Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre y cuando den crédito y licencia a las nuevas creaciones bajo los mismos términos. Esta licencia suele ser comparada con las licencias copyleft de software libre y de código abierto. Todas las nuevas obras basadas en la suya portarán la misma licencia, así que cualesquiera obras derivadas permitirán también uso comercial.

http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

Universidad Nacional "San Luis Gonzaga"

Software Antiplagio

UNICHECK

INFORME DE REVISIÓN

Se ha realizado el analisis con el software antiplagio de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", por parte de los docentes reponsables, al documento cuyo titulo es:

OPERACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA SÓLIDO-LÍQUIDO

presentado por:

MELIZA MALDONADO ALMAZA

del nivel **PREGRADO** de la facultad de **INGENIERIA QUIMICA Y PETROQUIMICA** obteniéndose como resultado una coincidencia de **2.85%** otorgándosele el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presenta el reporte de evaluación del software antiplagio.

Observaciones:

El presente TRABAJO MONOGRÁFICO ha sido APROBADO con un 2.85% de coincidencias.

Ica, **1** de **Mayo** de **2021**

SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO
COORDINADOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y PETROQUIMICA

RAUL GERARDO AVILA MEZA
ASESOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y PETROQUIMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO POR EXAMEN DE SUFICIENCIA ACADÉMICA

OPERACIÓN DE TRANSFERENCIA DE MASA SÓLIDO-LÍQUIDO

PRESENTADO POR:

Bach. MALDONADO ALMANZA, Meliza.

ICA-PERÚ

2019

Resumen

La presente monografía OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA SÓLIDO-LÍQUIDO, es un estudio que consta de dos partes fundamentales: una teórica, desarrollada en gabinete, recolectando la información pertinente sobre el tema y su correspondiente adecuación a un tratado específico sobre la lixiviación de minerales oxidados de cobre y otra parte experimental en la que se describe el procedimiento llevado a cabo en laboratorio para obtener el cobre como sulfato mediante una lixiviación con agitación en caliente, llamada lixiviación dinámica, que permite reducir sustancialmente el tiempo de percolación y a su vez aumentar el rendimiento y la eficiencia del proceso, pudiéndose recuperar casi la totalidad del cobre presente en el mineral. También se presenta un desarrollo sobre equipos de Transferencia de Masa Solido-Líquido, en cuanto se refiere a que en muchos casos la lixiviación se lleva a cabo en tanques.

Por esa razón se presenta un capítulo referente a los tanques, la mezcla, la agitación y los diversos tipos de agitadores que se utilizan no solo en la metalurgia sino en otras actividades industriales como la de los alimentos.

Además, los conceptos que gobiernan el diseño de los tanques agitados, dimensionamientos y sus proporciones geométricas.

Índice

Resumen **2**

Índice **3**

Introducción **5**

Capítulo I Fundamentos Teóricos de la Transferencia de Masa **6**

1.1. Definición de transferencia de masa 6

1.2. Equilibrio entre fases 7

1.3. Operaciones de transferencia de masa más utilizadas en la industria 9

Capítulo II Transferencia de Masa Sólido-Líquido **12**

2.1. Definición 12

2.2. Tipos de lixiviación 15

2.3. Lixiviación de minerales de cobre 16

2.3.1. Generalidades 16

2.3.2. Selección de agentes lixiviantes 17

2.3.3. Aplicación de la solución lixiviante 20

2.4. Cinética de la lixiviación 21

2.5. Lixiviación de minerales oxidados de cobre 24

2.5.1. Teoría de la lixiviación 24

2.5.2. Minerales oxidados 25

2.5.3. Minerales sulfurados 25

2.5.4. Lixiviación de óxidos 26

2.5.5. Lixiviación de sulfuros 27

2.5.6. Ganga de minerales 27

2.6. Efecto de la ganga en la lixiviación 27

2.7. Termodinámica de la lixiviación 29

2.8. Métodos industriales de lixiviación de minerales 31

2.8.1. Lixiviación in situ. 31

2.8.2. Lixiviación Dump 31

2.8.3. Lixiviación en Heap 32

2.8.4. Lixiviación en Vats 32

2.8.5. Lixiviación por agitación. 33

2.9. Lixiviación con agitación o lixiviación dinámica 33

Capítulo III Equipos de Transferencia de Masa Sólido-Líquido 43

3.1. Tanque agitado 43

3.1.1. Objetivos del mezclado 43

3.1.2. Agitación 44

3.1.3. Objetivos y requisitos de la agitación 46

3.1.4. Transferencia de materia en sistemas heterogéneos 47

3.1.5. Formación de emulsiones 47

3.1.6. Transferencia calorífica y uniformidad de temperatura 47

3.2. Equipos de agitación 49

3.2.1. Impulsores 49

3.2.1. Ruta del flujo en la agitación 54

3.2.2. Diseño "normal" típico de una turbina 55

3.3. Leyes aplicables en el mezclado 56

Conclusiones 59

Bibliografía 60

Introducción

La asignatura más importante dentro de la carrera de Ingeniería Química y quizás sea la que la caracteriza fundamentalmente es la transferencia de masa, ya que no todas las ingenierías se ocupan de su estudio, salvo las ingenierías de proceso. Podemos definir la Transferencia de masa como la propensión de alguno o más compuestos de una mezcla o solución a transferirse desde una región de concentración alta del o los componentes hacia otra región de menor concentración. A esto se le denomina el motor o gradiente de transferencia y en este caso por tratarse de masa, dicho gradiente o diferencia será referida a la composiciones o fracciones de masa, molar o volumétrica.

Desde la perspectiva de la química industrial las operaciones de transporte de masa tienen una considerable importancia. Es muy difícil hallar un proceso químico que no necesite primeramente depurar la materia prima o depurar un producto intermedio, o sencillamente separar los productos finales del procesamiento de los subproductos. Asimismo, esta operación generalmente o casi siempre van asociadas a operaciones de transmisión de calor y/o de transferencia de cantidad de movimiento o flujo de fluidos.

La transferencia de masa está presente en casi todas las actividades industriales ya sea con reacción o si reacción química como en la industria orgánica como la producción de fertilizantes, la industria azucarera, así como en la industria inorgánica como la producción de los ácidos sulfúrico y clorhídrico, también en la refinación del gas y del petróleo, etc.

En la presente monografía se desarrollará uno de los aspectos de estas operaciones, la correspondiente a la transferencia de masa sólido-líquido, llamada también lixiviación o percolación, aplicado a los minerales oxidados de cobre y a otras actividades como la alimentaria.

Capítulo I

Fundamentos Teóricos de la Transferencia de Masa

1.4. Definición de transferencia de masa

Una definición interesante y que se expone es la que publica el Dr. Francisco Jarabo de la Universidad de La Laguna en Tenerife (Jarabo Friedrich, 2019):

> El desplazamiento de uno o varios de los componentes de una mezcla fluida respecto a la masa global de la misma debido a la acción de una fuerza impulsora (diferencia de concentraciones del componente que se desplaza) se conoce como transferencia de materia. Si ésta se produce entre fases, puede aprovecharse el fenómeno para obtener la separación de los componentes de una mezcla (Jarabo Friedrich, 2019).
>
> Las operaciones de separación por transferencia de materia tienen como objetivo la separación de los componentes de una mezcla originalmente homogénea, haciendo posible el paso de algunos de ellos a una segunda fase, con lo que aquélla se pone en contacto (Jarabo Friedrich, 2019).
>
> Esta segunda fase a veces es necesario añadirla al sistema, sin proceder de la mezcla original: es el caso de la extracción. La extracción es una operación de separación por transferencia de materia en la que se ponen en contacto dos fases inmiscibles con objeto de transferir uno o varios componentes de una fase a otra (Jarabo Friedrich, 2019).

Además, se ha encontrado otra definición sobre la transferencia de masa en EcuRed (EcuRed, 2019) y que se expresa de la siguiente manera:

> La transferencia de masa es la tendencia de uno o más componentes de una mezcla a transportarse desde una zona de alta concentración del o de los componentes a otra zona donde la concentración es menor. Por ejemplo, si se echa un cristal de sulfato cúprico en agua el cristal se disolverá, alrededor de la superficie del cristal la coloración del agua toma un color azul, que es más intenso mientras más cerca se esté de dicha superficie (EcuRed, 2019).
>
> A medida que transcurre el tiempo, se observa como la coloración de las zonas alejadas se vuelve más azul, mientras que el cristal desaparece paulatinamente, hasta que si se deja el tiempo suficiente, toda el agua muestra un tono de azul uniforme (EcuRed, 2019).
>
> El sulfato viaja de una zona donde la concentración es más alta a la zona de menor concentración, dicha tendencia permite la disolución del sulfato cúprico en el agua; la diferencia de concentración es la que constituye la fuerza motriz (o directora) de la transferencia de masa (EcuRed, 2019).

1.5. Equilibrio entre fases

De igual forma para definir el equilibrio entre fases:

> La transferencia de masa tiene un límite, que se conoce como equilibrio entre las fases que se alcanza cuando no existe fuerza directriz y la transferencia neta cesa; desde el punto de vista físico este equilibrio se produce de la manera siguiente: si por ejemplo existe una fase gaseosa y la otra líquida y el componente que se va a transferir se encuentra al principio solamente en la fase gaseosa, con una concentración y, mientras

que la concentración en la fase líquida es x = 0, al ponerse en contacto ambas fases, las moléculas del componente comenzarán a pasar de la fase gaseosa a la fase líquida con una velocidad que será proporcional a la concentración del componente en la fase gaseosa (EcuRed, 2019). No obstante, en presencia en la fase líquida del componente, puede pasar que las moléculas se transfieran en un sentido inverso, es decir hacia la fase gas, manteniendo la condición de proporcionalidad ente la velocidad y la concentración del compuesto en fase líquida.

A medida que transcurre el tiempo, la velocidad de transferencia de la fase gaseosa a la líquida disminuye, mientras que la de transferencia de la fase líquida a la gaseosa aumenta; en algún momento, ambas velocidades se igualan y se establece un equilibrio dinámico ente las fases y no existirá una transferencia visible del componente de una fase a otra, o sea el resultado neto es nulo y en este momento la diferencia de concentraciones entre las fases (x–y) no es la fuerza motriz, sino el alejamiento de las condiciones de concentraciones en equilibrio en cada fase, que se puede expresar, según sea el caso, como (x – x*) o (y – y*) y puede tomar diferentes valores según sean las formas de expresar dichas concentraciones (EcuRed, 2019).

A una presión y temperatura dadas ocurre que el equilibrio se llega a lograr alguna dependencia entre las concentraciones límites del componente transferido entre ambas fases. Un proceso industrialmente factible debe tener una producción o resultado razonable, por lo cual el equilibrio se debe evitar, ya que el flujo de la transferencia es proporcional a la fuerza directriz, la cual es mayor mientras más alejadas son las condiciones de operación de aquellas que se establecen cuando se alcanza el equilibrio; esto se logra a través de acciones específicas para cada tipo de operación, las cuales se

integran al proceso en cuestión donde las variables de control operacional son generalmente la temperatura, la presión y la concentración (EcuRed, 2019).

1.6. Operaciones de transferencia de masa más utilizadas en la industria

A continuación, se definen las principales operaciones de transferencia de masa que en la industria han encontrado un uso profuso y que por esa razón son tan estudiadas.

Absorción

El componente, que está en fase gaseosa formando una mezcla con otros gases, pasa a la fase líquida en la cual es más soluble, aquí se manifiesta la transferencia de masa de la fase gaseosa a la fase líquida; cuando las concentraciones del componente a transferir son pequeñas en la solución inicial, el equilibrio se describe a través de la ley de Henry, como por ejemplo: absorción de CO_2 de los gases de combustión utilizando como absorbente la metanolamina (EcuRed, 2019).

Desorción

Esta operación es contraria a la anterior, aquí el componente es despojado de una corriente líquida donde forma una mezcla y pasa a la fase gaseosa; por ejemplo, la desorción del CO_2 absorbido en la metanolamina con el objeto de regenerarla, o sea de restaurarle la propiedad absolvedora (EcuRed, 2019).

Destilación o Rectificación

Esta operación se fundamenta en separar mezclas de líquidos homogéneos por medio de un intercambio múltiple de componentes entre la fase líquida y la fase gas.

En esta operación los componentes pesados de la fase gaseosa pasan a la fase líquida, mientras que los componentes más ligeros de la fase líquida pasan a la fase gaseosa, es decir, que para este caso existirá una doble transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa; en condiciones ideales para estas operaciones se aplica la ley de Raoult, por ejemplo, la destilación del petróleo en las refinerías (EcuRed, 2019).

Secado

Consiste en remover el líquido de una masa sólida mediante la vaporización; durante este proceso ocurre la transferencia de masa hacia la fase gaseosa, como, por ejemplo: el secado del azúcar refino (EcuRed, 2019).

Extracción sólido-líquido (Lixiviación)

Esta operación consiste en remover de una mezcla sólida un componente soluble en un solvente líquido, en el cual el resto de los sólidos son insolubles; ejemplo: disolución de carbonato de níquel en una disolución amoniacal en el proceso productivo de Nicaro (Cuba) (EcuRed, 2019).

Extracción líquido-líquido

Esta operación se realiza en un sistema líquido-líquido, consiste en la separación de un componente diluido en un solvente líquido por otro líquido prácticamente inmiscible o miscible parcialmente con el primer solvente; en este caso, el componente, a extraer de la disolución inicial, va de una fase líquida a otra fase líquida, un ejemplo de esto es la extracción del ácido acético mezclado con benceno, utilizando agua como solvente (EcuRed, 2019).

Adsorción

Consiste en la eliminación selectiva de un componente gaseoso o líquido de una mezcla, mediante un adsorbente sólido poroso, la separación está caracterizada por el paso de la sustancia de la fase gaseosa o líquida a la fase sólida (EcuRed, 2019).

Ejemplo: decoloración con carbón activado del sirope en la producción de azúcar refinado. Otro ejemplo es el intercambio iónico, utilizado frecuentemente durante el tratamiento del agua inyectada a las calderas para la producción de vapor, consiste en la separación sobre la base de la capacidad de algunas materias sólidas (ionitos), de cambiar sus iones móviles por iones pertenecientes a disoluciones de electrolitos al ponerse en contacto con las mismas (EcuRed, 2019).

Capítulo II

Transferencia de Masa Sólido-Líquido

2.1. Definición

Si se tiene una mezcla primigenia cuya fase es sólida y se quiere separar de dicha mezcla un componente llamado soluto, de otro (inerte) por medio del contacto con otra fase líquida llamada disolvente, cuya acción es disolver selectivamente, entonces se trata de la operación de extracción sólido-líquido o también llamada “lixiviación”.

Según Jarabo (Jarabo Friedrich, 2019), para llevar a cabo la extracción será necesario, en primer lugar, poner en contacto íntimo las dos fases hasta conseguir la transferencia de soluto de la mezcla original al disolvente. Una vez finalizada esta etapa de transporte de materia, se procede a la separación de las fases, obteniéndose una mezcla de disolvente y soluto llamada “extracto” y una mezcla de la que se ha extraído el soluto, denominada “refinado”, que estará formada por la fase sólida inerte con una parte de la disolución retenida (Jarabo Friedrich, 2019).

El análisis del proceso de extracción sólido-líquido generalmente se lleva a cabo sobre un diagrama triangular, al tratarse de un sistema ternario, que, a una presión y a una temperatura, determinadas se representa mediante un triángulo rectángulo isósceles, tal como se indica en la figura 1, donde en los vértices del triángulo se representan los

componentes puros, reservándose el ángulo recto para el sólido inerte (I) y, en el sentido de las agujas del reloj, el disolvente líquido (C) y el soluto sólido (B), los lados representan mezclas binarias de los componentes de los vértices correspondientes y los puntos interiores al triángulo representan mezclas ternarias (Jarabo Friedrich, 2019).

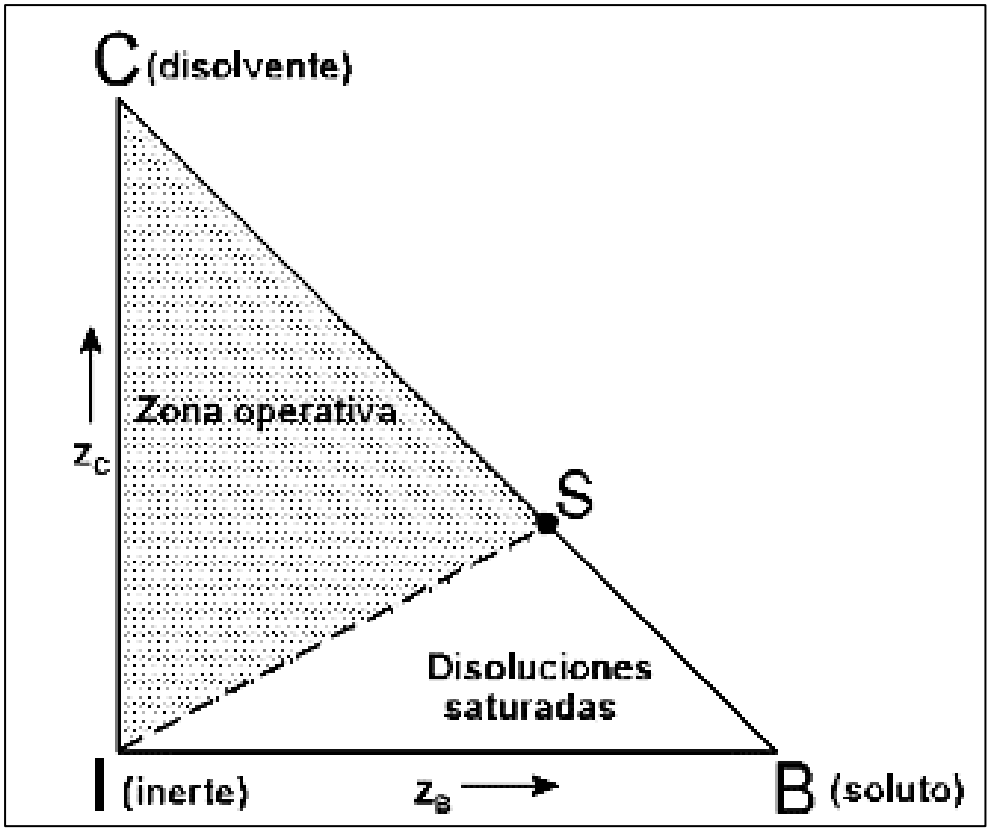

Fig.1. Diagrama de extracción sólido-líquido (Jarabo Friedrich, 2019).

Cualquier punto del triángulo corresponde a una composición expresada en fracciones másicas (o molares): si se trata de una composición de la fase extracto se suele representar como (y_B, y_C), mientras que si es una composición de la fase refinado se representa como (x_B, x_C); obsérvese que, al operar en concentraciones fraccionales, cualquier punto de la fase refinado ha de cumplir que $x_1 + x_B + x_C = 1$, mientras que para la fase extracto, al no haber inerte, se cumplirá que $y_B + y_C = 1$ (Jarabo Friedrich, 2019).

Si el soluto no es totalmente soluble en el disolvente, existirá una concentración de saturación a la temperatura del sistema, representada por un punto tal como el S sobre el diagrama triangular, de tal manera que, cualquier mezcla de inerte y disolución saturada se hallará situada sobre el segmento IS, que divide al diagrama ternario en dos zonas (Jarabo Friedrich, 2019).

La zona situada a la derecha del segmento IS, que representa a todas las mezclas en las cuáles las disoluciones representadas están saturadas, ya que todos los puntos de esta zona representan fracciones del soluto mayores a los correspondientes valores de saturación y la zona situada a la izquierda del segmento IS, que representa a todas las mezclas en las cuáles las disoluciones representadas no están saturadas, ya que todos los puntos de esta zona representan fracciones del soluto menores a los correspondientes valores de saturación (Jarabo Friedrich, 2019).

Según Jarabo (Jarabo Friedrich, 2019), obsérvese que en casi todas las extracciones sólido-líquido se obtiene una sola disolución no saturada, ya que se trata siempre de conseguir una elevada recuperación del soluto o de producir un sólido inerte lo más libre posible de soluto, es decir, siempre se operará con la suficiente cantidad de disolvente como para que se pueda obtener disoluciones no saturadas; por tanto, en el diagrama triangular se trabajará en la zona de disoluciones no saturadas que será, pues, la zona operativa.

El procedimiento más simple de operar con la extracción sólido-líquido es colocar el sólido en contacto con el solvente y luego, separar del sólido residual insoluble la solución que se forma. Este método se llama de “contacto simple”.

Si la cantidad total de disolvente que se va a utilizar se subdivide en varias fracciones y el sólido es extraído sucesivamente con cada una de ellas se habla de un “contacto múltiple

en corriente directa", lo que mejora la recuperación del soluto, pero en disoluciones relativamente diluidas. Se obtienen una elevada recuperación del soluto y una disolución de elevada concentración cuando se lleva a cabo un "contacto múltiple en contracorriente", en el que la disolución formada se pone en contacto con el sólido original, mientras que el sólido ya casi agotado es el que se pone en contacto con el disolvente puro (Jarabo Friedrich, 2019).

Como puede observarse, a medida que aumenta la complejidad de la operación aumenta su rendimiento y, por tanto, su importancia como aplicación industrial; no obstante, el contacto simple es el método preferido para trabajar en el laboratorio, sobre todo cuando es necesario obtener parámetros del sistema necesarios para el cálculo de las complejas unidades industriales (Jarabo Friedrich, 2019).

2.2. Tipos de lixiviación

En el campo de la química industrial se consideran dos tipos de lixiviación:

a. Lixiviación física.

b. Lixiviación química.

La primera se desarrolla cuando hay ausencia de reacciones químicas, y para este caso se dice que es una operación típica, tal como cuando se emplea un solvente (acetona) para extraer el compuesto aceitoso de alguna semilla oleaginosa, como la pepa de algodón, o cuando se extrae la esencia de una hoja como el té con el fin de hacer una infusión.

La segunda se desarrolla cuando si ocurren reacciones químicas, y para éste caso se dice que es un proceso, se puede citar el caso de cuando se necesita extraer el metal cobre de un mineral empleando ácido sulfúrico diluido, según la reacción química siguiente:

$$CuO + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + H_2O$$

2.3. Lixiviación de minerales de cobre

2.3.1. Generalidades

Los minerales de cobre en sus diferentes menas, se encuentran en la naturaleza asociados entre sí y con otras especies mineralógicas, más o menos diseminadas dentro de una roca matriz con la ganga correspondiente; en este sentido, para el desarrollo de un proyecto de lixiviación es necesario un conocimiento de las características del yacimiento y de la mena, y los factores que influyen en la lixiviación (Llorente Gómez, 1991).

Según Llorente (Llorente Gómez, 1991), en particular respecto a las características del yacimiento es importante considerar:

- Su composición mineralógica, por las interferencias que puedan producir en la lixiviación las diferentes especies conteniendo o no cobre
- Dispersión de las especies por medio de las frecuencias y los tamaños de granulos
- Caracterización de la ganga debido a algunos minerales yacen dentro de una ganga carbonatada y hacer elevar el consumo de ácido, lo que vuelve el proceso no rentable
- Descripciones físicas de la mena, en cuanto a volumen de finos o lamas, y de igual manera de propiedades como la porosidad y permeabilidad, básicos para lixiviar estáticamente

- Comportamiento del mineral durante la trituración, con la finalidad de crear o aumentar la fracturación, para tener una mayor exposición superficial al ataque químico

2.3.2. Selección de agentes lixiviantes

Para seleccionar el agente lixiviante adecuado al mineral se debe tomar en cuenta las propiedades del mineral y además, la cuantificación del yacimiento en cuanto a las reservas probadas y reservas potenciales. Para ello se efectúan caracterizaciones mineralógicas y varios ensayos para encontrar los indicadores iniciales que permitan llevar a cabo las pruebas de laboratorio de lixiviación.

El ideal sería elegir un solo agente químico, que sea económico y recuperable, y un ciclo de lixiviación lo más corto posible (ojalá uno solo), para extraer un máximo de cobre y un mínimo de impurezas, lo cual es difícil en la mayoría de los casos; en la elección del proceso es fundamental conocer la cinética de la reacción química que las influyen, mediante las diversas fases de investigación en laboratorio; para ello se hacen análisis preliminares en botellas rotatorias y en columnas o vasijas, según si el mineral es apto a la lixiviación estática o dinámica (Llorente Gómez, 1991).

Por último, al seleccionar previamente el agente lixiviante se debe considerar el proceso posterior de recuperación del cobre a partir de la solución madre; por ejemplo, si el lixiviante es el sulfato férrico, deben tenerse en cuenta los efectos perjudiciales del aumento de iones férricos en la solución, para un posterior proceso de cementación (alto consumo de chatarra) o electrodepositación (mala eficiencia de corriente en electrólisis) o extracción por disolventes (purificación de hierro) (Llorente Gómez, 1991).

Entre los reactivos mas comunes utilizado para lixiviar minerales de cobre, podemos citar el ácido sulfúrico que se usa cuando tratamos minerales oxidados y cuando se trata de minerales sulfurados, se utiliza el sulfato férrico acidificado disuelto en un medio oxidante.

En el proceso de lixiviación se pueden mencionar dos casos:

Lixiviación natural: producido por las aguas de lluvia que percolan en el yacimiento, atacando las superficies expuestas y produciendo un lixiviante con contenidos variables de ácido, hierro e incluso cobre, según la estación del año y zonas de producción (son las aguas de desagüe de minas); puede ocurrir que, mezclando aguas de distintas procedencias con sulfato férrico suficiente, se controla tan sólo el pH bajo (añadiendo ácido sulfúrico), para regular la acidez e impedir la precipitación del hierro trivalente a hidróxido, que origina bastantes dificultades en la lixiviación y en caso de escasez de agua, se recircula parte de la solución estéril o se aportan aguas más frescas de otras procedencias (Eduardo Bustamente, 2015).

Lixiviación preparada: Se emplea el hierro trivalente en forma de sal ácida (sulfato férrico), cuya concentración en Fe^{3+} y ácido se ajusta según la investigación y experiencia práctica, normalmente, las soluciones empleadas no suelen ser muy concentradas, el ácido varía entre 4 y 10 % y el hierro, alrededor del 1%; en algunos casos hay una regeneración del lixiviante en el propio proceso (Eduardo Bustamente, 2015).

Se termina recirculando o rechazando las soluciones estériles, depuradas o no. Esta recirculación supone el aumento de compuestos de sulfatos, ácidos, hierro, arsénico, cloro y otros. Esto aumenta también las sustancias nocivas a la lixiviación tales como el

arsénico, el cloro, ácidos, etc., lo que es perjudicial al proceso o en operaciones posteriores; por esta razón debe llevarse a cabo una depuración periódicamente.

El agente lixiviante más usado para minerales oxidados es el ácido sulfúrico, por lo que las soluciones que entran a electroobtención son de $CuSO_4$ H_2SO_4 más impurezas, de modo que fundamentalmente se tienen iones de Cu^{+2}, H^+, $SO4^{-2}$, SO^{+2}; la elección del agente químico de lixiviación va a depender de su costo, disponibilidad, estabilidad química, selectividad y grado de generación de soluciones ricas en mineral, de tal forma que sea lo más económico y fácil de trabajar (Eduardo Bustamente, 2015).

Tabla 1

Tipos de Agentes Lixiviantes

Tipo de agente	Ejemplos
Ácidos inorgánicos	Ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico
Bases	Hidróxido de amonio
Agentes oxidantes	Oxígeno, ion férrico, ion cúprico
Agentes complejantes	Amoniaco, sales de amonio, cianuros, carbonatos, cloruros.

(Eduardo Bustamente, 2015).

Los minerales de cobre por lo general, requieren ser sometidos a una previa oxidación antes de procesarlos en la solución del metal. Para el caso de carbonatos y óxidos de Cu se requiere del solvente ácido, por lo que es de uso común el ácido sulfúrico, y para procesar sulfuros, se requiere de un oxidante, con un poder de oxidación que depende de la clase de sulfuro. La selección del agente lixiviante, que constituye de por sí, un costo fundamental en el proceso, se debe tener en consideración en primer lugar, la disponibilidad, transporte, costo puesto en planta, consumo y capacidad de ser recuperado; igualmente se debe considerar las propiedades corrosivas, que afectan a los materiales de la planta. Sin embargo, lo más importante es la efectividad del y que debe ser lo más selectivo posible para la disolución del cobre del mineral a tratar. Considerar también que las menas son

muy diferentes de una zona a otra y no se puede generalizar, incluso dentro de una misma zona.

Importante

Al momento de elegir el agente lixiviante es importante tener en cuenta la composición mineralógica del material, tipo de ganga, tamaños de granos y diseminación, contenido de azufre, presencia de carbonato, cloruros u otros constituyentes, por lo que es necesaria la investigación y la experiencia operativa, para seleccionar el lixiviante y obtener los datos necesarios para predecir el comportamiento de la lixiviación (Eduardo Bustamente, 2015).

2.3.3. Aplicación de la solución lixiviante

La lixiviación propiamente tal se inicia con el riego por aspersión o goteo, donde los distintos sistemas de irrigación, de aplicación de la solución, velocidades y efectos de la operación de lixiviación en vertederos, se pueden aplicar al sistema de lixiviación en pilas, donde existe un mayor control de la operación, con lo que se obtienen mejores resultados; para el logro de un resultado exitoso, es fundamental cuidar la distribución de la solución lixiviante a la mayor área que sea posible, mediante un sistema de aspersión, y con la velocidad de aplicación conveniente según la adaptación (permeabilidad) de la pila (Eduardo Bustamente, 2015).

Si la solución lixiviante se entrega de manera de aumentar la cantidad de líquido disponible en torno ellas, se trata de un sistema de riego no inundado o trickle-leaching, en el que, al excederse los límites de líquido correspondiente al estado capilar, se produce una suspensión sólido/líquido y en ese momento ya no hay fuerzas para mantener las partículas en su sitio, los finos se desplazan, ocupando espacios entre las partículas mayores y, si hay

arcillas, ambos factores cumplen un rol sellante, lo que conduce a un lecho inundado, lo que debe evitarse, ya que para una buena operación es esencial mantener una adecuada permeabilidad (Eduardo Bustamente, 2015).

2.4. Cinética de la lixiviación

En una reacción donde están implicadas una fase sólida y otra acuosa existe un fenómeno de difusión y de ataque químico en el área superficial del mineral. Se han identificado cinco fases:

1) Los reactivos se difunden hasta llegar a la interfase sólido – líquido
2) Los reactivos en la interfase se adsorben sobre la superficie del mineral
3) Los reactivos y la superficie del mineral interactúan originando la reacción química
4) Los productos de la reacción son desorbidos de la superficie del sólido
5) Los productos solubles se difunden desde la interfase a la solución

Las fases a) y e) utilizan un tiempo que es controlado por la velocidad de difusión; mientras que los tiempos de las fases b), c) y d) son controlados por la rapidez del proceso, entonces, en caso que la difusión sea muy lenta, se debe aplicar más agitación para permitir la aceleración de la reacción y si ésta se retarda debido a propios procesos químicos, la solución es aumentar la temperatura.

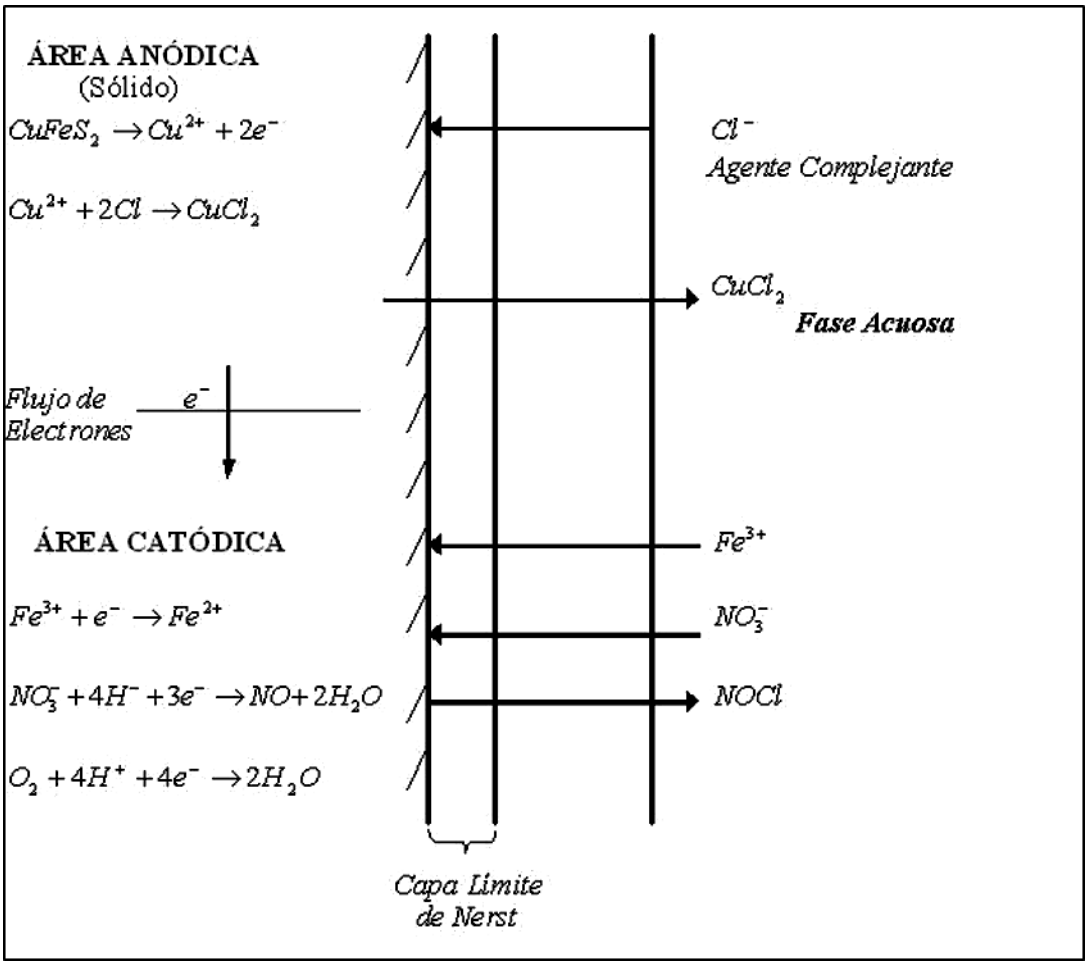

Fig. 2. Mecanismo electroquímico de la lixiviación del cobre (Fernández Salinas, 2019).

En un proceso, los modelos cinéticos proporcionan valiosa información para la predicción de la velocidad de reacción a diferentes condiciones como para la ingeniería y economía de procesos. El estudio cinético en el caso de la metalurgia determina el mejor rendimiento y a la vez brinda información sobre parámetros y variables que luego serán utilizados en:

- La determinación de los mecanismos de reacción y
- El diseño propiamente de los procesos y de los equipos

Es necesario establecer los factores que determinan la velocidad o rapidez de un proceso y en la planta real cómo se aplicará eficientemente.

Las etapas sucesivas en que se llevan a cabo las reacciones y su mecanismo son:

1. Si hay presencia de reactantes gaseosos, estos se disuelven la solución acuosa
2. Los reactantes disueltos se transportan en dirección a la interfase sólido-líquido
3. Los reactantes se transportan hacia la superficie de reacción por medio de una capa producto o de la ganga del mineral por difusión entre los poros del sólido
4. Los reactantes se combinan químicamente con el mineral mediante reacciones, adsorción, químicas y electroquímicas
5. Los productos solubles se transportan hacia la superficie sólido-líquido por medio de la capa producto
6. Los productos solubles se transportan hacia el seno de la disolución

Algunas etapas en ciertos casos no se presentan, como sucede cuando no se forma capa sólida producto o el mineral no está bloqueado por la ganga, la velocidad de todas estas etapas es proporcional al área de interfase sólido-líquido y del área de reacción, que en algunos casos puede coincidir, también la etapa más lenta es la que controla la velocidad del proceso, lo que puede implicar un control, químico o por transporte; los factores que afectan la cinética de las reacciones heterogéneas de lixiviación son numerosos, destacándose (Conceptos de Lixiviacion, 2019):

- Temperatura
- Geometría, tamaño, porosidad del sólido
- Formación producto sólido o no
- Tipo de control
- Naturaleza reacción química
- Concentraciones de los reactantes y productos solubles

- Reacciones laterales ocurrentes

Tomando en como ejemplo la disolución Copper Wad.

$$CuO + 2H^{+} = Cu^{2+} + H_2O$$

Se observa que el cobre que se encuentra formando una red cristalina en estado sólido, por intermedio de la reacción química de ácido que "ataca" el mineral, éste se transfiere (pasa) de una fase acuosa a una fase líquida, ahora como electrolito Cu^{2-} (Conceptos de Lixiviacion, 2019)

2.5. Lixiviación de minerales oxidados de cobre

2.5.1. Teoría de la lixiviación

La lixiviación es un proceso hidrometalurgico que consiste en la recuperación en forma iónica de metales valiosos (Cu, Zn, Au, etc.) de los minerales primarios y/o secundarios. La recuperación se efectúa por reacciones iónicas de disolución efectuadas a condiciones de temperatura ambiente por intermedio de soluciones acuosas (Conceptos de Lixiviacion, 2019).

- Iones: Porción pequeña de materia que tiene una carga eléctrica y que resulta de la disolución de un compuesto químico, y son de dos tipos, iones con carga positiva llamados también cationes y iones con carga negativa llamados también aniones
- Solución acuosa: Se define como una mezcla entre el agua en fase líquida y un compuesto químico ya sea ácido o básico que se disuelve en ella conteniendo los iones metálicos

Las materias primas principales para la lixiviación son los minerales, que contienen las menas de valor comercial; estos pueden ser minerales oxidados y sulfurados.

2.5.2. Minerales oxidados

Los minerales oxidados y carbonatos son usualmente encontrados cerca de la superficie en las minas de tajo abierto, estos se forman debido a la descomposición y alteración de minerales sulfurados primarios, los óxidos metálicos son fácilmente solubles en medio ácido, los principales minerales oxidados de cobre son: malaquita, azurita, cuprita (Conceptos de Lixiviacion, 2019).

Tabla 2

Formas de Minerales

Forma Mineralógica	Forma Química
Crisocola	$CuSiO_3$
Malaquita	$CuCO_3 * Cu(OH)_2$
Azurita	$2CuCO_3 * Cu(OH)_2$
Cuprita	Cu_2O
Tenorita	CuO

(Conceptos de Lixiviacion, 2019).

2.5.3. Minerales sulfurados

En las minas de tajo abierto los minerales sulfurados se encuentran por debajo de la capa de óxidos, y por lo tanto no han sufrido cambios por efectos del medio ambiente, su tratamiento generalmente se realiza por operaciones tradicionales de chancado, molienda, flotación, fundición y electrorefinación, sin embargo, la técnica de lixiviación bacteriana, permite la extracción del cobre de estos minerales de baja ley; los principales minerales sulfurados son la chalcopirita y calcosina (Conceptos de Lixiviacion, 2019).

2.5.4. Lixiviación de óxidos

El contenido de los minerales oxidados es de dos tipos: el mineral de cobre propiamente dicho y la ganga que es el mineral de ganga que no tiene ningún valor.

El cobre se encuentra en forma de silicatos de cobre o crisocola y en forma de carbonatos de cobre como malaquita y azurita, también se encuentra pequeñas cantidades de sulfuros de cobre tales como la calcocita y la calcopirita; los óxidos se caracterizan principalmente por tener como ganga una matriz o roca madre de carbonatos (caliza), que son consumidores de ácidos y tienen un alto contenido de arcilla que dificulta la percolación de la solución durante la lixiviación en pilas; la crisocola, es un hidroxisilicato con una estructura cristalina abierta, se lixivia rápidamente en ácido sulfúrico (H_2SO_4) de acuerdo a la siguiente reacción (Conceptos de Lixiviacion, 2019).

$$CuSiO_3\ 2H_2O + H_2SO_4 + 2H_20 \rightarrow Cu^{+2} + 5H_2O + SiO_2$$

El Cu^{+2} es el ion cúprico, el estado principal del Cu cuando este se disuelve en solución, los iones en solución podrían ser cargas positivas, como el cúprico (Cu^{+2}) o negativas, como el sulfato ($SO4^{-2}$); igual que los minerales de crisocola, malaquita, azurita se lixivian muy rápido en ácido sulfúrico, las reacciones químicas para este proceso de lixiviación son las siguientes (Conceptos de Lixiviacion, 2019).

Malaquita

$$Cu_2(OH)_2CO_3 + 2H_2SO_4 + 7H_2O \rightarrow 2CuSO_4 + 10H_2O + CO_2$$

Azurita

$$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2 + 3H_2SO_4 + 11H_2O \rightarrow 3CuSO_4 + 15H_2O + 2CO_2$$

2.5.5. Lixiviación de sulfuros

Aquellos minerales sulfurados que tienen mineral de cobre, se han formado en grandes periodos o eras de tiempos geológicos por medio de un proceso de lixiviación parcial de la calcopirita ($CuFeS_2$), y que se conoce como el sulfuro primario.

El cobre que se encuentra en la calcosina y covelina se puede disolver en la solución de lixiviación en la forma de ion cúprico (Cu^{+2}) mediante una reacción con ion férrico (Fe^{+3}) que es uno de los agentes oxidantes más poderosos que se conocen; la covelina se lixivia con solución de ácido sulfúrico de acuerdo a la siguiente reacción (Conceptos de Lixiviacion, 2019):

$$Cu_2S + 4Fe^{+3} + 3H_2SO_4 \rightarrow 2Cu^{+2} + S0_2 + Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

2.5.6. Ganga de minerales

Todos los minerales de cobre, y también de los demás, ocupan realmente un pequeño porcentaje del volumen total. La roca contiene en mucho mayor porcentaje otros minerales y compuestos complejos de aluminio, silicatos, y carbonatos, que constituyen la llamada ganga del mineral.

2.6. Efecto de la ganga en la lixiviación

La ganga presente en todos los minerales y también en los de cobre tienen una influencia en el proceso de lixiviación originando:

- ✓ Mas consumo de ácido
- ✓ La disolución y precipitación de impurezas
- ✓ Disminuye la velocidad de lixiviación

- ✓ Ocurrencia de escurrimiento por lechos percolantes
- ✓ Pérdida de mineral de cobre

Aspectos geoquímicos de las gangas:

Feldespatos, especie mineralógica que pertenece a la familia de los silicatos; estos minerales son los causantes de la formación de las rocas primarias ígneas y la ocurrencia de su cristalización origina la llamada cristalización del magma.

Arcilla, son minerales aluminosilicatos hidratados; se forman debido a la descomposición y a la alteración de los feldespatos, por lo que son considerados de carácter secundario. Se ha determinado que todas las reacciones que involucran la disolución de estas silico-gangas en medio ácido originan un gran consumo de ácido sulfúrico.

También se tiene el caso de gangas que están agregadas a la ortoclasa, esmectita, anortita, illita, montmorillonita, albita, que tiene moléculas de agua en su estructura cristalina y esta condición puede conducir a tener que recurrir a operaciones como:

- ✓ Mezcla y agitación Tixotrópica
- ✓ Separación sólido-líquido dificultosa
- ✓ Operaciones en pilas de mineral
- ✓ Absorción de humedad por higroscopía
- ✓ Pilas de mineral estables

El abultamiento por absorción de agua y solutos de arcillas de cierto tipo, llamado el swelling, ocasiona problemas serios de escurrimiento hidráulico en los respectivos lechos.

2.7. Termodinámica de la lixiviación

El estado de equilibrio que debe alcanzar la lixiviación es determinado por la termodinámica para llevar a cabo el proceso a determinadas condiciones. La termodinámica brinda información sobre las reacciones que son factibles y las que no lo son; para ello toma en cuenta si la energía es espontánea o no. La termodinámica de las Rxs de lixiviación se representa mediante los diagramas Eh – Ph, más conocidos como Diagramas de Pourbaix.

Los solutos disueltos deben formarse en los límites del agua estable. Cuyo límite superior de estabilidad del agua está definido por la reacción siguiente:

$$\tfrac{1}{2}\ O_2(g) + 2\ H^+_{(ac)} + 2\ e^- \rightarrow H_2O(ac)$$

$$E = 1.288 - 0.0591\ pH + 0.0147 \log PO_2$$

En el límite inferior de la estabilidad del agua está fijado mediante la reacción de evolución del hidrógeno molecular (H_2):

$$2\ H^+ + 2\ e^- _\ H_2(g)$$

$$E = -0.0591\ pH - 0.0295 \log PH_2$$

Se requiere un medio oxidante para estabilizar especies disueltas que estén cerca al límite superior de la estabilidad del agua, de igual manera se requiere un ambiente reductor para estabilizar especies disueltas que estén cerca del límite inferior de estabilidad del agua.

Es importante tomar en cuenta la termodinámica en los sistemas de lixiviación para controlar la estabilidad de las especies en formación y los diagramas de Pourbaix nos brinda una idea general de dichas zonas de estabilidad.

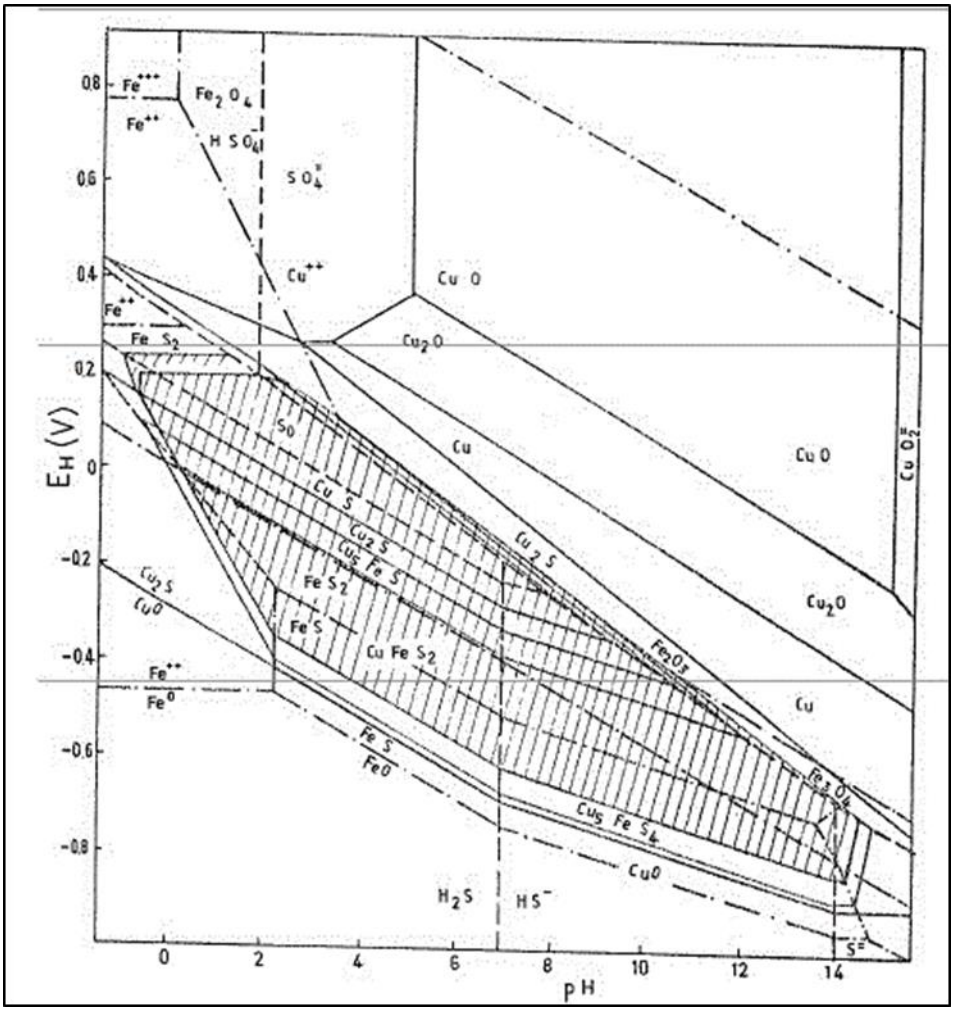

Fig. 2.3 – Diagrama Eh – pH del Sistema Cu – Fe – S – H_2O

2.8. Métodos industriales de lixiviación de minerales

Los métodos esenciales de lixiviación que son muy utilizados son: dump, in situ, vats, heap y también el de agitación. La elección del método obedece a las propiedades físicas y químicas del material y de los minerales que están asociados. Entre los factores principales tenemos: la solubilidad del valor metálico, la cinética de la disolución, la ley del mineral, el tamaño de la operación, el tipo de mineral, el consumo del reactivo, y otros mas.

2.8.1. Lixiviación in situ.

La lixiviación in situ comprende el mineral fracturado en el terreno como se encuentra. El mineral puede ser el relave desechado después de la recuperación de Au y Ag, o de cualquier otro metal, o el material que no puede ser tratado por métodos convencionales. El método in situ suprime el minado y transportar grandes cantidades de mineral y remueve los productos de desecho finales.

La lixiviación in situ consiste en la inyección de un solvente acuoso a través del material y después de disolver los valores metálicos, la solución impregnada se bombea hacia un tratamiento ulterior.

2.8.2. Lixiviación Dump

El método Dump es utilizado para recuperar valores de minerales tal como se extraen de la mina y que tienen menor valor que el rango crítico. Regularmente la materia prima se coge de los desechos que se originan en la operación de minado a tajo abierto en gran escala. Este mineral es descargado sobre una cancha impermeabilizada, y la solución extractora es esparcida en la superficie y percolada por entre el Dump mediante la gravedad. Luego se

colecta la solución impregnada en el fondo del dump y pasa a tratamiento ulterior. Al terminar el circuito de lixiviación, los residuos sólidos se dejan en la cancha de relaves.

2.8.3. Lixiviación en Heap

El principio básico de la lixiviación en heap es que es muy parecido al método Dump. No obstante, es usada para extraer valores metálicos de mineral tal como sale de la mina en vez de desechos de minado. El mineral es generalmente poroso y de fácil disolución.

2.8.4. Lixiviación en Vats

Esta lixiviación es utilizada con el fin de recuperar los las menas de valor del mineral triturado que tiene alta ley, en un recipiente de volumen limitado. En la práctica metalúrgica este método se prefiere al proceso hea cuando el material a tratar no tiene porosidad suficiente o no tiene la trituración necesaria para posibilitar el contacto interfacial correcto entre el solvente y el valor metálico. El diámetro de trituración del mineral debe estar en el intervalo entre 3/8 a 3/4 de pulgada. Si el diámetro de las partículas es demasiado fino, esto originará pérdidas considerables debido a la permeabilidad y entonces la solución no percolará a través de los sólidos.

Una planta que utiliza el método de lixiviación en Vats debe tener un cierto número de vats y cada uno debe medir entre 60 a 175 pies por lado y de 10 a 20 pies de profundidad, y debe equiparse con sistemas de filtración alrededor de la descarga en la base del vats. Los vats están usualmente construidos de concreto reforzado con un revestimiento como plástico reforzado.

2.8.5. Lixiviación por agitación.

La lixiviacción por agitación, llamada también lixiviación dinámica, es empleada para extraer valores de minerales finamente molidos en un recipiente en el cual existe un dispositivo de mezclado que puede ser mecánico o neumático (por aire). Los principios y condiciones a las cuales se lleva a cabo este método de lixiviación será detenidamente tratado en el siguiente Ítems, ya que constituye el tema principal de la tesis.

2.9. Lixiviación con agitación o lixiviación dinámica

Al contrario de lo que sucede en la lixiviación estática, en la agitación el mineral y la solución de ataque están en movimiento relativo. Este hecho, también aquí, condiciona la práctica de esta etapa del proceso hidrometalúrgico. Si se considera, por ejemplo, el tamaño de partícula, es obvio que este debe ser más reducido facilitando la acción de suspensión de la pulpa en el tanque agitador en condiciones razonables de trabajo.

Este pequeño tamaño del sólido hace que la cinética de la operación sea rápida, debido al desarrollo superficial de la materia prima, y que normalmente, si se utilizan las disoluciones adecuadas, los rendimientos de extracción sean muy elevados.
Evidentemente, las razones para esta rápida cinética de reacción se relacionen con el tamaño de partícula del sólido pero también con la transferencia de masa en condiciones favorables para generar un sistema de tanque agitado. Bajo estas condiciones los minerales que se van atacar suelen ser de alta ley o concentrados pues se garantiza la recuperación prácticamente total del metal contenido (casi siempre superior al 95%). Lo anterior, además, conduce a que el alto valor económico del metal que se recupera sea capaz de

pagar tanto la energía utilizada en la agitación como el uso de reactivos concentrados de ataque que, a su vez, garantizan los rendimiento elevados a que antes se aducía. Finalmente, en estas condiciones de lixiviación, con minerales ricos, cinética rápida y rendimientos elevados de extracción, las disoluciones fértiles son muy concentradas y aptas para realizar, sin concentración previa, una precipitación del metal, si fuese necesario, por electrólisis.

La lixiviación tiene lugar, casi siempre, continuo en series de 3 – 4 tanques con volúmenes muy variables (del orden de 50 a 500 m^3 en cada reactor). Adicionalmente, al contrario de lo que sucede en la percolación, es posible calentar el medio de reacción hasta temperaturas cercanas a 60º C con lo que todavía la productividad de estos sistemas de lixiviación aumenta.

Cuando se trabaja a temperaturas algo superiores. Se prefiere el uso de reactores a presión (autoclaves) para evitar una excesiva evaporación. En cualquier caso, estos reactores permiten trabajar en condiciones extremas aumentando, además de la temperatura, la presión y haciendo posible, con cinéticas aceptables, el uso de reactivos gaseosos, como por ejemplo el oxígeno, que son poco solubles en las disoluciones acuosas. Este método es el más caro de los que se utilizan en lixiviación en condiciones extremas y por lo sofisticado de los reactores, lo que hace aumentar los gastos de instalación de forma significativa.

El método más utilizado a industrialmente, evidentemente, es la lixiviación por agitación llevada a cabo a presión atmosférica. Se realiza ya sea usando medios mecánicos o también valiéndose de medios neumáticos inyectando aire a presión. Esta última opción se lleva a

cabo a escala industrial en los llamados TANQUES PACHUCA donde se determina y se fija una circulación de la pulpa en forma ascendente – descendente, que favorece la ocurrencia de la reacción de lixiviación. Estos tanques cilíndricos con fondo cónico donde se verifican las recciones se llaman reactores. En su interior llevan un tubo coaxial abierto en sus extremos con el mismo tanque. Tienen, además, un inyector de aire que se introduce a través del tubo central. Así, de esta manera, la densidad de la pulpa en el tubo es menor a la densidad fuera del mismo tubo, lo que origina una diferencia de presión de fuerza a la pulpa a ascender dentro de dicho tubo, y rebosar en su parte superior, haciendo circular toda la carga del reactor. Además, la calefacción del sistema, hasta un máximo de unos 60-70ºC, es muy sencilla utilizando aportes adecuados de vapor de agua. El reactor es de un diseño extremadamente simple y no tiene partes móviles.

La lixiviación por agitación o dinámica se puede llevar a cabo en régimen discontinuo o también en tanques reactores en régimen de flujo continuo. Generalmente la primera opción se aplica en procesos donde las materias primas a tratar tienen alto valor y que se pueden procesar en pequeños volúmenes, en tanto que la segunda opción se prioriza para el caso de manejar operaciones a gran escala donde se tratan considerables volúmenes de material y por esta razón se debe automatizar el proceso.

a. Agitación mecánica

Es indispensable el contacto íntimo entre el mineral y la disolución lixiviante para que ocurra la operación de lixiviación. Puesto que el sólido tiende a depositarse en el fondo del reactor, es necesario que éste disponga de algún medio para conseguir mantener a aquel en suspensión. La manera de lograr esto es imprimir al líquido un movimiento tal que la

velocidad local del fluido sea superior a la de caída libre a las partículas, con lo cual el líquido arrastra en su movimiento a aquellas impidiendo su sedimentación.

Como se ha indicado más arriba, esta agitación puede conseguirse de dos maneras mediante un sistema mecánico formado por paletas, o por la introducción en el fondo de un caudal de gas que en su ascensión arrastra al líquido que lo rodea provocando su movimiento. Aunque los resultados conseguidos pueden ser análogos, la forma de actuación es muy diferente en ambos casos, lo cual obliga a estudiarlos de forma separada. Se empezará por la agitación mecánica.

Los tanques reactores con este dispositivo de agitación, están conformados por un envase cilíndrico (tanque) y un mecanismo que debe generar la turbulencia apropiada dentro del tanque. El mecanismo es un motor que provee la velocidad de giro a un eje, a las revoluciones adecuadas, que lleva en su extremo inferior un sistema de paletas que producirán la turbulencia en la pulpa.

El sistema motriz consta de un motor eléctrico y de un sistema reductor de velocidad unido solidariamente al motor por medio de una polea, Cuando el reactor debe ser hermético, como en los autoclaves, es necesario disponer de un sistema de cierre que permita el paso y giro del eje sin que salgan los gases al exterior.

El elemento primordial en la agitación es el propio agitador. Aunque existe una gran variedad de modelos, en el caso de la lixiviación no se utilizan más de dos tipos: el de hélice marina y el de turbina, aunque este último se presenta en diversos diseños.

El agitador de hélice presenta la ventaja de su gran versatilidad y por ello se emplea en reactores de laboratorio y semipiloto. Produce un buen movimiento del líquido pero poca

turbulencia. Este tipo de agitador no se aplica, como se ha comentado, en dispositivos industriales.

El agitador ideal para la lixiviación es el de turbina con paletas planas verticales. En la práctica, este tipo de agitador se puede sustituir por el de paletas curvas que presenta la ventaja de un menor consumo de potencia.

Como se ha indicado anteriormente, la agitación de la pulpa durante la lixiviación tiene dos objetivos: mantener en suspensión los sólidos y favorecer la transferencia de materia. A primera vista parece evidente la importancia de conseguir la primera condición sin la cual no puede darse la segunda. Cuando un sólido de una determinada granulometrías se somete a agitación, se observa que hasta que se alcanza una determinada velocidad de rotación del agitador, la mayor parte de las partículas permanecen en el fondo de la vasija. La velocidad a la que se consigue alcanzar la fluidización de las partículas se denomina velocidad crítica de agitación la cual depende del diámetro de la vasija, del diámetro del agitador y de la distancia de este al fondo de la vasija.

Por lo que respecta a la altura del agitador, se observa que cuando está a una altura superior al 30% de la altura del líquido, el sólido antes de fluidizar se concentra en el centro del fondo de la vasija, mientras que cuando la altura del agitador es inferior al 10% de la altura del líquido, el sólido se sitúa en la periferia del reactor. Por cálculos más o menos complejos, se puede determinar que el diámetro óptimo del agitador; d, es una función directa del diámetro del reactor, D:

$$d \approx 0.45D$$

Para un agitador de paletas, la siguiente formula establece la relación entre velocidad de agitación, N, en rpm, y el diámetro, d, en cm, del agitador:

$$N = \frac{4.100}{d^{0,85}}$$

En donde se ha supuesto una relación D/d de 3, una densidad del sólido de 3,5 g cm^{-3}, una densidad del líquido de 1,2 g cm^{-3}, una viscosidad de 0,015 poises, una densidad de pulpa de 20% y un diámetro medio de las partículas de 0,005 cm.

Con respecto a la potencia a aplicar al agitador, se han propuesto diferentes relaciones matemáticas entre las variables que influyen en este parámetro. Una de ellas es la siguiente:

$$P = \frac{N_p d^5 N^3 \rho}{735}$$

Donde P es la potencia en caballos Np es el número de potencia que a su vez es función del número de Reynold, de la altura del líquido en el tanque y del diámetro del tanque, d es el diámetro del agitado, N el número de revoluciones y ρ la densidad del sólido.

Otro aspecto interesante a considerar en los reactores agitados es el calentamiento de la pulpa lo cual se consigue, a menudo, con vapor de agua. Teniendo en cuenta que cada kilogramo de vapor seco aporta al condensar unas 2 250kj. $Kg.^{-1}$ para calentar 1 m^3 de pulpa, con un calor especifico de 0,9 desde 30 a 100ºC, es necesario consumir un mínimo de 117 Kg. de vapor. En la práctica, el vapor no es seco y siempre arrastra algo de humedad, y hay que considerar diversos tipos de pérdidas de calor, lo que eleva la cifra anterior hasta no menos de 200 kg. m^3 de pulpa. Otro medio de calentamiento es el uso de serpentines y camisas, aunque es menos frecuente que el uso directo del vapor.

En muchas reacciones de lixiviación, que transcurren en un medio oxidante, es necesario utilizar oxígeno y la velocidad de reacción podría estar controlada por la velocidad de suministro del gas al sistema.

Entonces la velocidad de reacción es proporcional a la concentración de oxígeno en disolución, que también es función de la presión de oxígeno y de la temperatura:

$$C_{O_2} = K_{11} P_{O_2}$$

en donde la concentración de oxígeno se expresa en g. L^{-1} y la presión en atmósfera, y además K_{11} es un coeficiente relacionado con la Ley de Henry y que para el caso del agua varía entre 0,07 a temperatura ambiente y 0,025 a 100ºC, aumentando a temperaturas superiores. Para alcanzar el valor máximo de concentra de oxígeno, dado por 4,8g. L^{-1}, es necesario un aporte continuo del gas a la disolución, lo cual tienen lugar a través de la interfase gas – líquido y, por tanto, la velocidad de reacción será proporcional a la superficie de la interfase. Esta superficie disminuye comparativamente cuando aumenta el volumen del reactor y consecuentemente hay una mayor demanda relativa de oxigeno por parte del sistema. Para conseguir aumentar la superficie de la interfase hay dos procedimientos: inyectar un chorro de gas debajo de la turbina, que es más empleado, y utilizar un agitador de doble turbina.

En el primer caso al ascender las burbujas en el reactor y encontrarse con el agitador se produce una fina distribución de las mismas en la disolución aumentando fuertemente la superficie de la interfase gas – líquido. En el segundo caso, la turbina superior se entuba de forma que al no tener contra corriente da lugar a la formación de vórtices con lo que el gas es alcanzado por las paletas y distribuido finalmente.

Si la presencia de oxígeno en el sistema es el factor controlante de la cinética de reacción, conviene modificar el tipo de turbina siendo una de las más efectivas la de discos con aspas situadas en su parte inferior. Con ello, también se modifican necesariamente los parámetros más importantes de diseño del reactor. Por último, hay que advertir que como consecuencia de la aireación, el volumen de pulpa aumenta notablemente. Esto es importante en el cálculo del tiempo de residencia de la pulpa en el reactor en operaciones continuas y en el rebose del reactor en operaciones discontinuas. Otros aspectos importantes, aunque en esta ocasión favorable, es muy notable reducción de la potencia realmente absorbida que puede llegar hacer de incluso el 50%.

b. Agitación neumática

La aplicación industrial de la lixiviación por agitación neumática se lleva a cabo en los tanques Pachuca donde la energía de expansión del aire a presión expelido desde el vértice del cono inferior del tanque, origina el movimiento de la pulpa. La energía de agitación liberada es consecuencia de la energía adiabática que se necesita para comprimir el aire. Cualquier pérdida de calor, del aire comprimido hacia los alrededores o hacia la misma pulpa, es energía que suministra el compresor y no es útil para causar el movimiento requerido de la pulpa (fig.2.4)

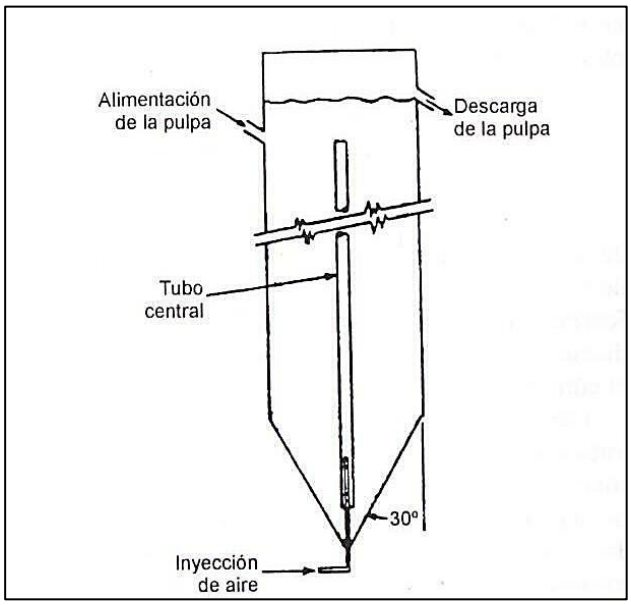

Fig.2.4. Diagrama esquemático de un tanque-reactor Pachuca con agitación neumática.

El tanque Pachuca es realmente un sistema de recirculación antes que un reactor agitador de mezcla perfecta. La recirculación se lleva a cabo por el material que ingresa al tubo central, obligado por la fuerza ascendente del aire, luego rebosa en la parte superior y por último, regresa al fondo del tanque una y otra vez en forma cíclica. El tiempo de duración de cada ciclo es función del diseño del reactor. Experimentalmente se observa la formación de un rosario de burbujas cuando se hace pasar aire a través de una boquilla sumergida en agua, cuyo diámetro es función tanto del diámetro de la boquilla como del caudal del aire insuflado. El diámetro de la burbuja será independiente del diámetro de la boquilla cuando alcance el valor crítico del Reynold. De esta manera para valores de Reynold mayores a 10,000, se logra un diámetro de burbuja constante de 4,5 mm (fig.2.5).

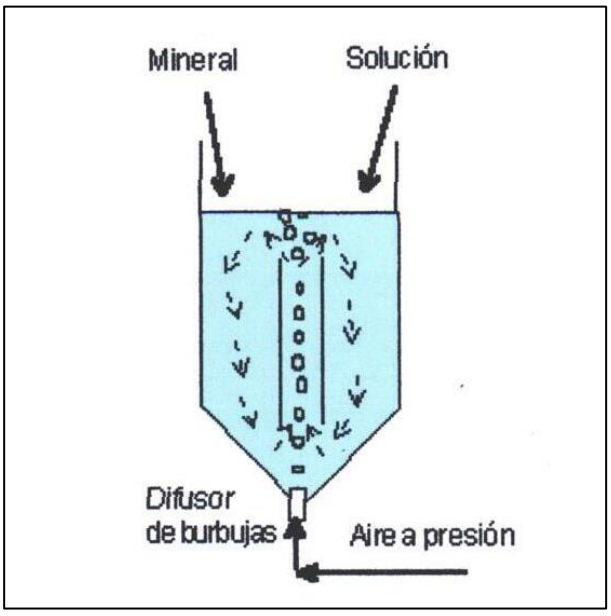

Fig. 2.5. Agitación neumática.

Para tener varios grados de agitación, la cantidad de aire que se debe introducir en el tanque es variable y está en función del tipo de reactor y de las características de la pulpa a tratar, aunque se ha determinado que unos $30m^3min^{-1}$ de aire equivale a un ciclo del sólido en el reactor por unos 15 min. Cuando los tiempos de residencia están en el orden de 5 a 10 veces el tiempo de un ciclo, los reactores trabajan adecuadamente. Las dimensiones promedio de los tanques reactores están alrededor de los 13 m de altura y con diámetros que oscilan entre 5 a 7m, el ángulo del cono inferior debe ser de 60º.

Capítulo III

Equipos de Transferencia de Masa Sólido-Líquido

3.1. Tanque agitado

Los términos de mezclado y agitación se usan con frecuencia para indicar lo mismo. Sin embargo, el mezclado describe con más precisión una operación en la cual dos o más materiales se incorporan para obtener un grado deseado de uniformidad. La agitación se aplica a aquellas operaciones en las cuales el propósito fundamental es promover la turbulencia del líquido para mejorar la transferencia de momento, calor y masa. Cuando la agitación se emplea con el propósito de promover el crecimiento de floculo, se llama floculación.

El mezclado y la agitación tienen una gran aplicación en la industria alimentaria. Aunque el mezclado ha sido esencialmente un arte, hay en la actualidad información suficiente con relación a los principios básicos (Valiente Banderas & Obaya Valdivia, 2016).

3.1.1. Objetivos del mezclado

La operación unitaria de mezclado se usa generalmente para homogeneizar productos finales y darles una calidad y presentación constante. El objetivo es mantener una composición constante, o mantener alguna propiedad como la densidad, la viscosidad, el calor, el olor o el color constantes.

3.1.2. Agitación

La agitación, en su aspecto tecnológico, consiste en producir movimientos irregulares, turbulentos, en un fluido, por medio de dispositivos mecánicos que actúan sobre el mismo y que encuentra amplia aplicación industrial para acelerar ciertas operaciones como la extracción, el mezclado, la absorción, la transferencia calorífica y algunas reacciones químicas. Aunque la agitación puede estudiarse al tratar cada una de las operaciones a las que se aplica, por ser común a todas ellas puede considerarse, en sí misma, como una operación básica (Brown, 1965).

Según Foust (Foust, 2006), la agitación o mezclado es una de las operaciones más antiguas y comunes de la ingeniería química, si bien la comprensión de la materia es limitada; aunque la efectividad y consumo de energía de la agitación depende de los principios básicos de la mecánica de fluidos, los patrones de flujo en el recipiente agitado típico son tan complejos, que la aplicación rigurosa de los principios básicos resulta imposible y en su lugar, deben usarse métodos empíricos. La agitación se utiliza en diversas aplicaciones, incluyendo (Foust, 2006):

1. Dispersión de un soluto miscible en un disolvente
2. Mezclado de dos líquidos miscibles y;
3. Producción de una suspensión de un sólido finamente dividido en un líquido y;
4. Mezclado de reactivos en un reactor químico y;
5. Agitación de un líquido homogéneo para mejorar la transferencia de calor al líquido (Foust, 2006).

Resulta obvio de esta lista parcial que, para que la agitación sea efectiva, debe llevarse a cabo con cuidado hasta el resultado particular deseado; una aplicación de dispersión puede requerir la presencia de fuerzas cortantes de alta intensidad actuando en un área de flujo restringida para que los aglomerados de partículas finas se distribuyan en forma adecuada; por otro lado, este requerimiento puede no existir en el mezclado de reactivos en un reactor químico, aunque la viscosidad de la mezcla puede aumentar marcadamente a medida que la reacción avanza, requiriendo por ello una elevada entrada de potencia y un diseño resistente del agitador; por tanto, casi todas las aplicaciones de agitación requieren que el diseño se base en la experiencia industrial adquirida o en pruebas llevadas a cabo en el sistema particular involucrado (Foust, 2006).

Para la especificación del equipo requerido para una aplicación nueva y la predicción de su operación, la teoría de similitudes constituye una herramienta empírica útil; partiendo del registro de mediciones de los resultados de los ensayos en laboratorio o en pequeño o similar, se puede realizar la predicción de la operación de un sistema de agitación a gran escala. Los resultados de los ensayos de laboratorio se analizan a la luz de los principios de la dinámica de fluidos, lo que lleva a determinar un factor de escalamiento para las variables más importantes.

Estos factores de escala permiten la amplificación empírica del aparato de prueba a instalaciones a gran escala y en muchos casos, el aumento progresivo puede basarse en el principio de que el equipo a escala industrial debe suministrar la misma intensidad de energía – es decir, el mismo consumo de potencia por volumen de material agitado - que lo requerido por la unidad piloto; en otros casos, como en la dispersión antes mencionada, el

esfuerzo cortante en la punta del impulsor debe ser constante para un aumento progresivo efectivo (Foust, 2006).

El aumento progresivo del mezclado para muchas operaciones caracterizadas como "sensibles a la velocidad del flujo" tiene mayor éxito si se mantiene constante la torsión/unidad de volumen; para estas aplicaciones, resulta una menor amplificación de la entrada de potencia para un aumento progresivo que para una predicción más clásica basada en una potencia igual por unidad de volumen (Foust, 2006).

3.1.3. Objetivos y requisitos de la agitación

Según sean los resultados que se requieran, son muchas los requisitos que deben cumplir los sistemas de agitación. Se han identificado cuatro clases de operaciones generales y que se pueden distinguir por sus respectivos objetivos, y cada una de ellas necesita un equipamiento diferente de agitación para cada una de las fases. La intensidad de la turbulencia debe ser uniforme en todo el recipiente, si se quiere que la transferencia de materia tenga lugar en todos los puntos, en este sentido, las hélices pequeñas que operan a grandes velocidades producen grandes velocidades de corriente, pero concentran la zona de turbulencia en las proximidades del rodete; por otra parte, los rodetes grandes que funcionan a pequeñas velocidades producen turbulencia uniforme en todo el tanque, si bien las velocidades que determinan son demasiado bajas para lograr una buena suspensión o dispersión de las fases y en consecuencia, para esta operación se recomiendan rodetes de tamaño mediano, que funcionen a velocidades medias (Brown, 1965).

3.1.4. Transferencia de materia en sistemas heterogéneos

Esta categoría de operaciones incluye las reacciones químicas, la disolución de sólidos, la extracción, la absorción y la adsorción y las exigencias que debe satisfacer el agitador son dobles: debe dispersar o suspender la fase discontinua en la totalidad de la continua; y debe provocar intensa turbulencia entre las gotitas, burbujas o partículas suspendidas, para favorecer la transferencia de materia entre las fases; para estas finalidades se necesita un agitador que produzca velocidades de flujo suficientemente elevadas que impidan la sedimentación, de las partículas o la estratificación de las fases (Brown, 1965).

3.1.5. Formación de emulsiones

En unas cuantas operaciones, como la emulsión de dos líquidos inmiscibles, deben encontrarse espacios muertos en el sistema en agitación, debido a que se produciría la concentración local de los líquidos inmiscibles, y se requiere turbulencias de mucha intensidad en algún punto del sistema. En general, las cosas suelen disponerse de manera que los líquidos estén bastante bien mezclados antes de llegar al punto de gran turbulencia y si la operación se conduce en forma discontinua, es preciso que, gradualmente, todo el contenido del depósito pase por la zona de gran turbulencia; para esta operación son especialmente recomendables los rodetes pequeños, a grandes velocidades, bien ajustados y con pequeños espacios libres entre el rodete y las piezas fijas de sus alrededores (Brown, 1965).

3.1.6. Transferencia calorífica y uniformidad de temperatura

La transferencia de calor frecuentemente suele presentarse asociada a la transferencia de masa, sobre todo para los casos en los que se presentan reacciones químicas. En

consecuencia, los tanques de reacción suelen estar provistos de serpentines de calefacción (o de refrigeración) o de dobles paredes, y es necesario que se produzcan velocidades adecuadas a lo largo de las superficies cambiadoras para favorecer la transmisión calorífica; en estos casos, el dispositivo de agitación debe estar situado cerca de los serpentines o de las camisas de calefacción; además, el rodete debe producir corrientes de gran volumen, de manera que la totalidad del contenido del recipiente se ponga fácilmente en contacto, o llegue a la proximidad de las superficies transmisoras de calor, única manera de obtener temperaturas uniformes en todo el sistema; para estas operaciones son apropiados los agitadores grandes a pequeñas velocidades (Brown, 1965).

En algunos pocos casos, en los que conviene evitar sobrecalentamientos de determinadas áreas de la superficie de transmisión, el agitador debe rozar la superficie, o, si se emplean rodete s pequeños de gran velocidad, éstos deben crear gran turbulencia en la vecindad inmediata de dicha superficie; al considerar los requisitos reseñados, hay que tener presente que con los líquidos viscosos la zona de gran turbulencia que rodea al agitador es de pequeño volumen y por lo tanto, cuando se trabaja con líquidos de gran viscosidad se deben emplear grandes rodetes para que el flujo alcance a todos los puntos del sistema (Brown, 1965).

3.2. Equipos de agitación

En el mezclado y la agitación se emplean numerosos equipos, estos incluyen los impulsores rotatorios, agitadores por aire, trompas de mezclado y bombas.

Los líquidos se agitan y mezclan en algún tipo de tanque o recipiente, usualmente de forma cilíndrica y con un eje vertical, la parte superior del recipiente puede encontrarse abierta al aire o puede estar cerrada. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo del problema; sin embargo, hay determinados diseños estándar. La parte inferior del tanque suele ser redondeada, no plana, para eliminar las regiones en las que las corrientes del fluido no pueden penetrar. La profundidad del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Se monta un impulsor sobre una flecha soportada a su vez desde arriba. La flecha está dirigida por un motor y a veces conectada a una caja de engranes reductores de velocidad. Usualmente se incluyen accesorios tales como líneas de salida, serpentines, chaquetas, pozos para termopares. Los impulsores se pueden clasificar en tres grupos: paletas, turbinas y propelas. Estos impulsores se pueden montar sobre una flecha y utilizarse más de uno en los aparatos (Valiente Banderas & Obaya Valdivia, 2016).

3.2.1. Impulsores

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto, done la altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque, además un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje; en la figura 3.1 se muestra un sistema de agitación típico (Geankoplis, 2006).

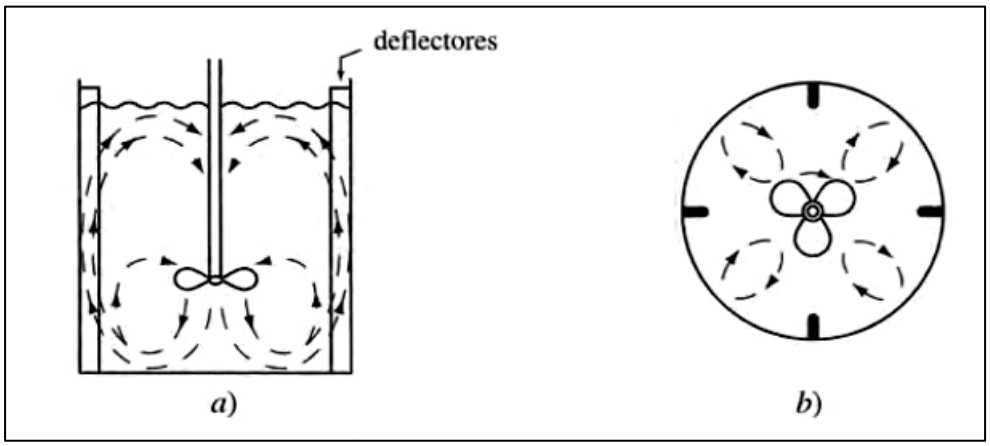

Figura 3.1. Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial: a) vista lateral, b) vista del fondo (Geankoplis, 2006).

a. **Agitador propulsor de tres aspas**. De este tipo se tienen diversos tipos de agitadores de frecuente uso. Uno de los más conocidos es el agitador de tres aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas y que puede ser móvil para introducirlo lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro; estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm (revoluciones por minuto) y son propios para líquidos de baja viscosidad. En la figura 3.1 se muestra el patrón de flujo en un tanque con deflectores y con un propulsor colocado en el centro del tanque; este tipo de patrón de flujo se llama flujo axial, ya que el fluido fluye axialmente hacia abajo en el eje central o eje de la hélice y hacia arriba a los lados del tanque, como se muestra en la citada figura (Geankoplis, 2006).
b. **Agitadores de paletas**. Para velocidades de 20 a 200 rpm se emplean diversos tipos de agitadores de paletas, tal como lo muestra la figura 3.2a se tienen sistemas de dos a cuatro paletas planas, la longitud total del propulsor de paletas mide del 60 al 80% del diámetro del tanque y la anchura de la paleta es de 1/9 a 1/10 de su longitud; a bajas

velocidades se consigue una agitación suave en un recipiente sin deflectores y a velocidades más altas se usan deflectores porque, sin ellos, el líquido simplemente hace remolinos y en realidad casi no se mezcla (Geankoplis, 2006).

El agitador de paletas no es efectivo para sólidos en suspensión porque, aunque hay un buen flujo radial, hay poco flujo axial o vertical, se suele usar una paleta de ancla o compuerta, ilustrada en la figura 3.2b, la cual barre o raspa las paredes del tanque y a veces su fondo; se emplea con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes y para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es buen mezclador; se suele usar para procesar pastas de almidón, pinturas, adhesivos y cosméticos (Geankoplis, 2006).

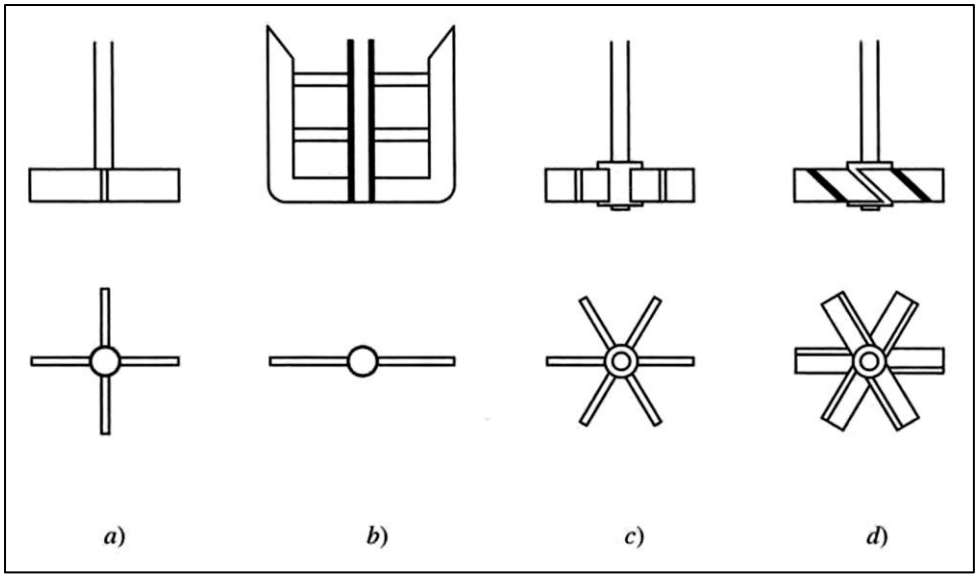

Figura 3.2. Varios tipos de agitadores: a) paleta de cuatro aspas, b) paleta de compuerta o ancla, c) turbina abierta de seis aspas, d) turbina de aspas inclinadas (45"). (Geankoplis, 2006).

c. **Agitadores de turbina.** Para el procesamiento de líquidos o sus mezclas que tienen una gran diversidad de viscosidades se utilizan turbinas parecidas al agitador de paletas múltiples, pero con aspas más cortas. El diámetro de una turbina suele medir del 30 al 50% del diámetro del tanque, normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspas; en la figura 3.3 se muestra un agitador de turbina de seis aspas, con disco; en la figura 3.2c se ilustra una turbina plana abierta de seis aspas; las turbinas con aspas planas producen un flujo radial, como se muestra en la figura 3.3, para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del propulsor de la turbina en su eje; de esa manera las paletas dispersan el gas en muchas burbujas finas (Geankoplis, 2006).
   Con la turbina de hojas inclinadas que se muestra en la figura 3.2d, con las aspas a 45° se imparte cierto flujo axial, de modo que hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo es útil para sólidos en suspensión, ya que las corrientes fluyen hacia abajo y luego levantan los sólidos depositados; a menudo se emplea una turbina de hoja inclinada con sólo cuatro hojas para la suspensión de sólidos. El impulsor de alta eficiencia de tres hojas que se muestra en la figura 3.4a es semejante a una turbina inclinada de cuatro hojas; sin embargo, presenta un ángulo de inclinación mayor de 30-60° en el centro y un ángulo más pequeño de 10-30° en la punta. Este impulsor de flujo axial produce más movimiento de fluido y mezclado por unidad de potencia, y es muy útil para la suspensión de sólidos (Geankoplis, 2006);
d. **Agitadores de banda helicoidal.** Este tipo de agitadores se usa para soluciones sumamente viscosas y opera a pocas rpm, en la región laminar. La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central. El líquido se mueve en una

trayectoria de flujo tortuosa hacia abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro (Geankoplis, 2006).

Otros agitadores semejantes a este tipo son los de banda helicoidal doble (figura 3.4b) y los de banda helicoidal con tornillo sin fin (figura 3.4c).

e. **Selección del agitador e intervalos de viscosidad**. Una de las diversas propiedades que incide en elección del agitador es la viscosidad del fluido. En seguida se dan algunas indicaciones de los intervalos de viscosidad de esos agitadores; los propulsores se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 Pa s (3000 cp); las turbinas pueden usarse por debajo de unos 100 Pa s (100000 cp); las paletas modificadas como los agitadores tipo ancla se pueden usar desde más de 50 Pa s hasta unos 500 Pa s (500000 cp); los agitadores helicoidales y de tipo banda se suelen usar desde arriba de este intervalo hasta cerca de 1000 Pa s y se han utilizado hasta para más de 25 000 Pa s; para viscosidades mayores de unos 2,5 a 5 Pa s (5000 cp) o más, los deflectores no se necesitan porque hay poca turbulencia (Geankoplis, 2006).

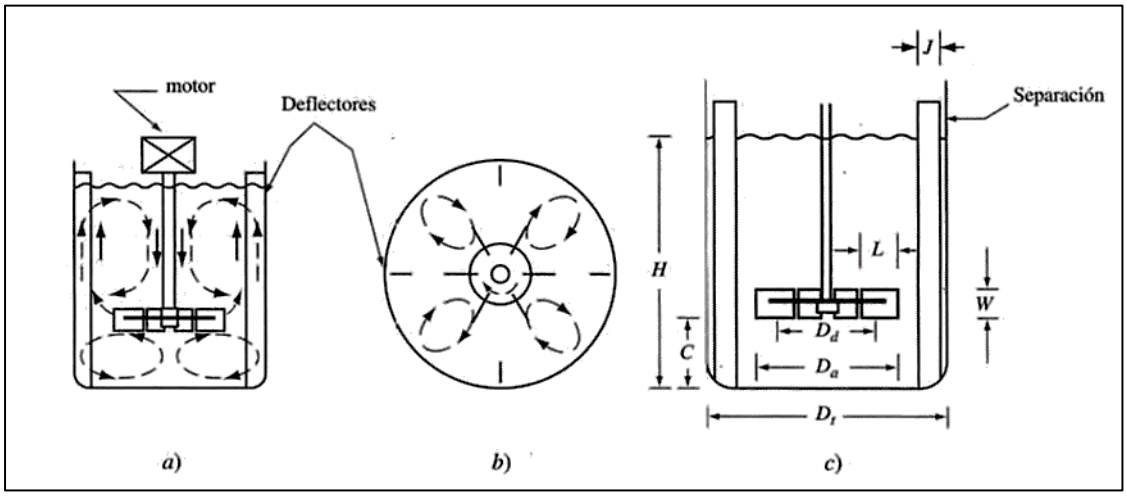

Figura 3.3. Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco, que muestra patrones de flujo: a) vista lateral, b) vista superior, c) dimensiones de la turbina y el tanque (Geankoplis, 2006).

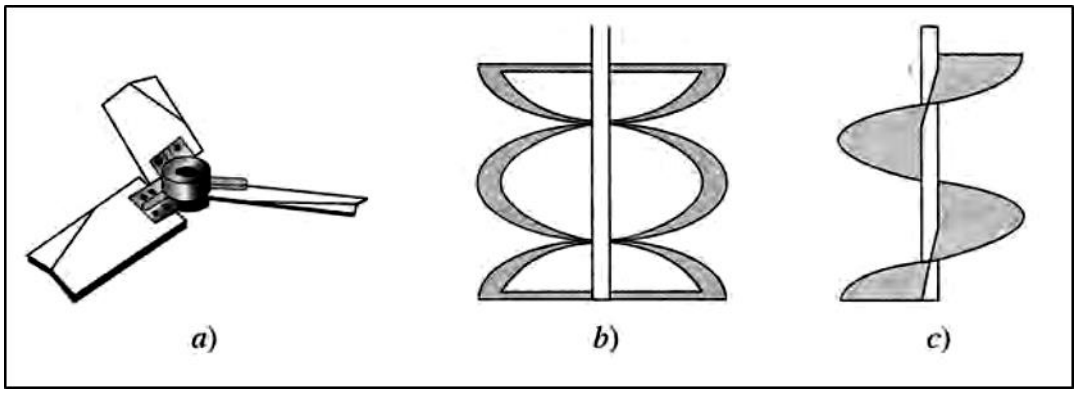

Figura 3.4. Otros tipos de agitadores: (a) impulsor de tres hojas de alta eficiencia, (b) cinta de doble hélice, (e) tomillo helicoidal (Geankoplis, 2006).

3.2.1. Ruta del flujo en la agitación

La ruta que sigue el flujo en un tanque de agitación es función de las propiedades del fluido, de la forma del tanque, de la clase de bafles y del tipo de agitador. Si el propulsor u otro agitador va montado verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo tipo remolino, que suele ser indeseable debido a que se atrapa aire, se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas y otros efectos perjudiciales, en especial cuando se opera a velocidades altas; para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro cuando se trata de propulsores de baja potencia, sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias (Geankoplis, 2006).

Es habitual el uso de bafles para obtener una agitación enérgica con agitadores verticales, para disminuir el remolino y tener un buen mezclado. En la figura 3.3 se muestran deflectores montados en las paredes en posición vertical, casi siempre basta con cuatro

deflectores, que tengan anchura de cerca de 1/12 del diámetro del tanque para turbinas y propulsores, el impulsor de la turbina fuerza al líquido en dirección radial hasta las paredes donde se divide, en una porción que fluye hacia arriba, hasta tocar la superficie para regresar hacia el propulsor, mientras la otra porción fluye hacia abajo; algunas veces, cuando se trata de tanques con grandes profundidades de líquido en comparación con el diámetro del tanque, se montan dos o tres propulsores en el mismo eje, y cada uno actúa como un mezclador individual; el propulsor inferior está cerca de 1.0 diámetro del propulsor por arriba del fondo del tanque (Geankoplis, 2006).

En un sistema de agitación, el gasto volumétrico del fluido que mueve el impulsor, es un factor muy importante para asegurarse de agitar la totalidad del volumen del mezclador en tiempo razonable, además, la turbulencia en la corriente de agitación es decisiva para el mezclado, puesto que arrastra al material hacia la corriente; algunos sistemas de agitación requieren una alta turbulencia con velocidades de circulación bajas; otros se basan en turbulencias bajas con altas velocidades de circulación, esto casi siempre depende de los tipos de fluidos que se mezclan y del grado de mezclado que se solicite (Geankoplis, 2006).

3.2.2. Diseño "normal" típico de una turbina

El agitador más utilizado en la ingeniería de procesos y en la industria es el de turbina y que se observa en la figura 3.3. Cuando se diseña un sistema de agitación, por lo general se utiliza este agitador en el diseño inicial. Las proporciones geométricas del sistema de agitación que se considera como el diseño "normal" típico se muestra en la tabla respectiva, estas proporciones relativas son la base de las correlaciones principales del

desempeño de los agitadores en muchas publicaciones, en algunos casos, para las correlaciones del agitador, $W/D_a = 1/8$ y el número de deflectores en la mayoría de los usos es 4; la brecha entre los deflectores y la pared suele ser de 0.10 a 0.15 J para asegurar que el líquido no forme bolsas estancadas cerca de esa zona, en pocas correlaciones la relación entre el deflector y el diámetro del tanque es $J/D_t = 1/10$ en lugar de 1/12 (Geankoplis, 2006).

3.3. Leyes aplicables en el mezclado

Las leyes de la naturaleza que rigen el mezclado dependen de las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas de los materiales. Para el cálculo de la potencia de los agitadores se requiere de conocimientos de los números adimensionales llamados número de Reynolds, número de Froude y número de potencia. En los balances de materia y energía se requiere de la aplicación de la regla de la palanca y del empleo de diagramas entalpía concentración (Valiente Banderas & Obaya Valdivia, 2016).

Como ya se dijo, los números adimensionales característicos de esta operación son:

El número de potencia:

$$Np = \frac{Pogc}{\rho N^3 D^5}$$

El número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

El número de Froude:

$$N_{Fr} = \frac{DN^2}{g}$$

en donde Po es la potencia, N las revoluciones por unidad de tiempo, D el diámetro del impulsor, ρ la densidad, μ la viscosidad, g la aceleración de la gravedad y gc el factor de conversión. Las relaciones existentes entre los números adimensionales son del tipo:

$$Np = K(N_{Re})^a (N_{Fr})^b$$

En donde K, a, b son constantes, cuyos valores dependen de la situación y el tipo de agitador empleado.

Cuando hay turbulencia y no existe vórtice,

$$Po = \frac{K}{gc} \rho N^3 D^5$$

en donde K, como ya dijimos depende del tipo de impulsor empleado.

Para el caso de flujo laminar.

$$Po = \frac{K}{gc} \mu N^2 D^3$$

En la tabla siguiente se encuentran algunos valores de K para tanques equipados con cuatro mamparas de 10 % del diámetro del tanque.

Tabla 3.1.

Valores de K para tanques, de acuerdo al flujo

Impulsor	**K en Flujo laminar**	**K en flujo turbulento**
Propela de 3 hojas, pitch cuadrado	41	0,32
Propela de 3 hojas, pitch de dos	43,5	1
Turbina de 6 hojas	71	6,3
Turbina de 6 hojas curvas	70	4,8
Turbina con 6 hojas en flecha	71	4,0
Turbina de ventilador de 6 hojas	70	1,65
Impulsor de paletas de 2 hojas	36,5	1,7
Turbina con anillo con 6 hojas curvas	97,5	1,08
Turbina con anillo y con estator y sin bafles	172,5	1 a 12

(Valiente Banderas & Obaya Valdivia, 2016)

$\frac{D_a}{D_t} = 0.3 \text{ a } 0.5$		$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$
$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$

Figura 3.5. Proporciones geométricas para un sistema de agitación "normal" (Geankoplis, 2006).

Conclusiones

- La operación de transferencia de masa sólido-líquido es una operación unitaria muy requerida en la industria de la transformación de una materia prima en un producto terminado.
- En el diseño de Tanques agitados los principales parámetros para su construcción son en Número de potencia, el Número de Froude, el Número de Reynolds, yanto para régimen laminar como para el régimen turbulento.
- Dadas las condiciones, se pude concluir que las ecuaciones del modelo de la operación de transferencia de masa sólido-líquido en cuanto a lixiviación, interactúan entre sí en forma estable y congruente.
- Se ha logrado reunir valiosa información para el estudio de las Operaciones de transferencia de masa sólido-líquido de los sistemas de extracción de cobre por lixiviación.
- Se ha expuesto de manera comprensiva los fundamentos de la lixiviación y la agitación y mezcla.

Bibliografía

Brown, G. (1965). *Operaciones básicas de la Ingeniería Química.* Barcelona: Editorial Marín S. A.

Castellan, G. (2001). *Fisicoquímica.* Fondo educativo interamericano.

Conceptos de Lixiviacion. (2019). *Academia.edu.* Obtenido de https://www.academia.edu/6896709/Conceptos_de_lixiviación_de_minerales

EcuRed. (15 de Enero de 2019). *EcuRed*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Operación_con_transferencia_de_masa

Eduardo Bustamente, R. A. (2015). *capitulo ii métodos de lixiviación de minerales de cobre.* Obtenido de http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2655/IMedbura.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fernández Salinas, S. I. (2019). *Docplayer.es.* Obtenido de https://docplayer.es/18378801-Optimizacion-del-proceso-de-lixiviacion-clorurante-en-medio-acido-oxidante-de-concentrados-sulfurados-de-cobre.html

Foust, A. (2006). *Principios de Operaciones Unitarias.* México: Compañía Editorila Continental.

Geankoplis, C. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación (incluye operaciones unitarias).* México: Compañía Editorial Continental.

Jarabo Friedrich, F. (21 de Enero de 2019). *FJaraboWeb*. Obtenido de https://fjarabo.webs.ull.es/Practics/Oba/ObaFiles/AMater.pdf

Llorente Gómez, E. (1991). *Minería Química.* Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.

Valiente Banderas, A., & Obaya Valdivia, A. (13 de Octubre de 2016). *iqvalientenlinea.* Obtenido de Operaciones unitarias para la industria alimentaria. (Un enfoque basado en competencias): https://iqvalientenlinea.wordpress.com/2016/10/13/operaciones-unitarias-para-la-industria-alimentaria-un-enfoque-basado-en-competenciasel/