



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESINA**

**ESTADO DEL ARTE SOBRE LA  
ELECTROFLOTACIÓN EN CELDA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA:  
PAOLA CABALLERO GARDUÑO**



**CDMX**

**2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** FAUSTINO JUÁREZ SÁNCHEZ  
**VOCAL:** JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES  
**SECRETARIO:** MIGUEL ÁNGEL TAPIA RODRÍGUEZ  
**1ER. SUPLENTE:** VELA AVITÚA ANDRÉS  
**2° SUPLENTE:** ELIZABETH HERNÁNDEZ MARÍN

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA,  
EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA,  
UNAM

LABORATORIO DE RADIATIVIDAD NATURAL, INSTITUTO DE  
GEOFÍSICA, UNAM.

## **ASESOR DEL TEMA:**

---

**Dr. Faustino Juárez Sánchez**

## **SUSTENTANTE:**

---

**Paola Caballero Garduño**

# Índice

<b>1. RESUMEN</b>	4
<b>2. OBJETIVOS</b>	5
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>4. GENERALIDADES</b>	8
4.1 SULFUROS EXPLOTADOS EN MÉXICO	8
4.2 ESFALERITA	9
4.3 ZINC	10
4.4 FLOTACIÓN	12
4.4.1 INTERFASES	15
4.4.2 ÁNGULO DE CONTACTO.	20
4.4.3 ELECTROQUÍMICA DE FLOTACIÓN	22
4.5 FUERZA ELECTROMOTRIZ	23
4.6 ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTROFLOTACIÓN	25
4.6.1 TAMAÑO DE BURBUJA	27
4.6.1.1 EFECTO DE pH EN EL TAMAÑO DE BURBUJA	29
4.6.1.2 EFECTO DE DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL TAMAÑO DE BURBUJA	30
4.6.2 ELECTRODOS	32
4.6.3 APLICACIONES	33
<b>5. PROCEDIMIENTO</b>	34
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	35
<b>7. CONCLUSIONES</b>	49
<b>8. BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA</b>	50

# 1. RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad la revisión del estado del arte en el proceso de electroflotación en celda considerando como muestra una mena sulfurada de zinc, (esfalerita, ZnS), con el fin de conocer las condiciones de trabajo a nivel laboratorio para lograr la mayor cantidad de Zinc recuperado y deprimir el azufre presente de manera natural en la red cristalina de la esfalerita y otras impurezas como el hierro y cadmio.

Para conocer dichas condiciones, se llevó a cabo esta investigación bibliográfica extensa. Algunos autores elaboran la experimentación de acuerdo a diversas variables como son la activación de Zinc con iones  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ; a través de una ecuación en la que se conoce la cantidad de Xantato de sodio (NaX) requerido para flotar el metal de interés. Otros, sin embargo, realizan el estudio de potencial en pulpa, oxigenación de ésta última, además del comportamiento de la burbuja, su estabilidad, etc.

Al término de la revisión del estado del arte, se considera la información más destacada que puede ser usada para llevar a cabo el proceso de electroflotación a nivel laboratorio. De acuerdo a los datos obtenidos, este método será posible extrapolarlo a otros minerales de igual manera sulfurados.

Los resultados de esta investigación muestran que es necesario un medio alcalino para llevar a cabo la flotación, una densidad de corriente controlada y eludir en lo posible iones que sean capaces de competir con los iones producidos por el colector, debido a que éstos generan una mayor carga superficial en la interfase mineral-burbuja disminuyendo su hidrofobicidad.

## 2. OBJETIVOS

### Objetivos generales:

Recopilar información acerca del proceso de concentración, electroflotación en celda, para la extracción de Zinc a partir de una mena sulfurada como la esfalerita.

De acuerdo a los parámetros teóricos fundamentales recopilados de la electroflotación de esfalerita, llevar a cabo posteriormente la experimentación correspondiente a nivel laboratorio con la finalidad de conocer la viabilidad de este proceso extrapolándolo a otras menas sulfuradas.

### Objetivos particulares:

A partir de los diversos tipos de colectores de Xantato de potasio (KX) como el isopropílico, amílico y etílico, lo cuales dependen del tamaño de la cadena, valorar cuál es el indicado para incrementar la hidrofobicidad de la esfalerita.

Considerar el uso de Xantato amílico de potasio como colector (PAX) y evaluar la viabilidad de la técnica de electroflotación en celda como método para la eliminación de sulfuros y otros metales presentes en una mena de esfalerita.

Conocer cuáles son las condiciones óptimas de pH, potencial Zeta, eficiencia del colector, oxigenación de pulpa y iones que sean posibles para activar a la partícula mineral y poder flotar al metal de interés, el Zinc.

### 3. INTRODUCCIÓN

El Zinc es la principal materia prima utilizada en diversos procesos electroquímicos tales como, el galvanizado en piezas de acero y la fabricación de aleaciones como Latón o Zamak. La industria minera extrae el zinc a partir de una mena sulfurada como es la esfalerita [1].

La esfalerita es un mineral con un contenido de zinc y azufre presentes en la estructura cristalina. De la misma manera incluye algunas impurezas como el hierro, el cual le proporciona su tonalidad desde ámbar hasta oscuro. El porcentaje promedio de cada elemento presente en una mena de esfalerita es: 64.06% Zn, 33.06% S y 2.88% Fe [5].

La extracción de zinc requiere del proceso de conminución y posteriormente concentración (flotación o electroflotación) para su liberación y eliminación de impurezas, las cuales son acarreadas desde el proceso de trituración hasta la molienda. Al llegar a la última etapa, flotación o electroflotación, se añaden algunos reactivos como colectores, espumantes, depresores y modificadores de pH que favorecen la eliminación del hierro [7].

El azufre contenido en la red cristalina de la mena sulfurada de zinc (ZnS), así como sus contaminantes, tales como hierro e incluso cadmio, provocan que el porcentaje de recuperación del metal de interés sea relativamente bajo, es por ello que se tiene la necesidad de mejorar las condiciones de trabajo con la finalidad de incrementar estos valores.

Ante esta situación, en las últimas décadas se han propuesto varias alternativas que han dado resultados favorables en el tratamiento de minerales de media ley, logrando la liberación del metal de interés, eliminando dentro de lo posible el azufre presente en la red cristalina y deprimir impurezas con un porcentaje de recuperación alrededor del 90%.

Esta técnica es conocida como electroflotación, la cual se considera un proceso de separación selectiva y que consiste en la separación específica de minerales basándose en propiedades superficiales gracias a la generación de burbujas de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> por medio de la electrólisis del agua.

Dentro de los reactivos de flotación que benefician a la extracción de Zinc son los colectores, como los Xantatos, los que permiten que la esfalerita incremente su hidrofobicidad y sean adheridos a la fase gaseosa (burbujas de H<sub>2</sub> para electroflotación). Los autores consultados hacen uso de diferentes tipos de Xantatos, algunos de ellos de sodio y potasio, como lo son el amílico, etílico, isopropílico, isobutílico y sec-butílico [15].

Este trabajo permite conocer las diferentes variables para llevar a cabo el proceso de electroflotación en celda de una mena de esfalerita e incrementar la cantidad final de zinc recuperado. Algunas de estas variables son pH, tipo de colector a emplear y cantidad añadida de éste a la pulpa, interacción de cargas superficiales o capa Stern y oxigenación de la misma.

Con base en las variables mencionadas anteriormente en la aplicación propuesta de electroflotación en celda considerando una mena sulfurada, será posible aplicar este método a nivel laboratorio basándose en este trabajo en un futuro para corroborar las condiciones propuestas por algunos autores y considerarlo como un método eficaz para obtener la mayor cantidad de zinc recuperado buscando eliminar sus contaminantes.

## 4. GENERALIDADES

### 4.1 SULFUROS EXPLOTADOS EN MÉXICO

México es uno de los países más importantes a escala mundial en cuanto a riqueza minera se refiere, tanto por cantidad y calidad de especies minerales. Ocupa el décimo segundo lugar a este nivel en producción minera y se ubica entre los 10 principales productores de minerales importantes siendo el 1<sup>er</sup> productor de plata, 5° en molibdeno, 6° en plomo y zinc, 8° en oro y cobre, también es rico en bismuto y cadmio [2].

Los yacimientos más importantes ubicados geográficamente en el país se pueden apreciar en la Figura 1, dentro de ellos encuentran, el de Fresnillo (Zacatecas), Cananea y La Caridad (Sonora), Molango (Hidalgo), Cerro San Pedro (San Luis Potosí), San Pedro, Cuatro Ciénegas (Coahuila) y Charcas (San Luis Potosí), esta última es la más importante en la extracción de esfalerita, entre otros. Muchos de los metales explotados en estas minas provienen de menas sulfuradas como la esfalerita ( $ZnS$ ), galena ( $PbS$ ), calcopirita ( $CuFeS_2$ ), pirita ( $FeS_2$ ), dichas menas sulfuradas se pueden considerar como una fuente de elementos potencialmente tóxicos [2].

La industria minero-metalúrgica es de suma importancia económica y social ya que promueve la exportación de productos metálicos y se encuentra dentro de los primeros cinco sectores que más contribuyen al Producto Interno Bruto (PIB) en el país. La aportación de este sector representó en el año 2020 el 8.3% y 2.3% del PIB Industrial y Nacional, respectivamente, de acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2020 [3].



Figura 1. Potencial Geológico de México [4]

## 4.2 ESFALERITA

La esfalerita o también llamada blenda recibe su nombre del griego “sphaleros” que significa traidor, nombre dado por la facilidad de ser confundida por la galena. Es un mineral con un sistema cristalino cúbico que pertenece al grupo de los sulfuros y es una mena fundamental para la extracción de zinc. Se encuentra en grandes variedades de colores como el marrón, negro, amarillo, verde, rojo, gris, blanco, incoloro, hasta llegar a negro, mostrado en la Figura 2. Todo esto dependiendo de su composición química y de la cantidad de hierro presente como impureza principalmente, la cual es: Zn (64.06%), S (33.06%) y Fe (2.88%). Así mismo presenta una dureza de 3.5 a 4 en escala de Mohs (alrededor de 18.3 kWh/ston), ideal para llevar a cabo el proceso de conminución y un peso específico entre 3.9 a 4.1 [5].



Figura 2. Sulfuro de Zinc, ZnS [6].

En comparación con otros minerales de sulfuro, la esfalerita tiene una flotabilidad natural inferior y la adsorción del ion Xantato ( $X^-$ ) en la superficie, se considera relativamente débil, es por ello que se requieren otros reactivos de flotación para poder ser separada de la ganga y aumentar la recuperación del Zinc metálico al final del proceso de concentración por electroflotación.

### 4.3 ZINC

El Zinc ocupa el 23° lugar de los elementos más abundantes en la Tierra donde las menas contienen alrededor de un 10% de Fe y entre un 40%-50% de Zn proveniente de la esfalerita (ZnS). Es un metal de color gris azulado, en presencia de humedad se forma una capa superficial de óxido o carbonato básico que aísla el metal y lo protege de la corrosión.

Presenta una gran resistencia a la deformación plástica en frío que disminuye en caliente, lo que obliga a laminarlo por encima de los 100 °C. Una de sus aplicaciones más importantes (alrededor del 50% de consumo anual en México) es el galvanizado del acero [7]. Sin embargo, otras aplicaciones son el uso de baterías Zn-AgO en la industria aeroespacial y piezas de aleaciones de Zamak (Zn-Al-Mg) y Latón (Cu-Zn). Las propiedades físicas del zinc se enlistan en Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas del Zinc [8]

<b>Nombre</b>	<b>Zinc</b>
Número atómico	30
Valencia	2
Estado de oxidación	2
Electronegatividad	1.6
Radio covalente	1.3
Radio iónico	0.74
Configuración electrónica	[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>
Primer potencial de ionización (eV)	9.42
Masa atómica (g/mol)	65.37
Densidad (g/ml)	7.14
Punto de ebullición (°C)	906
Punto de fusión (°C)	419.5

Es posible separar al zinc de una mena a partir de la metalurgia extractiva por vía húmeda gracias a la hidrometalurgia, donde se lixivia a partir de reactivos acuosos, vía seca o pirometalurgia, por medio de la tostación de mineral o por conminución, operaciones que incluyen la reducción de tamaño y concentración en el que se modifica el comportamiento superficial del sólido llamado flotación [7].

El zinc ocupa uno de los 6 principales metales que produce México tanto para su uso interno como para exportación, siendo Zacatecas, Chihuahua y Durango, los principales productores. En la Figura 3, se muestra el ranking más alto de producción de Zinc en toneladas métricas en México en 2020 [9].

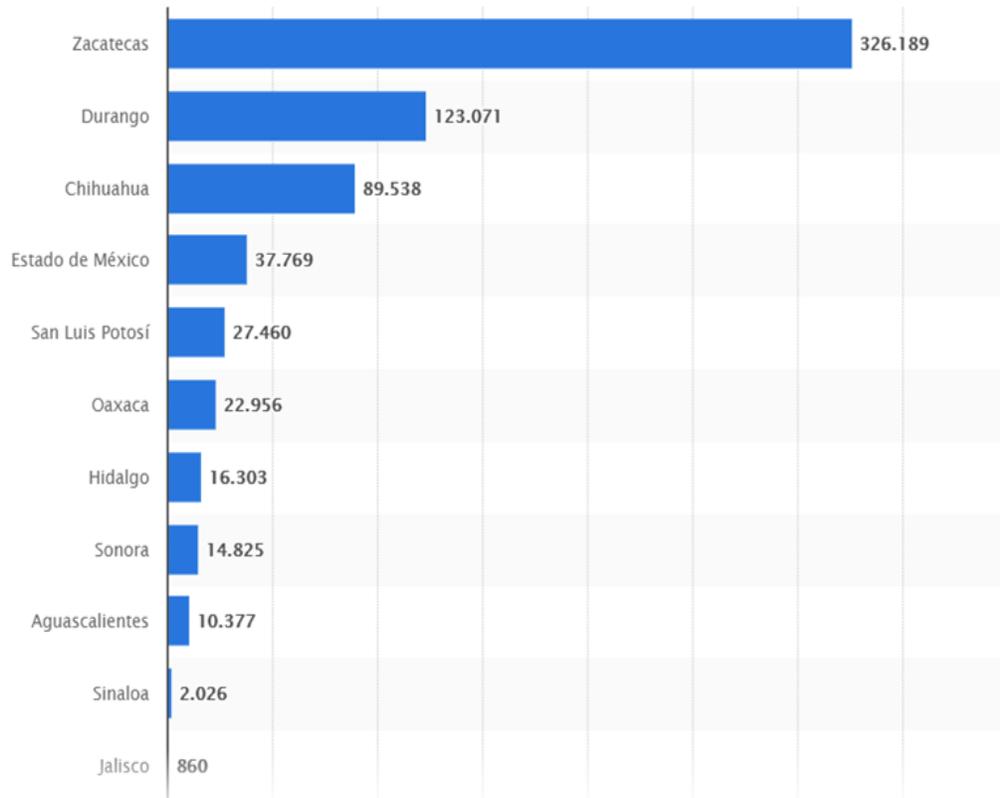


Figura 3. Ranking de las entidades federativas con el volumen de producción de zinc más alto en México en 2020 [9]

## 4.4 FLOTACIÓN

La flotación por espuma es el proceso empleado para separar selectivamente minerales con un tamaño de partícula adecuado, en un rango de 30 a 100  $\mu\text{m}$ , en función de su hidrofobicidad gracias a propiedades específicas que caracterizan a las interfases y posibilitan la concentración de iones u otras especies cargadas en estado coloidal.

En esta técnica, las partículas de interés se separan físicamente de una fase líquida llamada pulpa como resultado de la capacidad de la superficie de dichas partículas para adherirse selectivamente a las burbujas de aire [10]. Formando así, una espuma que se puede eliminar, mientras que los materiales hidrofílicos o no deseados permanecen en la fase líquida, llamados colas o relaves.

Al alimentar las celdas de flotación con la pulpa, se inyecta aire formando burbujas manteniéndolas en constante movimiento para estar en contacto con la partícula mineral. Las burbujas deben ser capaces de soportar la agitación y turbulencia en la celda. Este contacto se da mediante reactivos de flotación también adicionados.

Este paso de selectividad se puede apreciar en la Figura 4. Las dos condiciones importantes para la concentración por flotación son: 1) las químicas, en las cuales se involucran la interacción de los reactivos químicos en la interfase Sólido-Gas, es decir, con la partícula mineral y la burbuja para dar lugar a un producto selectivamente hidrofóbico y 2) las físico-mecánicas en donde se determinan las características y condiciones del equipo necesario para llevar a cabo este tipo de concentración [11].

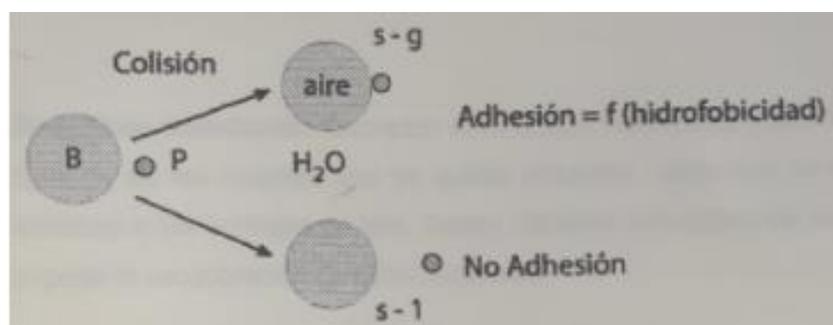


Figura 4. Esquema de adhesión selectiva de mineral. B: burbuja; P: partícula; s-g: sólido-gas; s-l: sólido-líquido [11].

Cualquier equipo de flotación debe tener ciertas características, entre ellas se requiere contar con una zona para la remoción de las partículas flotadas, así mismo debe mantener constante la dispersión tanto de la pulpa como de las burbujas y promover la óptima agitación. Las celdas de flotación mecánicas a nivel laboratorio tienen una capacidad

entre 500 y 2000 g de mineral; la aireación de pulpa se da gracias a un rotor o por medio de electrodos, en donde las burbujas se producen por electrólisis, es decir, se hace pasar corriente eléctrica por medio de una fuente de energía conectada a dichos electrodos; el cátodo genera  $H_2$  y el ánodo genera el  $O_2$ . [12].

El grado de liberación de una partícula mineral mayor a un 90% favorece a la flotación selectiva de éste, por medio de la separación del mineral valioso de fracción de desecho. Los 2 tipos de liberación relacionados con el tipo de fractura, son intergranular y transgranular, siendo ésta última la más común [13].

En la Figura 5 se muestra una imagen de la fragmentación de un mineral. Las partículas liberadas presentan un rango  $x \geq 80\%$  de metal valioso (donde  $x$  es el grado de liberación expresado en porcentaje), en las partículas parcialmente liberadas existe un rango entre  $x = 15\%-80\%$  de metal valioso, el rango de ganga valiosa se encuentra entre  $x = 0.5\%-15\%$  de metal valioso y los inertes no presentan valor metálico.

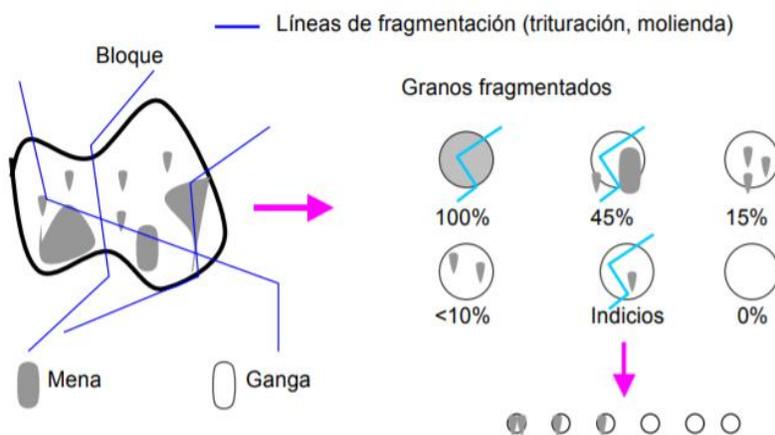


Figura 5. Fragmentación de un mineral [14]

La naturaleza propia de los minerales sulfurados es hidrofóbica; es decir no son solubles en agua, empero es posible añadir una pequeña cantidad de algún colector como Xantato de sodio ( $NaX$ ), el cual es un ácido débil de molécula compleja que presenta un extremo polar y otro no polar. Se adiciona a pH neutro o relativamente alcalino (alrededor de 10 g/L solución) para asegurar su adherencia con la burbuja de aire. El comportamiento químico de este colector permite la transferencia de un electrón de  $NaX$  hacia el azufre del mineral, formándose un enlace S-S como complejo en la superficie del mineral.

Los xantatos más comunes son el amílico, etílico, isopropílico, isobutílico y sec-butílico, todos ellos de la familia I de la tabla periódica como sodio y potasio. En la Figura 6 se muestra la estructura molecular de algunos colectores empleados en la flotación de esfalerita [15].

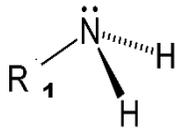
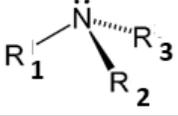
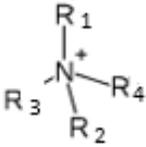
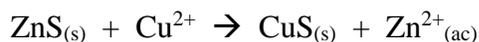
Aniónicos		Catiónicos	
Xantato Isopropílico de Sodio	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \quad \text{S} \\ \quad \quad \quad // \\ \text{CHOC} - \text{SNa} \\ \quad \quad \quad / \\ \text{CH}_3 \end{array}$	Amina Primaria	
Xantato amílico de Sodio	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH} \begin{array}{l} // \text{S} \\ \backslash \text{SNa} \end{array}$	Amina Terciaria	
Diaquil ditiocarbonato	$\begin{array}{c} \text{S} \\ // \\ \text{R}-\text{N}-\text{C}-\text{S}-\text{R}' \\   \\ \text{R}'' \end{array}$	Amina Cuaternaria	

Figura 6. Algunos colectores para flotación. Adaptado de Caballero [15]

Los colectores catiónicos como las aminas presentan una parte polar con una carga positiva asociada al grupo de hidrocarburos hidrofóbicos. Los colectores aniónicos y catiónicos cumplen la función de convertir a la partícula hidrófoba. Cabe destacar que, para cada mineral, se emplea un colector que favorecerá en mayor medida la flotación.

De la misma manera, para la electroflotación en celda, se requiere adicionar otros reactivos como espumantes, que no presentan interacción con el mineral (terpineol o aceite de pino), los cuales son compuestos orgánicos solubles en agua que ayudan a estabilizar a la burbuja y evitan su ruptura abatiendo la tensión superficial del agua; los modificadores ayudan a intensificar o disminuir el efecto de la hidrofobicidad, ya sea de pH para controlar la acidez o alcalinidad de pulpa o un depresor el cual evita la recolección de otra especie no deseada como  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (no deprime ZnS) empleando máximo 10% en peso y finalmente los activadores que aumentan la flotabilidad [16].

La selectividad de minerales sulfurosos como la esfalerita, es posible mejorarla por medio de algunos compuestos químicos como el  $\text{CuSO}_4$ . La activación ocurre gracias al remplazamiento de los iones  $\text{Zn}^{2+}$  en la superficie del mineral por los iones más estables,  $\text{Cu}^{2+}$ , de acuerdo a la siguiente reacción química:



La característica principal que presenta un depresor es la presencia de un ion que compite con el ion del colector xantato. Es de suma importancia recordar que se debe añadir un depresor aniónico si el colector es aniónico.

#### 4.4.1 INTERFASES

Las 3 interfases presentes en el proceso de electroflotación son, Líquido-Gas (L-G), Sólido-Líquido (S-L) y Sólido-Gas (S-G), ya sea en conjunto o por separado. Es necesario romper con la tensión superficial provocada por el líquido incrementando el área de la interfase S-G para favorecer la adherencia entre la partícula y el mineral. Existe una presión interna propia de la burbuja, sin embargo, si ésta es muy grande existe una mayor probabilidad de que se rompa y por lo tanto no permite que la partícula mineral se adhiera para ser flotada [17].

Las moléculas de los reactivos de flotación como espumantes y colectores (llamado adsorbato) aumentan la concentración en la interfase L-G gracias a la adsorción envolviendo a la burbuja de aire y a la partícula (adsorbente), proporcionando las características necesarias para llevar a cabo la electroflotación.

La partícula mineral es hidrofóbica si se considera una adsorción ( $\Gamma_i$ ) positiva y viceversa, se considera hidrofílica si presenta una adsorción negativa. Es posible calcularla por la ecuación de adsorción de Gibbs considerando una relación inversa entre la adsorción y la tensión superficial ( $\gamma$ ), Si  $\gamma$  disminuye,  $\Gamma_i$  aumenta [18].

Ecuación de adsorción de Gibbs:

$$\Gamma_i = -\frac{1}{RT} \left( \frac{d\gamma}{d\ln C_i} \right)$$

Donde:

$\Gamma_i$  = Adsorción en una interfase

R = Constante de los gases

T = Temperatura absoluta

$\gamma$  = Tensión superficial

$C_i$  = Concentración

En la interfase S-L se producen cargas eléctricas tanto en la capa superficial de la partícula mineral denominada capa rígida como en la fase líquida llamada capa difusa como resultado de interacciones químicas y/o la disociación de los grupos iónicos de los reactivos de flotación; las cuales se compensan proporcionalmente generando una distribución homogénea de cargas en la fase acuosa formando una capa de contraiones llamada capa Stern, en donde la atracción de un coloide negativo hace que los iones positivos formen esta capa adyacente de la superficie del coloide manteniendo la electroneutralidad.

Los iones quimiadsorbidos son los encargados de fijar la carga de superficie o también llamados iones determinantes del potencial (iones del mineral, iones de  $H^+$  u  $OH^-$  o iones del colector). Ambas capas forman una doble capa eléctrica y ésta influye en la adsorción de los reactivos de flotación la cual se regula por la propia naturaleza eléctrica de la superficie del mineral [19].

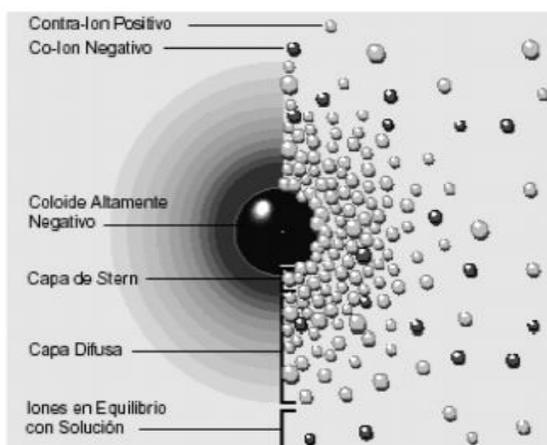


Figura 7. Capa de Stern [20]

La carga superficial del mineral no es posible medirla, sin embargo, es posible calcularla mediante una diferencia de potencial superficial o potencial electroquímico empleando los valores de actividad tanto del ion determinante del potencial en solución como la actividad del ion determinante del potencial al punto cero de carga (PCC), esta capa Stern se muestra en la Figura 7, donde se observa que la concentración aumenta conforme disminuye la distancia y el equilibrio propiamente en el seno de la disolución. La Figura 8 muestra una representación esquemática de la doble capa eléctrica, en donde es posible apreciar la caída de potencial con respecto a la distancia a partir del centro de un coloide.

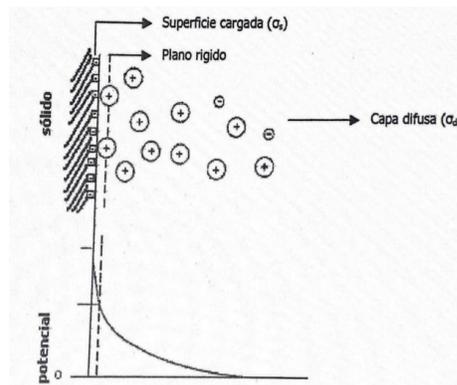


Figura 8. Doble capa eléctrica [21]

En esta misma interfase, S-L, se produce un potencial eléctrico llamando Potencial electrocinético o potencial Zeta, “ $\xi$ ” y puede definirse como una medida de la magnitud de la repulsión o atracción electrostática (o de carga) entre las partículas. En la Figura 9 es posible apreciar el efecto de  $\xi$  con respecto a la distancia de la doble capa [22].

Potencial Zeta “ $\xi$ ”:

$$\xi = \frac{4\pi\eta V}{D E}$$

Donde:

$\eta$ = Viscosidad del líquido

$V$ = Velocidad de movimiento del sólido

$D$ = Constante dieléctrica del líquido

$E$ = Intensidad de campo eléctrico

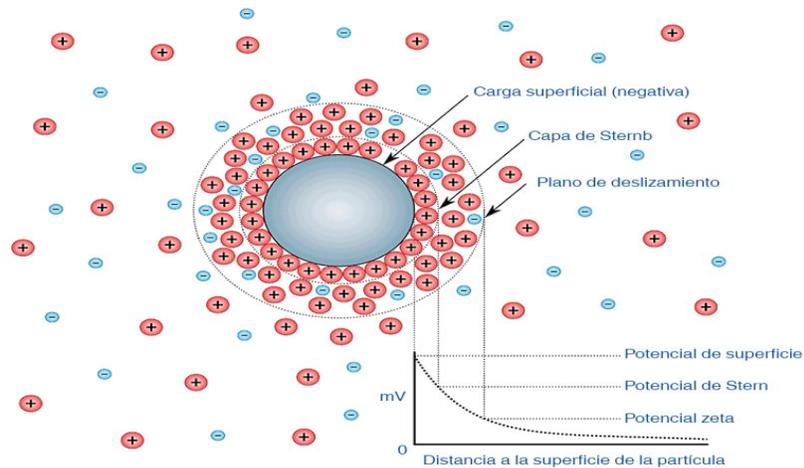


Figura 9. Esquema de Potencial Zeta [23]

Existe una relación entre  $\xi$  y el pH como medida del fenómeno de adsorción, la cual se puede apreciar en la Figura 10, considerando el PCC y el PIE (Punto isoeléctrico), es decir el punto donde el Potencial Zeta vale cero [24]. Cuando el potencial Zeta es positivo (valores de pH menores que PIE) el colector aniónico o catiónico se adsorberá en la superficie del mineral y tendrá lugar la flotación (Figura 11); por el contrario, si  $\xi$  es negativo, dicho colector no podrá adsorberse y por consecuencia, no se llevará a cabo la flotación.

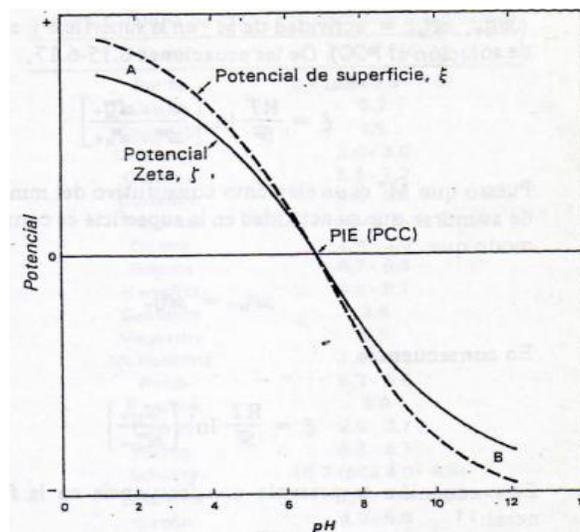


Figura 10. Efecto de la actividad del ion determinante de potencial sobre el potencial de superficie y  $\xi$  en una interfase mineral-solución [24]

Para llevar a cabo la flotación electrolítica, es necesaria la mineralización de la burbuja, este proceso consta de 3 pasos fundamentales que se muestran en la Figura 12. El primero es la colisión, que es el proceso en que la partícula mineral cae y está en contacto directo con las burbujas que van ascendiendo; el segundo es la adhesión que consiste en que la burbuja de  $H_2$  debe penetrar en el líquido entre la interfase L-G durante cierto tiempo llamado tiempo de contacto, con el fin de que pueda llevarse a cabo la adherencia. Como último paso encontramos la estabilización donde la partícula mineral es adherida a la burbuja sin desprenderse y que ésta pueda soportar la agitación, presión y turbulencia para ser llevada a la superficie para posteriormente ser recolectada [26].

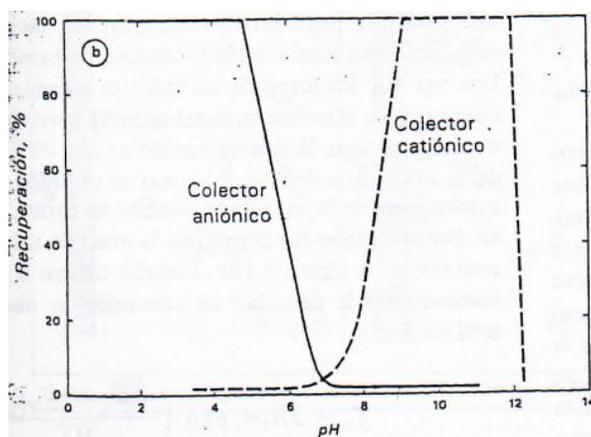


Figura 11. Efecto de la recuperación mineral al emplear colector aniónico y catiónico en función de pH de pulpa [25]

Algunas variables importantes a considerar para este proceso de mineralización son el radio de la burbuja ( $R$ ), radio de la partícula suponiendo geometría esférica ( $r$ ), densidad del líquido ( $\rho_L$ ), densidad del sólido ( $\rho_S$ ) y viscosidad ( $\mu$ ).

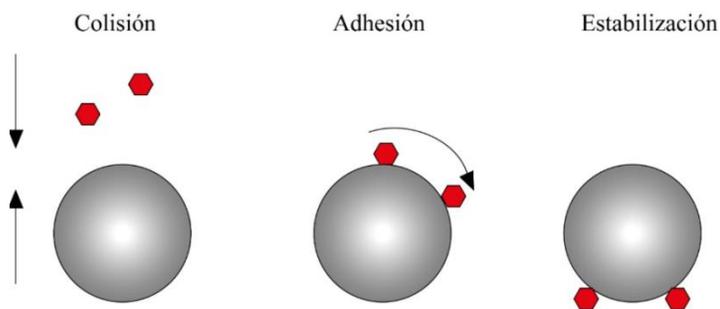


Figura 12. Mineralización de la burbuja [26]

Para que una partícula pueda adherirse es necesario que se encuentre en la línea de corriente más próxima a la burbuja, por lo que a mayor agitación mayor probabilidad de colisión. Sin embargo, si la agitación es excesiva se genera lo contrario, provocando la defloculación y el exceso de velocidad no permitirá que se forme la colisión (previo a la adhesión). Para promover esto será necesario que tanto la burbuja como la partícula se encuentren a una distancia muy pequeña tal que se favorezca la colisión [27].

#### 4.4.2 ÁNGULO DE CONTACTO.

El ángulo de contacto es aquel formado entre 2 interfases como son la interfaz Sólido-Líquido ( $\gamma_{S-L}$ ) y la interfaz Líquido-Gas ( $\gamma_{L-G}$ ), esto se puede observar en la Figura 13. La ecuación de Young describe las interacciones entre las fuerzas de adhesión y a partir de ella puede determinarse la energía superficial por unidad de área [28]. A mayor ángulo de contacto, el proceso de adhesión partícula–burbuja es más espontáneo.

$$\gamma_{S-G} = \gamma_{S-L} + \gamma_{L-G} \cos\theta$$

Donde:

$\gamma_{S-G}$ = Tensión interfacial sólido-gas

$\gamma_{S-L}$ = Tensión interfacial sólido-líquido

$\gamma_{L-G}$ = Tensión interfacial líquido-gas

$\theta$  = Ángulo de contacto

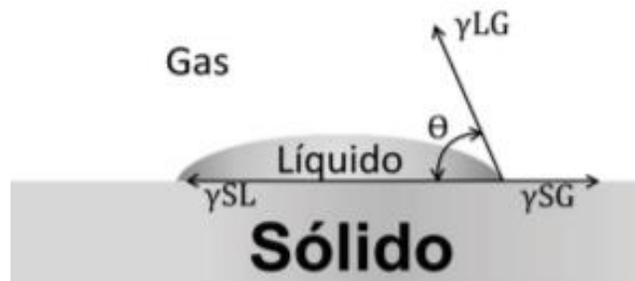


Figura 13. Ángulo de contacto [30]

Por otra parte, es posible definir la energía libre de superficie como la suma de todas las fuerzas o interacciones entre las interfases siempre y cuando se trabaje bajo condiciones de temperatura y presión constante. Dicha energía no puede ser medida o evaluada a menos que exista una variación en el área de contacto entre cada interfase ( $\gamma_{S-G}$ ,  $\gamma_{S-L}$  o  $\gamma_{L-G}$ ). En la interfase S-L-G las fuerzas existentes generan un equilibrio vectorial con respecto a la longitud correspondiente de la burbuja, es decir, la suma de todas las fuerzas en las interfases presentes es igual a cero.

Equilibrio vectorial de la interfase S-L-G:

$$\gamma_{S-G} + \gamma_{S-L} + \gamma_{L-G} = 0$$

Una superficie es hidrofílica si existe una alta energía superficial, es decir, la fase sólida presenta una tendencia para atraer la fase líquida disminuyendo la tensión superficial y se produce poca o nula resistencia a la deformación de la interfase S-G provocando la mojabilidad del sólido. Al contrario de una superficie hidrofóbica en donde existe una baja energía superficial ya que la fase sólida no se moja y existe la colisión de la interfase S-G [29].

Una superficie en la cual la gota forma un ángulo de contacto mayor que  $90^\circ$ , es una superficie hidrófoba. Esta condición implica que la mojabilidad y adhesividad del sólido son bajas. En cambio, si la superficie es hidrófila, se observará un ángulo de contacto menor a  $90^\circ$  (Figura 14) y tanto la mojabilidad como la adhesividad del sólido serán altas [30].

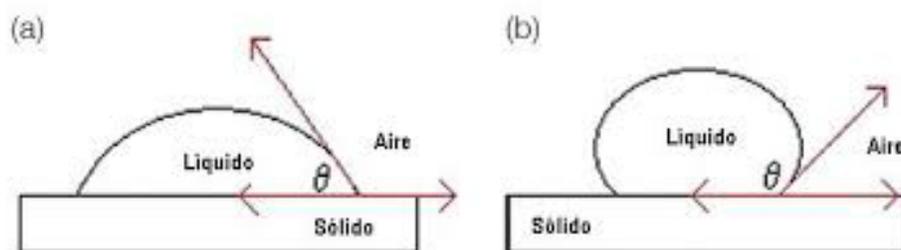


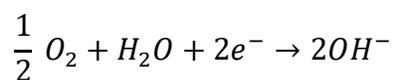
Figura 14. Ángulo de contacto. (a)  $\theta < 90^\circ$  Superficie hidrofílica  
(b)  $\theta > 90^\circ$  Superficie hidrofóbica [31]

### 4.4.3 ELECTROQUÍMICA DE FLOTACIÓN

Considerando un pH alcalino y empleando un mineral sulfurado como la esfalerita, el mecanismo de adsorción química consta de 2 pasos principales. El primero es la oxidación superficial de mineral promovida por el oxígeno (O<sub>2</sub>) presente y el segundo es la formación de sales metálicas produciendo el ion sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) debido a la reacción entre el ion del colector X<sup>-</sup> y el ion metálico.

La reacción de hidrólisis del agua es de suma importancia ya que gracias a ella se forman las burbujas necesarias para poder flotar al mineral. En la reacción catódica se aceptan los electrones libres, y el aceptor es el oxígeno [29].

Hidrólisis del agua:



Uno de los colectores más usados en la industria es el xantato etílico de sodio, el cual ayuda a disminuir el potencial cuando se adsorbe por el mineral favoreciendo también la concentración del oxígeno disuelto (OD) afectando así mismo al pH de la pulpa. En la Figura 15 se puede apreciar la disminución del potencial al incrementar el pH, al aumentar el OD, el potencial aumenta.

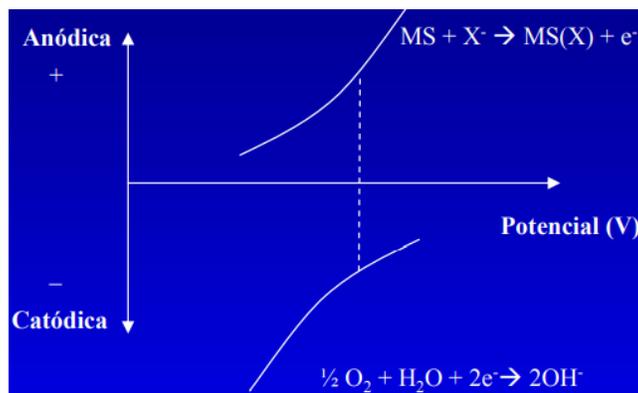


Figura 15. Efecto de pH con Potencial [29]

## 4.5 FUERZA ELECTROMOTRIZ

Los electrodos colocados al interior de la celda de electroflotación requieren de pilas electroquímicas que ofrecen una tensión de vacío, o Fuerza Electromotriz (f.e.m.),  $\varepsilon$ , que mide la facilidad de las sustancias por recolectar electrones. También se puede definir como la energía proveniente de cualquier fuente medio o dispositivo que suministre corriente eléctrica. La corriente eléctrica se puede definir como la relación entre la cantidad de carga que pasa a través de un material y el tiempo recorrido de estas cargas [32].

Corriente eléctrica:

$$I_{prom} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Donde:

$I_{prom}$  = Corriente eléctrica [A]

$\Delta q$  = Cantidad de carga que pasa a través de la superficie de un material [C]

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo que le toma a las cargas pasar por toda la superficie [s]

Una batería llamada f.e.m. es una fuente de energía fundamental para la producción de corriente, la cual almacena la máxima diferencia de potencial posible para ser suministrada a través de sus terminales. Los portadores de carga presentan la misma magnitud y sentido o dirección, y esto se debe a que  $\Delta V$  (diferencia de potencial) es constante en todo el intervalo de tiempo; a este tipo de corriente se le llama corriente directa (CD).

Todas las baterías presentan 2 terminales, una positiva (+) y otra negativa (-). La primera se encuentra a una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) mayor con respecto a la terminal negativa. Alguna limitación es la resistencia interna al flujo de carga ( $r$ ) debido al material con el cual fue fabricada la batería y la resistencia de carga también llamada resistencia externa ( $R$ ). Es posible calcular la diferencia de potencial y la corriente eléctrica considerando la resistencia interna o externa [33].

Diferencia de potencial empleando fem:

$$\Delta V = \varepsilon - Ir$$

Donde:

$\Delta V$  = Diferencia de potencial [V]

$\varepsilon$  = fem [V]

$I$  = Corriente eléctrica [A]

$r$  = Resistencia interna del material [ $\Omega$ ]

Intensidad de corriente empleando la resistencia externa de la batería:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

Donde:

I = Intensidad de corriente [A]

$\varepsilon$  = fem [V]

R = Resistencia de carga [ $\Omega$ ]

r = Resistencia interna del material [ $\Omega$ ]

El tipo de corriente que llega a los aparatos eléctricos en el hogar no viaja de manera lineal como la CD, sino de manera sinusoidal. A este tipo de corriente se le conoce como corriente alterna (CA), la cual también requiere de una fuente de energía que proporciona una diferencia de potencial alterna.

Para una fuente de poder, se considera la densidad de corriente eléctrica como la cantidad de corriente por unidad de área a través de un conductor. Es una relación inversamente proporcional entre la corriente instantánea I que atraviesa la sección transversal de un conductor y el área A de la misma [34]. Esta expresión es válida si la densidad de corriente es uniforme y el área de sección transversal es ortogonal a la dirección de la corriente eléctrica.

Densidad de Corriente eléctrica:

$$J = \frac{I}{A}$$

Donde:

J= Densidad de corriente [ $A/m^2$ ]

I= Intensidad de corriente [A]

A= Área [ $m^2$ ]

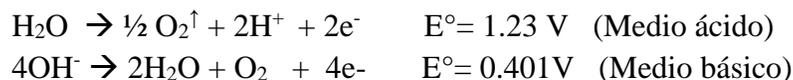
Cabe destacar que, manteniendo una diferencia de potencial constante a través de cierto conductor, se dispone de una densidad de corriente y un campo eléctrico. En ciertos materiales metálicos, dicha densidad es proporcional al campo; la constante de proporcionalidad se le conoce como conductividad y dependerá del tipo de material con que estén elaborados los electrodos.

## 4.6 ESTADO DEL ARTE DE LA ELECTROFLOTACIÓN

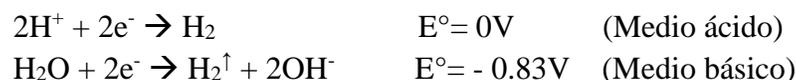
El proceso de electroflotación o también llamado flotación electrolítica, flotación por aire disperso o flotación por aire disuelto, obtiene su nombre por el método de generación de burbujas más finas o más pequeñas (3 a 15  $\mu\text{m}$ ) de  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$ , el cual es el tamaño adecuado debido a que presentan mayor superficie de contacto para la adsorción, provocadas por el proceso de electrólisis del agua gracias a electrodos conectados a una fuente de poder o f.e.m. proporcionando la máxima eficiencia de oxigenación. Para la operación de este proceso a nivel laboratorio, el intervalo de corriente directa es de 5 a 20 V [35].

Las reacciones químicas en medio ácido y básico correspondientes en el cátodo y ánodo, respectivamente, son las mostradas a continuación [36]:

- Reacciones en el ánodo:



- Reacciones en el cátodo:



Para poder llevar a cabo la generación de burbujas de  $\text{H}_2$  por medio de las reacciones químicas previamente mencionadas necesarias en el proceso de electroflotación, se requiere conectar los electrodos de manera adecuada en una fuente de poder de corriente directa (CD). En la Figura 16 se muestra un esquema de una celda de flotación a nivel laboratorio donde se puede observar las conexiones pertinentes de los electrodos a la f.e.m. [37].

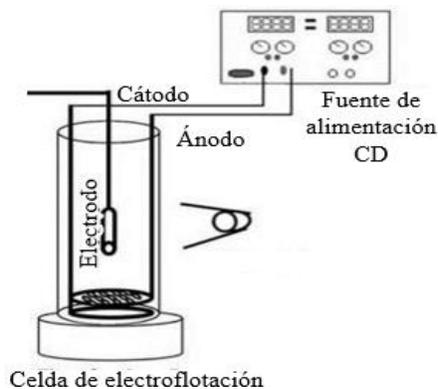


Figura 16. Esquema de conexión de electrodos a una f.e.m. en una celda de electroflotación [37]

Las burbujas producidas en el cátodo ( $H_2$ ) son las que se utilizan para la recolección del metal de interés. La cantidad relativa de gas producido se encuentra en función de la densidad de corriente, salinidad de pulpa y pH de ésta última.

Existe un remanente de gas  $H_2$  producido en el cátodo; dicha fracción se disuelve en el electrolito. Es posible separar los gases electrolíticos mediante diafragmas instalados de manera estratégica en la celda con la finalidad de controlar el ambiente electrolítico de la pulpa. El gradiente de campo eléctrico entre los electrodos es de suma importancia ya que ayuda a la floculación de las partículas de mineral suspendidas.

Una de las principales características que debe llevar una celda de electroflotación a nivel laboratorio es la colocación de un agitador mecánico con una velocidad de 15 rpm aproximadamente [37]; su función es única y exclusivamente la de mantener a la partícula mineral suspendida ya que de lo contrario y haciendo uso único de los electrodos, el sólido queda en el fondo y la probabilidad de adherencia sería mínima.

Una de las ventajas principales del proceso, es la colocación de los electrodos, ya que es posible alinearlos de tal manera que proporcionen la mayor cobertura de la superficie de la celda favoreciendo la mezcla entre la fase líquida y gaseosa generando gran cantidad de burbujas muy pequeñas con el mínimo de turbulencia para evitar su ruptura [37].

Los iones  $S^{2-}$  provenientes de un mineral sulfurado como la esfalerita provocan el decrecimiento de diámetro hidrodinámico de las partículas de la fase dispersa, es por este motivo que se requiere la adición de floculantes para revocar esta característica. Así mismo, algunos iones presentes de minerales que contienen  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  y  $Mn^{2+}$ , son ligeramente solubles alterando la electroflotación de estos compuestos en solución acuosa.

Un reto en el proceso de flotación por aire disuelto es el tamaño de partícula proveniente de la molienda, ya que, a tamaños muy pequeños, el índice de recuperación es lento y bajo a causa del efecto de la colisión en la interfase S-G. La partícula mineral muy pequeña presenta una masa menor y mayor área específica.

Gracias a los avances en cuanto a molienda se refiere, la explotación y concentración de minerales de baja ley se ha convertido económicamente viable incrementando la importancia de flotación electrolítica. Es por ello que, con el paso del tiempo se han estudiado algunas variables que son fáciles de controlar y revisar como la producción de gas en función del electrodo a emplear y tiempo de residencia.

Considerando la electroflotación como una corriente líquida, el éxito de la eficiencia es la hidrofobicidad, considerando una estrecha relación entre el colector y el ion metálico. Dicho colector requiere propiedades espumantes como xantato de sodio, que se añade de manera estequiométrica.

En resumen, la eficacia de la electroflotación podría mejorarse variando las características superficiales de la fase dispersa variando el pH y el potencial redox del medio,

así como el uso de diferentes reactivos. La recuperación de partículas finas también puede mejorarse mediante el uso de burbujas finas generadas en los electrodos. Por lo tanto, el conocimiento de la distribución del tamaño de éstas en un sistema de flotación por aire disperso es de suma importancia [38].

#### 4.6.1 TAMAÑO DE BURBUJA

A diferencia del proceso de flotación donde las burbujas de aire son producidas por un rotor que presentan un tamaño promedio de 1000  $\mu\text{m}$ ; se han realizado diversos estudios reportados en la literatura acerca de la metodología de electroflotación o flotación por aire disuelto, en donde este tamaño de burbuja se encuentra por debajo de 100 $\mu\text{m}$ . Dicho tamaño favorece la mineralización de la misma de  $\text{H}_2$  aumentando el ángulo de contacto de la interfase Sólido-Gas y así recuperar el metal de interés.

El tamaño de las burbujas producidas por electroflotación se encuentra influenciado por varios factores. En primer lugar, depende del tipo de material del electrodo y su posición en la serie electromotriz. En segundo lugar, se encuentra en función del pH. La disminución del diámetro de burbuja incrementa la eficacia de colisión en la interfase S-G.

Los parámetros como el tamaño y frecuencia de las burbujas pueden ser estudiados considerando algunas variables como el tipo de electrodo, el efecto de la geometría del alambre, reparación de la superficie, densidad de corriente y pH. Se destaca que para cada mineral existe un tamaño de burbuja promedio, para el caso de esfalerita, algunos estudios revelan que para obtener alrededor de 95% de zinc recuperado, el tamaño de burbuja es de  $16 \mu\text{m} \pm 2$  [38].

Las burbujas tanto de  $\text{H}_2$  como de  $\text{O}_2$  crecen en las paredes del electrodo, a raíz de la reacción de electrólisis del agua. Considerando electrodos con geometría cilíndrica, en la Figura 17 se muestra un esquema de una burbuja adherida a éste antes de ser desprendida de un electrodo. Algunas de las variables que han sido estudiadas para el crecimiento de dichas burbujas son:  $h$  altura desde la parte superior de la burbuja que se desprende hasta la superficie del electrodo,  $d_{b,a}$  es el diámetro de desprendimiento,  $\omega$  ángulo de contacto y  $D$  es el diámetro del electrodo.

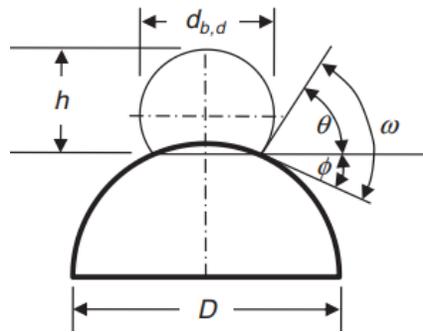


Figura 17. Geometría de una burbuja [38]

Los resultados obtenidos por medio de diversas investigaciones con respecto al crecimiento de las burbujas de hidrógeno y oxígeno en la superficie de los electrodos, muestran que, al incrementar gradualmente la corriente eléctrica, dichas burbujas crecen y se desprenden con mayor facilidad (Figura 18), siempre y cuando la superficie del electrodo sea lisa favoreciendo así que la partícula mineral pueda adherirse a la fase gaseosa, y por el contrario si la superficie es rugosa, disminuye su tamaño, y como consecuencia disminuye la eficiencia de mineralización de una burbuja.

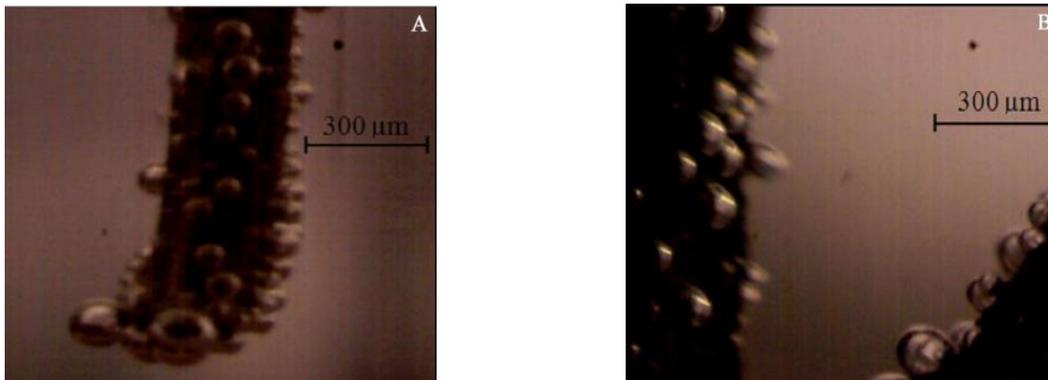


Figura 18. Formación de burbujas de  $H_2$  en el cátodo de acero inoxidable (A) y  $O_2$  en el ánodo (B) a un potencial de 3.5 V y pH=7 [38]

#### 4.6.1.1 EFECTO DE pH EN EL TAMAÑO DE BURBUJA

El pH es una variable fundamental para determinar el tamaño de burbuja tanto de Hidrógeno ( $H_2$ ) como de Oxígeno ( $O_2$ ). Es por ello que se reportan un sinnúmero de experimentos para conocer la relación presente. En la flotación por aire disuelto se demuestra que, al utilizar reactivos de flotación, las burbujas de  $H_2$  son más grandes en un medio ácido en comparación con un medio neutro o alcalino debido a la disminución de la nucleación provocada por la concentración de iones  $H^+$ . Por el contrario, las burbujas de  $O_2$  alcanzan un tamaño mínimo en medio ácido y aumentan de diámetro con un pH básico o alcalino [38].

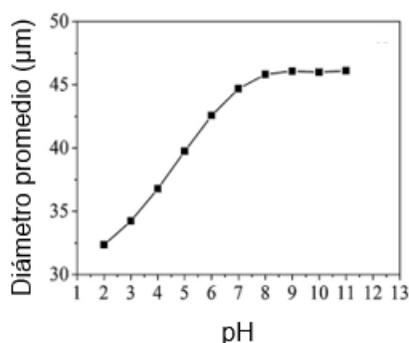


Figura 19. Diámetro medio de burbuja de  $H_2$  con electrodos de titanio recubiertos con rutenio como función de pH. Adaptado de Caballero [36]

Lo que demuestra esta relación entre el tamaño de burbuja y pH se muestran en la Figuras 19 y 20, de acuerdo a un experimento reportado con el nombre “Diámetro medio de Sauter” donde se comprueba la relación antes mencionada para los dos gases producidos gracias a las reacciones de electrólisis del agua [36].

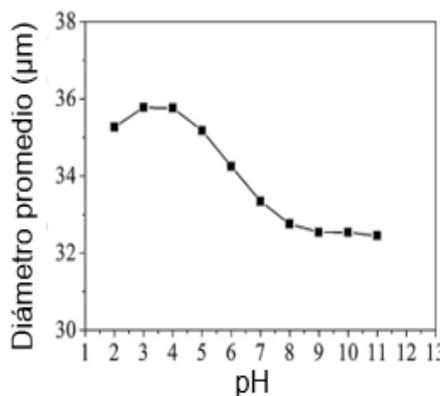


Figura 20. Diámetro medio de burbuja de  $O_2$  con electrodos de titanio recubiertos con rutenio. Adaptado de Caballero [36]

En la Figura 21 se muestra una tendencia del promedio ponderado del tamaño de burbujas en función de diferentes electrodos. Es posible apreciar que al usar un cátodo en forma de malla se presenta un menor tamaño de burbujas como consecuencia en la disminución de la tensión superficial comparándolo con un cátodo de geometría de placa.

De igual manera, es posible usar electrodos tratados superficialmente por medio de lijas de agua con diferente tamaño de grano hasta llegar a efecto espejo. En la misma Figura 21, se aprecia que para los electrodos pulidos hasta efecto espejo presentan el mayor tamaño de burbuja debido a la mínima rugosidad favoreciendo el desplazamiento de ésta y menor cantidad de sitios activos para la nucleación. Por el contrario, al usar un electrodo con acabado superficial de lija 40, se aprecia un valor máximo de diámetro de burbuja a pH neutro y disminuye gradualmente al agotamiento de iones  $H^+$ , es decir, pH alcalinos.

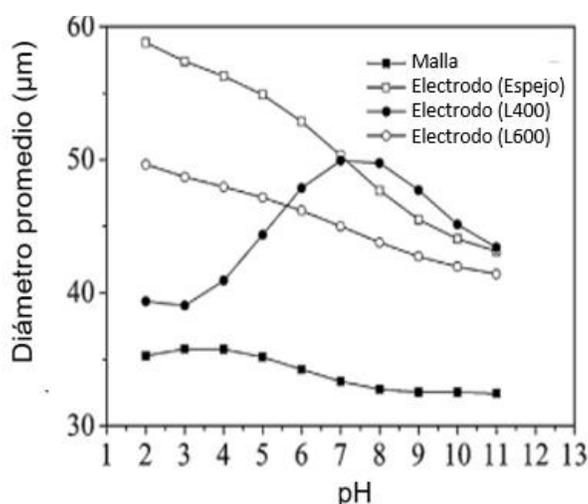


Figura 21. Promedio ponderado de diámetro de burbuja de  $O_2$  con diferentes electrodos. Adaptado de Caballero [36]

#### 4.6.1.2 EFECTO DE DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL TAMAÑO DE BURBUJA

De acuerdo a las condiciones de trabajo para el proceso de flotación electrolítica, la densidad de corriente (J) estará en función del material con que estén elaborados los electrodos, geometría y por consecuencia, el diámetro promedio de burbujas. Es por ello que existe un vínculo muy estrecho entre estos parámetros. Tanto para electrodos con geometría planar y

con un tratamiento superficial de lija hasta llegar a efecto espejo como para electrodos en forma de malla se exhibe que, al incrementar la densidad de corriente de trabajo, se reduce considerablemente el tamaño de burbuja disminuyendo así la capacidad de adhesión en la fase Sólido-Gas [39].

Existe una relación directamente proporcional entre el flujo de gas disuelto en la superficie de los electrodos y la densidad de corriente, es decir a mayor  $J$ , incrementa el flujo de gas ocasionando un tiempo de nucleación más reducido favoreciendo así a la formación de una burbuja de gas con un diámetro menor adherida a la superficie de su respectivo electrodo.

El paso siguiente a la nucleación de la burbuja es el crecimiento de la misma, esto se debe al aumento interno de la presión generado en el interior de la misma burbuja. Al incrementar la densidad de corriente, disminuye su radio crítico y posteriormente se desprende la burbuja de la superficie del electrodo con un diámetro menor como se presenta en la Figura 22 [36].

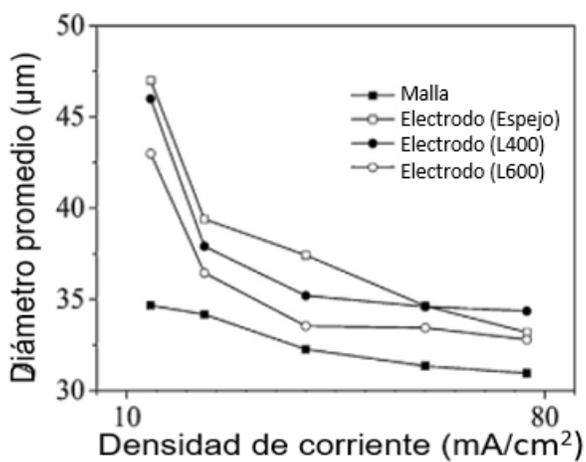


Figura 22. Diámetro promedio de burbujas de gas vs densidad de corriente para diferente geometría y acabado superficial de cátodos. Adaptado de Caballero [36]

## 4.6.2 ELECTRODOS

Los electrodos juegan un papel imprescindible para el proceso de electroflotación, ya que a raíz de ellos se forman las burbujas de  $H_2$  y  $O_2$  necesarias para hacer flotar a la partícula mineral y así poder ser recuperado el metal de interés. En la literatura se encuentran con un sinnúmero de opciones más comunes para realizar este proceso a nivel laboratorio. No obstante, se deben encontrar los materiales adecuados en cuanto a electrodos se refiere considerando propiedades mecánicas, eléctricas y vida útil que satisfagan las necesidades del proceso.

Entre la variedad de electrodos, es posible utilizar ánodos de sacrificio de hierro o aluminio, aunque el gasto económico a mediano plazo es un poco alto; siempre y cuando los iones desprendidos de  $Fe^{2+}$  y  $Al^{3+}$ , respectivamente, no alteren la interacción con el medio acuoso y el metal de interés para poder flotarlo [35].

De igual forma, para realizar experimentos a nivel laboratorio se pueden emplear cátodos de acero inoxidable AISI 316, los cuales se consumen en un mayor tiempo, y ánodos de titanio con una capa superficial de óxido de rutenio. El cátodo deberá estar perforado para permitir la evacuación pertinente de las burbujas. La condición de trabajo con respecto a la densidad de corriente necesaria al usar esta combinación se encuentra en un rango de  $60 A/m^2$  hasta  $260 A/m^2$  [37].

Para estudios más específicos se recomienda el uso de electrodos con la mayor resistencia a la corrosión, es decir, cátodo y ánodo de platino con una pureza alrededor de 99.9% con una geometría de malla y con una separación establecida mostrado en la Figura 23. En la Tabla 2 se muestran las características de estos electrodos [40].

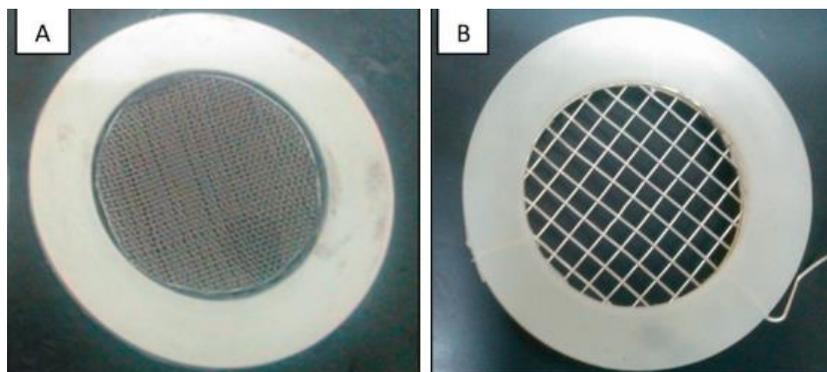


Figura 23. Electrodos de platino. (A) Electrodo con abertura 0.02 mm (B) Electrodo con abertura 0.16mm [40]

Tabla 2. Características de electrodos [41]

<b>Electrodo de malla</b>	<b>Diámetro de cable (mm)</b>	<b>Espacio entre cables (mm)</b>	<b>Área total de electrodo (cm<sup>2</sup>)</b>
A	0.02	0.16	142
B	0.08	0.02	25

#### 4.6.3 APLICACIONES

La flotación por aire disuelto se puede aplicar a diversas menas de baja ley con resultados de recuperación viables. En el caso de minerales salinos, se requiere controlar pH y adición de modificadores debido a la formación de iones como  $\text{Ca}^{2+}$ . Dentro de estas menas se encuentra la magnesita  $\text{MgCO}_3$  y la dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

Otra aplicación importante es la extracción de metales pesados y/o no ferrosos de compuestos en suspensión donde se forman emulsiones de componentes orgánicos donde podemos encontrar sustancias con una composición a base de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) por ejemplo, cobre, zinc y níquel.

Este procedimiento de concentración no solamente se aplica para la recuperación de un metal de interés en el área de metalurgia extractiva, sino que también es posible usarla en la industria petroquímica, donde se ha podido recuperar plomo, zinc y bario provenientes de pozos petrolíferos. Estos elementos han ocasionado una importante contaminación de suelos por medio de una simulación de aguas residuales.

Así mismo, se puede aplicar este método para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la generación de biodiesel (combinando electro oxidación). Así como los provenientes de la industria alimentaria para eliminar grasas, sólidos y aceites, con el fin de eliminar turbidez del agua [35].

## 5. PROCEDIMIENTO

- Llevar a cabo la revisión bibliográfica de los experimentos realizados empleando el método de flotación y considerando como mineral a la esfalerita.
- Consultar los parámetros tanto físicos como químicos para obtener el mayor porcentaje de recuperación de Zinc considerando como proceso de concentración, electroflotación.
- Consultar el efecto del Zinc al emplear diferentes concentraciones de xantato de sodio como colector para electroflotación.
- Revisar la bibliografía acerca del uso de iones como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Cd}^{2+}$  como activadores de Zinc.
- Buscar el efecto de la oxigenación de pulpa previo a la flotación de esfalerita en la recuperación de Zinc.
- Buscar la existencia de una ecuación que permita conocer la cantidad de colector necesario para incrementar la hidrofobicidad del colector y por consiguiente la flotabilidad.
- Llevar a cabo la revisión bibliográfica del efecto de pH con respecto al potencial en la flotación selectiva de esfalerita.
- Ahondar en el impacto provocado al usar diferentes concentraciones de xantato amfílico de potasio en la recuperación final de Zinc al emplear como mineral esfalerita.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

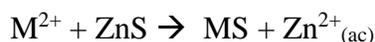
Para llevar a cabo el proceso de flotación de manera adecuada es necesario convertir el mineral de hidrofílico a hidrofóbico con la finalidad de ser recolectado. Sin embargo, la esfalerita es un mineral con un grado variable de hidrofobicidad debido a un amplio rango de porcentaje de impurezas previamente mencionadas, por lo que no es posible llevar a cabo la flotación de Zinc empleando únicamente como colector el xantato de algún catión de la familia I de la tabla periódica, tal como sodio o potasio.

Debido a lo anterior, es necesario activar el Zn con iones de cobre formando CuS. De la misma manera, el Zn también se puede activar de forma inadvertida gracias a otros elementos metálicos contenidos en el sistema como  $\text{Cd}^+$  y  $\text{Pb}^{2+}$ .

El sulfato de cobre se ha empleado por mucho tiempo como activador de la esfalerita para su flotación. No obstante, aún se encuentran ciertas dificultades con respecto a la cinética y el mecanismo de activación del sulfuro de zinc. Es por ello que las primeras investigaciones realizadas por Ralston et. al. [41], plantean un vínculo cuantitativo entre el uso de otros iones que pueden actuar también como activadores del mineral, así como analizar la dificultad de la adición de éstos.

La activación de las partículas de mineral es la primera etapa para llevar a cabo la flotación de acuerdo a la reacción química  $\text{M}^{2+}$ . La reacción química producida se basa en la proporción de ion activador y la extracción del  $\text{Zn}^{2+}$ , así como la demostración que esta reacción es termodinámicamente favorable.

Para el procedimiento experimental, la muestra de esfalerita fue puesta en gel sílice con  $\text{Cu}(\text{NO})_3$ ,  $\text{Cd}(\text{NO})_3$  y  $\text{Pb}(\text{NO})_3$  como iones activadores a  $\text{pH}=5$ ; los electrodos seleccionados fueron Ag/ AgCl gracias a su alta selectividad de los iones adicionados. Dichas soluciones fueron burbujeadas obteniendo  $[\text{O}_2]= 0.05$  ppm. De la misma manera se empleó KOH y  $\text{HNO}_3$  para controlar el pH del experimento. La siguiente reacción química refleja la interacción entre el Zn y el ion activador,  $\text{M}^{2+}$ .



Se consideró de manera arbitraria un tiempo de 2 horas, esto con el fin de evaluar la formación de la "película delgada" o fracción de la monocapa de los iones activadores en la interfase S-L. Las muestras fueron analizadas por rayos X, por lo que los resultados reportados fueron: consumo del ion activador y fracción de la monocapa todo esto en base a la concentración de Zn liberado en función del tiempo. Al lograr un equilibrio en la flotación, se alcanza un potencial máximo de 0.2V en todo el experimento.

Después de analizar los resultados, Ralston et. al. corroboraron el hecho de que la captación de los iones activadores durante la reacción se presenta en dos pasos, de igual manera se forma una fina capa de MS (donde M es el ion activador) tras un periodo de acondicionamiento corto en la interfase S-L.

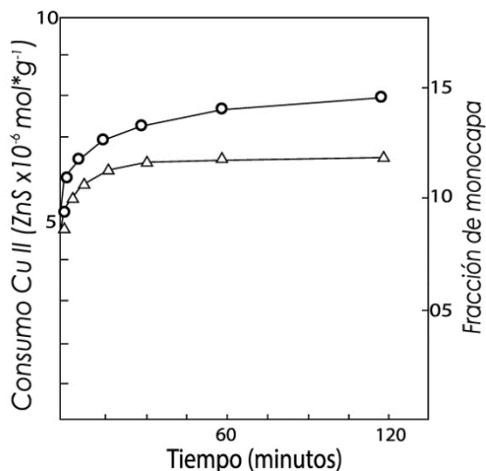


Figura 24. Activación de Zn gracias a iones  $\text{Cu}^{2+}$ .  
Adaptado de Caballero [41]

Los dos pasos son: 1) Un paso rápido en donde los iones de  $\text{Cu}^{2+}$  presentan un mayor tiempo abarcando aproximadamente el 100%, en comparación con los de  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$  y 2) un paso lento en donde en un tiempo de 2 horas, los iones de  $\text{Cu}^{2+}$  forman 2 capas, mientras que en los otros 2 iones se forma un 60% y 50% de monocapa en cuanto a  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ , respectivamente.

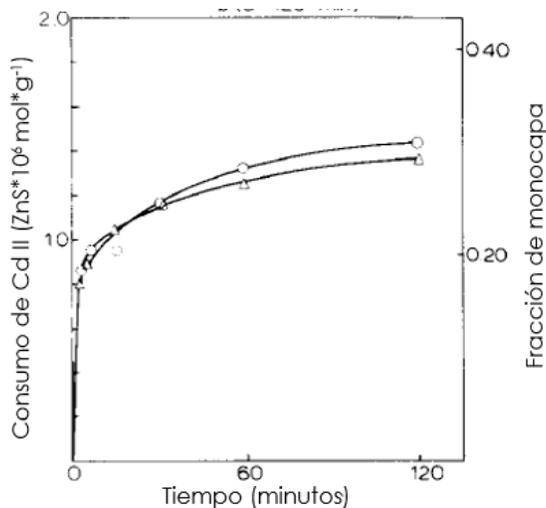


Figura 25. Activación de Zn gracias a iones  $\text{Cd}^{2+}$ . Adaptado de Caballero [41]

Durante el primer paso de activación, la tasa de absorción de  $\text{Cu}^{2+}$  es alrededor de 5 veces más rápida que la de  $\text{Cd}^{2+}$  y unas 3 veces más rápida que la de  $\text{Pb}^{2+}$ . Dicha tendencia se mantiene en el segundo paso.

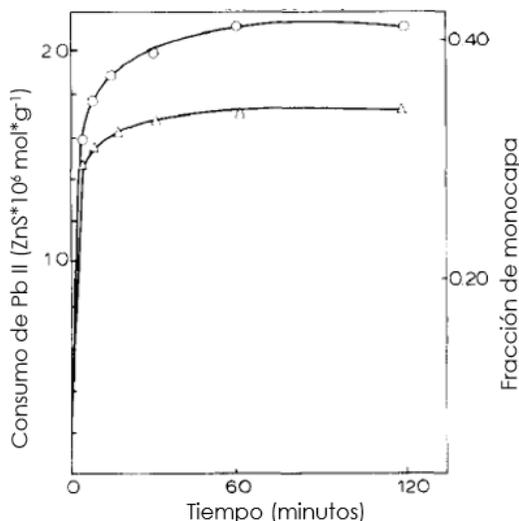


Figura 26. Activación de Zn gracias a iones  $\text{Cd}^{2+}$ . Adaptado de Caballero [41]

Los resultados que sustentan esta afirmación se pueden observar en la Figura 24, Figura 25 y Figura 26 para los iones  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ , respectivamente. El límite de tiempo de 2 horas permite la formación de la monocapa en las partículas de esfalerita.

De acuerdo a lo anterior, los iones que no favorecen la activación del Zn en comparación con el cobre son los de cadmio y plomo.

A pesar de los resultados adecuados con respecto a la activación del Zinc por otros iones metálicos, Duhamet et. al. [42], publicaron su artículo “Importance of oxygenation of pulps in the flotation of sulfide ores”, donde se demuestra que la esfalerita en presencia de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ) requiere cierto porcentaje de saturación mínimo de  $\text{O}_2$  con la finalidad de obtener un porcentaje de recuperación mayor empleando  $\text{CuSO}_4$  como activador.

Los experimentos se realizaron bajo 2 condiciones, la primera en una planta piloto, en donde el tiempo requerido para la oxigenación de la pulpa es de 15 minutos previo a la flotación y la segunda en un laboratorio, donde el tiempo de oxigenación es de 90 minutos. Este tiempo sirve para mejorar la activación gracias a  $\text{Cu}^{2+}$  añadido después del incremento en la concentración de  $\text{O}_2$ , deprimiendo así la pirita presente en la muestra de ZnS. Cabe recordar que la pirita presente afecta la selectividad en la flotación.

Las 2 muestras usada por los autores fueron:

- 1) ZnS: tamaño de partícula de molienda 30  $\mu\text{m}$ , 0.5% Cu, 0.1-0.2%Pb, pirita-pirrotita (28%)
- 2) ZnS: 0.9%Pb, 5-6%Zn, 10% pirita.

Para ambas muestras de esfalerita, redujeron su tamaño en un molino de bolas y posteriormente colocadas en un tanque de acondicionamiento aireado como pulpa con 20% de sólidos.

La flotación se llevó a cabo en 2 etapas, la primera, a un pH alcalino con el fin de recuperar el Zinc, la segunda etapa a un pH ácido para hacer flotar a la pirita. El tiempo de acondicionamiento con  $\text{CuSO}_4$  es de 10 minutos; posterior a ello, la pulpa se acondicionó 5 minutos con N-etil O isopropil tiocarbamato y etil Xantato como colector. La saturación de oxígeno se llevó a cabo con electrodos de  $\text{O}_2$  siguiendo el principio de Clark (electrodo activo de Pt y uno de referencia de Ag-AgCl inmersos en una solución saturada de KCl).

De acuerdo con lo anterior, se observa que la oxigenación de alguna manera es necesaria ya que actúa sobre la activación de la esfalerita haciéndola receptiva a la acción de cobre, así mismo, favorece la acción del colector sobre las partículas minerales de ZnS activadas por los iones añadidos. Si se añade  $\text{CuSO}_4$  previo a la oxigenación, se presenta un menor porcentaje de recuperación de Zn.

Los resultados expuestos gracias a Duhamet et. al. indican que la muestra 2 con un contenido menor en pirita alcanzó con mayor facilidad la saturación de oxígeno, con un tiempo de 10 minutos. En comparación con la muestra 1 que requirió más de 1 hora para la saturación (Figura 27), todo esto bajo las condiciones de laboratorio.

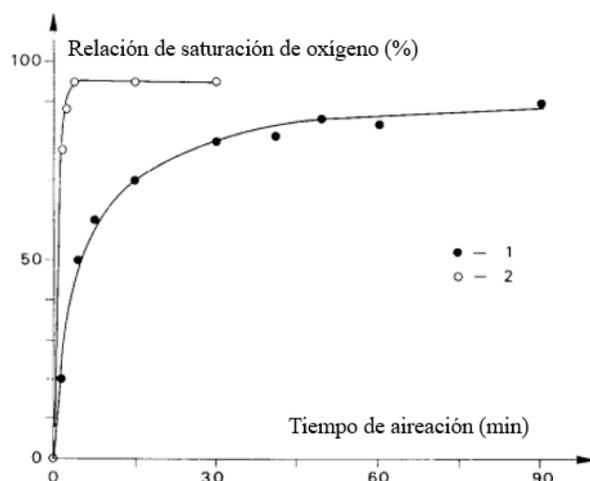


Figura 27. Relación de saturación de oxígeno en función del tiempo: 1 =muestra 1; 2= muestra 2. Adaptado de Caballero [42]

Ahora bien, con los resultados anteriores, Duhamet et. al. analizaron ambas muestras bajo las 2 condiciones de trabajo, es decir, en el laboratorio y en la planta piloto. En el caso de la muestra 1 (Figura 28) se puede concluir que la esfalerita con alto contenido de sulfuro, caen considerablemente las curvas provocando así, desfavorecer el proceso de saturación. Considerando la muestra 2, con un contenido menor de sulfuro (Figura 29), se demuestra que a medida que avanza el acondicionamiento, se favorece la saturación de O<sub>2</sub>.

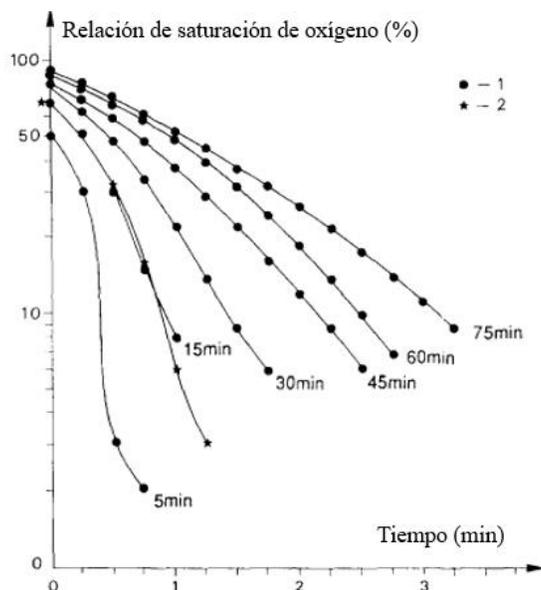


Figura 28. Caída de la relación de saturación de oxígeno en función del tiempo de acondicionamiento aireado del mineral No. 1:1 = pruebas de laboratorio; 2 = muestreo de desbordamiento de ciclón. Adaptado de Caballero [42]

Como conclusión de todo lo anterior, se confirma que el consumo de oxígeno está relacionado, con la composición química o mineralógica de la esfalerita. En el caso de la muestra 1, la oxigenación es incluso necesaria para la recuperación del mineral. La forma de las curvas de consumo de oxígeno permite estimar el tiempo de oxigenación requerido de la pulpa.

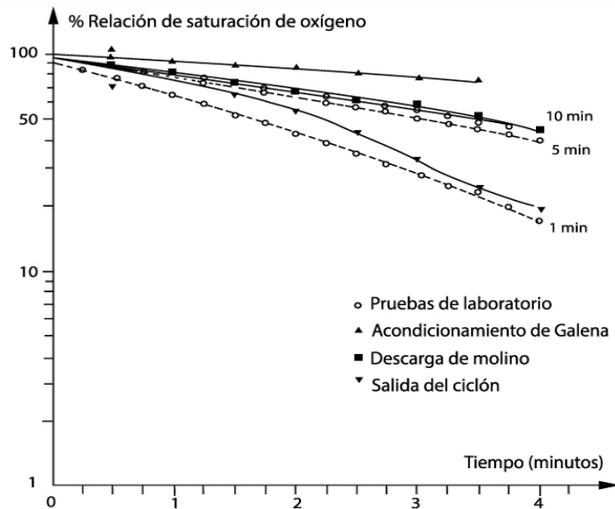


Figura 29. Saturación de O<sub>2</sub> para la muestra 2. Adaptado de Caballero [42]

Un descubrimiento importante fue realizado por Chen et. al. [43], donde elabora una síntesis de ZnS por coprecipitación de sulfocarbamida, activando la esfalerita con CuSO<sub>4</sub> 10<sup>-4</sup>M, usando como colector xantato butílico y como espumante aceite de pino. Llevó a cabo el proceso de flotación convencional empleando 2 muestras de ZnS, una con mayor y otra con menor cantidad de Fe, con un pH constante alrededor de 7. Las muestras de finos y colas fueron pesadas para obtener el % Rendimiento, y fueron llevadas a difracción de Rayos X, en la cual se detectó únicamente la red o fase cristalina correspondiente a la blenda.

Para obtener la cantidad de xantato butílico adsorbido en cada muestra empleó la siguiente ecuación:

$$T = \frac{V(C_o - C)}{w}$$

Donde:

T= Cantidad de colector adsorbido

V= Volumen de solución,

C= Concentración después de la adsorción

Co= Concentración antes de la adsorción

w= Peso del reactivo

Los resultados más destacados se muestran en la Figura 30, donde se observa la existencia de un muy bajo rendimiento de flotabilidad con altas impurezas de Fe, sin embargo, con impurezas con Cu y Cd, la flotabilidad aumenta. Los autores (Chen et. al.) corroboran sus hipótesis, es decir, la adsorción de xantato disminuye con ZnS puro, por el contrario, con Cd y Cu, aumenta siempre y cuando exista un porcentaje mayor de 3% de éste último. Finalmente explican la formación de dixantógeno en la superficie del mineral activado con Cu debido a la transferencia de  $e^-$  entre el reactivo de flotación, colector, y la interfase del mineral S-L [43].

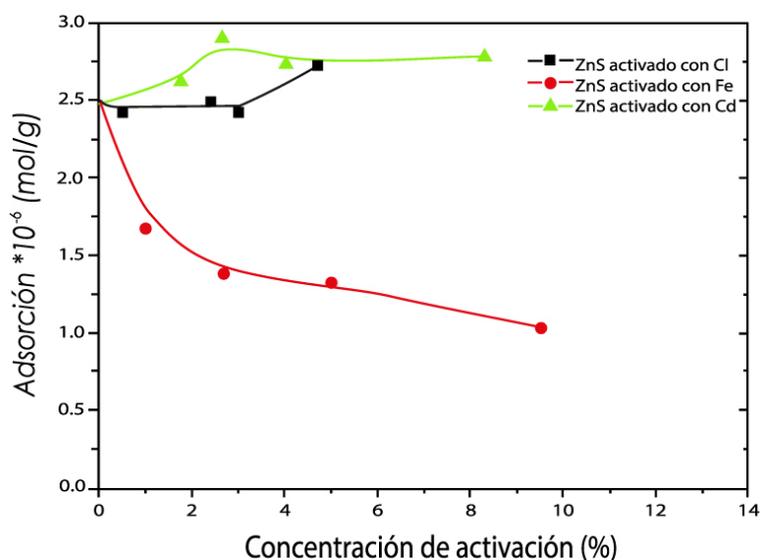


Figura 30. Adsorción de xantato sobre ZnS dopado con impurezas en presencia de  $\text{CuSO}_4$  [Xantato] =  $10^{-4}$  M,  $[\text{CuSO}_4]$  =  $10^{-4}$  M. Adaptado de Caballero [43]

Posteriormente, alrededor de 2014 se estudió el efecto de la salinidad de la pulpa en la adsorción de xantato en esfalerita y la interacción que ésta provoca en la interfase burbuja-mineral. Es por ello que Wang et. al. [44] realizaron experimentos basándose en el poco rendimiento del xantato como colector especialmente cuando las cadenas de alquilo de éste son más cortas y débiles que las amílicas, estudiando las propiedades fisicoquímicas de la superficie mineral, tiempo de inducción, el ángulo de contacto y la determinación del potencial Zeta.

Para realizar la experimentación se empleó un tamaño de partícula de 75-150 $\mu\text{m}$  de ZnS y como reactivos NaCl, NaOH, HCl,  $\text{CaSO}_4$   $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , xantato amílico de potasio (PAX), agua salina la cual es mezcla de agua de proceso regenerada y agua de mar.

Se tomaron varias muestras del mineral tratado con HCl y posteriormente enjuagada con agua desionizada; cada muestra se introdujo a lo que Wang et. al. llaman solución de prueba adicionando los iones con y sin PAX a un pH=5.

Sus resultados demostraron que para la esfalerita en presencia de un incremento en la concentración de iones  $\text{Na}^+$ , el tiempo de inducción (tiempo que le toma a la partícula adherirse a la burbuja de aire) aumenta considerablemente sin agua salina, tal como se muestra en la Figura 31. Sin embargo, en presencia de esta mezcla y una concentración de NaCl 0.46 M, el tiempo de inducción es relativamente bajo.

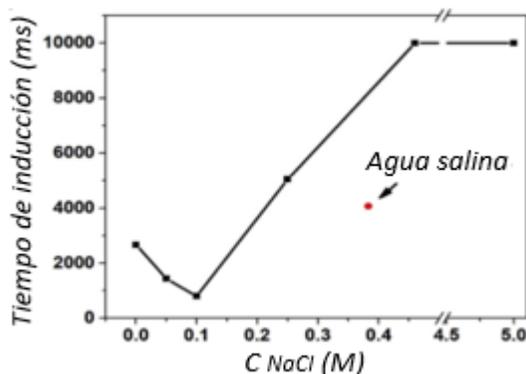


Figura 31. Tiempo de inducción de esfalerita tratada con PAX en soluciones de prueba de diversas concentraciones de NaCl. Adaptado de Caballero [44]

Gracias a estos resultados se puede decir que las partículas de esfalerita con un tratamiento de acondicionamiento y en contacto con NaCl, presentan buenos resultados con respecto al acoplamiento en la interfase S-G debido a la formación de la doble capa eléctrica en condiciones de alta salinidad; considerando el tiempo de inducción requerido para la adsorción competitiva de PAX y NaCl es de 10,000 ms.

No obstante, al incrementar la concentración de iones  $\text{Na}^+$ , el ángulo de contacto disminuye considerablemente de  $60^\circ$  a alrededor de  $30^\circ$  y por lo tanto la hidrofobicidad también disminuye ya que entran en competencia los iones presentes de sal y propios del colector, aunque disminuye aún más el ángulo de contacto de la esfalerita en presencia de PAX y agua salina (Figura 32).

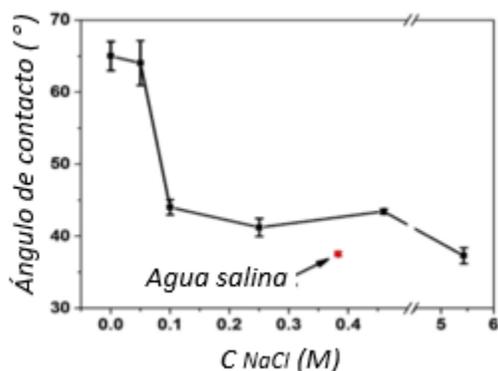


Figura 32. Ángulo de contacto de esfalerita tratada con PAX en soluciones acondicionadoras de diversas concentraciones de NaCl. Adaptado de Caballero [44]

El potencial Zeta se ve afectado producto de la adsorción del PAX en la interfaz S-L y por los iones de sal presentes. En la Figura 33, es posible apreciar este efecto, donde las partículas tratadas con solución de NaCl se encuentran en el rango de 30 a 35 mV, mientras que sin tratar el valor aproximado es de 26 mV.

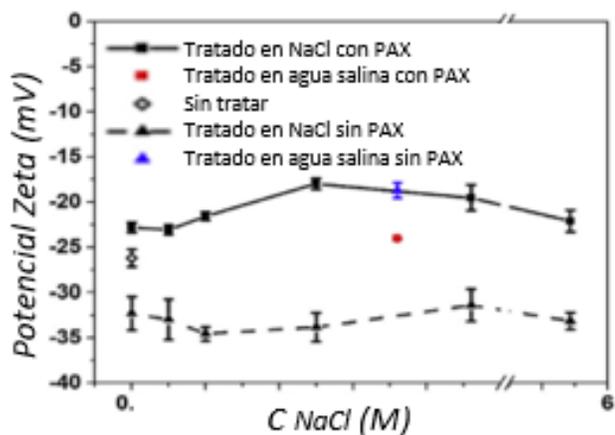


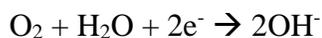
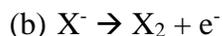
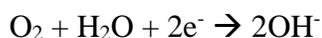
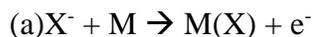
Figura 33. Potenciales zeta de partículas de esfalerita tratadas en soluciones acuosas de varias concentraciones de NaCl con y sin PAX. Adaptado de Caballero [44]

Las cargas en la superficie de la esfalerita se originan a partir de su hidrólisis dando como resultado diferentes especies iónicas como  $H^+$ ,  $OH^-$  y  $Zn^{2+}$ . Las especies en la superficie de la esfalerita son  $SH_2$ ,  $ZnSH^+$  y  $SZnOH$ . En presencia del colector empleado, se adsorbe en los sitios de este último para reemplazar al  $OH^-$ , por lo que la potencial zeta se vuelve menos negativo.

Al aumentar la concentración de  $NaCl$ , se adsorbe menos xantato en la superficie del mineral, pero es posible disolver y adherir más iones de zinc a la superficie del mineral como  $Zn(OH)^+$ , por lo que se obtienen valores de potencial zeta menos negativos que los de la esfalerita sin tratar [45].

Como resultado de un análisis de todo lo anterior, existen interacciones químicas del colector con el mineral, dichas interacciones corresponden a un valor específico de potencial el cual depende de las 2 principales reacciones redox. La reacción química (a) corresponde la adsorción del xantato con la superficie del mineral, mientras que la reacción química (b) es la oxidación del xantato produciendo dixantógeno en la superficie de ésta.

Gracias a la combinación de las superficies catódica y anódica, se forma una celda galvánica, siendo el oxígeno el aceptor de  $e^-$ . El mineral con el valor más alto de potencial de reposo alcanzado de manera espontánea por el mineral sulfurado en la pulpa actuará como cátodo y el de menor potencial como ánodo. Todas estas interacciones químicas favorecerán la flotabilidad de la esfalerita en la superficie de la burbuja aunado a todas las condiciones requeridas previamente mencionadas como pH, tamaño de la burbuja, oxigenación de la pulpa, entre otros.



Realizando una comparación de la esfalerita con la pirita se interpreta que ésta última presenta un potencial de reposo de 424 mV a pH=6, mientras que la esfalerita presenta un potencial de reposo de 188mV. De acuerdo a estos datos se afirma que la pirita actúa como un mineral más catódico (mayor aceptor de electrones) y la blenda como el menos catódico donde el sulfuro se oxida a azufre elemental.

Para poder efectuar la electroflotación de la esfalerita, se requiere que actúe como activador el sulfato de cobre, que es comúnmente empleado en la industria, el cual tiende a crear una película de sulfuro de cobre; en la superficie de la esfalerita. Así mismo se debe

incrementar el pH de flotación, el cual usualmente se encuentra entre 10.5 y 11.0. La lechada de cal suele usarse para regular el pH en la flotación de zinc.

Una vez producida la activación de la esfalerita, se le adiciona el colector o colectores requeridos para efectuar la colección de las partículas de sulfuro de zinc. El concentrado de zinc obtenido en la etapa de desbaste se envía al circuito de limpieza para eliminación de impurezas, y el relave de la etapa de desbaste es el relave final del proceso de flotación, por lo cual se envía al depósito de relaves.

En algunas ocasiones puede llegar a ser necesario la remolienda del concentrado de desbaste de plomo y/o de zinc en sus respectivos circuitos de limpieza. La razón de esto es generar la liberación adecuada de partículas valiosas de las inertes.

A lo largo de los años se han realizado diversos experimentos acerca del acondicionamiento de las celdas de electroflotación con el fin de estudiar el tamaño de burbuja para hacer flotar a las partículas de esfalerita considerando un medio alcalino. El último estudio se reportó en el 2018 gracias a Rojas et. al. [40], donde menciona que este proceso de concentración es muy versátil y competitivo ya que se requiere menor mantenimiento y el costo operacional en comparación con otras celdas es más bajo.

Como se mencionó anteriormente, el material con el que estén fabricados los electrodos, así como su geometría se verá influenciado en la cantidad de gases producidos durante la electrólisis del agua, es por ello que Rojas et. al. elaboraron la experimentación utilizando dos tipos de mallas de platino con diferente diámetro. Los parámetros considerados se encuentran en la Figura 34.

Malla de electrodo	Diámetro de cable (mm)	Espacio entre cables (mm)	Área total de electrodos (cm <sup>2</sup> )
I	0.02	0.02	14.2
II	0.08	0.16	25

Figura 34. Características de los electrodos usados. Adaptado de Caballero [40]

De la misma manera, se estudió el tamaño de burbuja en medio ácido y alcalino empleando HNO<sub>3</sub> y NaOH respectivamente como reactivos para controlar en pH y como electrolito Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Con el objeto de poder capturar las imágenes correspondientes de hidrógeno y oxígeno, se empleó una cámara digital de alta velocidad. Algunas condiciones evaluadas para la generación de hidrógeno y oxígeno se enlistan en la Figura 35.

Condiciones	Valores
pH*	3, 5, 7, 9, 11
Concentración de electrolito (M)	0.05; 0.1
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	5.28; 6.69; 8.31
Geometría de electrodos	I, II
Agitación	700
Volumen de celda	380
Temperatura	25
Presión	1

\*Para ZnS se considera valores pH >7

Figura 35. Condiciones de operación usadas para la medición de diámetro de burbuja. Adaptado de Caballero [40]

Para conocer el diámetro medio de burbuja, Rojas et. al emplearon la ecuación llamada diámetro medio de Sauter ( $d_{32}$ ).

Diámetro medio de Sauter:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1} di^3}{\sum_{i=1} di^2}$$

Donde

$di$ = diámetro de burbuja.

Comenzando con un análisis en cuanto a las burbujas de hidrógeno, los resultados arrojados demuestran que, al existir una carga superficial negativa entre las paredes de los electrodos y la burbuja, se genera cierta fuerza repulsiva en medios alcalinos, lo que provoca que su tamaño sea menor en comparación de pH ácido, favoreciendo así que estas burbujas se desprendan de manera más rápida. La Figura 36 muestra este efecto, donde  $d_{32} = 54.4 \mu\text{m}$  aproximadamente a pH 11.

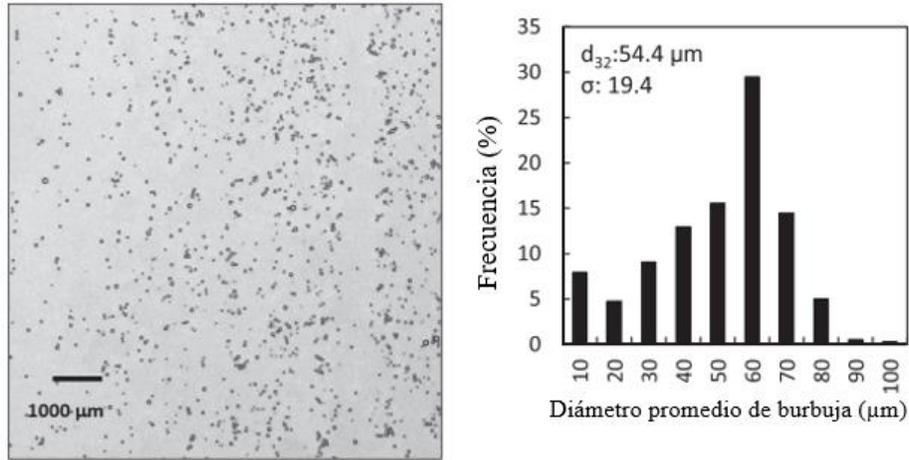


Figura 36. Efecto de pH en el diámetro de burbujas de H<sub>2</sub> en el proceso de electrólisis del agua. pH: 11; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0.05 mol/L; densidad de corriente: 5.28 mA/cm<sup>2</sup>. Adaptado de Caballero [40]

En cuanto al efecto del tamaño de burbuja y la relación con la densidad de la corriente se refiere, los resultados argumentan que, a mayor densidad de corriente, disminuye el diámetro de burbuja tanto de H<sub>2</sub> como de O<sub>2</sub>; esto provocado por la tasa de nucleación. Lo que genera que sean desprendidas una mayor cantidad de burbujas de la superficie de los electrodos en todo el rango de pH, desde ácido hasta alcalino. Sin embargo, un efecto adverso observado en estos experimentos es la coalescencia de burbuja al incrementar la densidad de corriente.

Ahora bien, en cuanto a las burbujas de oxígeno, presentan un comportamiento inverso a las burbujas de H<sub>2</sub>, es decir, a pH alcalino, el diámetro de esta burbuja incrementa (Figura 37), debido a la fuerza repulsiva entre la superficie del electrodo y la burbuja (cargadas negativamente). A pH 11, el d<sub>32</sub> es de alrededor de 67 μm (tamaño mayor que las de H<sub>2</sub>).

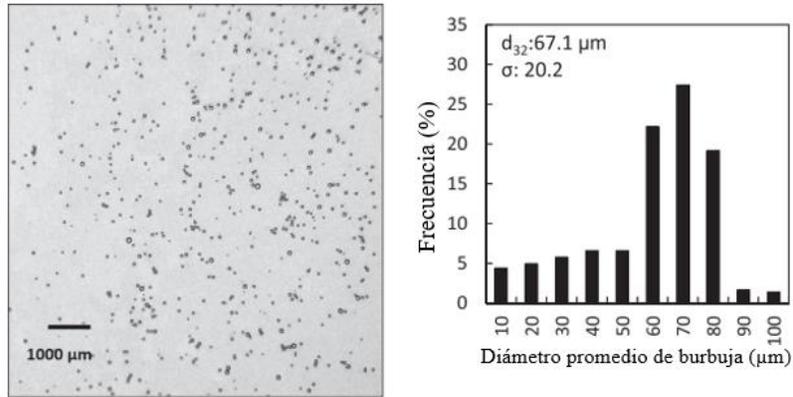


Figura 37. Efecto de pH en el diámetro de burbujas de O<sub>2</sub> en el proceso de electrólisis del agua. pH: 11; Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 0.05 mol/L; densidad de corriente: 5.28 mA/cm<sup>2</sup>. Adaptado de Caballero [40]

De acuerdo a toda la experimentación reportada por Rojas et. al., se puede decir que el diámetro de la burbuja producida durante la electrólisis del agua se encuentra influenciado por el pH. En cuanto al tamaño de burbuja de Sauter de hidrógeno disminuye a medida que aumenta el pH, mientras que el de las burbujas de oxígeno aumenta a medida que aumenta el pH.

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo con toda la información recabada, se concluye que para llevar a cabo la electroflotación de una mena sulfurada como la esfalerita en el laboratorio de Beneficio de Minerales, se requiere una fuente de poder con un rango de 5 -20 V, que favorecerá la generación de burbujas de  $H_2$ , las cuales son las responsables de flotar al mineral.

Para mejorar el rendimiento de la flotación selectiva de este mineral, se requiere de oxigenar la pulpa a la salida de la molienda. De la misma manera se sugiere que la mena contenga la menor cantidad de  $Fe^{3+}$  el cual proviene de la pirita, que se considera como impureza.

En el caso de contener un porcentaje mayor a 3% de Fe, se requerirá una mayor cantidad de iones  $Cu^{2+}$  provenientes de  $CuSO_4$  con la finalidad de obtener una mayor activación y Xantato para favorecer su hidrofobicidad.

Respecto al potencial eléctrico y pH, las condiciones de flotación selectiva precisan en un medio alcalino, pH= 9-11 para obtener un potencial positivo y así el colector se adsorberá de manera eficiente en la superficie de la esfalerita favoreciendo así la electroflotación.

Se recomienda usar como colector xantato amílico de potasio (PAX) debido a su longitud de la cadena con la finalidad de incrementar el tiempo de inducción, y así, convertir en hidrófobas a las partículas de  $ZnS$ ; de igual manera evitar en lo posible una concentración alta de iones como  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , ya que éstos impiden la adsorción del colector debido a la competencia de adherencia a la burbuja de aire, disminuye el ángulo de contacto y el potencial Zeta.

Con base a la investigación teórica recopilada en este trabajo, es posible llevar a la práctica el proceso de electroflotación en celda empleando como mineral a la esfalerita, y con las condiciones necesarias.

A partir de los resultados recabados, es posible aplicar el mismo proceso a otros minerales sulfurados con la finalidad para determinar la factibilidad de extrapolar este proceso a nivel industrial.

## 8. BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA

- [1] M. Gerónimo, «Introducción,» de Tesis. *Estudio de biooxidación de un concentrado de magnetita con bacterias mesófilas para la eliminación de sulfuros*, México, 2017, pp. 11,12
- [2] López. L, «Introducción» de Tesis. *Residuos mineros y la generación de drenaje ácido.*, CDMX, 2013, p. 5
- [3] «Secretaría de Economía» [En línea] <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria#:~:text=El%20sector%20minero%2Dmetal%C3%BAgico%2C%20en%2C%20en%202020>. [Último acceso: 02 Agosto 2021].
- [4] «Secretaría de Gobernación,» [En línea]: <https://www.gob.mx/fifomi/articulos/contexto-de-mexico-en-la-mineria?idiom=es#:~:text=Potencial%20Geol%C3%B3gico&text=El%20territorio%20nacional%20contiene%20abundante,Manganeso%2C%20entre%20los%20m%C3%A1s%20importantes>. [Último acceso: 30 Agosto 2020].
- [5] «GeologíaWeb,» [En línea]: <https://geologiaweb.com/minerales/esfalerita/>. [Último acceso: 13 Octubre 2020].
- [6] «Minería en línea,» [En línea]: [https://mineriaenlinea.com/rocas\\_y\\_minerales/esfalerita/](https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/esfalerita/). [Último acceso: 06 Septiembre 2021].
- [7] «Quimica.es,» [En línea]: <https://www.quimica.es/enciclopedia/zinc.html> [Último acceso: 01 Octubre 2021]
- [8] «Profertil,» [En línea]: <http://iio.ens.uabc.mx/hojas-seguridad/zinc.pdf>. [Último acceso: 04 Septiembre 2021].
- [9] «Statista,» [En línea]: <https://es.statista.com/estadisticas/612096/entidades-federativas-con-el-mayor-volumen-de-produccion-de-zinc-mexico/>. [Último acceso: 03 Septiembre 2021].
- [10] R. García, «Flotación,» de Tesis. *Evaluación por modelación de agitación magnética y del efecto de la granulometría en la recuperación del mineral*, México, 2012, p. 3.
- [11] F. Juárez, «Flotación,» de *Apuntes para el laboratorio Beneficio de Minerales*, CDMX, 2012, p. 117.
- [12] E. Kelly, «Máquinas de flotación para laboratorio,» de *Introducción al procesamiento de minerales*, México, Limusa, 1990, p. 337.

- [13] J. Fonseca, «Grado de liberación,» de Tesis. *Análisis, modelación y simulación del proceso de flotación en una celda de contacto*, Santiago de Chile, 2012, pp. 2,3.
- [14] E. Andrea, «Capítulo1: Introducción en la mineralurgia,» [En línea]: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/1.\\_mineralurgia\\_introduccion.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/1._mineralurgia_introduccion.pdf). [Último acceso: 17 Agosto 2020].
- [15] E. Kelly, «Termodinámica de las interfases,» de *Introducción al Procesamiento de Minerales*, México, Limusa, 1990, pp. 340-342.
- [16] E. Solis, «Reactivos utilizados para la flotación de minerales,» de Tesis. *Evaluación metalúrgica a los minerales sulfurados para mejorar la recuperación de sus concentrados en la planta concentradora San Expedito Cerro S.A.C*, Perú- 2015, pp. 19-21
- [17] E. Kelly, «Termodinámica de las interfases,» de *Introducción al Procesamiento de Minerales*, México, Limusa, 1990, p. 123,124.
- [18] «Capítulo 3. Sistema de adsorción,» [En línea]: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/Cap%C3%ADtulo3+Sistema+de+adsorci%C3%B3n.pdf>. [Último acceso: 06 Noviembre 2020].
- [19] J. Fonseca, «Hidrofobicidad,» de Tesis. *Análisis, modelación y simulación del proceso de flotación en una celda de contacto*, Santiago de Chile, 2012, pp. 3,4.
- [20] F. Juárez, «Potencial Z,» de *Apuntes para el Laboratorio Beneficio de Minerales*, CDMX, 2010, p. 125.
- [21] F. Juárez, «Carga Superficial,» de *Apuntes para el laboratorio Beneficio de Minerales*, CDMX, 2010, p. 124.
- [22] E. Kelly, «Termodinámica de las interfases,» de *Introducción al Procesamiento de Minerales*, México, Limusa, 1990, p. 133.
- [23] «El potencial Zeta,» [En línea]: <https://www.acniti.com/es/tecnolog%C3%ADa/potencial-zeta-burbujas-ultrafinas/>. [Último acceso: 13 Septiembre 2021].
- [24] E. Kelly, «Termodinámica de las interfases,» de *Introducción al Procesamiento de Minerales*, México, Limusa, 1990, p. 125.
- [25] E. Kelly, «Termodinámica de las interfases,» de *Introducción al Procesamiento de Minerales*, México, Limusa, 1990, p. 127.
- [26] Fonseca, «Mecanismo de flotación,» de Tesis. *A Análisis, modelación y simulación del proceso de flotación en una celda de contacto*, Santiago de Chile, 2012, pp. 7,8.
- [27] J. Salager, «Fundamentos de la Flotación,» [En línea]: <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/06/S335A.Flotation.pdf> [Último acceso: 21 Octubre 2020].

- [28] G. Neira, «Procedimiento para medir ángulos de contacto en sólidos particulados.» [En línea]: <file:///C:/Users/75138/Downloads/5159-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2949-1-10-20120413.pdf>. [Último acceso: 14 Octubre 2020].
- [29] «Fundamentos de flotación de minerales,» [En línea]: <http://biblioteca.esucomex.cl/RCA/Fundamentos%20de%20flotaci%C3%B3n%20de%20minerales.pdf>. [Último acceso: 29 Septiembre 2020].
- [30] M. Bustamante, «Estudio de la hidrofobicidad del oro nativo,» [En línea]: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49624956008.pdf>. [Último acceso: 15 Octubre 2020].
- [31] M. González, «Flotación,» [En línea]: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flotacion>. [Último acceso: 06 Septiembre 2021].
- [32] R. Serway, «Corriente eléctrica,» de *Física. Electricidad y Magnetismo*, CDMX, Cengage Learning, 2009, pp. 112,113.
- [33] R. Serway, «Fuerza electromotriz,» de *Física. Electricidad y Magnetismo*, CDMX, Cengage Learning, 2009, pp. 135,136.
- [34] R. Serway, «Densidad de corriente eléctrica,» de *Física. Electricidad y Magnetismo*, CDMX, Cengage Learning, 2009, pp. 116,117.
- [35] Z. George, «Electroflotation: A review, » *Elsevier Scientific Publishing Company*, p. 8, 2016.
- [36] S. Grisol, «*The influence of some parameters on bubble average diameter in an electroflotation cell by laser diffraction method*, » Elsevier Scientific Publishing Company, p. 7, 2016.
- [37] M. Kotti, «*Bubble hydrodynamic influence on oxygen transfer rate at presence of cationic and anionic surfactants in electroflotation process*,» Elsevier Scientific Publishing Company, p. 8, 2013.
- [38] Md. Shahjahan, «*Bubble size measurement in electroflotation*, » Elsevier Scientific Publishing Company, p. 8, 2010.
- [39] H. Vogt, «*Contribution to the interpretation of the anode effect*, *Electrochim*, » Elsevier Scientific Publishing Company, p. 14, 2010.
- [40] R. Rojas, «*Measurement and analysis of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> bubbles diameter produced by electroflotation processes in a modified Partridge-Smith cell*,» Elsevier Scientific Publishing Company, p. 13, 2018.
- [41] J. Ralston, «*Activation of zinc sulphide with Cu II, Cd II and Pb II. Activation in neutral and weakly alkaline media*, » Elsevier Scientific Publishing Company, p. 15, 1980.

[42] R. H. a. D. Duhamet, «*Importance of oxygenation of pulps in the flotation of sulfide ores,* » Science Direct, p. 11, 1990.

[43] Y. y. L. L. Chen, «*The influence of the impurities on the flotation behaviors of synthetic ZnS,* » Science Direct, p. 7, 2012.

[44] J. Wang, «*Effects of salinity on xanthate adsorption on sphalerite and bubble–sphalerite interactions,* » Elsevier Scientific Publishing Company, p. 8, 2014