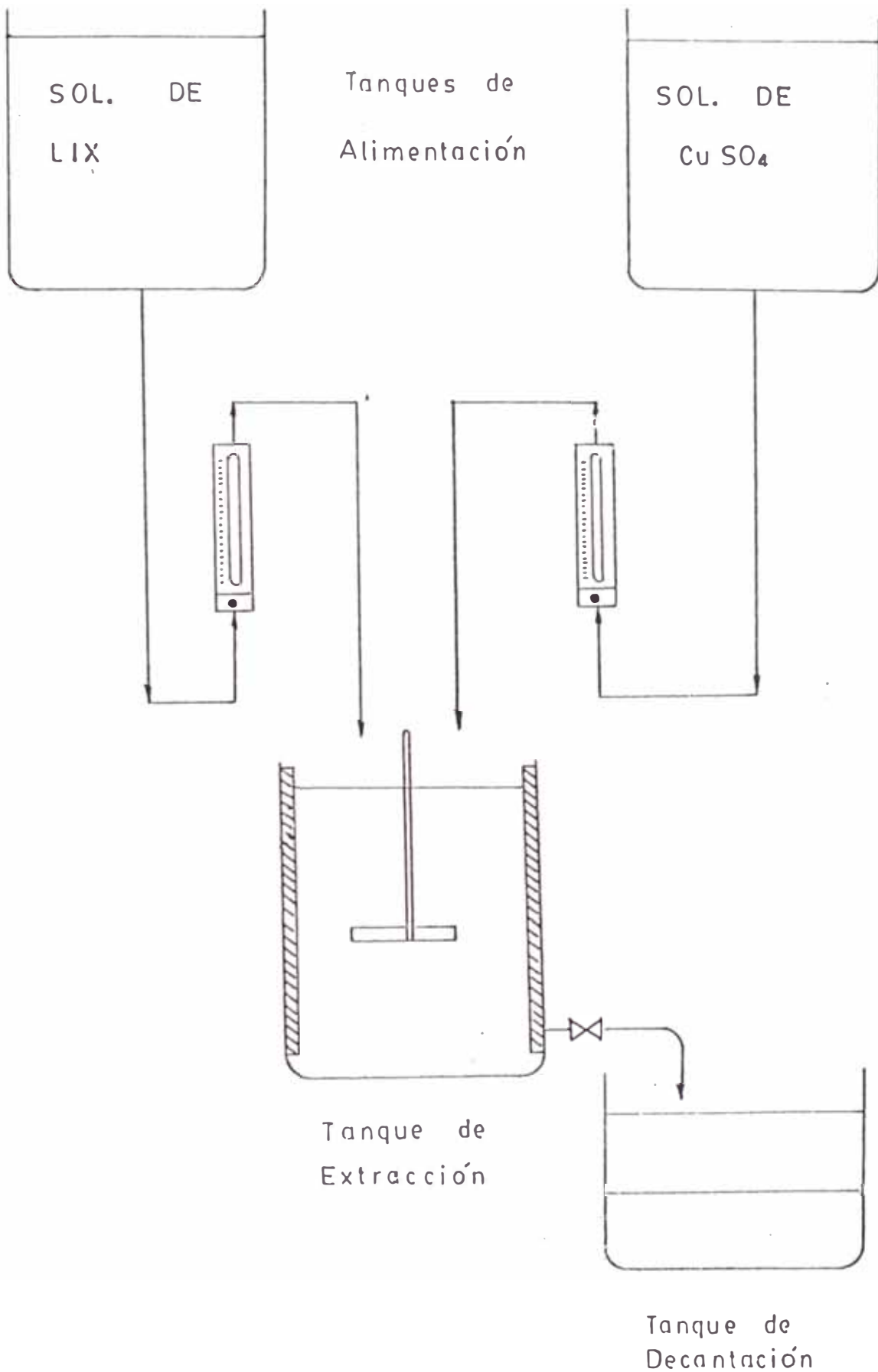


Fig. 4.5 : Sistema de extracción a nivel de planta piloto

dispersión uniforme

5. Inmediatamente se abren las válvulas de los rotámetros se regulan los flujos preestablecidos para cada solución
6. Se abre la válvula de purga y se regula el flujo para mantener el sistema en estado estacionario
7. Se toman muestras para tiempos de agitación: 0, 5, 10, 20, 30 min. Se valoran las fases acuosas
8. Cuando 2 determinaciones consecutivas de la fase acuosa son iguales en concentración de  $\text{Cu}^{2+}$  se suspende la prueba.

#### 4.2.4 RESULTADOS

##### 4.2.4.1 CALIBRACION DE ROTAMETROS

###### Rotámetro No. 1

Solución :  $\text{CuSO}_4$  6 g  $\text{Cu}^{2+}/\text{l}$

Escala del Rotámetro	Flujo (ml/min)
3	71
4	114
5	155
6	190
7	224
8	261
9	299
10	337
12	400

Se calculó el coeficiente de regresión lineal  $r$ , siendo su valor lo que indica que la tendencia de los pares ordenados se puede graficar como una recta de ecuación:

$$Y = A + BX$$

donde:

$$A = -31,67$$

$$B = 36,494$$

$$r = 0,9993$$

### Rotámetro No. 2

Solución : LIX 984 10%

Escala del Rotámetro	Flujo (ml/min)
4	92
5	121
6	166
7	193
8	235
10	310

En forma similar al cálculo anterior:

$$Y = A + BX$$

donde:

$$A = -61,119$$

$$B = 37,000$$

$$r = 0,999014$$

4.2.4.2 EQUILIBRIO DE FASES DURANTE LA  
EXTRACCION

Primera Prueba

Condiciones Iniciales

[Cu<sup>2+</sup>] - 6,0 g/l

pH de la solución de cobre = 2,5

[LIX] - 10% (V/V)

O/A - 1:1

Flujos de Alimentación = 0,1 l/min

Condiciones de Agitación

Impulsor : Turbina plana

Dimpulsor : 2,5"

Ubicación : H/2 (interfase)

Velocidad : 550 RPM

Resultados

Tiempo (min)	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>ac</sub> (g/l)	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>org</sub> (g/l)
0	6,0	0
1	2,80	3,20
	2,38	3,62
10	2,28	3,72
20	2,22	3,78
30	2,22	3,78

Segunda PruebaCondiciones Iniciales[Cu<sup>2+</sup>] 6,0 g/l

pH de la solución de Cobre = 2,5

[LIX] 10% (V/V)

O/A 1:1

Flujos de Alimentación = 0,1 l/min

Condiciones de Agitación

Impulsor : Turbina plana

 $\varnothing_{\text{impulsor}}$  : 3,5"

Ubicación : H/2 (interfase)

Velocidad : 350 RPM

Resultados

Tiempo (min)	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>ac</sub> (g/l)	[Cu <sup>2+</sup> ] <sub>org</sub> (g/l)
	6,0	0
1	3,18	2,82
5	2,60	3,40
10	2,47	3,53
20	2,37	3,63
25	2,37	3,65

### 4.3. CALCULOS

#### 4.3.1 DETERMINACION DE LAS CONSTANTES QUE GOBIERNAN LA CURVA DE EQUILIBRIO DE FASES

Como se mencionó en las ecuaciones de diseño, las concentraciones de cobre en el equilibrio, pueden ser representadas por la ecuación:

$$y = Ce^{-\frac{B}{x}}$$

donde:

**y** : Concentración de cobre en la fase orgánica

**x** : Concentración de cobre en la fase acuosa

**C y B** : Constantes

Para tal efecto se determinaron las constantes C y B por regresión exponencial, usando los datos experimentales que se detallaron en los cuadros 3.4 al 3.18.

Desarrollando tenemos:

$$y = Ce^{-B/x}$$

$$\ln y = \ln C + (-B/x)$$

Cambiando variables:

$$y' = A' + B' x'$$

$$A' = \frac{\sum y - B' \sum x}{n}$$

$$B' = \frac{n \sum x' \sum y' - \sum x' \sum y'}{n \sum x'^2 - (\sum x')^2}$$

Así mismo, determinamos el coeficiente de correlación  $r$  :

$$\frac{n \sum x' y' - \sum x' \sum y'}{\sqrt{[n \sum x'^2 - (\sum x')^2] [n \sum y'^2 - (\sum y')^2]}}$$

En el siguiente cuadro se muestran las constantes y los coeficientes de correlación de las curvas de equilibrio experimentales y ajustadas según la ecuación exponencial, correspondientes a los cuadros 3.4 al 3.18 respectivamente:



CUADRO 4.1 CONSTANTES DE CORRELACION DE LAS CURVAS DE EQUILIBRIO AJUSTADAS

NUMERO	C	B	
1	5,509	0,07745	- 0,9550
2	4,9825	0,03752	- 0,9430
3	4,4273	0,03330	- 0,9223
4	3,4509	0,04044	- 0,8581
5	5,2127	0,16316	- 0,9770
6	5,0702	0,18593	- 0,9782
7	5,0693	0,20840	- 0,9749
8	4,9337	0,26460	- 0,9711
9	5,4500	0,30280	- 0,8640
10	4,9396	0,20700	- 0,8826
11	4,9700	0,2362	- 0,9060
12	4,6000	0,1203	- 0,8483
13	5,2394	0,3772	- 0,9200
14	5,4590	0,8460	- 0,9774
15	5,5570	1,0894	- 0,9759

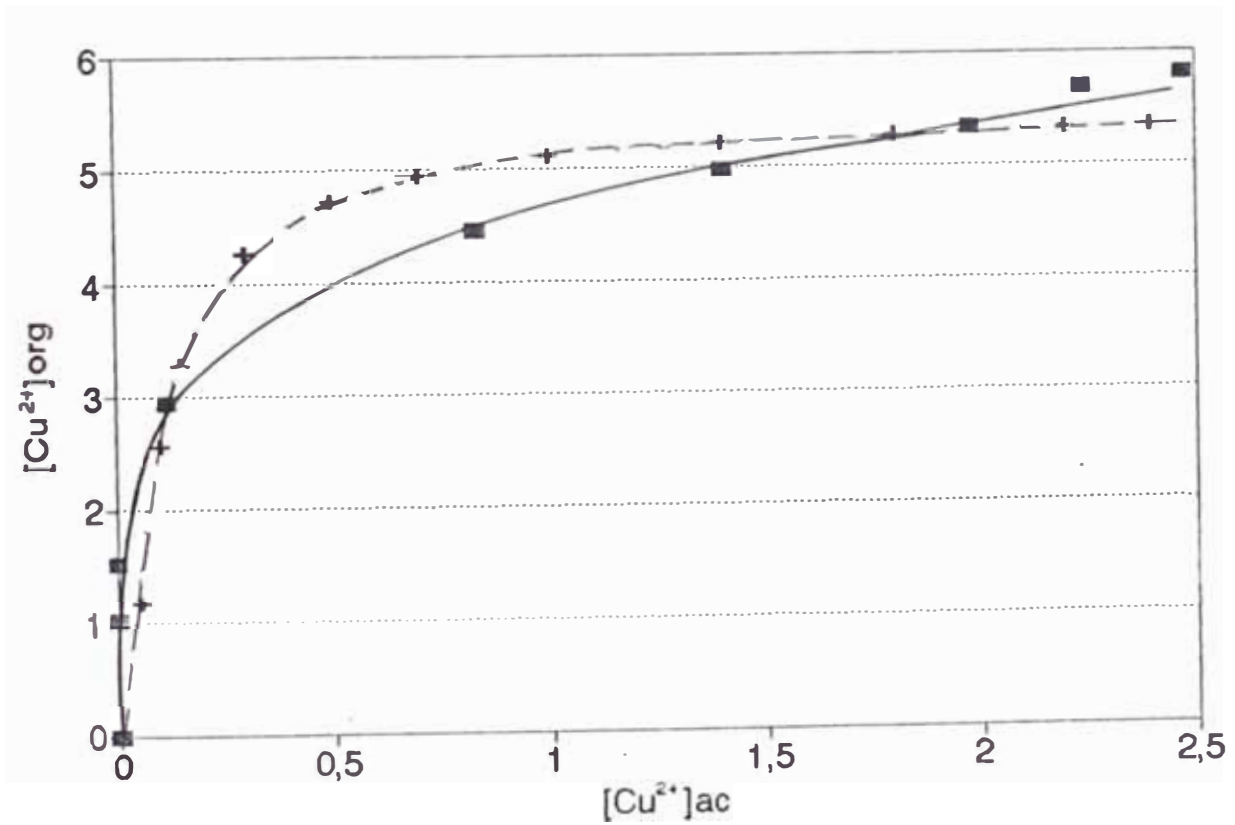
Adicionalmente se muestran los gráficos de comparación de las curvas de equilibrio experimentales y ajustadas (Gráficos 4.1 al 4.15)

# GRAFICO 4.1

COMPARACION ENTRE CURVA DE EXTRACCION EXPERIMENTAL  
Y LA CURVA TEORICA CON LIX 984 AL 10% V/V

$[Cu^{2+}]_{ac}$  inicial = 3,05 g/l

$pH_{ac}$  inicial = 2,5



+ AJUSTADA

■ EXPERIMENTAL

#### 4.3.2 DETERMINACION DE LA VARIACION DE LAS CONCENTRACIONES DE COBRE CON RESPECTO AL TIEMPO PARA LA PRUEBA PILOTO

De acuerdo al modelo matemático desarrollado en la sección 4.1.2 (Ecuación 12) tenemos:

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{A_f X_f + O_f Y_f - A_m X_m - O_m [C \exp(-B/X_m)]}{[H_a + H_o \frac{B}{X_m^2} \exp(-B/X_m)]}$$

Donde:

$$H_a = 1 \text{ l.}$$

$$H_o = 1 \text{ l.}$$

$$C = 5,2127$$

$$B = -0,16316$$

$$A_f = 0,1 \text{ (l/min)}$$

$$X_f = 6,0 \text{ (g/l)}$$

$$O_f = 0,1 \text{ (l/min)}$$

$$Y_f = 0$$

$$O_m = 0,1 \text{ (l/min)}$$

$$A_m = 0,1 \text{ (l/min)}$$

$X_m$  : Concentración de cobre en la fase acuosa

$t$  = tiempo

Reordenando términos y reemplazando valores, tenemos:

$$\frac{dX_m}{dt} = \frac{X_m^2 [0,06 - 0,1 X_m - 0,52127 e^{-0,16316 / X_m}]}{X_m^2 + 0,8505 e^{-0,16316 / X_m}}$$

La ecuación diferencial se resuelve usando el método numérico de Runge Kutta.

A continuación se muestra un programa para la solución de la ecuación diferencial, el que nos ha permitido establecer los valores teóricos de concentración de cobre respecto al tiempo.

#### 4.3.3 SIMULACION DE LA PRUEBA EN PLANTA PILOTO APLICANDO METODOS NUMERICOS (RUNGE KUTTA)

La ecuación diferencial de la sección 4.3.2 se desarrolla mediante el método numérico Runge Kutta, el cual se detalla en el programa para computadora, tal como se muestra en el apéndice (pag. 155)

#### 4.3.4 RESULTADOS DE LA SIMULACION

Los resultados del desarrollo de la ecuación diferencial de la sección 4.3.2 se reportan en el apéndice (pag. 156-160)

#### 4.4. DISCUSION DE RESULTADOS

##### 4.4.1 PRUEBA EN PLANTA PILOTO

- a) De acuerdo a los resultados de la sección 4.2.4 se observa que para las condiciones de prueba realizadas, se llega al estado estacionario dentro de los primeros 30 minutos de iniciada la prueba lo que indica una buena cinética de reacción.
- b) Las concentraciones de cobre en la fase acuosa y orgánica difieren con respecto a las concentraciones obtenidas a nivel de laboratorio debido a que a pesar de que se llega al estado estacionario no se llega al equilibrio.
- c) Si consideramos que el equilibrio es el obtenido en la prueba de laboratorio, determinamos que en las pruebas realizadas a nivel de planta piloto sólo se logra el 86,9% y el 83,4% del equilibrio con velocidades de agitación de 550 y 350 r.p.m. respectivamente, esto indica la importancia de la velocidad de agitación en la extracción.
- d) Es importante realizar la prueba de dispersión para determinar la velocidad óptima en la extracción sin llegar a provocar emulsiones.

#### 4.4.2 SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL POR EL METODO RUNGE KUTTA

La solución de la ecuación diferencial nos muestra los siguientes resultados, ver cuadro

Tiempo (min)	% Extracción respecto al equilibrio
0	0
5	26,4
10	48,3
15	62,7
20	74,9
25	84,4
30	91,3
40	100,0

- a) Los resultados del cuadro indican una rápida extracción durante los primeros 40 minutos, similar a los resultados de la prueba de planta piloto
- b) La concentración de cobre en la fase acuosa del estado estacionario difiere ligeramente con respecto al equilibrio hallado en laboratorio.

$$[\text{Cu}^{2+}]_{\text{ac equilibrio}} = 1,62 \text{ g/l}$$

$$[\text{Cu}^{2+}]_{\text{ac estado estacionario (teórico)}} = 1,37 \text{ g/l}$$

## CAPITULO V

### ANTEPROYECTO PARA LA INSTALACION DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCION DE SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO A PARTIR DE SOLUCIONES POBRES DE COBRE

#### 5.1. DESCRIPCION DEL PROCESO

Consideramos que el agua de mina posee concentraciones de 3 g/l de cobre y 2,5 de pH, ésta será sometida a las diferentes etapas hasta obtener cristales de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

##### 1era. Etapa

EXTRACCION LIQUIDO-LIQUIDO DEL COBRE CON SOLUCION ORGANICA DE LIX 984

En esta etapa inicial se debe acondicionar la solución diluida de cobre a tratar a un pH y concentración del orgánico, que determinará el número de etapas.

La extracción por solvente entre la fase orgánica y acuosa se lleva a cabo en extractores de características específicas que permiten obtener el mejor contacto entre las dos fases, la relación de volumen de mezcla y tiempo de contacto permitirá obtener resultados de acuerdo al diseño requerido.

En esta etapa el orgánico despoja al cobre de la solución acuosa, convirtiéndola en solución pobre que retornará a los pozos para seguir disolviendo cobre nuevamente, esta operación se realiza indefinidamente lo que puede causar variación en las concentraciones de cobre de la fase acuosa.

### 2da. Etapa

REEXTRACION LIQUIDO-LIQUIDO DE COBRE CON SOLUCION ACUOSA DE COBRE CON ALTO CONTENIDO DE ACIDO SULFURICO.

En esta etapa el cobre capturado por la solución orgánica es reextraído (despojado) por una solución acuosa de cobre con alta concentración de ácido sulfúrico, todo esto aprovechando la reversibilidad de la reacción, variando la concentración del ácido.

Las concentraciones de cobre y ácido sulfúrico de la solución reextractante son: Cobre 30 g/l y  $H_2SO_4$  150 - 200 g/l, lo que permite realizar una buena extracción.

Para que la solución acuosa sea la más concentrada posible, se debe trabajar con las relaciones de mezcla O/A altas (10/1) y dos etapas de reextracción.

La solución orgánica regenerada vuelve al proceso de extracción, el ciclo se repite una y otra vez. Hay que anotar que durante estos ciclos de trabajo existen pérdidas de pequeñas cantidades de orgánico, por lo que es necesario realizar reposiciones del mismo.



### 3ra. Etapa

#### CRISTALIZACION Y CENTRIFUGACION

La solución acuosa proveniente de la 2da. etapa contiene altas concentraciones de cobre, que para ser precipitados como sulfato de cobre necesita ciertas condiciones apropiadas, las cuales son: adición de ácido sulfúrico para saturar la solución y bajar la temperatura para disminuir la solubilidad del sulfato de cobre, produciendo así la cristalización de la sal, luego es centrifugado separándose la solución saturada de sulfato que retornará a la 2da. etapa para completar el ciclo.

La cantidad de cobre a cristalizar está en función de las siguientes variables:

- Concentración de la solución de cobre
- Concentración del ácido sulfúrico en la solución
- Temperatura de la solución.

#### 5.2. CRITERIOS DE DISEÑO

Los cálculos básicos han sido realizados en función de los criterios de diseño técnico experimentales, gentilmente cedidos por Cia. Henkel Corporation. A continuación mostramos algunos de los criterios usados.

Decantador (largo/ancho)	$\geq 0,90$
Velocidad del orgánico en el Decantador (ft/min)	= 6
Altura del Acuoso en el Decantador (m)	= 0,46
Máximo ancho del Decantador (m)	= 32,01
Extractor (Altura/Diámetro)	= 1,20
(Altura/Ancho)	= 0,70
Espacio libre en el Extractor (m)	$\geq 0,30$
Extractor (Diámetro Agitador/Diámetro Tanque)	= 0,60
Velocidad del Agitador (RPM)	= 34
Costos de Capital de Sistema de Ext-Reextracción (\$/ft <sup>2</sup> de área de base del decantador)	= 475
Flujos Específicos (GPM/ft <sup>2</sup> )	
En la Extracción	= 1,8
En la Reextracción	= 1,8
Tiempos de Retención de Contacto (min)	
En la Extracción	= 3
En la Reextracción	= 3
Reactivo Perdido en el Circuito de Extracción (ppm)	= 100

### 5.3. DIAGRAMA DE FLUJO

El Diagrama de Flujo propuesto para este estudio incluye sistemas de extracción-reextracción, decantación y centrifugación tal como se muestra en la siguiente figura N° 5.1.

#### 5.4. PROYECCION ECONOMICA

Para tener la proyección económica del proceso propuesto se han utilizado las variables de cada uno de los puntos contenidos en el diagrama de flujo, éstos permiten fijar las características físicas y con ellos los costos aproximados de los equipos a utilizarse.

Se ha considerado realizar un breve análisis de la tasa interna de retorno que podría tener este proyecto a fin de observar si ésta supera las expectativas teóricas necesarias para tener confianza en el proyecto. Por ello se han realizado las estimaciones del costo de inversión de capital para una producción de 120 Toneladas métricas de sulfato de cobre pentahidratado; también se estima el costo unitario de dicho producto. Los cuadros de la proyección económica se muestran en el apéndice.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

#### 6.1 CON RESPECTO A LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

6.1.1 Se demuestra que la capacidad de LIX 984 10% (V/V) aumenta con el incremento del pH de la solución acuosa y este incremento es del orden del 3% al 14% para variaciones de pH desde 1,5 hasta 2,5.

6.1.2 La máxima cantidad de cobre que puede extraer el LIX 984 es 56,5 gramos de cobre por litro de LIX puro.

6.1.3 De acuerdo a la necesidad se pueden trabajar a diferentes relaciones de mezcla y pH que permiten determinar mayor eficiencia de extracción. A pH menores de 1,8 la eficiencia de extracción disminuye significativamente.

6.1.4 Se observa que las curvas de equilibrio halladas para el reactivo LIX 984 con soluciones diluídas de cobre presentan un comportamiento que puede ser simulado por la ecuación:

$$y = Ce^{-B/x}$$

siendo los valores C y B característicos para cada par de condiciones de mezcla.

6.1.5 Se pueden generar constantes y curvas de distribución capaces de predecir comportamientos de equilibrio a diferentes relaciones de mezcla. Para ello previamente se deben determinar curvas de equilibrio tales como se han realizado en el presente trabajo

6.1.6 La eficiencia de extracción del LIX 984 al .10% (V/V) aumenta con la concentración de ácido sulfúrico en la solución reextractante por lo tanto es conveniente realizarla a la mayor concentración de ácido posible.

6.1.7 Los tiempos empleados para llegar al equilibrio durante la extracción y reextracción de cobre con LIX 984 son menores que 60 seg. (a relaciones de mezcla orgánico/acuoso

iguales a 1 y velocidades de agitación de 1600 RPM)

6.1.8 La cinética de re-extracción del reactivo LIX 984 es mayor que la cinética de la extracción, en aproximadamente un 100%.

## 6.2. CON RESPECTO A LAS PRUEBAS DE PLANTA PILOTO

6.2.1 El estado estacionario para las pruebas de planta piloto se logra luego de 15 a 20 minutos y no se llega al equilibrio de extracción determinado en el laboratorio. ésto se debe a que la prueba fue realizada como proceso continuo.

6.2.2 El modelo matemático propuesto para simular el comportamiento de la extracción de LIX 984 se aproxima a los resultados obtenidos a nivel de la prueba de planta piloto, lo que indica que puede ser usado como base para evaluaciones teóricas.

6.2.3 Se comprueba que las eficiencias de la extracción obtenidas en las pruebas de planta piloto (83,4% y 86,9%), se aproximan a las eficiencias reportadas en las referencias bibliográficas que indican que las eficiencias de extracción pueden llegar hasta el 90%

**BIBLIOGRAFIA**

1. ROBERT E. TREYBAL. "Transferencia de Masa. Mc Graw Hill 1980, pág. 534, 537
2. ROBERT H. PERRY - CECIL H. CHILTON. Biblioteca del Ingeniero Químico. Mc Graw Hill 1986, pág. 15.3-15.7
3. SHEPRARD T. POWELL. "Manual de Agua para Usos Industriales". Ediciones Ciencia y Tecnología 1987 Vol I, pág. 181-183
4. INCZEDY J. "Analitical Applications of Ion Exchange". Editorial I. Buzas 1962, pág. 346-381
5. YITZNAK - MORKUS AND A.S. KERTES. "Ion Exchange and Solvent Extraction of Metal Complexes". London-New York Wiley Intersciencia 1969, pág. 502-506
6. LADDHA G.S. . "Fenómenos de Transporte en Extracción Líquida". Editorial Tata - Mc Graw Hill 1976, pág. 209- 217
7. F. J. ALGUACIL. "La Extracción con Disolventes Aplicada a la Hidrometalurgia de Cobre". Revista Metalúrgica, Madrid 1987, pág. 172- 188



8. RODRIGUEZ VILLALBA, GERMAN. "Estudio de Extracción por Solventes". Tesis de Bachiller, UNI Ingeniería Metarlúrgica 1986
9. HENKEL. "Minerals Industry Division". Revista Técnica LIX 984 Tucson-Arizona 1987
10. E.R. DE MENT Y C.R. MERIGOLD. LIX 64N "Informe de los Progresos sobre Intercambio Iónico Líquido de Cobre:", General Mills Inc. Febrero 1970, pág. 1-6
11. M. GARCIA; A. OTERO; G UGARTE. "Mathematical Modelling de Cooper Solvent Extraction Processes", Revista Cooper 87, 1988. V. Santiag● de Chile, Vol.3, pág. 365-386
12. A.H. P. SKELLAND AND R. SEKSARIA. "Minimum Impeler Speeds for Liquid-Liquid Dispersion". Industries Engineering Process, Vol. 17 N°4, August 8, 1977, pág. 56-61
13. A.H.P. SKELLAND AND RJAI MOON LEE. "Agitator Speeds in Baffler Vessels for Uniform Liquid-liquid Dispersions", Industries Engineering Chemical Process, Vol. 17 N°4, June 29, 1978, pág. 473-478

14. ~~STEPHEN~~ MIALL. "Diccionario de Química". Editorial Atlante S.A., 2da. Edición, 1956, pág. 15, 137, 380, 423, 838.
  
15. REMINGTON - FARMACIA. Editorial Medka Panamericana 17 Edición. 1987, pág. 247-248, 269-271, 445-448
  
16. MOYER, HENRY R. "Copper Sulphate Via Solvent Extraction and Crystalization. Henkel Corporation, Tucson Arizona. 1979.
  
17. PETERS, MAX and TIMMERHAUS, KLAUS. "Plant Design and Economics for Chemical Engineers". Mc Graw Hill 1991, chapter 6.