CCM
CONSEJO DE COMPETENCIAS MINERAS

Cuaderno del Instructor
Operador Base Planta
Módulo IV: Hidrometalurgia: Proceso de Extracción por Solvente
PFPCO-2-01/v.2-[PE01-M04/v.1]

Una iniciativa de:

CONSEJO MINERO

Con la asesoría experta de:

Innovum | FCH FUNDACIÓN CHILE

Equipo Consejo Minero

Joaquín Villarino H., Presidente Ejecutivo
Carlos Urenda A., Gerente General
Christian Schnettler R., Gerente Consejo de Competencias Mineras
José Tomás Morel L., Gerente de Estudios
María Cecilia Valdés V., Gerente de Comunicaciones
Sofía Moreno C., Gerente de Comisiones y Asuntos Internacionales
Claudia Díaz R., Jefe de Proyectos

Equipo Innovum Fundación Chile

Hernán Araneda D., Gerente
Diego Richard M., Director Programa Fuerza Laboral Minera
Rafael Pizarro G., Director de Proyectos
Susana Gallardo S., Especialista de Formación
Eduardo Soto S., Consultor Senior
Álvaro Aguilar H., Consultor de Proyectos
Carolina Gutiérrez M., Consultor de Proyectos

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200
www.ccm.cl

Propiedad del Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero:

Este material ha sido realizado por el Centro de Innovación en Capital Humano de Fundación Chile - Innovum, con la colaboración técnica del Centro de Entrenamiento Industrial y Minero - CEIM, para el Consejo de Competencias Mineras (CCM) del Consejo Minero - del cual pasa a ser propiedad -.

Este material está disponible para instituciones que imparten formación en el ámbito minero en Chile, a las que se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos de este material para fines de formación, citando siempre al Consejo de Competencias Mineras del Consejo Minero y pudiendo incluso adaptarlo para satisfacer los requerimientos de los participantes. Se prohíbe la reproducción o adaptación con fines comerciales.

El uso del género masculino en esta publicación no constituye discriminación; tiene el sólo propósito de aligerar el texto cuando la redacción así lo exige.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
QUEDA AUTORIZADA SU REPRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN CITANDO LA FUENTE.

© Anglo American Norte S.A., Anglo American Sur S.A., Anglo American Chile Ltda.; Antofagasta Minerals S.A.; BHP Chile Inc.; Compañía Minera Barrick Chile Ltda.; Compañía Minera Cerro Colorado Ltda., Minera Escondida Ltda., Minera Spence S.A.; Compañía Minera Zaldívar Ltda.; Corporación Nacional del Cobre de Chile; Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM; Compañía Contractual Minera Candelaria, Sociedad Contractual Minera El Abra; Freeport-McMoran South America Inc.; Glencore Chile S.A.; SCM Minera Lumina Cooper Chile; Sierra Gorda SCM; Teck Resources Chile Ltda.; Yamana Chile Servicios Ltda.; 2013.

Consejo de Competencias Mineras – CCM:

El Consejo de Competencias Mineras (CCM) es una iniciativa de articulación entre las empresas mineras, cuyo fin es proveer información sectorial, estándares y herramientas que permitan al mundo formativo adecuar la formación de técnicos a la demanda del mercado laboral minero, tanto en términos cualitativos como cuantitativos. Con la asesoría experta de Innovum Fundación Chile, este organismo genera, con un enfoque sistémico, insumos para el mundo formativo, dando a conocer qué necesidades de capital humano tiene la minería y transfiriendo buenas prácticas para su formación.

El Consejo de Competencias Mineras – el primero de su naturaleza en el país – opera al alero del Consejo Minero. Fue formado en 2012 y cuenta con 12 empresas socias. A tres años de su creación, el CCM ha desarrollado una serie de productos y sistemas que han marcado un cambio de paradigma en la vinculación del mundo productivo con el de la formación para el trabajo, y han significado un aporte de fondo para el mejoramiento y la valoración de la educación técnico-profesional en el país, con un alcance que trasciende ampliamente a la sola industria minera.

Los Paquetes para Entrenamiento, son uno de estos productos. Se han creado además: Estudios de Fuerza Laboral, El Marco de Cualificaciones para la Minería (MCM), Marco de Calidad de Buenas Prácticas Formativas, Marco de Calidad para Instructores e impulsamos el apoyo sectorial al Sistema de Certificación de Competencias Laborales.

Si bien el Consejo de Competencias Mineras es una entidad privada, sus productos están concebidos como bienes públicos y gratuitos, de valor compartido para todos los estamentos de la sociedad en Chile. Toda la información y los productos generados por el CCM, además de un breve video explicativo, están disponibles en el sitio web: www.ccm.cl

El desafío que ahora enfrenta el CCM es que, tanto el mundo formativo como el minero, incorporen los estándares generados a sus procesos de negocio y a su quehacer diario. Esto generará una fuerza laboral más productiva y, por ende, mayor competitividad del país en el contexto internacional.

Contribución del CCM

Para trabajadores actuales y personas interesadas en trabajar en la minería:

- Mejor empleabilidad.
- Aprendizaje adecuado a los requerimientos del mercado.
- Acceso no sólo a un oficio, sino a rutas de formación y aprendizaje.

Para el sector minero:

- Mitigación de la escasez de personal, anticipándose al problema de manera coordinada y con visión de futuro.
- Mejora de productividad, al contar con más trabajadores preparados para los requerimientos de la industria, tanto propios como de proveedores.
- Mayor competitividad de esta industria, que repercute positivamente también en la competitividad del país.

Para las instituciones educacionales:

- Mejor empleabilidad de sus egresados.
- Mejor información proyectada a 8 a 10 años, para potenciar programas formativos en los oficios para los cuales se anticipa una mayor brecha de capital humano.
- Oportunidad para el reconocimiento de la industria respecto a su calidad formativa.

Para la comunidad y el país:

- Asignación más eficiente de fondos públicos de educación y capacitación, al tener identificados programas adecuados para satisfacer requerimientos del mercado.
- Disminución de la presión que se ejerce sobre otros sectores productivos por la demanda de trabajadores, al aumentar la cantidad de personas calificadas para la minería.

Índice

Descripción del documento 7

Módulo IV: Hidrometalurgia: Proceso de Extracción por Solvente 8

1. Operación de extracción por solventes 9

1.1. Descripción General 9

1.2. Objetivos del proceso de extracción por solventes 10

1.3. Operaciones específicas, etapas y mecanismos de la extracción por solventes 11

2. Principales equipos y parámetros operacionales 19

2.1. Equipamiento básico de extracción por solvente 19

2.2. Razones orgánico / acuoso internas típicas durante la puesta en marcha y una operación normal 25

Actividad N° 1 26

Descripción del documento

El Cuaderno del instructor contiene la totalidad de los contenidos a utilizar por el instructor para el desarrollo del programa de formación de Operador Base Planta de nivel 2.
El documento está dividido en módulos, los cuales están organizados en secciones de temas y contenidos específicos.
El instructor podrá además, sugerir actividades como las que se listan a continuación:

- Charlas y/o reflexiones de seguridad.
- Discusiones o foros de debate.
- Reforzamientos.
- Actividades en terreno.
- Preparación para la evaluación final

Específicamente para las actividades relacionadas a tecnologías de comunicación audiovisual se entregarán links a modo referencial, sin embargo el instructor tendrá la libertad de utilizar los recursos que estime conveniente a fin de lograr los requerimientos de la actividad.

Todo el material es susceptible de ser mejorado, adaptado o modificado en función de las características del grupo con el que se trabaje. Por ello se ha diseñado desde un enfoque flexible, que permite al instructor agregar recursos que enriquezcan algún contenido o posibilitar el aporte de los participantes, cuidando siempre de lograr los aprendizajes esperados de cada módulo.

Respecto a las evaluaciones se sugiere que éstas sean elaboradas por el instructor de acuerdo a los siguientes lineamientos:
La evaluación de los módulos y sus contenidos debe estar compuesta por a lo menos 10 preguntas, las cuales deben ser extraídas del documento “Instrumento de evaluación de proceso”.

Cada pregunta será evaluada con puntajes entre 0 y 10. La escala de calificación será de 0 a 100%. Considerando el 0% cuando el participante no tiene respuestas correctas y el 100% cuando posee la totalidad de respuestas buenas.

La nota de aprobación de las evaluaciones de los distintos módulos corresponderá a un 75%.

Módulo IV: Hidrometalurgia: Proceso de Extracción por Solvente

1. Operación de extracción por solventes

1.1. Descripción General

A continuación se presenta una descripción general del proceso de extracción por solventes, la cual tiene por finalidad la introducción del participante en los conceptos y operaciones básicas involucradas en este proceso.

La extracción por solventes es un proceso que implica el paso del cobre, disuelto en forma de iones dentro de una fase acuosa hacia otra fase líquida, inmiscible con ella, conocida como fase orgánica.

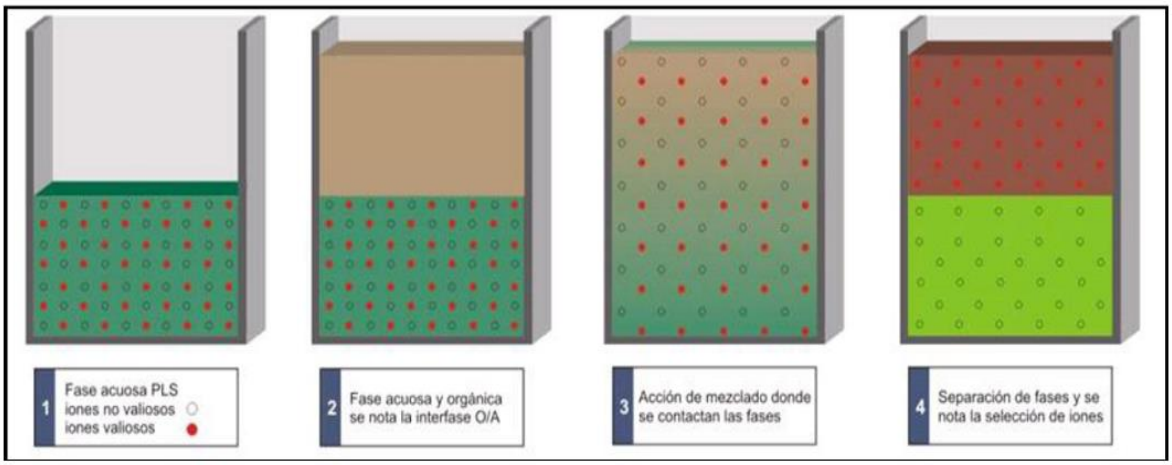
Durante el contacto líquido-líquido se produce un equilibrio en el cual el cobre en solución se distribuye entre las fases acuosas y orgánicas de acuerdo a sus respectivas solubilidades.

Esta técnica se aplica en la metalurgia extractiva del cobre con fines fundamentales de concentrar, purificar y separar este metal de otros elementos o metales disueltos.

En la operación de extracción por solventes la solución rica en cobre (PLS) que viene de la lixiviación se contacta en contracorriente e íntimamente con una oxima aromática disuelto en un diluyente adecuado, para la extracción por solventes, realizándose esta operación en un equipo llamado mezclador- decantador.

En la etapa inicial de mezcla existe una transferencia de masa selectiva de cobre desde la fase acuosa (PLS) a la fase orgánica (mezcla líquida entre un extractante y un diluyente) aquí se produce la reacción de extracción del cobre. El sentido de la reacción química se puede invertir mediante el contacto de la fase orgánica con una solución acuosa con alta concentración de ácido sulfúrico. Con ese fin el cobre es descargado o retraído de la fase orgánica al mezclarse con el electrolito pobre de electro obtención. El cobre es transferido nuevamente hacia la fase acuosa obteniéndose un electrolito rico que es la alimentación para el proceso de electro obtención.

El concepto de extracción por solventes lo podríamos resumir gráficamente como se muestra en la Figura. En el primer cuadro notamos la fase acuosa con diferentes iones metálicos, en el segundo cuadro se adiciona la fase orgánica, donde podemos notar que éstas no se mezclan (no son miscibles) por lo que se origina una interfase acuoso/orgánico, en el tercer cuadro ocurre la acción de mezclado de las dos fases y es donde ocurre el intercambio de iones, en el cuarto cuadro no se tiene acción de mezclado por lo que las fases nuevamente se separan pero podemos notar que la fase orgánica contiene iones valiosos y la fase acuosa contiene el restante de los iones no valiosos.



Proceso de Extracción por Solventes

Figura 1

1.2. Objetivos del proceso de extracción por solventes

Dentro de un sistema integral de recuperación de hidrometalurgia, el proceso de extracción por solventes es una parte significativa, que busca cumplir los siguientes objetivos:

- Separación y purificación de uno o más metales de interés de las soluciones que los contienen, las que suelen tener impurezas. Consiste en extraer el o los metales deseados desde soluciones o a la inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando el o los metales deseados en ella.
- Concentración de los metales disueltos para disminuir los volúmenes a procesar y así reducir los costos del proceso siguiente.
- Transferencia de los metales disueltos desde una solución acuosa compleja a otra solución acuosa diferente, que simplifique el proceso siguiente.

En la extracción por solventes, el cobre (Cu+2) contenido en el PLS, se transfiere a un extractante previamente diluido con un solvente orgánico. La mezcla de extractante y diluyente se denomina fase orgánica y la solución cargada de cobre PLS se denomina fase acuosa.

Las soluciones con bajo contenido de ácido permiten que el cobre se traslade de la fase acuosa hacia la fase orgánica, mientras que las soluciones altamente ácidas, re-extraen el cobre de la fase orgánica. (La transferencia de cobre hacia y desde la fase orgánica, es una reacción reversible que es controlada por la concentración de ácido sulfúrico en la solución acuosa).

Para comprender el proceso de SX-EW completo, visualicemos los siguientes tres circuitos interconectados:

- Circuito de solución de lixiviación.
- Circuito de purificación.
- Circuito de electro obtención.

El cobre se transfiere de un circuito a otro en forma sucesiva.

En la siguiente figura, se ilustran los tres circuitos. La concentración de cobre (Cu+2) en los circuitos, se expresa en gramos por litro (g/L).

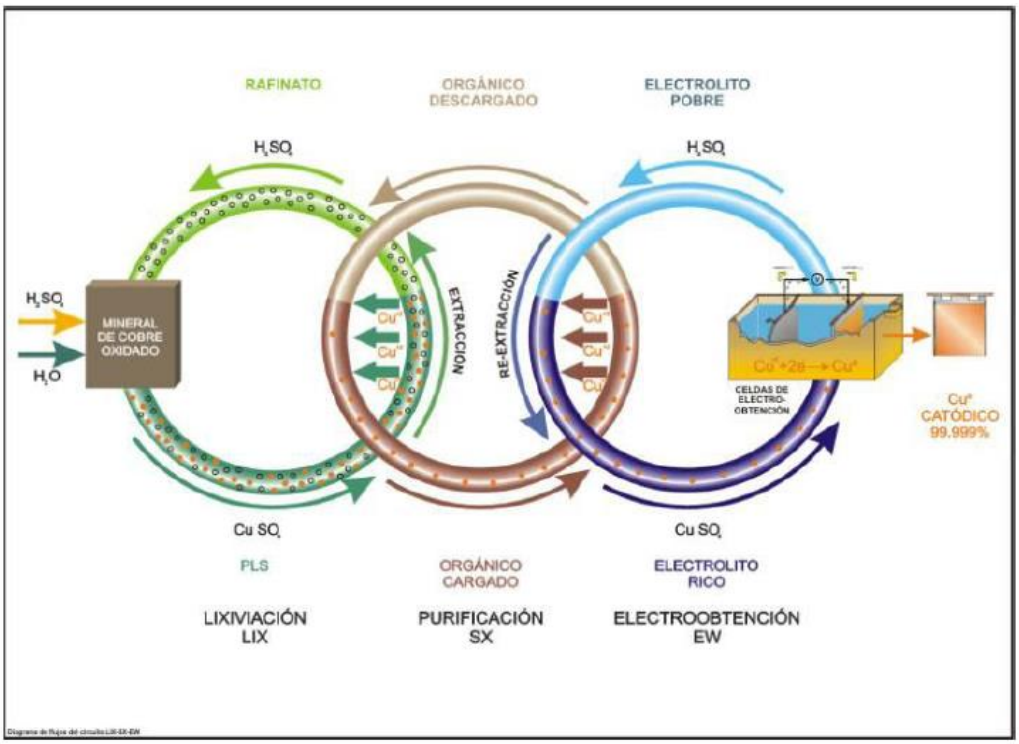


Diagrama de flujos del Circuito de lixiviación-extracción por solventes-electroobtención del cobre

Figura 2

1.3. Operaciones específicas, etapas y mecanismos de la extracción por solventes

El desarrollo de operaciones específicas, gracias a la incorporación de la extracción por solventes dentro de la metalurgia:

- La recuperación selectiva de un solo metal desde una solución de lixiviación, liberándolo de sus impurezas y concentrándolo de manera que facilite su posterior recuperación. Por ejemplo, en la lixiviación del cobre, la extracción por solventes se realiza en las soluciones de lixiviaciones diluidas e impuras, con el fin de traspasar el cobre a una solución de electrolito puro y concentrado, que permita realizar la electro obtención.

- La separación conjunta de varios metales desde una solución, ya que ciertos elementos químicos presentan una similitud de propiedades químicas y mediante la extracción por solventes se separan conjuntamente para su posterior separación diferencial.
- La extracción por solventes permite extraer las impurezas dañinas o contaminantes de una solución para dejarla limpia como solución de partida o purificada. Este método se aplica, por ejemplo, en la purificación de los descartes de electrolitos de refinería de cobre, al eliminar el Fe, As y otras impurezas, lo que limpia la solución y la devuelve al círculo principal.

Realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la electro obtención del metal, es imprescindible, ya que en la lixiviación ocurre la disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila.

El fundamento básico del proceso de extracción por solvente (SX) es la reacción química de intercambio iónico, entre el íon del elemento metálico y un íon H+ del compuesto orgánico (resina extractante), que da origen así a un complejo organometálico o quelato, que es soluble en la fase orgánica y que se separa entonces de los otros elementos impurezas, que permanecen solubles en la fase acuosa residual, o refino como se le denomina.

La fase líquida orgánica que permite la funcionalidad del proceso de SX, comúnmente en el lenguaje del proceso se le denomina como orgánica, contiene un compuesto orgánico denominado extractante, el cual esta diluido en un solvente. El extractante que químicamente se representa por RH.

Por otra parte, en base a la reversibilidad de la reacción química de extracción, el metal extraído es posible reextraerlo por otra fase acuosa desde el solvente orgánico, por el simple mecanismo de cambio de pH, con lo cual se invierte el sentido de la reacción química general.

$[M^{+2} – SO_4^{-2}]ac. + 2[R – H]org \leftrightarrow [R_2 – M]org + [2H^+ - SO_4^{-2}]ac$

Para el caso del cobre se han formulado resinas orgánicas o extractantes que operan de acuerdo a esa reacción general, que permite general un esquema de proceso en dos etapas, de acuerdo a la reacción.

Para que el proceso pueda funcionar eficientemente de acuerdo a lo esperado, se requiere que los extractantes y solventes utilizados posean un conjunto de características bien definidas, que están determinadas por sus formulaciones y por los procesos de fabricación y purificación que los originan.

En todo proceso de extracción por solventes, tanto en la etapa de extracción como en la de reextracción o stripping, se alcanza el equilibrio mediante la agitación de las respectivas fases

acuosas y orgánicas, lográndose un contacto íntimo entre ellas en forma de innumerables gotitas que facilitan la transferencia de masa.

La transferencia de masa se realiza en varias etapas:

- Convección dentro de una fase hacia la interfase.
- Difusión a través de la película fina junto a la interfase.
- Cruce de la interfase.
- Difusión y convección en la otra fase.

La interacción entre las distintas especies químicas presentes, está asociada a una cinética de reacción, que como tal va a influir en el tiempo de retención de las especies migrantes en los sistemas acuosos - orgánicos de las etapas de extracción y de stripping.

En consecuencia, las cinéticas de extracción y de stripping van a depender de la naturaleza química del extractante y de la especie que interesa extraer.

Las especies químicas participantes en la etapa de extracción de todo proceso de extracción por solventes son las siguientes:

a) Especie química que interesa extraer.
b) Otras especies químicas presentes en el disolvente acuoso.
c) Disolvente acuoso.
d) Extractante orgánico.
e) Diluyente orgánico.

Cuando la separación de las fases es deficiente y se genera entre ambas, una tercera fase denominada interfase, se hace necesario adicionar otra especie química denominada:

f) Modificador de fase

Las especies indicadas en los puntos a), b) acuosa y c) constituyen la fase acuosa y d), e) y f) la fase orgánica.

Después de alcanzado el equilibrio de extracción, la fase orgánica cargada o extracto puede ser limpiado con una fase acuosa apropiada para remover impurezas co-extraídas o eliminar especies químicas arrastradas mecánicamente. Este proceso se denomina scrubbing o lavado y puede aplicarse a nivel de laboratorio o industrial.

De manera similar, las especies químicas participantes en la etapa de stripping de todo proceso de extracción por solventes son las siguientes:

g) Complejo extractante metal a extraer.
h) Diluyente orgánico.
i) Agente de stripping.
j) Disolvente acuoso del agente de stripping.

Los puntos g) y h) constituyen la fase orgánica e i) y j) constituyen la fase acuosa.

Tipos de extractantes para la extracción del cobre

El extractante es un reactivo orgánico cuya característica principal es poder reaccionar y atrapar selectivamente un elemento disuelto específico.

Comercialmente, existen diferentes tipos de extractantes:

- Extractantes solvatantes.
- Extractantes básicos.
- Extractantes ácidos.
- Extractantes quelantes.

Sin embargo, son estos últimos los extractantes quelantes los más utilizados en la extracción de cobre. Los extractantes quelantes principales son las hidroxioximas (oximas). Estos poseen grupos hidróxilo (-OH) y grupos oxima (=N-OH) en sus estructuras moleculares y son altamente selectivos, dado que además de operar mediante un mecanismo de intercambio catiónico, forman quelatos con los electrones del nitrógeno (N) y el íon metálico extraído.

Para realizar la extracción por solventes, se utiliza un medio extractante líquido, de alta selectividad al elemento a separar, pero inmiscible en dicha solución.

En este proceso se distinguen tres momentos centrales:

- El líquido extractante se agrega a la solución primaria y se conecta con el ion metálico, que queda formando parte del extractante.
- El complejo extractante (ion metálico) es separado de la solución y llevado a una solución secundaria en el ion metálico.
- En la solución secundaria se produce la re-extracción o descarga, es decir, el elemento de interés es nuevamente devuelto a una solución acuosa, pero libre de impurezas, lista para el proceso siguiente de electro obtención.

Es decir, en el proceso de extracción por solventes se reconocen dos etapas fundamentales:

- La etapa de “extracción” propiamente tal.
- La etapa de “re-extracción o stripping”, también llamada “descarga”.

Procedimiento básico

El proceso tiene tres componentes básicos:

- Un soluto a extraer.
- Un solvente acuoso.
- Un extractante orgánico.

El proceso de extracción por solventes, se basa en la reacción reversible de intercambio iónico que tiene lugar entre dos fases inmiscibles, la fase orgánica que corresponde al reactivo extractante disuelto en un diluyente orgánico, y la fase acuosa que corresponde a la solución. Se pone en contacto la solución de lixiviación o fase acuosa con el reactivo orgánico o fase orgánica, y se mezcla fuertemente por agitación.

El reactivo orgánico contiene una molécula extractante, que tiene una alta afinidad por el ion metálico que se quiere recuperar. Este ion es transferido desde la fase acuosa o solución de lixiviación a la orgánica, a través de la interfase de los dos líquidos no inmiscibles.

La mezcla resultante por la agitación, se deja decantar para que se separe en dos capas o fases:

- La fase superior corresponde a la capa orgánica que también se conoce como fase cargada o fase extracto, se mantiene allí debido a su menor peso específico, el ion metálico se encuentra formando un complejo orgánico-metálico.
- La capa acuosa inferior, denominada fase acuosa o de refino, es una solución estéril respecto de iones metálicos y tiene un peso específico mayor al de la fase orgánica.

Al mezclarse las fases acuosa y orgánica, el equilibrio se logra gradualmente, debido a que la transferencia de masa dentro de un reactor depende de los siguientes factores:

- Tiempo de residencia.
- Área de interfases acuosa/orgánica.
- Potencial químico en la interfase.

El equilibrio de la reacción es el factor más importante en el proceso de intercambio y esto depende del tamaño de los equipos utilizados, la energía consumida en la agitación y otros factores que afecten en la totalidad de los costos del proceso.

Las dos etapas, extracción y reextracción, pueden ser consideradas una como la inversa de la otra.

Etapa de extracción o carga del reactivo

La solución impura proveniente de la lixiviación en fase acuosa, rica en iones de cobre y con una acidez baja, se introduce en mezcladores especiales donde se contacta con la fase orgánica de muy bajo contenido de cobre, llamado “orgánico descargado”.

Como ambas fases son inmiscibles, para realizar la extracción y mezcla, es necesario aplicar una acción mecánica de elementos externos que proporcionan la energía necesaria para este propósito. Al mezclarse ambas fases ocurre una transferencia de la especie metálica disuelta en la fase acuosa, la que se desplaza químicamente con el reactivo extractante en la fase orgánica hasta alcanzar el respectivo equilibrio químico. Así, se genera una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una solución acuosa descargada o refina.

Etapa de re extracción o descarga del reactivo

La etapa de re extracción del reactivo consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas de la fase orgánica, lo que permite ser reutilizada en otra extracción. Es decir, se obtiene una solución de orgánico descargado sin cobre, que es recirculado a la etapa de extracción, y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, la que es enviada a la siguiente etapa, la electro obtención.

Reactivos extractantes usados para recuperación de cobre

El principal constituyente del solvente o fase orgánica es el reactivo orgánico o extractante, aquel que tiene la capacidad de formar complejos orgánicos con el elemento que se desea extraer. En un principio, estos agentes extractantes estaban limitados para funcionar de acuerdo con un rango de pH y concentración de cobre en las soluciones que se trataban, pero en la actualidad se utilizan en un rango más amplio de soluciones provenientes de lixiviación.

Existe una amplia gama de propiedades que son usadas como patrón para seleccionar un extractante en particular.

Pérdidas de extractante

Las pérdidas de extractantes tienen gran importancia en la viabilidad económica de una planta. Ocurren principalmente por evaporación, solubilidad o entrampamiento durante el procesamiento. Así como la solubilidad es sensible al pH, las pérdidas también son dependientes de la acidez y, más aún, teniendo fases acuosas alcalinas.

Reactivos diluyentes

Los diluyentes y modificadores corresponden a otros componentes de la fase orgánica, que tienen funciones específicas en la optimización del proceso de extracción. En un círculo de

extracción por solventes, la fase orgánica normalmente está conformada por uno, dos o tres componentes: el extractante, el diluyente y algún modificador y por lo general, el diluyente es el componente de la fase orgánica que está presente en mayor proporción dentro de ella.

Los diluyentes se utilizan para disminuir la viscosidad de la fase orgánica para que fluya fácilmente y contribuya al contacto entre las dos fases. También se usan para reducir la excesiva concentración del extractante orgánico activo. Al igual que en el caso de los agentes extractantes, el diluyente debe cumplir ciertos requisitos:

- Ser capaz de disolver el extractante y de mantenerlo en solución.
- Baja viscosidad y densidad.
- Estabilidad química.
- Presentar baja solubilidad en la fase acuosa.
- Poseer un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

Elección del diluyente

Considerando la importancia del diluyente y su presencia mayoritaria en la fase orgánica, todo operador de planta debe realizar las máximas pruebas de control de calidad a cualquier nuevo embarque de diluyente que llegue al proceso de extracción por solvente. Las pruebas de control de calidad deben reflejar adecuadamente todas las propiedades consideradas significativas para el éxito de la operación.

Se debe ajustar el uso del diluyente según el sistema, por lo que cada operador de planta debe preocuparse de solicitar la asesoría de especialistas para estudiar varios diluyentes antes de determinar cuál es el más adecuado según condiciones de operación y localización de la planta. Un diluyente puede influir en el comportamiento del reactivo y ser un participante esencial en el éxito o eventuales dificultades operacionales del proceso.

Cuando el diluyente interactúa con el reactivo en la fase orgánica puede favorecer la polimerización del reactivo y restar así parte de los componentes activos dentro de la fase orgánica. Otros diluyentes producen el efecto contrario, lo que en los casos de extracción por intercambio catiónico se puede detectar midiendo la constante dieléctrica del diluyente. El menor valor resultante es el que da las mejores extracciones.

Algunos ejemplos de diluyentes usados a escala industrial son:

- Benceno (actualmente se considera cancerígeno, no se utiliza).
- Keroseno.
- Hexano.

- Tetracloruro de carbono.
- Cloroform.

Reactivos modificadores

Los modificadores tienen como función optimizar la separación de las fases, mejorar la coalescencia, aumentar la solubilidad de complejo metálico y evitar la formación de una tercera fase que corresponde a cualquier producto orgánico que, al ser añadido y disuelto en la fase orgánica, altere el comportamiento de un determinado reactivo.

Los modificadores son capaces de:

- Actuar sobre la separación de fases, para facilitar la coalescencia y disminuir los arrastres.
- Participar en el control de la generación de crudo y/o terceras fases, lo que favorece la solubilidad del complejo orgánico-metálico en la fase orgánica cargada.
- Estabilizar la molécula del reactivo, lo que permite su utilización indefinida al reducir su degradación. Por ejemplo, en el proceso SX del cobre se añaden como modificadores al reactivo principal, que es una oxima, alcoholes de cadena larga, fenoles y ésteres.

Solución acuosa

La solución acuosa es rica en lixiviación y corresponde a la fase portadora del metal o de los metales que interesa procesar por extracción; se denomina PLS (pregnant liquor solution). Luego de ser procesada por extracción, cambia de denominación a solución pobre o refinado, RF de refinante y suele ser enviada de regreso a la lixiviación.

2. Principales equipos y parámetros operacionales

2.1. Equipamiento básico de extracción por solvente

A partir de la solución de lixiviación que se han desarrollado a escala industrial, los procesos de extracción de cobre por solventes las cuales ponen en contacto la solución lixiviada con el disolvente sin carga, lo que se realiza en varias etapas (al menos dos), en que mezcladores y sedimentadores funcionan en contracorriente, dispuestos y arreglados de manera de asegurar que el disolvente orgánico entrante — sin carga- tenga un contacto final con la solución acuosa cargada, la que al salir quedará con muy baja concentración de cobre, el refino, el que retornará a la operación de lixiviación para uso posterior.

La transferencia de la fase orgánica recientemente cargada a la fase acuosa, se realiza contactando el orgánico con el electrolito agotado, o "electrolito pobre" fuertemente ácido, lo que se desarrolla en una serie de etapas (una, dos o hasta tres) en contracorriente, en mezcladores y sedimentadotes. Después de la etapa final de agotamiento, la fase orgánica estéril vuelve a la sección de extracción. Después de mezclar el electrolito enriquecido con electrolito pobre, para obtener la concentración justa de cobre, es bombeado al circuito de separación por electrólisis, la electro obtención.

El equipamiento básico de una planta de extracción por solvente, contiene:

- Un "mezclador" relativamente profundo, que recibe por bombeo las fases acuosa y orgánica, para su mezcla y emulsión. Este mezclador cuenta con un impulsor que evita el arrastre de la fase orgánica en la fase acuosa, de acuerdo con una configuración y velocidad rotacional definida.
- Un "sedimentador" poco profundo y de gran área. Con este equipo se separan las dos fases, facilitado por un sistema de doble compuerta que va por todo su ancho. El aumento de la temperatura en la emulsión, hasta cerca de 25 ºC, mejora la rapidez de la reacción y permite una mejor la separación de fases.
- Una manguera distribuidora que va entre el mezclador y el sedimentador, para asegurar un flujo laminar.
- Equipos mezcladores del tipo perfil bajo, ambos equipos en uno, formados por un cajón mezclador múltiple y un decantador al mismo nivel que el mezclador. En el mezclador se une la solución acuosa con el reactivo de extracción, gracias a un agitador que bombea y mueve la mezcla mediante una turbina.

Emulsión y coalescencia

En su definición más sencilla la emulsión es la formación de gotas pequeñas; la coalescencia es lo inverso, es decir, el aglutinamiento de las gotas pequeñas en gotas grandes. Estos dos procesos fundamentales en la operación de SX, se verifican en el mezclador y decantador respectivamente.

Si bien es cierto, que la emulsión favorece la cinética de intercambio debido a que una distribución de gotas más finas producirán un aumento de la velocidad de reacción o una disminución del tiempo de retención necesario, lo cual significa mayores flujos volumétricos o un reactor más pequeño, pero por otro lado, la distribución de tamaños más finos disminuirá la velocidad de separación de fases, lo cual significan menores flujos o un decantador más grande.

Estos efectos, que son opuestos, deben manejarse y balancearse muy bien, de tal modo de optimizar el trabajo del mezclador/decantador.

Banda de dispersión

La zona donde ocurre el fenómeno de coalescencia y comienza a separarse las fases constituyentes de la emulsión recibe el nombre de banda de dispersión. Esta banda se forma en el decantador de los equipos de extracción por solventes.

En esta banda de dispersión el orgánico asciende mientras que el acuoso desciende, generándose un perfil de fases en que el orgánico se encuentre sobre el acuoso y la banda de dispersión se ubica entre medio de estas dos fases. Este fenómeno de rompimiento de la emulsión se produce naturalmente y solo es necesario darle tiempo al sistema para que ocurra.

El espesor de esta banda de dispersión es una de las variables de operación más importante del decantador.

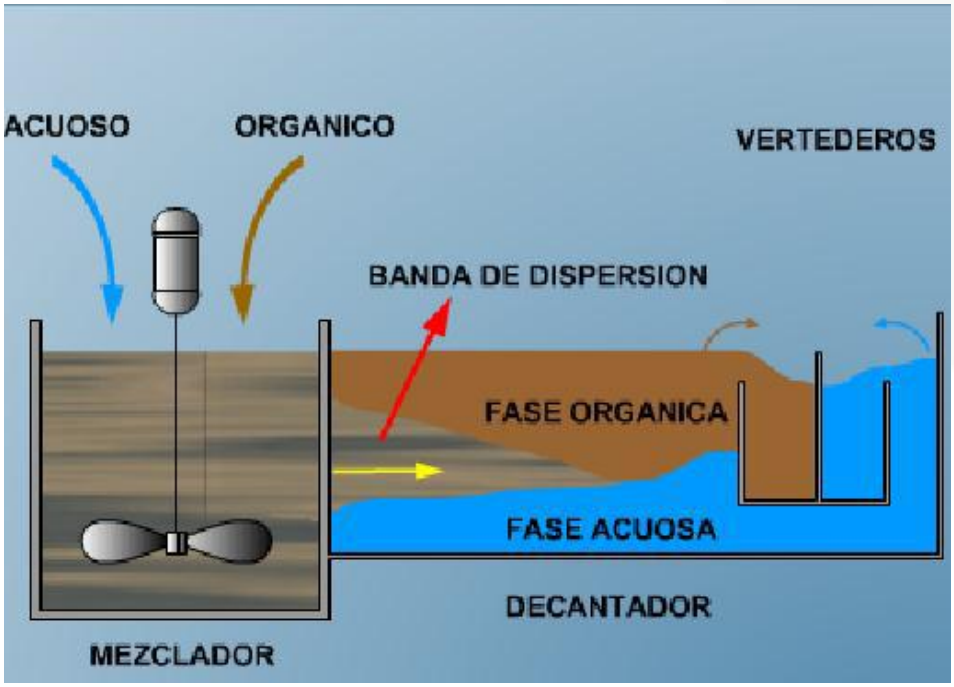


Figura 3

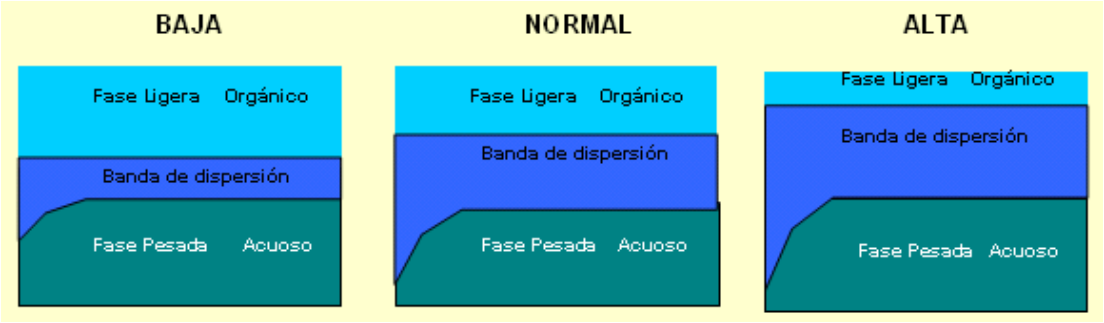


Figura 4

Continuidad y rompimiento de fase

Al agitar dos fases inmiscibles se forma una emulsión de una en otra. La técnica de extracción por solventes se basa en que esta emulsión se romperá por coalescencia en un tiempo prudencial, sin formar una tercera fase resultante de este proceso.

Después que el orgánico y el acuoso son contactados en el mezclador, esta dispersión fluirá a un decantador en que ambas fases calecerán, de acuerdo con su densidad, formando nuevamente dos capas continuas y perfectamente separadas una encima de la otra. Este fenómeno es conocido como Rompimiento de Fase o Separación de Fase.

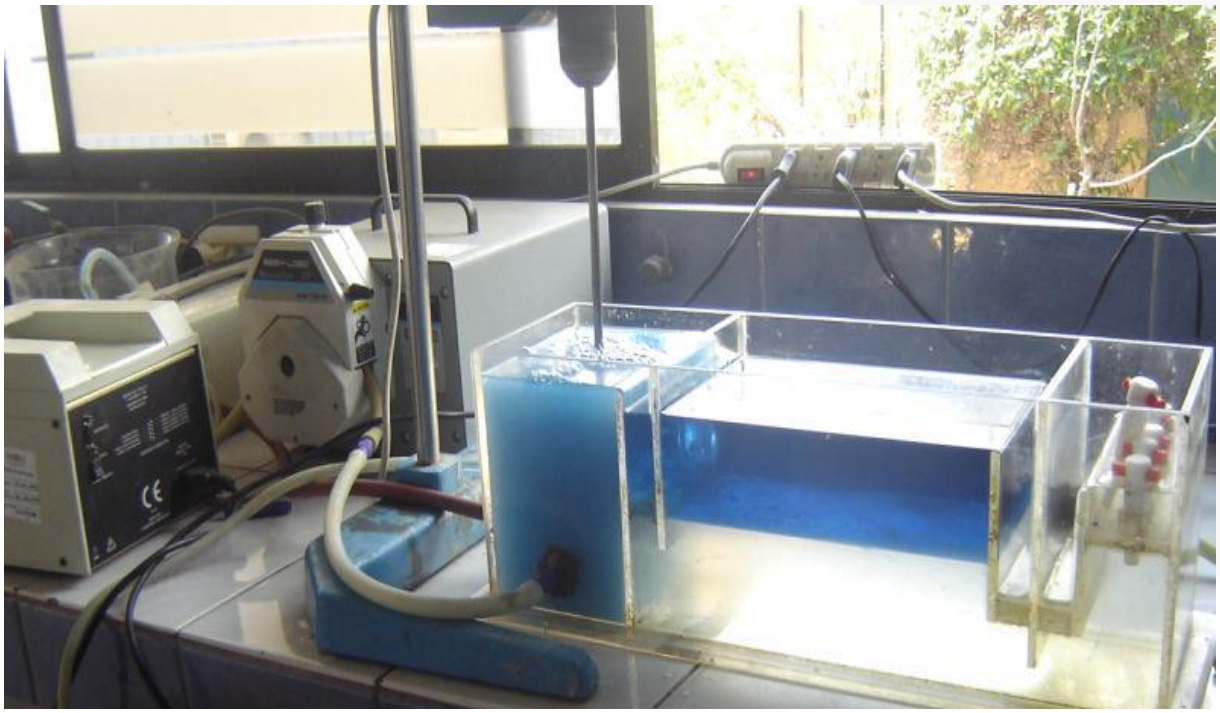


Figura 5

Cuando al agitar ambas fases, el acuoso está disperso en el orgánico se está en presencia de orgánico continuo. Si se tiene gotas de orgánico dentro de una fase acuosa, entonces se tiene acuoso continuo. La continuidad de fase es un factor importante a tener en cuenta en cualquier trabajo de SX. Las dispersiones en acuoso continuo son propensas a formar emulsiones estables, y por lo tanto, a producir arrastres físicos de orgánico.

El arrastre físico es definido como la cantidad de microgotas atrapadas de una fase en otra, formando una emulsión estable. En una planta continua, los arrastres físicos son los principales responsables del consumo de orgánico y de la contaminación de los electrolitos o soluciones de avance, con impurezas que se van incrementando en el tiempo si la reextracción funciona en circuito cerrado.

El problema de la continuidad de fase es un factor importante para la formación de Crud (borras) y emulsiones estables.

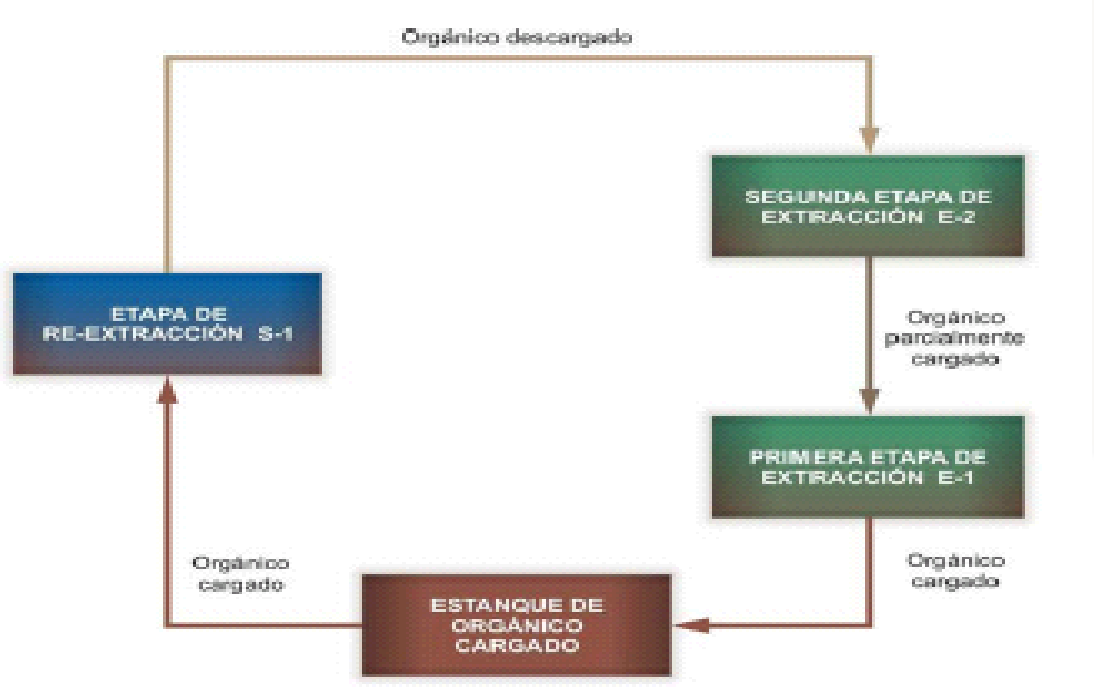


Figura 6

Razón Orgánico-acuoso

La razón orgánico-acuosa (O/A) es el cociente entre el flujo de orgánico y el flujo de acuoso, que ingresan al estanque de mezclado principal del mezclador-decantador. La práctica industrial muestra que un O-A cercano a 1.0 origina la mejor separación de fases.

O/A = Orgánico [m3/h] / Acuoso [m3/h]

O/A = 1 en extracción se logra haciendo coincidir los flujos de orgánico y de acuoso alimentados al mezclador-decantador E (1). Esta condición de operación define el flujo de orgánico para el circuito.

La mejor condición operativa física no siempre coincide con la química. En re-extracción, el flujo de acuoso está determinado por la transferencia de cobre necesario para el proceso posterior (electro-obtención), que es transferido desde el orgánico al electrolito. Por ello, el flujo de electrolito es menor que el de orgánico. Para operar re-extracción con un O/A similar a uno, se recicla electrolito que abandona el mezclador-decantador, hacia el estanque de mezclado del mismo mezclador-decantador que abandona, de modo que la combinación entre los flujos de electrolito reciclado y el que continúa hacia otra operación externa al área SX, coincidan con el flujo de orgánico.

Lo anterior también aplica al decantador de lavado (W), donde el flujo de solución de lavado que ingresa al equipo es mucho menor que el flujo de orgánico. Por ello, el decantador W incluye una cañería de reciclo de acuoso de gran diámetro.

En la práctica, para la determinación de la relación O/A se utiliza la probeta, la que es introducida en el mezclador principal, luego se retira de éste y se procede a tomar el tiempo.

Figura 7

Figura 8

2.2. Razones orgánico / acuoso internas típicas durante la puesta en marcha y una operación normal

	Tipo de flujo de circulación	Razón O/A interna durante la puesta en marcha
E1	Acuoso / Orgánico	0,7-1,0 (acuoso continuo) 1,0-1,20 (orgánico continuo)
E2	Acuoso / Orgánico	1,0-1,25 (orgánico continuo)
EP	Acuoso / Orgánico	1,0-1,25 (orgánico continuo)
S	Acuoso	1,0-1,25 (orgánico continuo)
W	Acuoso	0,7-1,0 (acuoso continuo) 1,0-1,20 (orgánico continuo)

Figura 9

Continuidad de fases

De la definición de emulsión se establece que existe una fase matriz dentro de la cual la otra fase se dispersa en forma de gotas. La fase que cumple el rol de fase matriz es la que define la continuidad de una emulsión.

En la extracción por solventes se puede dar dos casos de continuidades:

a) **Acuoso continuo:** pequeñas gotas de orgánico están dispersas en la fase acuosa. La mezcla en acuoso continuo conducirá la corriente eléctrica.

Cuando la fase matriz es la fase acuosa se tiene una emulsión de continuidad acuosa.

b) **Orgánico continuo:** pequeñas gotas de acuoso están dispersas en la fase orgánica. La mezcla orgánica continua no conducirá la corriente eléctrica.

Cuando la fase matriz es la fase orgánica se tiene una emulsión de continuidad orgánica.

Para producir una continuidad de fase definida, basta comenzar a agitar dentro de la fase que se quiere mantener como continua, es decir, dentro del orgánico si se quiere orgánico continuo, o dentro del acuoso si se prefiere acuoso continuo.

En otras palabras producir una emulsión con una determinada continuidad se inicia la agitación en la fase que se desea mantener continua. El tipo de continuidad que se tenga es de gran importancia desde el punto de vista de la contaminación de los diferentes flujos de soluciones que se tiene en la extracción por solventes. Esta contaminación se debe a los arrastres físicos de gotas de la fase dispersa.

En general una planta de SX teóricamente debe trabajar ya sea en continuidad acuosa u orgánica en las diferentes etapas, partiendo de la base que los flujos principales de salida de cada etapa no deben llevar la otra fase arrastrada, de acuerdo a:

E-1: el flujo de orgánico no debe llevar acuoso, por lo tanto debería trabajar en acuoso continuo.

E-2: El flujo de refino no debe llevar orgánico, por lo tanto debería trabajar en orgánico continuo.

W: El flujo de orgánico no debe llevar acuoso, por lo tanto debería trabajar en acuoso continuo.

S-1: El flujo de electrolito no debe llevar orgánico, por lo tanto debería trabajar en orgánico continuo.

S-2: El flujo de orgánico no debe llevar acuoso, por lo tanto debería trabajar en acuoso continuo.
En la práctica, cada planta debe acomodarse a su propia conveniencia, teniendo siempre en cuenta trabajar con las continuidades que produzcan los menores arrastres posibles. Debemos recordar siempre que la fase que no es continua, es la que lleva el menor arrastre.

Para el caso en que debido a los altos contenidos de una cantidad excesiva de borra, es preferible operar en continuidades orgánicas, para así permitir poder mantener la borra en la interfase. El peligro de mantener con continuidad acuosa en E-1 permite que se produzca un arrastre indeseable de borra, por cuanto sobrenada en la superficie y es descargada junto con el orgánico cargado en el mezclador de la etapa de lavado produciendo en este un aumento de emulsiones estables que aumentan los contaminantes y arrastres en el flujo de orgánico que va hacia las etapas de reextracción y del circuito en general. Estos arrastres de borra producen lejos los mayores arrastres de contaminantes que los arrastres de acuoso en orgánico.

La continuidad indica la fase que actúa como matriz en cada etapa de SX, y puede corresponder a orgánica o acuosa.

Si O/A = 1.0, la mezcla puede tener una u otra continuidad de fase, dependiendo de las condiciones específicas con que se creó la mezcla.

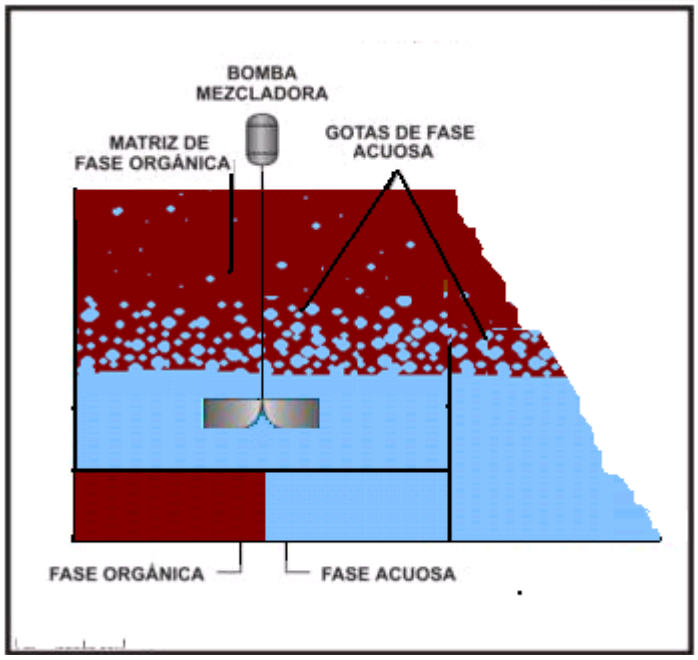


Figura 10

Continuidad Orgánica

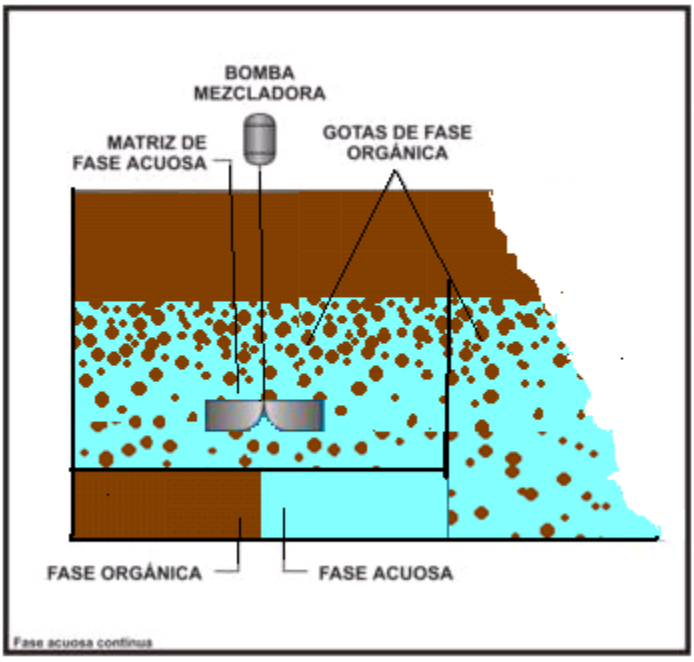


Figura 11

Continuidad acuosa

- Al aumenta O/A, crece la posibilidad de que la fase continua sea orgánica.
- Al disminuir O/A, crece la posibilidad de que la fase continua sea acuosa.

La práctica industrial muestra que en continuidad de fase orgánica, el arrastre de orgánico en el acuoso que abandona un mezclador-decantador, es menor que el arrastre de acuoso en el orgánico que abandona el mismo equipo, y viceversa.

La operación correcta de una planta de SX implica lograr la continuidad de fase adecuada en cada mezclador-decantador. La continuidad adecuada en un equipo depende de la preferencia en el arrastre a minimizar. En E-1 es más importante minimizar el arrastre de acuoso en el orgánico que deja el equipo, ya que el acuoso contiene impurezas que se traspasan al electrolito, en tanto el orgánico arrastrado finalmente ingresa al mezclador-decantador E-2, sin consecuencias. Sin embargo, en E-2 el arrastre de orgánico en el refino representa un descenso del inventario de orgánico del tren, lo que aumenta el costo de operación de la planta.

La continuidad de fase puede ser afectada por el contenido de sólidos en el acuoso, variaciones en flujos alimentados a un decantador, o por establecerse el traspaso de borra entre equipos.

Para la verificación del tipo de continuidad que se está trabajando existen varias formas las cuales se describen a continuación:

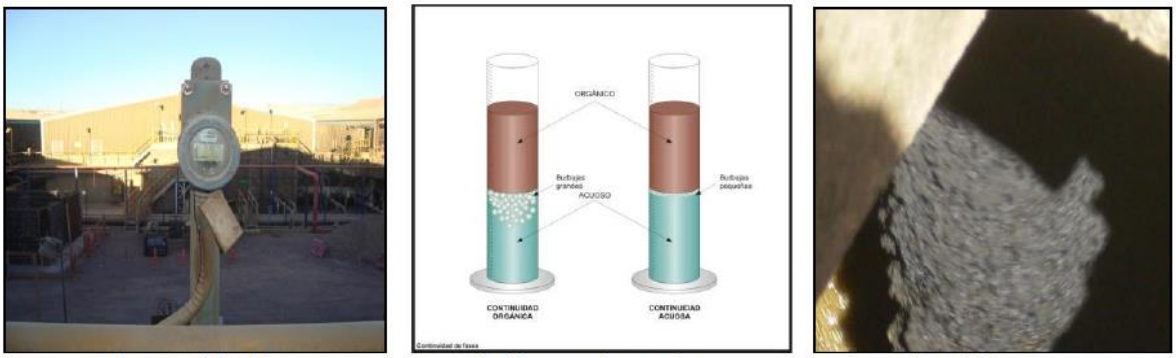
- Para saber cuál es la continuidad de fase en un momento determinado, se puede observar el sensor de conductividad que está inmerso en la dispersión, ya que el orgánico es no conductor desde el punto eléctrico.

- Dejar calecer las fases en una probeta y fijarse en la forma del menisco de interfase, para orgánico continuo es redondeado y plano para acuoso continúo.

- En la velocidad de coalescencia, la cual es más rápida en acuoso continuo que en orgánico continuo.

- Las burbujas en la interface, para orgánico continuo se tienen burbujas grande y dispersas de acuoso en la interface, y para acuoso continuo se tienen burbujas pequeñas de acuoso en la interface.

- Las continuidades de orgánico y de acuoso tienen diferentes apariencias a simple vista; la superficie de una mezcla bajo continuidad orgánica se aprecia menos agitada que bajo continuidad acuosa.



Conductividad Burbujas en interface agitación

Figura 12

Posición de Interfase de Acuoso y Orgánico

Cada decantador está equipado con un vertedero ajustable para el acuoso. Al ajustar la altura del vertedero se modifica la cota a la cual la interfase se establece, y en consecuencia las profundidades de las capas de orgánico y acuoso. Los decantadores han sido diseñados para una profundidad de orgánico y acuoso de aproximado de 800 mm, con un espesor de orgánico de 320 mm, que corresponde a la profundidad del fluido separado. El espesor del orgánico determina la velocidad media del fluido en el decantador, por ejemplo no debiera exceder 2.8 cm/s (velocidad de diseño), para asegurar bajos arrastres.

Perfil hidráulico y canaletas recolectoras en decantador

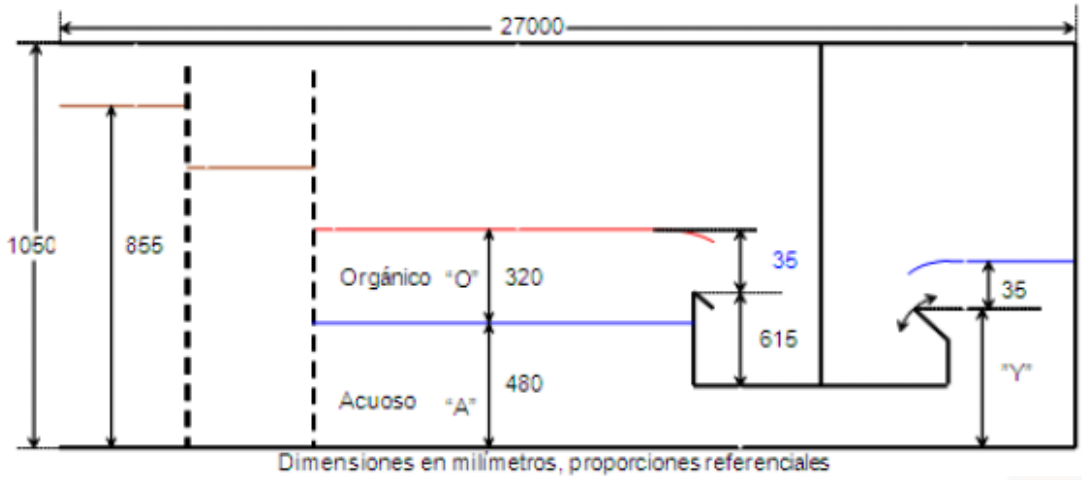


Figura 13

Para el control de las cotas en el decantador el operador utiliza un equipo llamado bandómetro. Este equipo es introducido en un punto del decantador para luego medir:

- La altura de la banda de orgánico
- La altura de la dispersión.
- La altura de borra o crub.

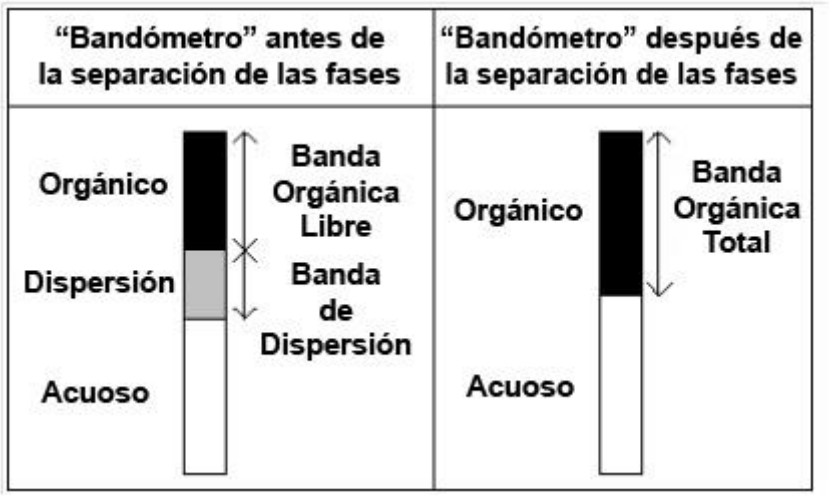
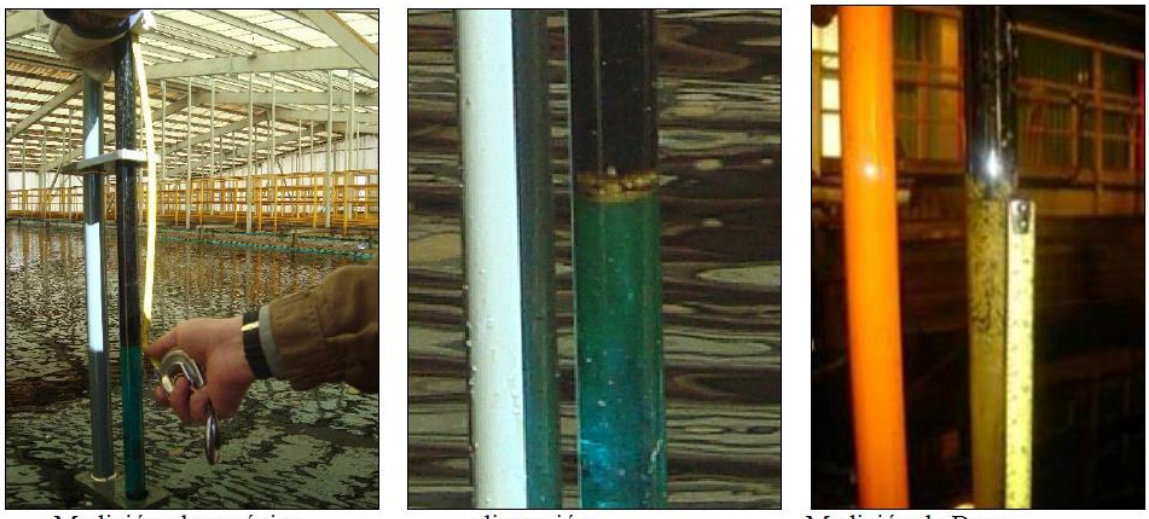


Figura 14



Medición de orgánico dispersión Medición de Borra

Figura 15

La relación básica para el ajuste del nivel del vertedero de acuoso es:
(O x ρ ORG) + (A x ρ AQ) = Y x (ρ AQ + 35),

Donde

- O, A: profundidad del orgánico, acuoso.
- Y: profundidad del acuoso a la cota del labio del vertedero ajustable.
- ρ ORG, ρ AQ: densidad de la fase orgánica, acuosa.

La razón de ajuste R expresa el cambio de cota de la interfase, respecto del vertedero ajustable.

R = ρ AQ / (ρ AQ - ρ ORG)

El ajuste del nivel del vertedero modifica el inventario de orgánico en un decantador. Un ajuste menor del vertedero provoca cambio notorio en la cota de la interfase. Por ejemplo en el decantador W la razón de ajuste es cercana a 6, en tanto en S-1 es cercana a 3. Por cada centímetro de ajuste (ej., subida) del vertedero de acuoso, la posición de la interfase varia (baja) en unos 6 cm en el equipo W, y en unos 3 cm en el equipo S-1

Arrastres

En todo proceso de SX, se genera el arrastre de una de las fases en la otra en la forman de microgotas que no logran ser separadas en los decantadores, lo que trae consigo problemas operacionales y deficiencias.
En extracción por solvente (SX) de cobre interesan de sobremanera los arrastres de acuoso en el orgánico cargado, por cuanto al avanzar este último a la etapa de reextracción genera una contaminación gradual del electrolito con impurezas perjudiciales afectando la electro obtención (EW).

La continuidad tiene gran importancia en el tipo de arrastres, debido a que normalmente se producen contaminaciones que afectan no solo a SX propiamente tal, sino también a las operaciones anteriores y posteriores.

La cantidad de arrastres es una función del reactivo, del diluyente, del tiempo de residencia, del diseño del decantador, del diseño de los agitadores, de la temperatura, y principalmente de los sólidos en suspensión que vienen en la solución rica proveniente del sistema de lixiviación en pilas.

Los arrastres no son fáciles de determinar, porque las muestras representativas de las fases son difíciles de obtener en pequeños equipos, que son usados para medir arrastres.

Los arrastres de fase orgánica en el refinado y en el electrolito rico, también son de suma preocupación, ya que esta pérdida de orgánico del circuito representa una de los principales costos de operación de la planta SX. A la vez los arrastres causan problemas de contaminación.

- El arrastre o contaminación O/A, es el volumen de orgánico, medido en partes por millón (ppm) que es arrastrado por la fase acuosa. Esta contaminación representa una pérdida del reactivo orgánico.

- El arrastre o contaminación A/O, también se mide en ppm, es el volumen de acuoso que es arrastrado por la fase orgánica. Esta contaminación implica que en el electrolito aumente la concentración de impurezas, lo que justifica, en algunos casos, una etapa de lavado del orgánico.

Figura 16

En resumen cuando se tiene una continuidad se dan los siguientes casos:

- Una continuidad acuosa se tiene arrastre de orgánica.
- Una continuidad orgánica se tiene arrastre de acuosa.

Esta contaminación debe ser controlada ya que el orgánico cargado, al pasar de las etapas de extracción a reextracción, produce un aumento en las concentraciones de impurezas en el electrolito.

Otro tipo de arrastre es aquel que proviene de la lixiviación y se refiere al arrastre de partículas finas de mineral. Este arrastre es muy peligroso porque genera una interfase muy estable, difícil de romper, denominada como borras.
Los niveles de arrastre, son una respuesta de la eficiencia de la separación de fases, la cual está influenciada por los siguientes factores principales:

Flujo especifico. (m3 /h /m2)

- Temperatura.
- Continuidad de fase.
- Grado de agitación en el mezclador.
- Razón de fase, O/A interna.
- Tasa de formación de borra.
- Razón O/A Global: Es la razón entre el flujo de orgánico y el flujo de acuoso que se alimenta a los mezcladores de cada etapa.

RO/A= F.O/F.A.

Razón O/A Operacional: Es la razón entre el flujo de orgánico y el flujo de acuoso, pero considerando recirculación de uno de los dos flujos.
Considerando Recirculación Acuosa

RO/A= F.O/(F.A+R)

Dispersiones estables de SX

- Contaminación O/A:

Es una fracción de dispersión, que no se separa y que produce contaminación del electrolito y de cátodos; también por arrastres vía refino llega a lixiviación. En ambos casos representa una pérdida de extractante.

- Contaminación A/O:

Es una fracción de dispersión sin separar que transporta impurezas al electrolito desde las etapas de extracción; también aumenta el ácido y cobre en el refino afectando la eficiencia de extracción.

Formas de remover los atrapamientos O/A

Entre los métodos de remoción de orgánico desde las soluciones acuosas, se tienen las siguientes alternativas:

- Post decantadores de refino y electrolito.
- Colección y retiro desde piscinas de refino.
- Columnas de flotación.
- Celdas Scavenger en EW
- Filtros Chuqui-Demister.
- Estanque de Electrolito Rico.

Formas de remover los atrapamientos A/O

Los arrastres de acuoso en orgánico se pueden eliminar o reducir mediante las siguientes alternativas:

- Mallas empacadas con elementos coalescedores en los decantadores.
- Coalescedores tipo Chuqui
- Etapas de lavado en la configuración de la planta.
- Lavado o lluvia de agua dentro del decantador.

Capacidad de Carga

La capacidad de carga, se refiere no sólo al metal que es factible de ser cargado, sino, a la transferencia neta que se logra al descontar el retorno que trae desde la descarga.

Carga máxima

La carga máxima corresponde a la máxima cantidad de cobre que la fase orgánica puede aceptar. Se Expresa como gll Cu en la fase orgánica. Esta carga máxima será función de la cantidad de oxima contenida en la fase orgánica.

Como el reactivo no se descarga totalmente en etapa de reextracción (stripping), existe una cierta carga circulante de la especie de interés en el orgánico, por lo tanto se trabaja con un concepto nuevo: la transferencia neta del reactivo de SX.

Transferencia neta

La transferencia neta es definida como la cantidad efectiva de la especie química de interés, que es transportada por el reactivo de SX desde la solución rica al electrolito. La transferencia neta se expresa en gramos/litro/1 % reactivo v/v. También puede decirse que es la diferencia entre la concentración de la especie de interés en el orgánico cargado y en el orgánico descargado, por cada unidad de porcentaje de concentración volumétrica del reactivo de SX en la fase orgánica.

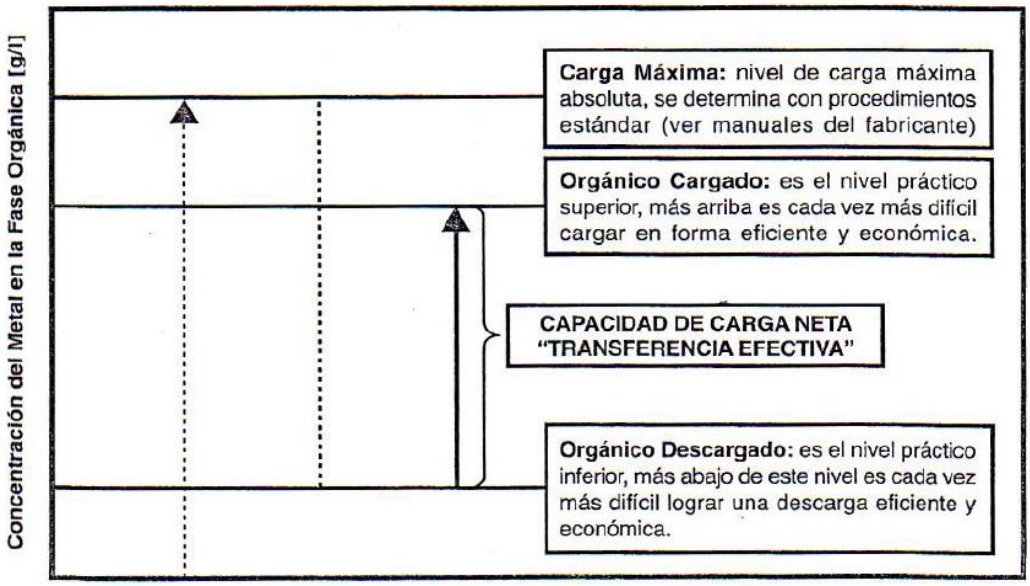


Figura 17

Por lo tanto a partir del concepto de transferencia neta, se puede corregir que el reactivo no trabaja al 100% de su carga máxima, sino a porcentaje de ésta. Esto está relacionado con el porcentaje de extracción de las etapas de extracción por solventes.

El porcentaje de extracción se calcula usando los coeficientes de distribución y la razón O/A como se muestra a continuación:

$$\%\ de\ extracción = \frac{{}^{O}/_{A}\ x\ D}{\left(1 + {}^{O}/_{A}\right) x\ D}$$

Figura 18

Donde el Coeficiente de Distribución es una medida del potencial extractante del reactivo de SX, mientras mayor es este número D, más grande es la tendencia de extracción del reactivo. El coeficiente de distribución es definido matemáticamente como:

$$D = \frac{Concentración\ del\ metal\ en\ la\ fase\ orgánica}{Concentración\ del\ metal\ en\ la\ fase\ acuosa}$$

Figura 19

En otras palabras representa la eficiencia de la fase orgánica respecto a la transferencia de cobre. Expresa la cantidad de cobre, gpl Cu, que cada 1% en volumen de extractante es capaz de transferir.

$$T.N = \frac{(O.C - O.D)gpl\ Cu}{{}^{\circ}/_{v}\ extractante} = \frac{gpl\ Cu}{{}^{\circ}/_{v}}$$

Figura 20

Su valor se ve altamente influenciado, por el flujo de orgánico, el N° etapas de la planta, las concentraciones de cobre y ácido en el electrolito, la concentración del extractante.
Muchos diseñadores la utilizan para el cálculo del requerimiento de extractante, en función de las T.N. entregadas en los Data Sheet.

Concentración de Extractante

Se define como el volumen de extractante contenido en la fase orgánica. Se puede expresar como:

$${}^{\circ}/_{v}\ Extractante = \frac{volumen\ de\ extractante\ x\ 100}{vol.de\ solvente + vol.extractante}$$

Figura 21

Se mide en laboratorio, la carga máxima de la fase orgánica y el valor obtenido se divide por el factor de carga del extractante:

$${}^{\circ}/_{v}\ Extractante = \frac{Carga\ Máxima}{factor\ de\ carga} = \frac{gpl\ Cu}{(\frac{gpl\ Cu}{{}^{\circ}/_{v}})}$$

Figura 22

Carga Máxima de Equilibrio

Se define como la concentración de cobre en la fase orgánica que queda determinada por la proyección del PLS cuando corta la isoterma de extracción.

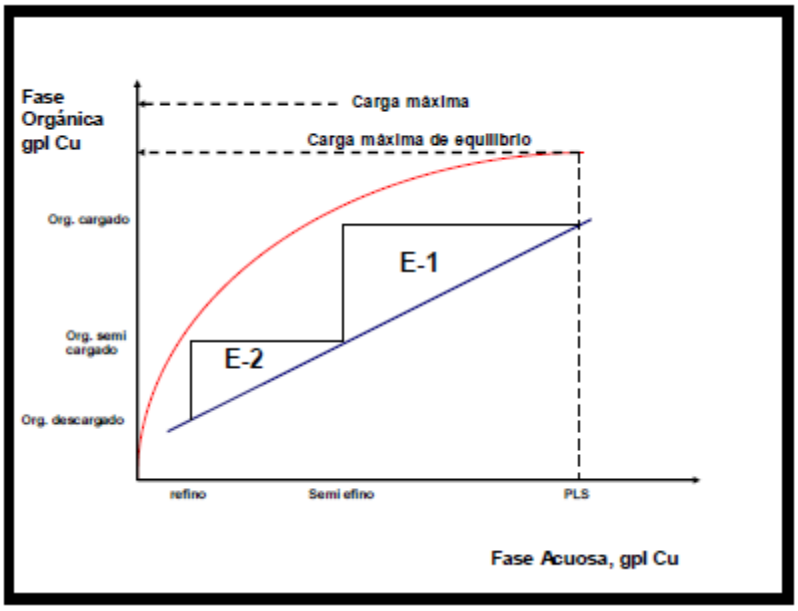


Figura 23

Porcentaje de carga

Expresa la proporción de cobre contenido en el orgánico cargado que deja la etapa de extracción. Esta proporción se expresa de dos formas:

- Referido a la carga máxima.
- Referido a la carga máxima de equilibrio.

Un bajo valor de % de carga está asociado con una baja selectividad de Cu/Fe.

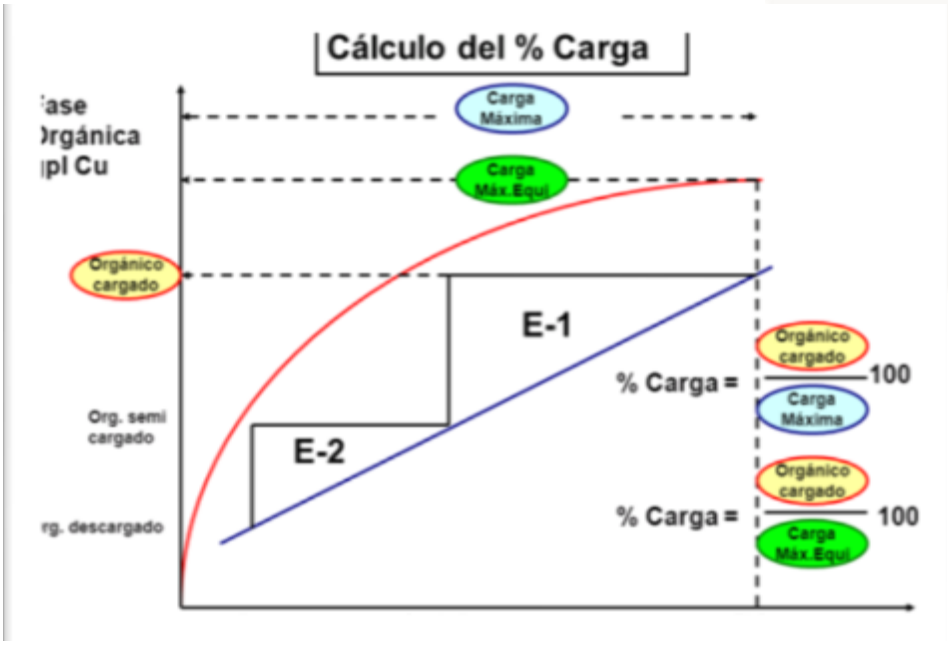


Figura 24

Descarga Máxima

La Descarga Máxima expresa el mínimo contenido de cobre, en gpl Cu, que puede tener la fase orgánica de acuerdo a las condiciones de operación de la planta.

En planta se manifiesta en la concentración de cobre en el Orgánico Descargado que deja la etapa de reextracción para entrar a la etapa de Extracción.

Su valor se verá influenciado por: el tipo de extractante, el contenido de ácido y cobre en el E.P, la concentración de extractante, el N° de etapas de S y E.

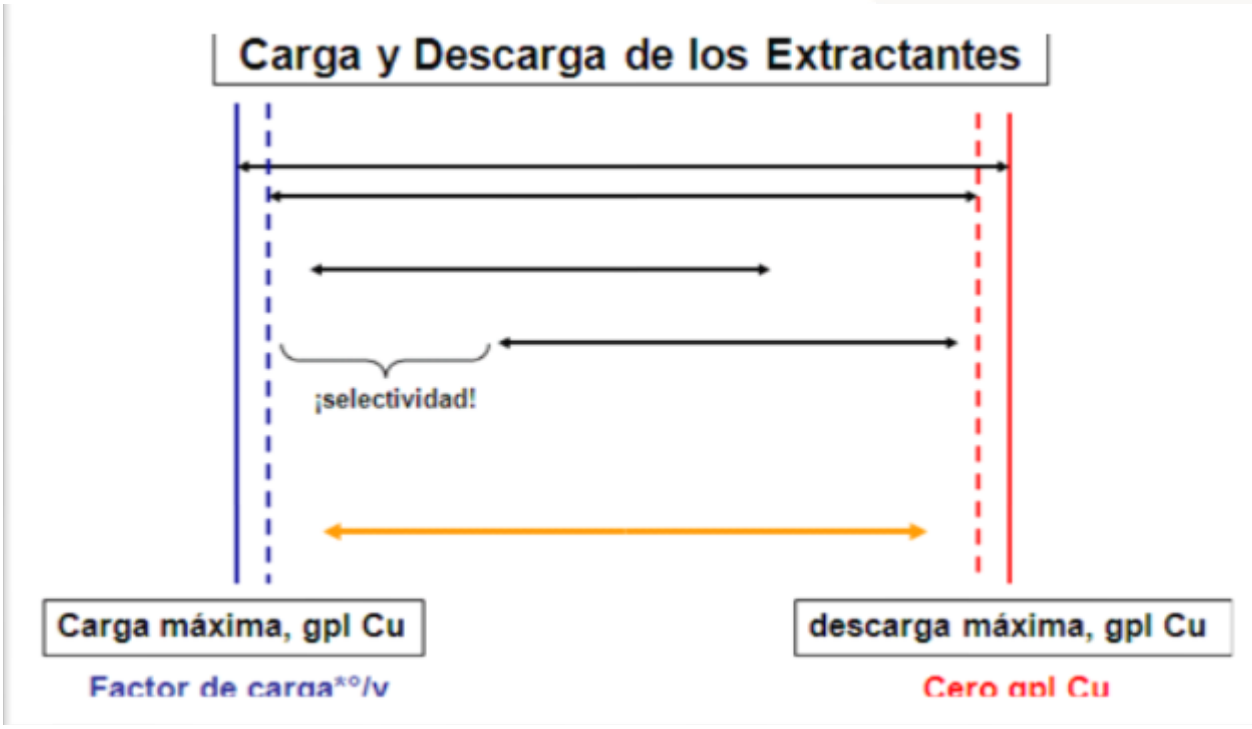


Figura 25

Eficiencia de la Reextracción

La Eficiencia de Stripping, similar a lo que es la Eficiencia de Extracción, dice relación con la transferencia de cobre desde la fase orgánica al Electrolito.

Su valor se ve influenciado por : razón O/A, gpl H+ y Cu en E.P, N° etapas de Stripping, tipo de reactivo, °/v extractante

Eficiencias de etapas:

$$Eficiencia\,de\,etapa = \frac{[Cu]_{in} - [Cu]_{out}}{[Cu]_{in} - [Cu]_{eq.}} \cdot 100\%$$

Figura 26

donde

$[Cu]_{in}$ = concentración de cobre de corriente acuosa entrante

$[Cu]_{out}$ = concentración de cobre de corriente acuosa saliente

$[Cu]_{eq}$ = concentración de cobre de corriente acuosa en equilibrio con la fase orgánica

Borra

La borra es una dispersión estable llamada emulsión trifásica compuesta por orgánico, acuoso, aire, sólidos coloidales que pueden ubicarse en la interfase acuosa orgánico, en el fondo del decantador o como sobre-nadante. Las proporciones de los componentes de la borra varían entre plantas, y aún entre los equipos de un mismo tren. Durante la separación de fases, la borra usualmente integra la fase discontinua. Bajo continuidad orgánica la borra tiende a asentarse entre la capa de acuoso libre y la interfase que se separa ("se hunde en la interfase"); esto ayuda a evitar que la borra migre junto con el orgánico, entre los equipos de un circuito. Bajo continuidad acuosa la borra tiende a asentarse entre el orgánico y la interfase que se separa ("flota en la interfase"), siendo común que fluya junto con el orgánico a través del circuito. Esto puede contaminar con borra el orgánico del circuito, y además el electrolito.

Es muy perjudicial porque provoca pérdidas de orgánico, contaminación del electrolito y disminución de la capacidad de transferencia de la planta de extracción por solventes.

Para recuperar el máximo de orgánico posible de la borra, se utiliza el centrifugado o el filtrado (Sperry) de la borra. El centrifugado separa la borra en tres fases: orgánico, acuoso y sólidos. Los dos últimos se descartan del proceso, y el orgánico recuperado se recicla.

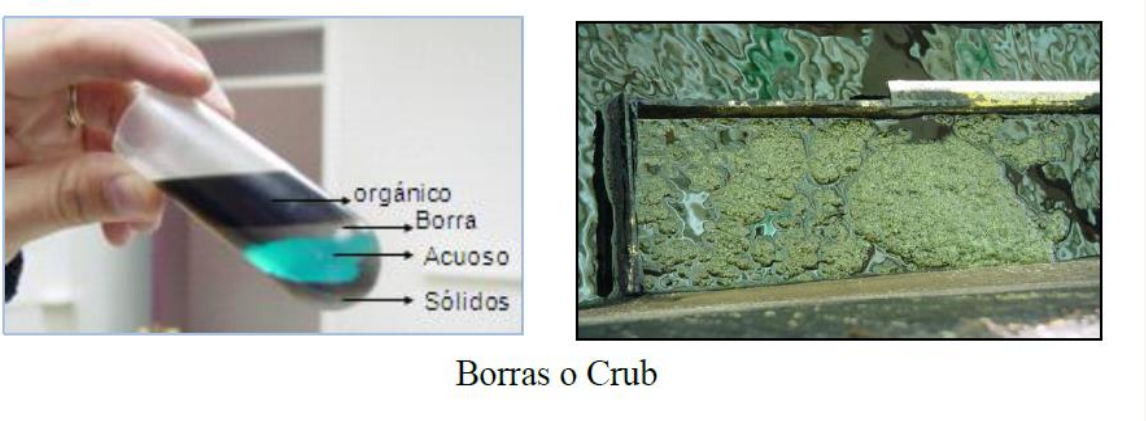


Figura 27

Densidad, Viscosidad y Temperatura de Fases

La diferencia de densidad entre fases acuosa y orgánica favorece la separación de fases. A mayor diferencia de densidad, mejor o más completa es la separación de fases. Habitualmente en la etapa S (1) de un tren de SX se observa la mejor separación de fases. La viscosidad de los fluidos es un factor adverso para la separación de fases. La separación de fases es más completa cuando la viscosidad de los fluidos es menor. Usualmente la viscosidad del orgánico en general es mayor a 3 mPas, lo que limita las posibilidades reales de lograr una completa separación de fases.

La viscosidad de las soluciones lixiviantes tiende a aumentar en el tiempo, debido a la incorporación paulatina de impurezas del mineral, lo que contribuye a limitar la calidad de la separación de fases en extracción. Usualmente la viscosidad de los electrolitos (~1,5 mPas) es menor que la de una solución lixiviante, por lo que obviando el factor densidad se puede observar una mejor separación de fases en re-extracción que en extracción.

Figura 28

Figura 29

En la etapa de lavado (W), donde el acuoso es prácticamente agua, la acidificación al rango 5-25 g/L reduce la viscosidad y aumenta la densidad del acuoso. La acidificación contribuye a mejorar la separación de fases y reduce la re-extracción en esta etapa.

La temperatura es un factor de la viscosidad, y en consecuencia es un factor de la separación de fases. A mayor temperatura de los fluidos mezclados, menor tiempo de separación de fases. A menor temperatura de la mezcla, aumenta el tiempo de separación de fases y también el espesor de la interfase en la dispersión. En condiciones de baja temperatura, el espesor de la banda de dispersión puede ser lo bastante profundo como para que el orgánico de la interfase fluya hacia el canal de recolección de acuoso.

Por otra parte el cuidado de la temperatura hace referencia a la cristalización del pentahidrato de sulfato de cobre ($CuSO_4 \bullet 5H_2O$) desde el electrólito de SX es una función de la temperatura, la concentración de cobre y el contenido de ácido sulfúrico libre. Por esto, es importante que la temperatura del electrólito rico se mantenga a 7°C por sobre el punto de cristalización.

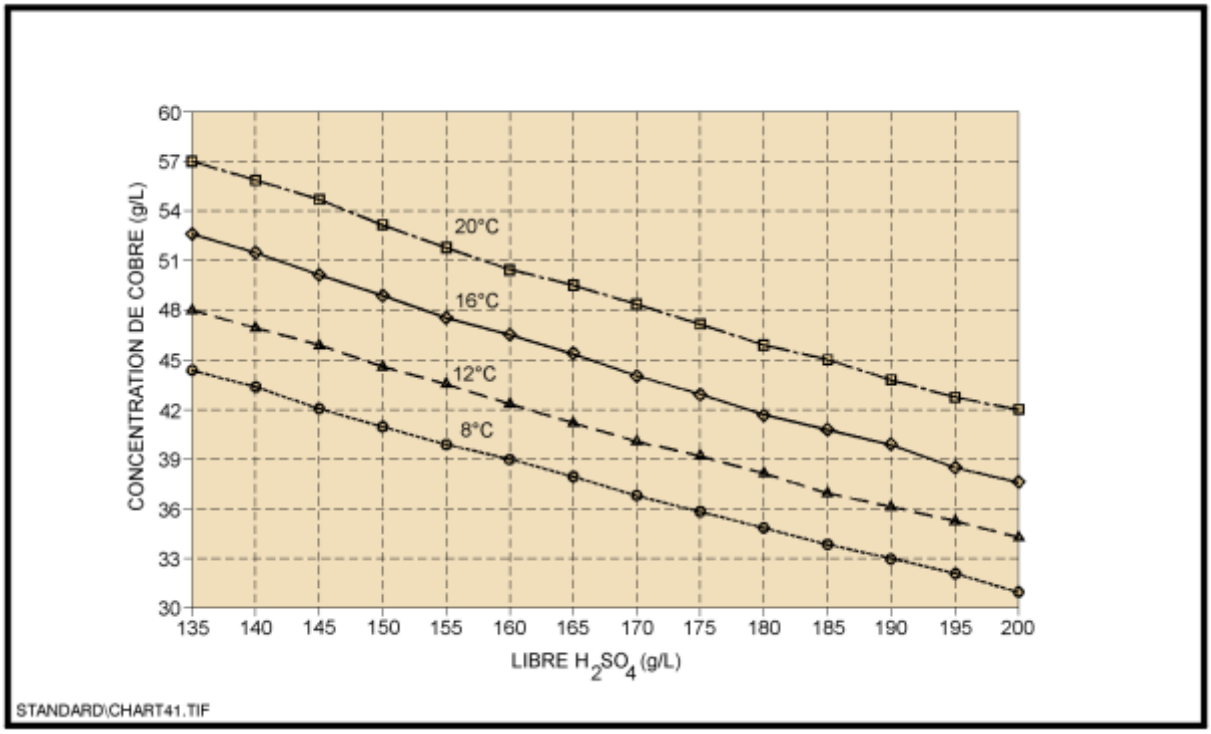


Figura 30

Remoción de Impurezas del Arrastre en el Orgánico

El orgánico cargado se mezcla con agua tratada acidificada, para eliminar una fracción de las impurezas contenidas en el arrastre mediante la dilución. El lavado del orgánico desempeña un rol principal para asegurar un electrolito de alta pureza.

La eficiencia del lavado expresa el porcentaje de arrastre de acuoso en el orgánico que se mezcla con la solución de lavado. En escala industrial no es posible lograr un 100 por ciento de eficiencia de lavado, ya que siempre hay corto-circuito, o solución que pasa por una etapa de proceso sin experimentar cambio. Para asegurar una eficiencia cercana a 90 por ciento, se emplean tres cajas de mezclado, y una recirculación de acuoso que permite operar con un O-A superior a 1,2. El grado de agitación de los agitadores de mezclado auxiliar influye en la eficiencia del lavado.

La solución de lavado se conforma con agua tratada y electrolito descargado. La transferencia de masa que ocurre durante el mezclado es baja si la solución lavadora es acidificada. El flujo de solución de lavado diluye las impurezas, pero el proceso de dilución es eficiente sólo en cierto rango. La figura se muestra la concentración teórica final de impureza en el acuoso arrastrado por un orgánico, en función del caudal de solución de lavado (expresado como razón Flujo de Solución de Lavado / Flujo de Arrastre). Caudales superiores a [25] no reducen la concentración de impurezas notablemente respecto de la original.

Velocidad de Agitación

El mecanismo de agitación cumple dos funciones:

- Producir una dispersión apropiada de las dos fases para que ocurra la reacción de intercambio.
- Succionar las fases orgánica y acuosa de las etapas adyacentes, con el fin de evitar la instalación de bombas de transferencia inter etapas.

Relación de Bellingham N3D2< 20, N: velocidad rotacional y D: diámetro del agitador

- Si: Mayor que 50, gotas finas
- Si: Menor o Igual a 20, gotas grandes

Flujo Específico: Es el flujo total de solución por unidad de área transversal del decantador.
Fe=FT/AT
Rango normal 2.6 a 4.8 m3/m2h

Recirculación de las soluciones

Las líneas de recirculación proporcionan el medio para recircular la fase orgánica o acuosa desde su vertedero de fase orgánica o acuosa para mantener la relación deseada 1:1 de fase orgánica y fase acuosa.

Figura 31

En cada uno de los trenes de SX se cuenta con una recirculación. La línea de recirculación puede salir de cualquiera de los vertederos (orgánico o acuoso) hacia los mezcladores. Las válvulas de control para la regulación del flujo son de mariposa y esta regulación va a depender de la razón O/A que se tenga en la etapa y a la vez se tendrá una incidencia en la condición de trabajo por ejemplo:

- E-1: Se tiene recirculación acuosa, debido que el flujo de acuoso es alimentación de cabeza proveniente de la piscina de PLS de sulfuro, por lo cual al haber una recirculación acuosa se genera una recarga del orgánico semi cargado proveniente de E-2, y a la vez se produce un PLS semi descargado con menos cobre que será enviado a la etapa E-2.

- E-2: Se tiene recirculación orgánica, debido que el flujo de orgánico proveniente de E-1P va a ir lo más cargado a la etapa siguiente E-1, por lo cual al haber una recirculación el orgánico captara más iones cobre y desalojara un refino más pobre en iones cobre.

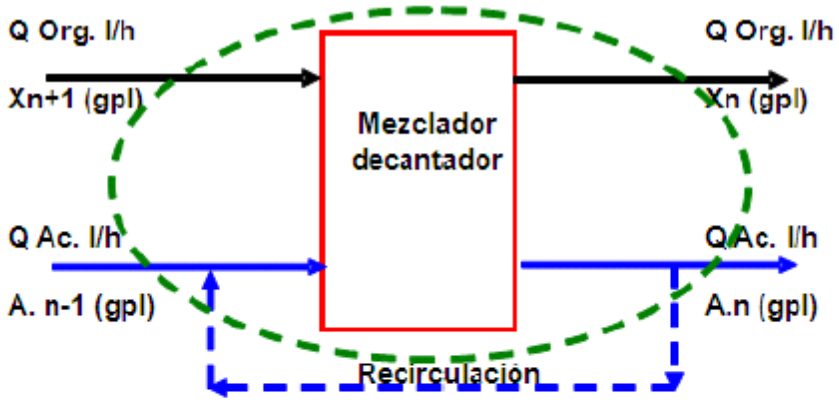
- E-1P: Se tiene recirculación acuosa, debido que el flujo de acuoso es alimentación de cabeza proveniente de la piscina de PLS de oxido, por lo cual al haber una recirculación se producirá un ajuste de continuidad del orgánico semi cargado proveniente de E-2P, y a la vez se mandara un PLS semi descargado con menos cobre a la etapa E-2P.

- E-2P: Se tiene recirculación orgánica, debido que el flujo de orgánico proveniente de la etapa S-1 viene descargado, por lo cual al haber una recirculación orgánica se generará un orgánico que captará más iones cobre y se empezará a cargar y a la vez desalojara un refino más pobre en iones cobre

- W: Se tiene recirculación acuosa, debido que al haber este tipo de recirculación se puede disminuir el consumo de agua.

- S-1: Se tiene recirculación acuosa, debido que el flujo de electrolito proveniente del estanque regulador viene con un déficit de iones cobre, por lo cual al haber una recirculación el electrolito tendrá un gradiente de aumento de iones cobre.

Relación del tiempo de residencia



Recirculación es F(m3/h) a Bn(gpl)

$$Q\ org * Xn+1 + Q\ Ac*A\ n-1 + F*\cancel{Bn} = Q\ org * xn + Q\ Ac*An + F*\cancel{Bn}$$

$$Q\ org * Xn+1 + Q\ Ac*A\ n-1 = Q\ org * xn + Q\ Ac*An$$

$$Q\ org\ (Xn+1 - Xn) = Q\ Ac\ (An - An-1)$$

$$\text{Razón} \qquad O/A = \frac{(An - An-1)}{(Xn+1 - Xn)}$$

Figura 32

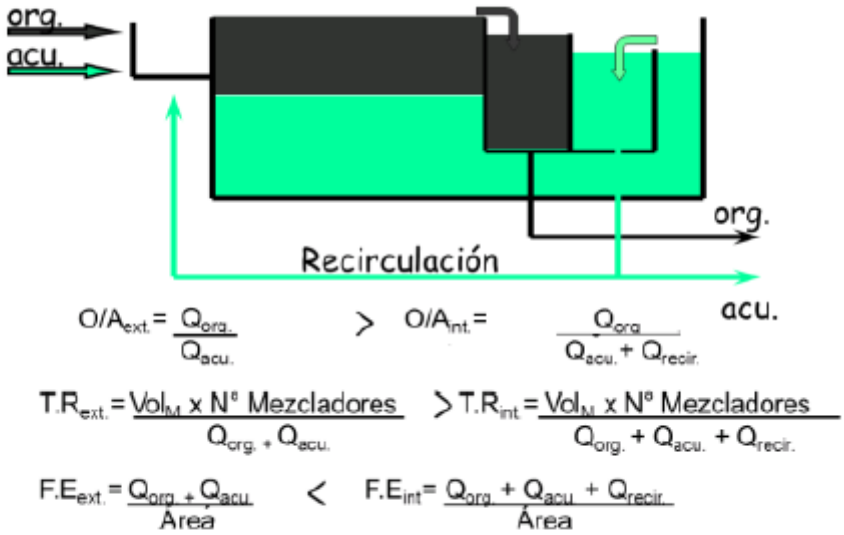


Figura 33

Actividad N° 1

Proceso de Extracción por Solvente

Estrategias metodológicas para el instructor

Las estrategias son los procedimientos y/o recursos utilizados para promover el aprendizaje a través de las actividades:

Explicación demostrativa vía plataforma web.	
Explicación demostrativa en aula.	✓
Recurso audiovisual.	
Propuestas de situaciones problemáticas.	✓
Formulación de preguntas.	✓

Objetivos de aprendizaje

Reconocer los principales equipamientos de extracción por solvente

Descripción de la actividad

El instructor guiará al participante, con el apoyo de los contenidos vistos en clases, a reconocer los principales equipamientos de extracción por solvente. Con este objetivo se trabajará en una planta escala.

Materiales y recursos

Planta a escala de extracción por solventes:
http://www.edemet.cl/index.php?pag=2&o=c&id=10

Desarrollo:

b) Se sugiere que el Organismo de formación encargado del curso adquiera la planta a escala. El instructor deberá considerar los objetivos de aprendizaje para dar cumplimiento a lo esperado y deberá además decidir cómo abordará la actividad práctica de acuerdo a las instrucciones del Kit. Los componentes de la planta de electro obtención a escala son los siguientes y los participantes deberán aprender a reconocerlas:

- Un “mezclador”.
- Un “sedimentador”.
- Una manguera distribuidora.
- Equipos mezcladores del tipo perfil bajo.

Cierre

El instructor podrá destacar que a escala industrial, los procesos de extracción de cobre por solventes las cuales ponen en contacto la solución lixiviada con el disolvente sin carga, lo que se realiza en varias etapas (al menos dos), en que mezcladores y sedimentadores funcionan en contracorriente, dispuestos y arreglados de manera de asegurar que el disolvente orgánico entrante, sin carga, tenga un contacto final con la solución acuosa cargada, la que al salir quedará con muy baja concentración de cobre, el refino, el que retornará a la operación de lixiviación para uso posterior.

Consejo Minero
Dirección: Apoquindo 3500, Piso 7, Las Condes, Santiago.
Teléfono: (562) 2347 2200

www.ccm.cl

AngloAmerican

ANTOFAGASTA MINERALS

BARRICK

bhpbilliton
resourcing the future

CODELCO
Orgullo de Todos

COLLAHUASI

FREEPORT-McMoRAN COPPER & GOLD

GLENCORE

KGHM
POLSKA MIEDŹ S.A.

LUMINA
COPPER CHILE

Teck

YAMANAGOLD