

12
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

"ESTUDIO DE DIELECTRICIDAD DEL ACTIVADOR
 $CuSO_4$ Y EL COLECTOR XEK SOBRE ZnS BAJO
LAS CONDICIONES DE FLOTACION"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

NICOLAS MARTINEZ HERNANDEZ



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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: Prof. Huerta Cerdán Antonio
Vocal : Prof. Rodríguez Gómez Francisco Javier
Secretario: Prof. Rodríguez Rivera Carlos
1er. Suplente: Prof. Argánis Juárez Carlos Rosendo
2do. Suplente: Prof. González Sánchez Jorge Antonio

Sitio donde se desarrolló el tema:

UNAM, Facultad de Química, Edificio D, Laboratorio de Metalurgia Extractiva.

Asesor del tema



M. en C. Antonio Huerta Cerdán

Supervisor Técnico



Dr. Joary Genescá Llongueras

Sustentante



Nicolás Martínez Hernández

A G R A D E C I M I E N T O S

A MIS PADRES:

**Sr. Rafael Martínez Vargas y
Sra. Socorro Hernández Olguín**

Aquellos que con tanto amor, cariño y confianza sembraron una semilla, la cual cuidaron con tanto esmero, desde el primer instante que la tuvieron y que depositaron toda su confianza en mí, siempre encaminándome hacia el camino correcto de la vida; el fruto de esta semilla lo ven reflejado hoy en este trabajo y de esta manera permitiéndome lograr uno de mis grandes anhelos, de lo que les estaré agradecido toda mi vida y decirles que los quiero mucho.

A MIS HERMANAS:

Rocío, Norma y Lupita

Por todo el amor, cariño y comprensión que me han brindado durante todo el tiempo que hemos estado juntos; ya que siempre hemos salido adelante en las buenas y en las malas, es por ello que con este trabajo agradezco a ustedes lo buenas que han sido conmigo.

A MI NOVIA:

María Elena Olvera Martínez

Quiero agradecerte todo el amor, cariño, comprensión y apoyo que me haz brindado durante todo el tiempo que hemos estado juntos, ya que siempre hemos logrado sacar a flote los problemas que han surgido. Te quiero mucho.

A MIS CUÑADOS:

**Alfredo Vázquez S. y
Antonio Miranda N.**

Por la amistad y apoyo que me han dado en este tiempo y espero que algún día ustedes también puedan darle a sus hijos: Julio Cesar y Luis Felipe, una herencia tan valiosa como ésta y así obtengan algo de provecho.

A MIS TÍOS:

Javier H., Gabino U., Lidia H., María Elena H. y Pedro F.

Por todo el apoyo y comprensión que me han brindado todo este tiempo, en el que hemos convivido, tanto yo como con mi familia.

A MI ASESOR:

M. En C. Antonio Huerta Cerdán

Por la amistad y apoyo que me brindo todo este tiempo, además de sus enseñanzas que siempre me guiaron a realizar las cosas de buena manera.

A MIS AMIGOS:

Armando S., Noel M., Alfonso L., Enrique B., Verónica C., Israel G., Edgar E., Marco T., Heriberto T., Carlos C., Carlos P., Cesar R., Gerardo P., Lourdes L., Manuel R., Luis G., Rodrigo M., Arturo C., Marco J.F., Cuauhtémoc A., Alejandro A., Israel C., Hugo M., Ricardo F., Israel L., Ignacio M., etc.

Por la amistad que me han brindado durante el tiempo que hemos estado juntos en esta gran escuela.

A MIS PRIMOS:

Edmundo, Héctor, Rafael, Teodoro, Miguel, José Luis, José, Noé, Heriberto, Juan Carlos, Ana, Adán, María Elena, Rubén, Javier, Roberto, Trinidad, Rubisel, etc.

Todos los momentos en los que hemos convivido, desde nuestra infancia, ya sea realizando cosas buenas o malas.

A MIS PROFESORES:

**Todos mis maestros de la Facultad, en especial a los del
Departamento de Ingeniería Metalúrgica**

Por todos los conocimientos que obtuve de ellos y de lo que quedo satisfecho y agradecido con todos y cada uno de ellos.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:
A la máxima casa de estudios, de la cual estoy orgulloso de pertenecer y por la
oportunidad que se me brindo de pertenecer a ella, en especial a la grandiosa
Facultad de Química

INDICE

Resumen	1
Introducción	3
Objetivos	5
CAPITULO I	
FLOTACIÓN POR ESPUMA	
1.1 Flotación y generalidades	7
1.2 Colectores	11
1.3 Espumantes	13
1.4 Propiedades de los minerales	13
1.5 Sistema ZnS-CuSO ₄ -XEK-Oxígeno bajo las condiciones de flotación	14
IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS	
1.6 Corriente Alterna	19
1.7 Circuito resistivo	20
1.8 Circuito inductivo	21
1.9 Circuito capacitivo	22
1.10 Impedancia	24
CAPACITANCIA Y PROPIEDADES DE LOS DIELECTRICOS	
1.11 Capacitores	26
1.12 Capacitor de placas paralelas	27
1.13 Capacitores en serie o en paralelo	28
1.14 Dielectricos y constante dieléctrica	31
CAPITULO II	
Metodología de cálculo	37
Determinación de las constantes Ca y K	41

CAPITULO III	
Desarrollo experimental	46
Ejemplo para determinar e' y e''	51
CAPITULO IV	
Determinación de % de sólidos adecuado de trabajo	54
Sistemas de ZnS: seco, en agua y en solución buffer	59
Sistema ZnS-XEK sin activación	61
Sistema ZnS CuSO ₄	63
Cinética de activación de ZnS en presencia de CuSO ₄	69
Sistema ZnS-CuSO ₄ -XEK con acondicionamiento simultáneo	72
Sistema de ZnS activada en presencia de reactivo colector XEK	75
Análisis de los parámetros estudiados	78
CAPITULO V	
Análisis de resultados	83
CAPITULO VI	
Conclusiones	91
Recomendaciones para trabajos posteriores	92
Bibliografía	94

RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio de impedancia a altas frecuencias con transformación a constantes dieléctricas, en el sistema ZnS - CuSO₄ - XEK (mineral - activador - colector) bajo las condiciones adecuadas de flotación.

De manera paralela, este trabajo describió detalladamente la metodología más adecuada para utilizar la técnica de " IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS"; debido a que esta tesis comprendió una técnica que no es muy conocida en México y América Latina. En los estudios recopilados recientemente de Francia (lugar de origen de esta técnica), no se muestra la metodología desarrollada, sino únicamente los resultados de los estudios efectuados, ya que esta técnica es relativamente nueva y por lo tanto se requiere de estudiar las condiciones que manifiesten resultados confiables.

México es un país que cuenta con grandes y variados depósitos mineros, además de que procesa una gran variedad de minerales, entre ellos se tiene el beneficio de minerales de zinc, principalmente ZnS (Esfalerita), en los cuales no se tiene un completo control en la flotación del mismo, y por ende, en este trabajo se propuso llevar a cabo una estrategia de obtención de las concentraciones adecuadas de Sulfato de Cobre (activador) y Xantato Etilico de potasio (colector), lo cual será de gran utilidad a nivel industrial ya que al aplicarse esta concentración recomendada; proporcionará un incremento en la eficiencia del proceso y se verán muy probablemente beneficiados los costos de operación.

Para tener este conocimiento se utilizó esta técnica, en donde fue determinada la permitividad compleja de la esfalerita, la cual se vio modificada por las distintas concentraciones de reactivos - activador y colector - ; las concentraciones que se utilizaron son para el CuSO₄ fueron: 1×10^{-2} M, 1×10^{-3} M, 4×10^{-4} M, 5×10^{-4} M, 6×10^{-4} M, 8×10^{-4} M, 1×10^{-4} M, 1×10^{-5} M, 1×10^{-6} M y para el XEK se utilizaron 5×10^{-3} M, 1×10^{-3} M, 5×10^{-4} M, 1×10^{-4} M.

En este estudio se determinó que para poder analizar mejor los fenómenos dieléctricos que ocurren en el sistema, era necesario enfocarse en

los estudios obtenidos en la frecuencia de 100 Mhz, debido que en esta frecuencia se tienen las menores pérdidas de dielectricidad, y se encuentra una estabilidad en las constantes dieléctricas.

Se realizó un estudio de la cinética de activación del activador CuSO_4 , para de esta manera poder conocer la concentración adecuada de éste.

En los resultados se encontró que el % de sólidos en peso que se debía emplear en esta técnica fue de 4% y para ello se acondicionó el mineral en un tubo de 25 g de capacidad, en los cuales 1 g de esta pulpa era el mineral.

Para las pruebas que se efectuaron sin activación de mineral, solo con reactivo colector, no se observó un cambio significativo con respecto al mineral en agua y algo similar sucedió cuando se realizó acondicionamiento simultáneo de activador y colector.

Posteriormente se determinó que la concentración óptima de reactivo activador (CuSO_4) a utilizar fue de 5×10^{-4} M debido a que con ésta, el mineral presenta buenas propiedades eléctricas y podrá ser flotado.

Una vez encontrada la concentración de reactivo activador el paso a seguir fue el conocer la cinética de activación sobre el mineral y se encontró que el tiempo de activación adecuado fue de 120 minutos.

Otra parte de este estudio fue el conocer el comportamiento que presenta la partícula activada en presencia de reactivo colector (XEK) y de donde se encontró que las concentraciones óptimas de reactivo colector se encuentran en el intervalo de 5×10^{-4} M y 1×10^{-4} M.

INTRODUCCIÓN

Indudablemente la flotación es la técnica de procesamiento de minerales más usada en la actualidad para preparar minerales que posteriormente serán utilizados en la elaboración de un gran número de herramientas y utensilios de uso común en nuestra vida diaria y que permiten facilitar el quehacer del hombre. La flotación es un proceso selectivo que se utiliza para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos. En un principio se utilizó para separar sulfuros de cobre, plomo y zinc, y hoy en día se tratan minerales oxidados y minerales no metálicos.

La flotación por espuma se puede describir bajo diversos fenómenos complejos involucrados en dicho proceso, que consiste en trabajar con pulpas, las cuales están constituidas por agua y mineral molido, en donde este tiene un tamaño aproximado de 10 - 100 micrones. Esta pulpa es colocada en una celda, junto con un tensoactivo llamado colector, el cual modificará las propiedades superficiales de dicho mineral, dándole propiedades hidrofóbicas y formando una capa de espuma en la parte superior de la máquina ó celda de flotación.

Los minerales ávidos de aire se adhieren a las burbujas y ascienden a la superficie donde se recolectan y se retiran por medio de un desnatado. Los minerales indeseables se les dan propiedades de no flotabilidad, ya sea dejando sus superficies intactas ó modificando sus propiedades con otros reactivos llamados depresores.

Los concentrados valiosos de la flotación por espuma pueden ser ya sea el producto de la espuma que se recoge en la parte superior ó bien el producto del subflujo. En general para el caso de minerales sulfurados de plomo, zinc, níquel, molibdeno, plata y oro nativo, los productos valiosos, llamados menas, se recolectan en la espuma, mientras los productos indeseables, como sílice en grado elevado aparecerán en el subflujo.

México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en la producción de zinc por lo que se considera uno de los grandes productores de este metal. Sin embargo en nuestro país no se tiene un control adecuado de los parámetros para el

procesamiento de este metal, principalmente con respecto a su beneficio, ya que las recuperaciones que se obtienen no resultan ser tan eficientes, por lo que las empresas procesadoras de este mineral al no conocer las concentraciones adecuadas de los reactivos que están utilizando, realizan gastos extras en su proceso.

En virtud de la importancia que tienen estos minerales, se ha tratado de explicar los fenómenos que acompañan a este proceso con el fin de lograr el máximo aprovechamiento de éstos minerales; debido a que representan un recurso no renovable con lo que se pretende optimizar el proceso bajando los costos de operación y elevando la producción

Se han realizado diferentes tipos de estudios⁽¹⁾, con el objeto de conocer mecanismos de reacción que a partir de los cuales se han sentado las bases del conocimiento de las interacciones mineral-colector, sin embargo, estos estudios no han sido aplicados de forma directa tal como se obtienen, sino que relacionan al proceso por medio de condiciones químicas equivalentes, logrando un comportamiento análogo de las partículas en el proceso real determinando el efecto de estas variables (como el potencial de reposo y el potencial zeta) en el % de recuperación y el % de ley, los cuales determinan de manera directa la eficiencia del mismo.

Surge la necesidad de estudiar más acerca del sistema ZnS - CuSO_4 - XEK (mineral-activador-colector), con una técnica novedosa, no destructiva y de fácil obtención de resultados "in situ" de los fenómenos de superficie que ocurren en esta interfase (mineral-solución), que son obtenidos vía flotación por espuma, además de tratarse de un mineral que tiene propiedades de ser no conductor.

Así pues, la aplicación de diferentes técnicas electroquímicas permite observar el comportamiento de las partículas de mineral en pruebas de laboratorio extrapolando de manera eficiente las condiciones de trabajo hacia el proceso, tal y como se aplica a nivel industrial.

OBJETIVOS

- Aplicar y difundir la técnica de IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS, para analizar el comportamiento de un mineral de esfalerita, el cual no tiene buenas propiedades eléctricas.
- Obtener información importante que ayude a comprender mejor las interacciones que existen en el sistema $ZnS - CuSO_4 - XEK$, para así, poder contribuir con herramientas de control más eficientes en el proceso de flotación industrial.
- Encontrar las condiciones de % de sólidos en peso adecuado para el desarrollo de este trabajo y de algún modo poder aportar resultados que sean provechosos en una planta de beneficio de minerales de zinc.
- Obtener la concentración y el tiempo de activación óptimos de reactivo activador ($CuSO_4$), en un mineral de esfalerita
- Obtener el intervalo de concentraciones de reactivo colector (XEK), que permita en forma muy probable flotar un mineral de esfalerita.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

FLOTACIÓN POR ESPUMA

1.1 Flotación y generalidades

La flotación es indudablemente la técnica de procesamiento de minerales más importante y versátil usándose ampliamente en diferentes industrias que se dedican al procesamiento de diversos minerales logrando mediante dicha técnica el tratamiento de tonelajes cada vez más grandes.

La flotación se patentó originalmente en 1906⁽²⁾ permitiendo el minado de yacimientos complejos y de bajo grado que de otra manera se habrían considerado no rentables. En la práctica más primitiva las colas de muchas plantas de concentración por gravedad eran de un grado más alto al del mineral que se trata en muchas de las modernas plantas de flotación.

La flotación es un proceso selectivo que se utiliza para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos tales como plomo-zinc, cobre-zinc, etc. Inicialmente se desarrolló para tratar los sulfuros de cobre, plomo y zinc; el campo de la flotación se ha extendido para concentrar los óxidos minerales, los no metálicos, incluyendo al carbón fino.

1.1.2 Principios de la flotación

La teoría de la flotación en espuma es un problema complejo y no se comprende por completo. La flotación por espuma es el proceso más utilizado en la actualidad para la obtención de minerales concentrados. La concentración (o beneficio) de los minerales es el tratamiento de esos minerales provenientes de las minas o cerca de ellas para producir uno o varios concentrados valiosos separándolos de los residuos que se componen de desechos o minerales que no son de interés. Tal es el caso de la esfalerita (ZnS) de la cual se obtiene el zinc, sin embargo, para el procesamiento de este mineral se requiere el uso de sustancias llamadas colectores o tensoactivos cuya función es la de facilitar su separación; fundamentalmente para el caso de los sulfuros metálicos son de tipo orgánico denominados xantatos, que son derivados hidrocarbonados que dan a la partícula

de mineral un comportamiento hidrofóbico, con lo que se provoca que dichas partículas se tornen ávidas de aire y repelen el agua. Con agitación vigorosa y buena aireación en presencia de un espumante se logrará la formación de una espuma estable.

La flotación por espuma aprovecha las diferentes propiedades fisicoquímicas de la superficie de las partículas minerales. Después del tratamiento con reactivos, las diferentes propiedades superficiales de los minerales que contiene la pulpa de flotación se manifiestan haciendo posible la flotación; una burbuja de aire se debe unir a una partícula de mineral y elevarla hasta la superficie del agua (fig. 1.1). El proceso se aplica únicamente a partículas relativamente finas ($10-100\mu\text{m}$)⁽³⁾⁽⁴⁾, ya que si son demasiado grandes, la adhesión entre la partícula y la burbuja deja caer su carga⁽¹⁾.

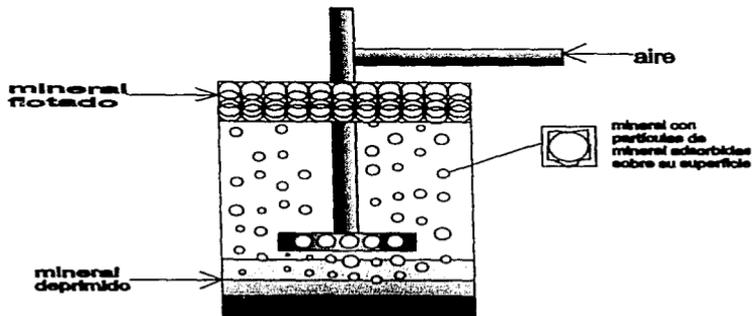


Fig. 1.1 Principio de la flotación por espuma

En la concentración por flotación, el mineral normalmente se transfiere a la espuma o fracción flotante, dejando la ganga en la pulpa o en las

colas. Esta es la llamada flotación directa opuesta a la flotación inversa, en la cual la ganga se separa en la fracción flotada.

Las burbujas de aire solamente se pegan a las partículas minerales si estas desplazan el agua de la superficie del mineral, lo que sucede únicamente si el mineral repele en cierta medida al agua o si su comportamiento es hidrofóbico. Una vez que las partículas de aire alcanzan la superficie, pueden continuar sosteniendo la partícula de mineral solo si forman una espuma estable; de otro modo reventan y cae la partícula de mineral. Para alcanzar estas condiciones, es necesario usar numerosos reactivos químicos conocidos como reactivos de flotación.

La actividad de una superficie mineral en relación a los reactivos de flotación en el agua depende de las fuerzas que operan sobre esta superficie. En la figura 1.2 se muestran las fuerzas que tienden a separar una partícula y una burbuja⁽³⁾.



Fig. 1.2 Ángulo de contacto entre burbujas y partículas en un medio acuoso

Las fuerzas de tensión conducen al desarrollo de un ángulo entre la superficie mineral y la superficie de la burbuja. En equilibrio:

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos \theta \quad 1.1$$

donde: $\gamma_{s/a}$, $\gamma_{s/w}$ y $\gamma_{w/a}$ son las energías de superficie entre las fases sólido - aire, sólido-agua y agua-aire respectivamente y θ es el ángulo de contacto entre la superficie mineral y la burbuja.

La fuerza necesaria para romper la interfase partícula-burbuja se denomina trabajo de adhesión, $W_{s/a}$, y es igual al trabajo necesario para separar la interfase sólido-aire y produce las interfases separadas aire-agua y sólido-agua, es decir:

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} + \gamma_{s/w} - \gamma_{s/a} \quad 1.2$$

Como resultado de la combinación de las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} (1 - \cos \theta) \quad 1.3$$

A medida que se incrementa el ángulo de contacto⁽⁸⁾, mayor será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja; además el sistema es más elástico entre las fuerzas de rompimiento.

Por consiguiente, la *flotabilidad* de un mineral aumenta con el ángulo de contacto y se dice que los minerales con alto ángulo de contacto son *aerofílicos*, es decir, que tienen mayor afinidad por el aire que por el agua. La mayor parte de los minerales en estado natural no son repelentes al agua y por tanto es conveniente adicionar los reactivos de flotación a la pulpa. Los reactivos más importantes son los *colectores*, los cuales son adsorbidos (de manera física mediante las atracciones electrostáticas o de manera química mediante una reacción) sobre la superficie de los minerales convirtiéndolos en hidrofóbicos (aerofílicos), facilitando su adhesión a la burbuja. Los espumantes ayudan a mantener una espuma lo

suficientemente estable para evitar que las burbujas cargadas con mineral se revienten y dejen caer el concentrado.

Los reguladores se usan para controlar el proceso de flotación, activando o deprimiendo la adherencia de las partículas minerales a las burbujas de aire y también se utilizan para controlar el pH del sistema.

1.2 Colectores

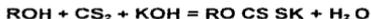
Todos los minerales se clasifican en tipos no-polares o polares, según sus características superficiales. Las superficies de los minerales no polares se identifican por enlaces moleculares relativamente débiles. Los minerales están compuestos de moléculas covalentes que se mantienen juntas por las fuerzas de Vander Waals; las superficies no polares no se unen fácilmente a los dipolos del agua y por consiguiente son hidrofóbicos. Los minerales de este tipo como el grafito, azufre, molibdenita, diamante, carbón y talco, tienen alta flotabilidad natural con ángulos de contacto entre 60 y 90 grados⁽⁷⁾. Aunque es posible el flotar a estos minerales sin ayuda de agentes químicos.

Para flotar los minerales se les debe impartir cierta calidad hidrofóbica. Para lograrlo se les agregan surfactantes a la pulpa, conocidos como colectores, observando un tiempo de adsorción, denominado *periodo de acondicionamiento*. Los colectores son compuestos que tornan a los minerales seleccionados, repelentes al agua por la adsorción de moléculas o iones sobre la superficie del mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa la superficie del mineral de la burbuja de aire, hasta un nivel tal que la adhesión de la partícula a la burbuja puede hacerse por contacto. Las moléculas de colector pueden ser compuestos ionizados que son prácticamente insolubles y tornan repelente al agua del mineral⁽³⁾ cubriendo la superficie de éste con una delgada capa.

Los colectores más utilizados para la flotación de la esfalerita son los xantatos⁽⁸⁾ que se clasifican en ionizados, del tipo aniónico con un grupo oxidrilo en su cadena.

Como todos los colectores aniónicos⁽⁸⁾, mientras mayor es la longitud de la cadena hidrocarbonada, tanto más poderosa será la repulsión al agua que se produzca; pero

no obstante la solubilidad disminuye, estos colectores se utilizan generalmente de cadena corta en virtud de la ventaja que representa ser más selectivos. Los xantatos se preparan haciendo reaccionar un hidróxido alcalino, un alcohol y un disulfato de carbón:



Donde R es el grupo hidrocarburo que normalmente contiene desde uno hasta seis átomos de carbono. Los xantatos que más se usan son los etílico, isopropílico, isobutílico y amílico, así como en menor grado el hexílico. El xantato etílico de potasio es típico y tiene la siguiente estructura:

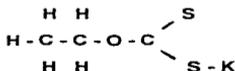


Fig. 1.3 Estructura del xantato etílico de potasio

La reacción entre los minerales sulfurados y los colectores sulfhidrilo es compleja. Se asume que los xantatos se adsorben sobre la superficie de los minerales sulfurados debido a las fuerzas químicas entre el grupo polar y la superficie resultando xantatos insolubles del mineral fuertemente hidrofóbicos. Se considera que la reacción del xantato con los productos de la oxidación de la superficie de sulfuro a través de un proceso de intercambio iónico es el mayor mecanismo de adsorción para la flotación de sulfuros. Sin embargo, un alto grado de oxidación superficial, acompañado por la formación de sulfatos que reaccionan rápidamente con los xantatos, impide la flotación, puesto que los xantatos metálicos formados escaman el mineral.

1.3 Espumantes

Quando las superficies minerales se vuelven hidrofóbicas por el uso del colector, la estabilidad de la adhesión de la burbuja depende en gran parte de la eficiencia del espumante. El comportamiento ideal del espumante ocurre totalmente

en la fase líquida y no influye sobre el estado de la superficie del mineral. Sin embargo, en la práctica hay una interacción entre el espumante, el mineral y otros reactivos y la selección de un espumante apropiado para una mena en particular solamente se puede hacer después de un arduo trabajo de pruebas.

En la flotación de minerales sulfurados es práctica común emplear al menos dos espumantes y más de un colector. Los espumantes en muchos aspectos son similares químicamente a los colectores iónicos y en realidad muchos de los colectores, como los oleatos, son espumantes poderosos para usarlos como espumantes eficientes, ya que la espuma que producen es demasiado estable para permitir el transporte eficiente hacia otro procesamiento. El aumento de espuma sobre la superficie de los espesadores y el espumado excesivo en las celdas de flotación, son problemas que se presentan en muchas plantas del procesamiento de minerales. Un buen espumante debe tener un poder colector despreciable y también producir una espuma que sea sólo bastante estable para facilitar la transferencia de mineral flotado desde la superficie de la celda hasta el canal colector.

1.4 Propiedades de los minerales

Mineral	Esfalerita	Covetita
Formula	ZnS	CuS
Sist. Cristalino	Cúbico	Hexagonal
Ctes. reticulares	a=5.43	a=3.802, c=16.43
Líneas de difracción	3.123 (100) 1.912(51) 1.633(30)	2.813(100) 1.896(75) 3.148(30)
Cte. óptica	N=2.369	$\omega = 1.45$
Dureza	3.5 - 4	1.5 - 2
Densidad	3.9 - 4.1	4.68
Clivaje	Perfecto {011}	Perfecto {0001}
Pdto. de solubilidad	1×10^{-20}	8.5×10^{-45}
Radio atómico	1.38 A (Zn)	1.28 A (Cu)

1.5 SISTEMA ESFALERITA - CuSO_4 - XANTATO - OXÍGENO EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN.

Las características de flotación de la esfalerita han tenido un gran interés de estudio, en ausencia y presencia de iones activadores. Algunos investigadores⁽⁹⁾ han estudiado la flotación con xantato etílico y xantato amílico en ausencia de activadores. Los diferentes resultados obtenidos, son debido a las diferentes características de oxidación que presenta la esfalerita. Esto es, la formación de precipitados de xantato de zinc en el seno de la esfalerita, los cuales deben presentarse para que ésta pueda flotar, en el caso cuando no existe presencia de algún activador. Cuando la esfalerita presenta características refractarias a la oxidación, sólo una cantidad limitada de Zn^{2+} será factible para la formación de multicapas de xantato de zinc en la superficie.

En este caso, la adsorción que presenta la esfalerita es similar a cuando aparecen los xantatos en la galena y en la calcocita, los cuales se adsorben en dos etapas. La primera etapa involucra una quimiadsorción de una capa inicial de xantato (1:1); y la segunda etapa aparentemente involucra la formación y adsorción de precipitados de zinc en el seno de la superficie de la esfalerita.

Plaksin y Anfimova⁽⁹⁾ realizaron estudios a cerca de éste sistema y llegaron a la conclusión de que existe la adsorción, y se puede detectar de dos formas; el xantato es débilmente adsorbido y es removido con facilidad, mediante un lavado con agua; poco tiempo después el xantato adsorbido es disuelto con piridina.

Shvedov y Andreeva⁽⁹⁾ observaron que bajo las condiciones de flotación existe la formación de cuatro a cinco monocapas de colector adsorbido en la superficie del mineral.

Algunos estudios adicionales muestran la presencia de una fase separada en la superficie de la esfalerita, esto después de estar en contacto con el xantato, estos resultados se obtuvieron mediante datos electrocinéticos, en donde se observó que el potencial electrocinético de la esfalerita en contacto con el xantato hexílico, se encuentran entre los resultados obtenidos para la esfalerita sin reactivo

alguno y esfalerita en presencia de xantato hexílico de zinc. Además, el potencial zeta del precipitado (xantato de zinc), cambia de signo (positivo → negativo), aproximadamente al valor de $\text{pH} \approx 3$.

La respuesta a la flotación de la esfalerita, en presencia de xantato amílico⁽⁹⁾, muestra que se obtienen excelentes resultados a $\text{pH} \approx 3.5$ (recuperación aproximada al 97%) y también se observó que a $\text{pH} \approx 9$ las recuperaciones obtenidas son bajas. Además se obtuvo que la marmatita presenta una menor recuperación en comparación con la esfalerita pura.

Estudios realizados por Gaudin, Fuerstenau y Turkaniš⁽⁹⁾ muestran que la esfalerita puede ser flotada con colectores sulfidril (por ejemplo xantatos), pero se obtienen resultados satisfactorios si resulta necesario el uso de xantatos con grupos no polares largos y al usar grandes cantidades de reactivo. Las sales solubles en agua de metales pesados (cobre, plata, plomo, etc.) activan satisfactoriamente a la esfalerita.

Bajo estas condiciones los iones de cobre (Cu^{2+}) reemplazan a los iones zinc (Zn^{2+}) en la capa superficial del mineral, presentándose las reacciones de oxido-reducción:



y sumando las dos reacciones anteriores, se obtiene que



A una alta cantidad de xantato adsorbido en esfalerita sin activar⁽⁶⁾, este no ataca en forma eficiente a el mineral; después del proceso de activación, el xantato reaccionará de una manera más eficiente con los cationes del cobre, que han reemplazado a los cationes del zinc.

El compuesto xantato-cobre que se ha logrado formar, resulta ser más resistente a la acción de disolución del agua⁽⁶⁾, si se compara con el compuesto que se forma con el zinc (zinc-xantato); además el xantato atacará más fácilmente al mineral en un medio acuoso. Se ha establecido que la velocidad de activación de la esfalerita por los iones, se incrementa grandemente cuando la

temperatura de la pulpa se incrementa, y bajo condiciones normales, esta velocidad no es considerable.

La facilidad con la que el cobre entra en los cristales reticulares de la esfalerita⁽⁶⁾, es debida al factor de que el radio iónico del cobre y el zinc son similares, y también debido a que el cobre presenta una mayor afinidad por el azufre, en comparación con el zinc.

Cuando las condiciones de activación de la esfalerita con iones cobre o plata resultan ser favorables⁽⁶⁾, una película de cobre o de plata se puede formar en la superficie de la esfalerita; esto es debido a que los iones cobre o plata pueden difundir fácilmente dentro del cuerpo reticular del mineral.

Gaudin⁽¹⁰⁾ estudió la relación que existe entre la flotabilidad y la formación de la película causada por el colector, encontrando evidencia de que las recuperaciones significativas en la flotación del mineral se obtienen cuando las películas formadas eran menores a la monocapa, cuando el recubrimiento es solamente del 5 al 15% de la misma⁽¹¹⁾.

En estudios realizados por Jones y colaboradores⁽⁹⁾, los xantatos de los metales alcalinos y alcalinoterreos son solubles en agua. Por ejemplo, el xantato etílico de sodio tiene una solubilidad de 8 moles/ litro. De otro modo, las sales de los xantatos de metales pesados tienen una solubilidad limitada en solución acuosa. A continuación se presenta la solubilidad de algunos xantatos metálicos:

Tabla 1.1 Productos de solubilidad de algunos xantatos metálicos⁽⁹⁾

Xantato metálico	Producto de solubilidad
Xantato Etilico de Zinc	$4.9 \cdot 10^{-9}$
Xantato Amilico de Zinc	$1.6 \cdot 10^{-12}$
Xantato Octilico de Zinc	$1.5 \cdot 10^{-16}$
Xantato Etilico de Plomo	$2.1 \cdot 10^{-17}$
Xantato Amilico de Plomo	$1.0 \cdot 10^{-24}$
Xantato Etilico Cuproso	$5.2 \cdot 10^{-20}$

Se observa que los productos de solubilidad de los xantatos metálicos disminuye a medida que la longitud de la cadena se incrementa. Además, el hecho de que el producto de solubilidad del Xantato Etilico de Zinc, es mucho mayor que el del Xantato Etilico de Plomo o el Xantato Etilico Cuproso, se puede observar. Este fenómeno tiene una gran importancia en la flotación selectiva, para separar esfalerita, calcopirita y galena.

Los productos de solubilidad de las sales ditiofosfato son mucho mayores que las correspondientes a las de los xantatos metálicos.

En la precipitación de sales de xantatos metálicos en solución, la estequiometría de la sal metálica es generalmente dos a uno, debido a los iones metálicos divalentes. Por ejemplo, el xantato etílico de plomo es $Pb(EX)_{2(s)}$, donde EX^- representa al ion xantato etílico.

Para el sistema $ZnS - CuSO_4 - XEK$ en estudio, en el ion cúprico se presenta la oxidación del xantato a dixantógeno, por los iones Cu^{2+} , esto provocado por la reducción de $Cu^{2+} \rightarrow Cu^+$.

El xantato cuproso⁽⁹⁾, es muy insoluble y se forma por precipitación. El precipitado es coloreado (amarillo canario) en un sistema xantato - cobre y su formación esta dada por la siguiente reacción:



donde, EX^- y $(EX)_2$ representan al xantato etílico y al dixantógeno dietílico respectivamente. Aunque el xantato cúprico formado inicialmente en el sistema, no es una especie estable y su existencia es sólo temporánea.

Además de la oxidación producida por los iones cúpricos, el xantato puede ser también oxidado a el dímero, dixantógeno, o por la presencia de oxígeno disuelto en la solución. Las reacciones de oxidación son:



o bien



Aunque la oxidación del xantato por el oxígeno disuelto es termodinámicamente favorable, pero su cinética es lenta. Como resultado de la formación del dixantógeno, se puede asumir que no ocurre un apreciable incremento en los sistemas de flotación. Sin embargo, cabe mencionar que esta oxidación electroquímica del xantato por el oxígeno, puede ocurrir en una superficie sólida apropiada, como es el caso de la pirita, donde esta reacción puede llevarse a cabo.

Con los iones Cu^{2+} , esta reacción cinéticamente es rápida⁽⁹⁾ y la oxidación completa del xantato se da a pH menor a 10, debido a que a pH cercanos o mayores a 11, ésta reacción de oxidación no es favorable.

La reacción de reducción que se llevará a cabo en este sistema en estudio es la siguiente:



El 80% del xantato es oxidado después de 2 minutos de reacción en presencia de Cu^{2+} y es importante hacer notar que el dixantógeno no es estable a pH cercano a 10.5. El ion xantato es la especie estable bajo estas condiciones.

IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS

1.6 Corriente Alterna

En la actualidad⁽¹²⁾, casi toda la energía eléctrica que proporcionan las compañías suministradoras se transmite como corriente alterna (CA) de 60 Hz (o cps). La razón primordial del uso extenso de la corriente alterna, en vez de la continua o directa (CC o CD) es la relativa facilidad y eficiencia para convertir un voltaje en otro por medio de transformadores.

La necesidad de esta conversión se debe a consideraciones puramente económicas: la potencia transmitida a grandes distancias debe hacerse con bajas corrientes, y consecuentemente, altas tensiones, para minimizar las pérdidas por calentamiento Joule, que se incrementan con el cuadro de la intensidad de corriente.

Cada vez que se cierra un circuito eléctrico, insertando una clavija en un portacontacto, o cerrando un interruptor, se proporciona una diferencia de potencial entre dos puntos que varía con el tiempo de acuerdo con:

$$e = e_0 \text{ sen } (\omega t + \delta) \quad 1.4$$

donde e_0 es la amplitud de la tensión, δ es el ángulo de fase y ω la frecuencia angular (120 π rad/s).

Análogamente a la ecuación anterior, para representar la onda senoidal de corriente:

$$i = i_0 \text{ sen } (\omega t + \phi) \quad 1.5$$

donde ϕ , el ángulo de fase, representa la posición de una onda con respecto a otra cuando ambas tienen la misma frecuencia.

Se dice que dos ondas de la misma frecuencia están en fase, cuando ambas cruzan la horizontal al mismo tiempo. Es decir, el ángulo de fase es el parámetro que se utiliza para considerar que tan desfasadas están dos ondas senoidales.

1.7 Circuitos Resistivos

La forma que debe tener el voltaje para producir una corriente es⁽¹³⁾:

$$i = i_o \text{ sen } 2\pi ft \quad 1.6$$

a través de la resistencia.

Al escribir la ecuación de Kirchoff de voltaje para este circuito se tiene

$$v_R - iR = 0 \quad 1.7$$

en donde v_R es el voltaje de la fuente que, en este caso especial, involucra una resistencia(fig. 1.4a). Como se observa la diferencia de potencial aplicada a través de la resistencia debe tener la forma

$$v_R = i_o R \text{ sen } 2\pi ft \quad 1.8$$

La diferencia de potencial a través de la resistencia esta en fase con la corriente. Es decir la corriente y v_R alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo(fig. 1.4b).

Para obtener el valor medio de la raíz cuadrática media (rms) de v_R , se toma el valor promedio del cuadrado de la ecuación anterior. Cabe mencionar que $(\text{sen}^2 \theta)_{\text{prom}}$ sobre un ciclo es $\frac{1}{2}$, por lo tanto tenemos:

$$(v_R^2)_{\text{prom}} = \frac{1}{2} i_o^2 R^2 \quad 1.9$$

El lado izquierdo de la ecuación es simplemente V^2 , mientras que $i_o^2 / 2$ es I^2 . Al realizar las sustituciones y después de sacar la raíz cuadrada se tiene que:

$$V_R = I R \quad 1.10$$

que representa la ley de Ohm. Entonces, se concluye que la ley de Ohm relaciona el voltaje rms con la corriente rms para una resistencia en un circuito de CA.

1.8 Circuito Inductivo

Para este caso la corriente esta representada por la siguiente ecuación⁽¹³⁾:

$$i = i_0 \text{ sen } 2\pi ft \quad 1.11$$

y fluye a través de una bobina de inductancia L (fig. 1.4c). Para encontrar el voltaje de la fuente que es necesario para producir esta corriente, se escribe la ecuación de voltaje para el circuito

$$v_L - L \, di / dt = 0 \quad \text{o} \quad v_L = L \, di / dt \quad 1.12$$

y al sustituir i por el valor dado anteriormente, se obtiene la siguiente expresión:

$$v_L = (2\pi fL) i_0 \text{ cos } 2\pi ft \quad 1.13$$

Nótese que v_L no esta en fase con la corriente, como se observa en la figura 1.4(d). El voltaje alcanza su valor máximo cuando la corriente que pasa a través del circuito es cero. Aún cuando esto puede parecer extraño al principio, se justifica con facilidad de la siguiente manera: ya que $v_L = di / dt$, el valor de v_L será máximo cuando la corriente cambie con rapidez. (Recordar que las bobinas se oponen al cambio de corriente) Puesto que di / dt es sólo la pendiente de la función senoidal que representa a i , el voltaje inducido v_L será máximo cuando la gráfica de la función seno tenga una pendiente máxima. El análisis de la curva que representa a i muestra que esto ocurre cuando i es cero. Por lo tanto, v_L tiene su valor máximo cuando i es cero. De donde se ve que v_L e i están $\frac{1}{4}$ de ciclo (o 90°) fuera de fase. Para encontrar el valor de rms para v_L , la ecuación se eleva al cuadrado y se calcula su promedio y si se procede como antes, se tiene que

$$V_L = (2\pi fL) I \quad 1.14$$

Esto se puede expresar en una forma que corresponde a la ley de Ohm para los valores rms de voltaje y de corriente, si se define la reactancia inductiva como del elemento como

$$X_L = 2\pi fL \quad 1.15$$

en cuyo caso se tiene

$$V_L = I X_L \quad 1.16$$

La reactancia inductiva X_L reemplaza a R en esta analogía de la ley de Ohm

1.9 Circuitos Capacitivos

Un tercer tipo de elemento de un circuito que se encuentra con frecuencia en circuitos de CA es el condensador. Suponiendo que se tiene la corriente⁽¹³⁾

$$i = i_o \text{ sen } 2\pi ft \quad 1.18$$

que fluye a través de un condensador como se muestra en la figura 1.4(e), ya que las placas del condensador deben tener cargas iguales de magnitud y opuesta de signo, la corriente que fluye hacia una de las placas debe ser igual a la corriente que fluye desde la otra. En consecuencia, se tiene la impresión de que la corriente fluye a través del condensador.

Se sabe que, para un condensador,

$$q = C v_c \quad 1.19$$

y

$$dq / dt = i = i_o \text{ sen } 2\pi ft \quad 1.20$$

en donde q es la carga sobre el condensador y v_c es la diferencia de potencial que aparece a través de él. Al integrar la ecuación anterior se obtiene que

$$q = (-1 / 2\pi f) i_o \text{ cos } 2\pi ft \quad 1.21$$

en donde la constante de integración representa una carga constante sobre el condensador, que en este caso es igual a cero. Ya que $q = C v_c$ se tiene que

$$v_c = (-1 / 2\pi f C) i_o \text{ cos } 2\pi ft \quad 1.22$$

La gráfica de esta ecuación puede verse en la figura 1.4(f). Nótese que el voltaje y la corriente no están en fase, su diferencia de fase es de 90°. Para encontrar el voltaje rms se procede como antes, se elevan al cuadrado el voltaje y se toma su promedio. El resultado es

$$v_c = (1 / 2\pi f C) i \quad 1.23$$

lo que puede expresarse en una forma que corresponda a la ley de Ohm, al escribir

$$X_c = 1 / 2\pi f C \quad 1.24$$

así que

$$V_c = I X_c \quad 1.25$$

La cantidad X_c se conoce como la reactancia capacitiva y es una medida de la oposición que ofrece el conductor al flujo de la corriente.

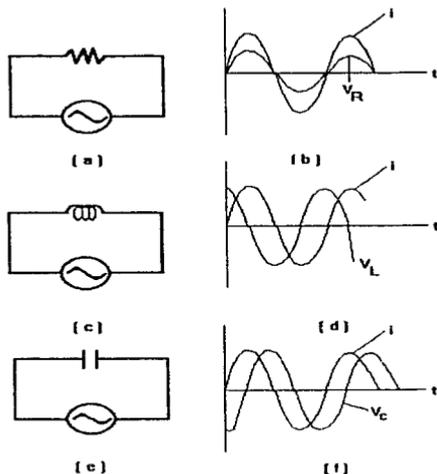


Fig. 1.4 Circuitos de una malla con una fuente de CA y gráficas desfasadas de corriente y voltaje

(a) y (b) resistivo; (c) y (d) inductivo; (e) y (f) capacitivo

1.10 IMPEDANCIA.

Es el término que relaciona el flujo de corriente en un elemento de circuito y la tensión en el elemento puede expresarse como una relación entre los números complejos y la corriente en circuitos de corriente alterna. Al realizar una analogía con la ley de Ohm, la impedancia se define como la diferencial de voltaje respecto a la diferencial de corriente y se representa con la letra Z.

$$|Z| = \partial E / \partial I \quad 1.26$$

La impedancia⁽¹⁴⁾ es un número complejo, que no cambia con el tiempo. Al analizar los valores de impedancia en un sistema, a cada valor de frecuencia le corresponde un ángulo de fase y un valor absoluto de impedancia, el cual se denomina magnitud del vector impedancia, con los cuales se determina el vector impedancia en coordenadas polares. En el plano complejo se representa de la forma: $Z = Z' + jZ''$ en coordenadas cartesianas, conociendo las expresiones de Z' y Z'' :

$$Z' = |Z| \cos \phi \text{ (componente real)} \quad 1.27$$

$$Z'' = |Z| \operatorname{sen} \phi \text{ (componente imaginaria)} \quad 1.28$$

$$|Z| = ((Z')^2 + (Z'')^2)^{1/2} \quad 1.29$$

$$\phi = \tan^{-1} Z'' / Z' \quad 1.30$$

La impedancia es un vector, que tiene en sus componentes una parte real, Z' y una parte imaginaria, Z'' . La parte real es llamada Resistencia, R, y a la parte imaginaria se le llama Reactancia, X, entonces, la impedancia se expresa:

$$Z = R + jX \quad 1.31$$

La *Resistencia* es la oposición que presenta el sistema al paso de un voltaje y la *Reactancia* genera un ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente resultante.

Cuando en el sistema se genera una reactancia negativa, entonces el sistema es un circuito *capacitivo* y cuando esta reactancia resulta positiva, el sistema se comporta como un *inductor*.

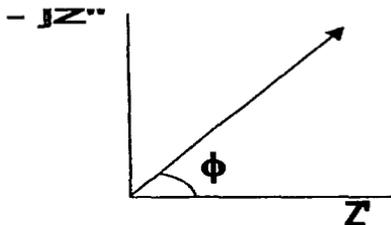


Fig. 1.5 Representación gráfica del vector Impedancia en el plano complejo

1.11 Capacitores

Dos conductores cualesquiera separados por un aislador se dice que forman un capacitor⁽¹⁵⁾.

En la mayoría de los casos prácticos, los conductores suelen tener cargas de igual magnitud y signo opuesto, de modo que la carga neta del capacitor en conjunto es nula. Entonces el campo eléctrico en la región comprendida entre los conductores es proporcional a la magnitud de esta carga, y por tanto la diferencia de potencial V_{ab} entre los conductores es también proporcional a la magnitud de carga Q .

Se define a la capacitancia C de un capacitor como la relación entre la magnitud de la carga Q de cualquiera de los conductores y la diferencia de potencial V_{ab} entre ellos:

$$C = Q / V_{ab} \qquad 1.32$$

De esta definición se deduce que las unidades de la capacitancia es el coulomb por volt (1 C.V^{-1}). Una capacitancia de un coulomb por volt se denomina farad (1 F).

Cuando un capacitor tiene una carga Q , significa que la carga del conductor de mayor potencial es Q y la del menor potencial, $-Q$ (suponiendo que Q es una cantidad positiva).

Los capacitores tienen muchas aplicaciones en circuitos eléctricos. Se utilizan para sintonizar circuitos de radios, para "suavizar" la corriente rectificadora suministrada por una fuente de energía, para eliminar la chispa que se produce cuando se abre repentinamente un circuito con inductancia. El sistema de encendido de los motores de automóvil tiene un capacitor para eliminar chispazo al abrir y cerrar los "platinos". La eficiencia de transmisión de corriente alterna puede aumentarse mucha veces utilizando grandes capacitores.

1.12 Capacitor de placas paralelas

El ejemplo más sencillo de capacitor⁽¹²⁾ es el mostrado en la figura 1.6

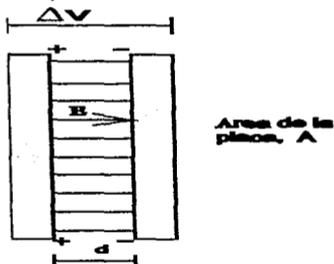


Fig. 1.6 Capacitor de placas paralelas

Dos placas conductoras, cada una de área A , están separadas a la distancia d , que por lo general es muy pequeña en comparación con las dimensiones de las placas. Un valor típico de d podría ser de menos de 1 mm, en tanto que las dimensiones de la placa pueden ser cientos o miles de veces mayores.

El campo eléctrico entre las placas es bastante uniforme para esta configuración de placas conductoras, excepto cerca de los bordes, donde puede ocurrir cierto efecto de dispersión.

El campo eléctrico es uniforme entre las placas, teniéndose que la magnitud de la diferencia de potencial (o tensión) está dada por

$$\Delta V = Ed \quad 1.33$$

en donde d es la separación de las armaduras. También se tiene que la magnitud del campo eléctrico entre las placas se puede expresar como:

$$E = \sigma / \epsilon_0 \quad 1.34$$

donde σ es la densidad de carga superficial en aquellas. Utilizando la expresión $\sigma = q / A$ y en combinación con las ecuaciones 1.32-1.34, se encuentra que:

$$C = q / \Delta V = q / Ed = q / (\sigma / \epsilon_0) d = q \epsilon_0 / q d \quad 1.35$$

o sea también

$$C = \epsilon_0 A / d$$

1.36

para la capacitancia de un capacitor de placas paralelas en el vacío. Se puede prever que este resultado tenga que ser modificado en cierta medida si se llena el espacio entre las placas conductoras con un material dieléctrico, en cuyo caso se altera la permisividad.

1.13 Capacitores conectados en serie o en paralelo

En los circuitos eléctricos se pueden conectar los capacitores entre sí y con otros elementos de circuito en una diversidad de formas⁽¹²⁾. En un diagrama de circuito se utiliza el símbolo de la figura 1.7(a) para representar un capacitor de capacitancia fija⁽¹²⁾ y el símbolo de la figura 1.7(b) para representar un capacitor con capacitancia variable⁽¹²⁾. En un capacitor de este último tipo se tienen medios para ajustar la separación o la disposición entre armaduras paralelas, por ejemplo, mediante una perilla. Desde luego, existen otras formas de construir capacitores cuya capacitancia pueda ajustarse.



Fig. 1.7 Simbología para representar al capacitor

(a) Capacitancia fija; (b) Capacitancia variable

Ahora se considerará el efecto de conectar dos capacitores diferentes⁽¹²⁾, inicialmente descargados. Si se aplica un voltaje o tensión entre los puntos a y c de la figura 1.8(a), aparecerán cargas en las cuatro superficies conductoras. Para simplificar, supóngase que se está trabajando con capacitores de placas paralelas, cuya separación entre sí es mucho mayor que la existente entre las placas de cualquiera de ellos. Al aplicar el voltaje aparece la carga +q en la placa 1, y en la placa 4 debe aparecer una carga opuesta -q. Originalmente las placas 2 y 3, así como el dispositivo externo que proporciona el voltaje eran eléctricamente neutros y deben permanecer de esa forma, pues se supone que están aislados de

sus alrededores. Por tanto, si en la placa 1 aparece la carga $+q$, en la placa 2 deberá aparecer una carga de compensación $-q$, lo que dejará a la placa 3 con una carga $+q$, puesto que la suma de las cargas en las placas 2 y 3 deben ser cero. Pero, la carga $+q$ en la placa 3 será exactamente la necesaria para equilibrar la carga $-q$ en la placa 4.

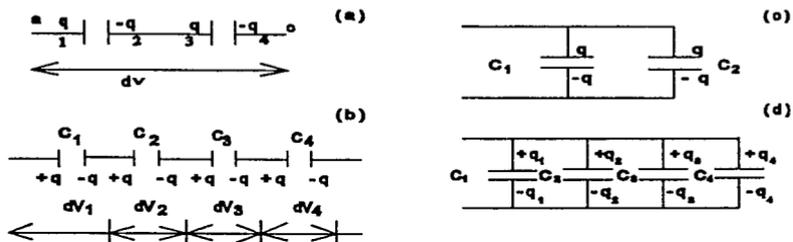


Fig. 1.8 Dos capacitores en serie y en paralelo y su capacitor equivalente

(a) y (b) en serie; (c) y (d) en paralelo

Como las placas 1 y 4 son conductores con cargas opuestas, constituyen una especie de capacitor. Sin embargo éste no es un capacitor simple de placas paralelas, pues éstas están muy separadas, además de que existen otros conductores entre éstas. Se considera que las placas 2 y 3 y su conductor de conexión son una sola armadura en la que ha ocurrido una separación de cargas positivas y negativas.

Entonces, la carga en la placa 2 debe ser $-q$, mientras que la placa 3 debe ser $+q$. Cuando los capacitores se conectan como en la figura 1.8(a), se dice que están en serie. Esta afirmación implica que todo incremento de carga que aparezca en uno de los capacitores necesariamente aparece en los demás. Como se menciona anteriormente, se puede considerar que esta combinación de

capacitores es uno solo con cierta capacitancia equivalente C , como se indica en la figura 1.8(b). Entonces, C esta relacionada con ΔV_{AC} por

$$\Delta V_{AC} = q / C \quad 1.37$$

Pero es claro que

$$\Delta V_{AC} = \Delta V_{AB} + \Delta V_{BC} \quad 1.38$$

o sea

$$\Delta V_{AC} = q / C = q / C_1 + q / C_2 \quad 1.39$$

En consecuencia, la capacitancia equivalente C debe estar dada por

$$1 / C = 1 / C_1 + 1 / C_2 \quad 1.40$$

o bien

$$C = C_1 C_2 / C_1 + C_2 \quad 1.41$$

Por lo tanto, si se deseara reemplazar los dos capacitores C_1 y C_2 por un solo en el que se obtuviera la misma carga q al aplicarle el mismo voltaje ΔV_{AC} , su capacitancia estaría dada por la ecuación 1.41. La generalización de la ecuación 1.41 al caso de N capacitores conectados en serie es muy directa y da el siguiente resultado

$$1 / C = 1 / C_1 + 1 / C_2 + \dots + 1 / C_N \quad 1.42$$

para N capacitores en serie.

También se puede conectar un grupo de capacitores en paralelo. Al conectarse de esta manera, como se muestra en la figura 1.8(c), el voltaje o tensión en cada uno tiene exactamente el mismo valor ΔV_{AB} . Cada uno de los capacitores tiene una carga que depende de su capacitancia propia. De este modo, para la figura 1.8(c) se tiene

$$\Delta V_{AB} = q_1 / C_1 = q_2 / C_2 \quad 1.43$$

Haciendo referencia al mismo diagrama se puede observar que las armadura que tienen las cargas $+q_1$ y $+q_2$ pueden considerarse como una sola, en tanto que las que tienen las cargas $-q_1$ y $-q_2$, pueden considerarse como una sola armadura. Por tanto, la combinación puede reemplazarse por un solo capacitor equivalente de carga $q_1 + q_2$ que también tiene un voltaje ΔV_{AB} a través de él. Como

el capacitor combinado o equivalente tiene la capacitancia $C = (q_1 + q_2) / \Delta V_{AB}$, se encuentra que

$$C = q_1 + q_2 / \Delta V_{AB} = C_1 + C_2 \quad 1.44$$

Por tanto, la capacitancia equivalente de un grupo de capacitores en paralelo se obtiene sumando sus capacitancias individuales. Para N capacitores en paralelo, la capacitancia equivalente será

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N \quad 1.45$$

Utilizando las leyes para la combinación en serie o en paralelo antes obtenidas, es posible reducir gradualmente redes complejas de capacitores, a un capacitor equivalente simple⁽²¹⁾. Pero existen muchas redes eléctricas en las que no se puede.

1.14 Dieléctricos y Constante Dieléctrica

La mayor parte de los capacitores tienen entre sus placas un material sólido no conductor o dieléctrico⁽¹⁵⁾.

Se pueden emplear dos formas distintas para tener una explicación de las propiedades eléctricas de los sólidos, líquidos y gases⁽¹³⁾. Se puede tratar de describir en detalle el campo eléctrico y a las cargas dentro del material. Por ejemplo, el campo variará ampliamente de lugar a lugar dentro del material conforme se mueve desde la vecindad de un electrón hacia la vecindad de un núcleo. Describir las variaciones del campo eléctrico, aun dentro de un único átomo, resulta ser muy complejo. Si se consideran los campos de muchos átomos en movimiento térmico, se observa que es muy deseable hacer simplificaciones.

Para la mayoría de las aplicaciones eléctricas, no es necesario ni deseable un examen tan detallado del material. Ciertamente el movimiento errático y el campo de un único átomo o molécula no tendrá un efecto notable sobre las propiedades totales del material. Sólo pueden ser de interés el movimiento total y el comportamiento que son característicos de un número muy grande de átomos y moléculas.

Un dieléctrico⁽¹³⁾ es cualquier material que no contiene un número apreciable de cargas libres, es decir cualquier no conductor. En la figura 1.9(a) se observa una porción de un dieléctrico, el cual se supone que no tiene carga neta, aun cuando el campo eléctrico varía mucho de punto a punto dentro de él y se tiene de interés sólo sobre el campo promedio en regiones suficientemente grandes como para contener muchos átomos. Este campo promedio es cero, ya que no existe una carga neta promedio en el dieléctrico.

Se supone que se aplica un campo eléctrico externo a la porción del dieléctrico, como se observa en la figura 1.9(b). Todos los átomos y moléculas del dieléctrico tendrán cargas positivas que se desplazan hacia la derecha⁽¹⁶⁾, mientras que las cargas negativas se desplazarán hacia la izquierda. Como se observa en la figura 1.9, esto causa que aparezca una capa de cargas positivas sobre el lado derecho de la porción del dieléctrico y que aparezca una capa de cargas negativas del lado izquierdo de la misma. Este tipo de carga es llamada polarización o carga de enlace y se dice que el dieléctrico se encuentra polarizado. El término enlace hace referencia al hecho de que las cargas en las capas están todavía ligeramente enlazadas con los átomos o a las moléculas. A diferencia de las cargas libres sobre el conductor, la carga no puede dejar al dieléctrico. Se representa a la densidad de carga superficial con el símbolo σ_b .

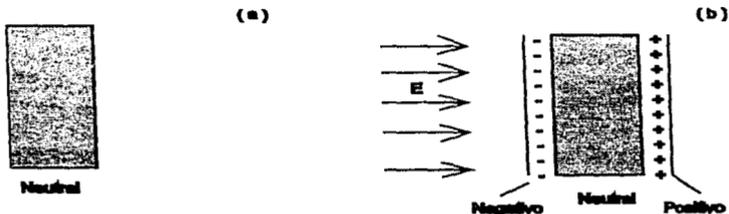


Fig. 1.9 Dieléctrico con y sin campo eléctrico
 (a) sin campo; (b) con campo

Si se considera el condensador de placas paralelas de la figura 1.10(a). Cuando la carga σ_f se coloca sobre el área unitaria de las placas, el campo E_o entre las placas puede encontrarse si se usa la ley de Gauss. Al utilizar la caja cuya área de sus tapas es A y de la que se muestra la sección transversal en la figura 1.10(a), se obtiene $E_o = \sigma_f / \epsilon_o$. El subíndice cero de E_o se pone para indicar que éste es el resultado para un condensador vacío.

Ahora si se considerara el efecto que tiene colocar una porción de dieléctrico entre las placas del condensador, como se muestra en la figura 1.10(b). El campo eléctrico E_o original entre las placas debido a σ_f provoca la aparición de cargas de polarización sobre la superficie de la porción del dieléctrico. Nótese que la σ_f , induce una σ_b negativa cerca de ella. Ya que el claro mostrado en la figura es exagerado, es evidente que la carga inducida $-\sigma_b$ y la carga libre σ_f sobre la placa del metal se combinan para dar una carga efectiva sobre la placa izquierda $\sigma = \sigma_f - \sigma_b$.

Entonces, en efecto, la porción del dieléctrico cancelará en forma parcial la carga original sobre las placas del condensador. Se supone que el campo dentro del dieléctrico E_d no es tan grande como el dado por σ_f / ϵ_o , sino que será

$$E_d = \sigma_f - \sigma_b / \epsilon_o \quad 1.46$$

Esta suposición se puede obtener también al examinar las líneas de campo de la figura 1.10(b). Como se observa, algunas de las líneas de campo que dejan la placa de metal terminan sobre la cara de la porción del dieléctrico, esto también indica que E_d es más pequeño para los dieléctricos que son más polarizables. Para esos materiales σ_b puede llegar en realidad a ser casi tan grande como σ_f , en cuyo caso E_d llegaría a ser cero. El mejor camino para encontrar el campo dentro del dieléctrico es aplicar la ley de Gauss a la superficie gaussiana, cuya sección transversal se observa en la figura. Entonces se obtiene que

$$\epsilon_o(0 + 0 + 0 + 0 + 0 + E_d A) = (\sigma_f - \sigma_b) A \quad 1.47$$

de donde

$$E_d = E_o - E_b \quad 1.48$$

mostrando que la suposición está justificada. Debido a que $\sigma_f / \epsilon_0 = E_0$ es el campo ocasionado por las cargas libres ya que $\sigma_f / \epsilon_0 = E_b$ es el campo provocado por las cargas de enlace, la ecuación 1.48 puede escribirse también como

$$E_d = E_0 - E_b \quad 1.49$$

El campo eléctrico en un dieléctrico es la combinación del campo originado por las cargas libres y del campo producido por las cargas enlazadas⁽¹⁷⁾.

Sin embargo, la ecuación 1.48 no resulta ser muy útil, ya que el ser σ_b una carga enlazada al dieléctrico, no se mide con facilidad. Se hace una aproximación más expedita, el definir una cantidad que se llama la *constante dieléctrica k*. Si se considera un dieléctrico donde la carga inducida σ_b es proporcional al campo eléctrico E_0 que la induce. Se dice que un dieléctrico es lineal porque $\sigma_b \approx E_0$ y entonces la ecuación 1.47 se escribe como

$$E_d = E_0 - (\text{const})E_0 \text{ o } E_d \approx E_0 \quad 1.50$$

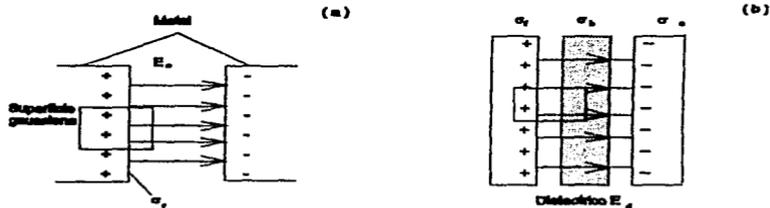


Fig. 1.10 Placas del condensador con y sin dieléctrico

(a) Sin dieléctrico; (b) Con dieléctrico

En consecuencia el campo en el dieléctrico es proporcional al campo que ocasiona que el dieléctrico se polarice. De aquí

$$k = E_0 / E_d \quad 1.51$$

De esta forma, se define la constante dieléctrica para el material.

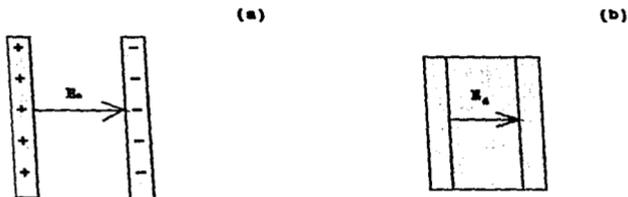


Fig. 1.11 Condensador

(a) Sin dieléctrico y con carga inducida; (b) Reducción del campo entre las placas

Esta definición se entiende con mayor facilidad al referirse al condensador de la figura 1.11. En la figura 1.11(a) se observa al condensador sin dieléctrico. El campo de él es E_0 . Se mantiene la misma carga libre sobre las placas como las de la figura 1.11(b), el campo se reduce a E_d debido a la carga inducida en el dieléctrico. Estos dos casos están relacionados a través de la constante dieléctrica del material:

$$E_0 = kE_d \quad 1.52$$

La carga inducida reduce el campo, $E_0 > E_d$, así que k es la unidad o una cantidad mayor que uno. Las constantes dieléctricas comunes se dan a continuación:

Material	k
Vacio	1.0000
Aire	1.005
Aceite de Petróleo	2.2
Benceno	2.29
Poliestireno	2.6
Hielo (-5°)	2.9
Mica	6
Alcohol metílico	38
Agua	81
Metal	∞

CAPITULO II

METODOLOGÍA DE CÁLCULO.

En este capítulo se presenta la metodología de cálculo para poder determinar la permitividad compleja de cualquier sistema:

Previamente, se necesita saber que el equipo empleado durante la experimentación (Vector Impedance Meter 4193A, Hewlett Packard) cuenta con un par de expresiones que son utilizadas para corregir las resistencias internas del equipo y el ruido interno que se genera, para así proporcionar un valor confiable de impedancia real, con base en su resistencia y su reactancia. Estas expresiones son:

Para la parte real:

$$R_r = \frac{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o) * |Z_m| * |Z_o|}{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o)^2 + (|Z_m| \sin \theta_o - |Z_o| \sin \theta_m)^2} - |Z_o| \cos \theta_o \quad 2.1$$

Para la parte imaginaria:

$$X_r = \frac{(|Z_o| \sin \theta_m - |Z_m| \sin \theta_o) * |Z_m| * |Z_o|}{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o)^2 + (|Z_m| \sin \theta_o - |Z_o| \sin \theta_m)^2} - |Z_o| \sin \theta_o \quad 2.2$$

Cabe mencionar que estas ecuaciones son válidas cuando $Z_o \gg Z_m$.

Donde:

$|Z_m|$ y θ_m son la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase del sistema medido, respectivamente.

$|Z_o|$ y θ_o son la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase de un circuito abierto, en este caso, aire.

$|Z_c|$ y θ_c son las magnitudes de la impedancia y el ángulo de fase de un circuito cerrado, en este caso, mercurio.

Una vez obtenidas las componentes reales de la impedancia, se procede a conocer la magnitud y el ángulo de fase real del vector impedancia, mediante las siguientes expresiones:

$$|Z_s| = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \quad 2.3$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_s} \quad 2.4$$

En esta etapa cabe señalar, que para cada frecuencia es necesario tomar dichos valores de Z_o , θ_o , Z_s y θ_s para poder obtener valores de impedancia reales.

En este trabajo las lecturas utilizadas de esos parámetros son:

Tabla 2.1 Valores obtenidos para los circuitos abierto y cerrado.

Frecuencia (Mhz)	Aire θ_o	Aire Z_o (Ω)	Mercurio θ_s	Mercurio Z_s (Ω)
0.5	-90	65000	10.9	0.5
1	-90	33000	14.4	0.5
2	-89.8	16413	23.3	0.5
5	-89.8	6593.3	44.3	0.7
10	-89.8	3300	62	1.1
20	-89.5	1657.3	74	2.1
30	-89.5	1244.1	77.5	3.05
40	-89.6	831	81	4
50	-89.6	691.3	82.2	4.95
60	-89.6	551.7	83.4	5.9
70	-89.6	481.5	84.1	6.9
80	-89.6	411.3	84.9	7.9
90	-89.4	368.8	85.4	8.5
100	-89.3	326.3	86	9.1

Como paso a seguir se deben calcular los valores de R_x y C_x , de igual forma para cada frecuencia mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_x = \frac{|Z_x|}{\cos \theta_x} = (\Omega) \quad 2.5$$

$$C_x = -\frac{\text{sen} \theta_x}{\omega |Z_x|} * 1 * 10^{12} = (pF) \quad 2.6$$

Donde:

R_x es la resistencia real, C_x es la capacitancia real, $|Z_x|$ es la magnitud de la impedancia real, θ_x es el ángulo de fase real, ω es la frecuencia angular = $2 * \pi * f$ (Hz).

Una vez determinadas la resistencia y la capacitancia real, como paso a seguir es determinar la permitividad compleja ($\epsilon^* = \epsilon' + j \epsilon''$ donde ϵ' es la constante dieléctrica y ϵ'' son las pérdidas por dielectricidad). Las ecuaciones que aquí se presentan son obtenidas a partir del trabajo de Gottmann⁽¹⁹⁾ en 1984:

Constante Dieléctrica:

$$\epsilon' = \frac{-C_x + \sqrt{C_x^2 + 4C_x K f^2 C_x}}{2C_x K f^2} \quad 2.7$$

Pérdidas por dielectricidad:

$$\epsilon'' = \frac{1}{R_x \omega C_x (1 + 2\epsilon' K f^2)} \quad 2.8$$

Donde:

C_x y K son las constantes de la celda, C_x esta dada en pF y K en Mhz^{-2} ;

f = Frecuencia en Mhz.

C_s = Capacitancia del sistema.

R_s = Resistencia del sistema.

ω = Frecuencia angular (Hz)

Como se demuestra a continuación, dichos parámetros son adimensionales:

Para e':

$$2 C_s K f^2 = 2 * C_s (\text{pF}) * K (\text{Mhz}^{-2}) * f^2 (\text{Mhz}^2) = \text{pF}$$

$$-C_s = \text{pF}$$

$$4 C_s K f^2 C_s = 4 * C_s (\text{pF}) * K (\text{Mhz}^{-2}) * f^2 (\text{Mhz}^2) * C_s (\text{pF}) = \sqrt{\text{pF}^3} = \text{pF}$$

$$e' = \frac{\text{pF} + \text{pF}}{\text{pF}} = \frac{\text{pF}}{\text{pF}} = \text{adimensional.}$$

Para e'':

$$R_s \omega C_s = R_s (\Omega) * \omega (\text{Hz}) * C_s (\text{pF})$$

$$(1 + 2 e' K f^2) = 1 + (2 e' * K (\text{Mhz}^{-2}) * f (\text{Mhz}^2))$$

$$e'' = \frac{1}{\Omega(\text{Hz})(\text{pF}) * (0)} = \text{adimensional.}$$

Como se mencionó antes, C_s y K son las constantes de la celda.

A continuación se presenta la forma de obtención de dichas constantes:

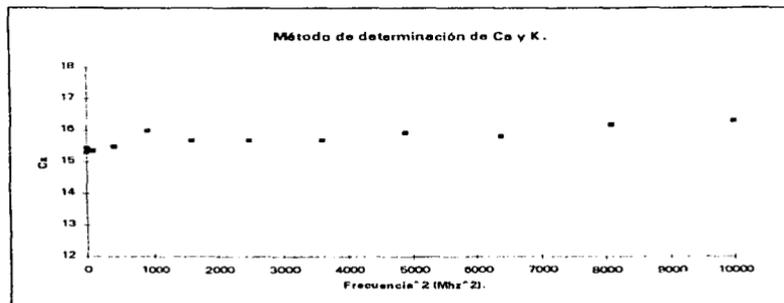
Para determinar dichas constantes es necesario realizar un barrido de frecuencias desde 0.5 a 100 Mhz (frecuencias deseadas), con la celda llena de agua bidestilada (generalmente se elige agua, para simplificar, ya que su constante dieléctrica se conoce y tiene un valor igual a 81, y por otro lado no tiene pérdidas de dielectricidad).

Una vez obtenida esta información, se procede a generar una tabla con la que se muestra a continuación:

MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE Ca Y K.

Frecuencia (Mhz)	Frecuencia ~ 2	θ_m	Zm	θ_x	Zx	Cx
0.5	0.25	-85.9	15630	-84.6	20566	15.41
1	1	-87.9	7900	-87.24	10383	15.3
2	4	-89	3920	-88.75	5149	15.44
5	25	-89.6	1573	-89.55	2066	15.4
10	100	-89.8	788	-89.82	1036	15.35
20	400	-89.7	391	-89.82	513	15.48
30	900	-89.8	260	-89.99	331	15.99
40	1600	-89.9	192	-89.86	253	15.68
50	2500	-89.7	153.9	-89.92	202	15.68
60	3600	-89.5	126	-89.71	169.14	15.68
70	4900	-89.6	106	-89.9	142	15.92
80	6400	-89.3	81.6	-89.58	125.7	15.82
90	8100	-89	79.1	-89.33	109.15	16.19
100	10000	-89	69.6	-89.39	97.53	16.31

A partir de los datos obtenidos, se procede a graficar la capacitancia en función de la frecuencia (elevada al cuadrado):



donde:

a) La ordenada al origen = $80 C_s$, despejando de la igualdad anterior se obtiene el valor de C_s .

b) La pendiente = $(80^2) \cdot K \cdot C_s$; despejando de la igualdad anterior se determina el valor de K .

Entonces, aplicando una regresión lineal a los valores obtenidos y eliminando a los valores de $f = 2X10^6$, $30X10^6$, $70 \cdot 10^6$, se obtiene:

$$a = 15.39726211$$

$$b = 8.953414434X10^{-5}$$

$$r = 0.9696084509$$

Los cuales están representados por la siguiente ecuación: $Y = a + bX$

a) Cálculo de C_s :

Ordenada al origen = $80 \cdot C_s$

$$C_s = \frac{15.39726211}{80} = 0.1924657764$$

$$C_s = 0.1924657764 \text{ pF}$$

b) Cálculo de K :

Pendiente = $80^2 \cdot K \cdot C_s$

$$K = \frac{8.953414434 \cdot 10^{-5}}{80^2 \cdot 0.1924657764} = 7.268674106 \cdot 10^{-8}$$

$$K = 7.268674106X10^{-8} \text{ Mhz}^{-2}$$

Como paso final se calcula la conductividad eléctrica por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma = \epsilon_s \epsilon_0' \omega$$

2.9

donde ϵ_0 es la constante de permitividad⁽¹⁷⁾ o la constante dieléctrica del vacío la cual tiene un valor de $8.854187818 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ y la conductividad eléctrica está dada en $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$.

Programa para obtener los valores de las variables

Para facilitar el cálculo de todas las variables que se involucran en el desarrollo de esta tesis, se optó por llevar a cabo la realización de un programa.

Dicho programa se desarrolló en una hoja de Microsoft Excel, en el cual se contó con las siguientes celdas:

f	θ_m	Z_m	θ_s	Z_{sal}	R	X	R_s	C_s	e'	e''	σ
A2-An	B2-Bn	C2-Cn	D2-Dn	E2-En	F2-Fn	G2-Gn	H2-Hn	I2-In	J2-Jn	K2-Kn	L2-Ln

Donde el valor de n será el último, siempre y cuando la frecuencia (f) sea igual a 100 Mhz.

- Para el caso de las celdas A, este valor siempre será una constante, ya que los valores son escogidos, y en este caso son: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100.
- En las celdas B, los valores a utilizar, son los que el aparato proporciona al momento de llevar a cabo las mediciones.
- De igual modo, los valores para las celdas C, son dados cuando se realiza la medición.
- Para las celdas D, la operación que se efectúa es la siguiente:

$$Dn = \text{ATAN} \frac{Gn}{Fn}$$

- Las celdas E se obtienen con la siguiente fórmula:

$$En = \sqrt{Fn^2 + Gn^2}$$

- Continuando con el desarrollo se calcula el valor de R, correspondiente a las celdas F, para las cuales se tiene la siguiente fórmula:

$$Fn = \frac{(((A' * \cos Bn) - (Cn * \cos B')) * (Cn * A'))}{(((A' * \cos Bn) - (Cn * \cos B'))^2 + ((Cn * \text{seno} B') - (A' * \text{seno} Bn))^2)} - (C' * \cos D')$$

de donde

A' = Impedancia del circuito abierto (aire)

B' = Angulo de fase del circuito abierto (aire)

C' = Impedancia del circuito cerrado (mercurio)

D' = Angulo de fase del circuito cerrado (mercurio)

de donde todos estos valores son conocidos, ya que fueron mencionados en la tabla 2.1, correspondiendo cada valor a un valor de frecuencia dado.

- Paso a seguir es el determinar los valores de la reactancia:

$$Gn = \frac{(((A' * \text{seno} Bn) - (Cn * \text{seno} B')) * (Cn * A'))}{(((A' * \cos Bn) - (Cn * \cos B'))^2 + ((Cn * \text{seno} B') - (A' * \text{seno} Bn))^2)} - (C' * \text{seno} D')$$

análogamente al paso anterior, los valores de las constantes son ya conocidos.

- Para calcular el valor de la resistencia real R_x (celdas H) se tiene la sig. ecuación:

$$Hn = \frac{En}{\cos Dn}$$

- La capacitancia real del sistema C_x (celdas I) se calcula de la siguiente manera:

$$In = \frac{\text{seno} Dn}{\omega * En} * 1 * 10^{12}$$

- Para el cálculo de la constante dieléctrica (celdas J) se tiene:

$$Jn = \frac{-C_a + \sqrt{C_a^2 + 4 * C_a * K * An^2 * In}}{2 * C_a * K * An^2}$$

de donde C_a y K son constantes que ya han sido determinadas.

- Ahora para el cálculo de las pérdidas por dielectricidad (celdas K), se tiene:

$$Kn = \frac{1}{Hn * \omega * C_a (1 + 2 * Jn * K * An^2)}$$

- Como punto final se realiza el cálculo de la conductividad eléctrica (celdas L):

$$Ln = \epsilon_0 * Kn * \omega$$

de donde ϵ_0 es constante.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para analizar las interacciones que ocurren en el sistema ZnS - CuSO₄ - XEK mediante la técnica de impedancia a altas frecuencias, se utilizó el equipo: Vector Impedance Meter 4193A, Hewlett Packard el cual se muestra en la figura 3.1.

Como se muestra en dicha figura, este aparato proporciona el ángulo de fase y la magnitud del vector impedancia para diferentes frecuencias (el intervalo de frecuencias en el que se opera es de 0.4 - 110 Mhz), pero como se mencionó con anterioridad, los valores que proporciona este equipo son susceptibles de error, debido al ruido interno de éste mismo, por lo que es necesario corregir estos valores mediante el uso de las expresiones 2.1 y 2.2. De igual forma se muestra la celda de medición, la cual está construida de acero inoxidable y tiene una capacidad de 5 ml.; tiene un papel muy importante en la veracidad de los resultados, ya que como se sabe la capacitancia depende de la geometría de el capacitor, y en este caso el sistema se comporta como un capacitor.

A continuación, se muestra la metodología experimental utilizada en este trabajo:

- Primero se realizó una caracterización del mineral de llegada utilizando los métodos de absorción atómica y microscopio electrónico de barrido, encontrando una pureza de 98%, (65,66%Zn) el 2% restante correspondió al Fe.
- Posteriormente se efectuó una reducción del tamaño de partículas, para que todas estuvieran en un intervalo de tamaño de -70 a +100 mallas; esto se realizó utilizando un mortero y las cribas correspondientes para su clasificación.
- Para reproducir las condiciones existentes en un proceso de flotación de esfalerita, se utilizó un pH de 10, el cual se logró con una solución buffer de ácido bórico - borato de sodio.

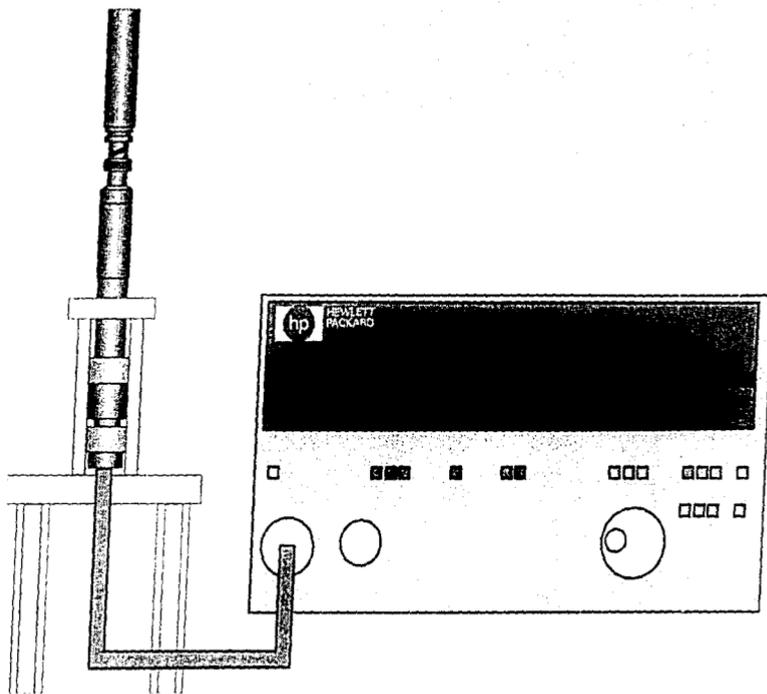


Figura 3.1 Equipo Medidor del vector de impedancia, Hewlett Packard.

- Una vez que se tiene la solución buffer y el mineral a la granulometría establecida, el paso siguiente fue la preparación de soluciones de CuSO_4 y XEK requeridas:

Las concentraciones de reactivos activador y colector utilizadas en base a las utilizadas a nivel industrial y para poder caracterizar de una mejor manera al sistema, fueron:

CuSO_4	XEK
$1 \times 10^{-2} \text{ M}$	$5 \times 10^{-3} \text{ M}$
$5 \times 10^{-3} \text{ M}$	$1 \times 10^{-3} \text{ M}$
$1 \times 10^{-3} \text{ M}$	$5 \times 10^{-4} \text{ M}$
$4 \times 10^{-4} \text{ M}$	$1 \times 10^{-4} \text{ M}$
$5 \times 10^{-4} \text{ M}$	
$6 \times 10^{-4} \text{ M}$	
$8 \times 10^{-4} \text{ M}$	
$1 \times 10^{-3} \text{ M}$	
$1 \times 10^{-3} \text{ M}$	

- Después de tener las soluciones preparadas, el paso a seguir fue la preparación de la pulpa.
- Después de varias pruebas realizadas se determinó que la cantidad apropiada de sólidos en la pulpa para hacer las mediciones era el tener un 4% de sólidos en peso en el tubo de acondicionamiento, con la finalidad de favorecer el equilibrio sólido - líquido.

En este caso, el % de sólidos que se manejó en la celda fue de 18.18%; debido a que con esto se garantizaba el equilibrio líquido - sólido y además se aseguraba que el capacitor que se forma en la celda, tuviera totalmente saturado de mineral la separación que existe entre las dos placas conductoras del capacitor.

En el caso de la esfalerita, resulta ser que dicha fracción volumínica de 0.404 es equivalente a el 18.18% de sólidos en peso. Pero debido a que esta es una fracción volumínica relativamente baja, en el sentido de que

físicamente no es muy densa, al vaciar a la celda se perdía una gran cantidad de sólidos, los cuales quedaban adheridos a las paredes del tubo de acondicionamiento. Por lo tanto, se decidió incrementar 0.05 g más de mineral en la pulpa, lo cual evidentemente repercutía en la fracción volumínica, pero se realizó con la finalidad de eliminar las pérdidas en el sistema y el % de sólidos de igual forma disminuía a 17.12, pero esto sólo durante el tiempo de acondicionamiento, es decir, en el tubo de acondicionamiento existía 1.05 g de ZnS + 24 ml de solución; la solución era el reactivo correspondiente, ya sea activador o colector, o ambos.

- Después de tener la pulpa en un tubo de acondicionamiento, se procedía a acondicionar el mineral. Es muy importante mencionar que la pulpa debe presentar una agitación vigorosa, para favorecer la interacción entre el mineral y el reactivo.

Esto se logró utilizando el Ro-tap, un recipiente (en este caso el pan), y una base para fijar a los tubos de ensaye.

Pruebas a realizar en el desarrollo de este trabajo

- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita seca
- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita en presencia de agua (pH=7).
- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita en presencia de solución buffer (pH=10).
- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita sin activar y en presencia de reactivo colector (pH=10), esto se llevó a cabo a diferentes porcentajes de sólidos y distintos tiempos de acondicionamiento.
- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita con el CuSO_4 , para el cual se realizó un barrido de concentraciones de reactivo activador (1×10^{-6} M - 1×10^{-2} M), para así poder determinar la concentración óptima de activador.
- Estudio de constantes dieléctricas de la cinética de activación con el CuSO_4 , para así determinar cuál es el tiempo óptimo de acondicionamiento del mineral. Los tiempos de acondicionamiento estudiados en el sistema esfalerita- CuSO_4 fueron

de 0, 5, 30 60, 90, 120 y 180 minutos. Cabe mencionar que se realizaron acondicionamientos para activar a la esfalerita hasta de 6 horas, en lo que se pudo observar que el % de sólidos que se estaba utilizando no era el adecuado.

- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita con acondicionamiento simultáneo de mineral y reactivo activador (variando las concentraciones antes mencionadas) y los reactivos colectores (variando concentraciones mencionadas), además de que también se realizaron las pruebas a distintos porcentajes de sólidos y distintos tiempos de acondicionamiento.
- Estudio de constantes dieléctricas de mineral de esfalerita activada en presencia de reactivo colector (XEK). El tiempo de acondicionamiento para el intervalo de concentraciones utilizado fue de 30 minutos.

Metodología de manejo de pulpas

Una vez que se lograba acondicionar la pulpa en los tubos de ensayo, el paso siguiente era vaciar la pulpa a la celda. Esto se realizaba de la siguiente manera:

- 1.- Primero se agitaba vigorosamente el tubo que contenía a la pulpa, una vez que se observaba homogénea a la misma, de inmediato se vaciaba a la celda de medición con mucho cuidado, pero lo más rápido posible.
- 2.- A continuación se hacían las conexiones correspondientes de la celda con el equipo encendido.
- 3.- Ya que estaba la celda en el lugar de medición, se dejaba reposar 2 minutos a el sistema, con el objeto de favorecer la separación de fases (mineral - solución).
- 4.- Una vez que ya se tenían en la celda el 18.18% sólidos, el cual equivale a una fracción volumínica de 0.404, se dejaba decantar la pulpa otros 3 minutos, para asegurar que se obtendría el equilibrio de fases en el sistema.
- 5.- Ya que se tenía el sistema listo, se realizaban las mediciones a las siguientes frecuencias: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 Mhz.: como se mencionó con anterioridad, se obtuvo información de los ángulos de fase y la magnitud del vector impedancia para cada frecuencia.

6.- Una vez terminada las mediciones, se procedía a limpiar perfectamente la celda, esto después de cada experimentación. De esta manera se evitaron errores por contaminación.

A continuación se presenta un ejemplo paso por paso que conjuga las ideas mostradas en los capítulos 2 y 3; el sistema que se eligió para ejemplificar es el sistema ZnS - Buffer a una frecuencia de 100 Mhz:

Donde :

$$\begin{aligned} |Z_s| &= 326.3\Omega \\ \theta_s &= -89.3^\circ \\ |Z_s| &= 9.1\Omega \\ \theta_s &= 86.0^\circ \end{aligned}$$

Experimentalmente se obtiene que :

$$\begin{aligned} |Z_m| &= 127\Omega \\ \theta_m &= -85.1^\circ \end{aligned}$$

Primeramente se debe conocer la magnitud real del vector de impedancia:

$$R_s = \frac{(|326.3| \cos(-85.1) - |6.45| \cos(-89.3)) * |6.45| * |326.3|}{(|326.3| \cos(-85.1) - |6.45| \cos(-89.3))^2 + (|6.45| \sin(-89.3) - |326.3| \sin(-85.1))^2} - |9.1| \cos(86) = 26.67165035\Omega$$

$$X_s = \frac{(|326.3| \sin(-85.1) - |127| \sin(-89.3)) * |127| * |326.3|}{(|326.3| \cos(-85.1) - |127| \cos(-89.3))^2 + (|127| \sin(-89.3) - |326.3| \sin(-85.1))^2} - |9.1| \sin(86) = -214.6200417\Omega$$

$$|Z_s| = \sqrt{(26.67165035^2 + (-214.6200417)^2)} = 216.2709856\Omega$$

Una vez conocido el valor real de la impedancia, entonces se prosigue a conocer cual es el ángulo de fase real:

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{-216.270985}{26.67165035} = -82.91595479$$

Posteriormente se deben calcular los valores de R_x y C_x :

$$R_x = \frac{|214.6200417|}{\cos(-82.91595479)} = 1753.66498\Omega$$

$$C_x = -\frac{\text{sen}(-82.91595479)}{628.3185307 * 10^6 * |214.6200417|} * 1 * 10^{12} = 7.302875348 \mu F$$

A continuación se calcula la permitividad compleja, es decir, la constante dieléctrica y las pérdidas de dielectricidad:

El cálculo de la constante dieléctrica es:

$$\epsilon' = \frac{-0.1924657764 + \sqrt{0.1924657764^2 + (4 * 0.1924657764 * 7.268674106 * 10^{-6} * 100^2 * 7.302875348 + 2 * 0.1924657764 * 7.268674106 * 10^{-6} * 100^2)}}{2 * 0.1924657764 * 7.268674106 * 10^{-6} * 100^2} = 369512785$$

El cálculo de las pérdidas de dielectricidad es:

$$\epsilon'' = \frac{1}{1753.66498 * 628.3185307 * 10^6 * 0.1924657764 * (1 + (2 * 36.952745 * 7.268674106 * 10^{-6} * 100^2))} = 4.47502495$$

Por último, se calcula la conductividad eléctrica:

$$\sigma = 8.854187818 * 10^{-12} * 4.475028855 * 627.3263346 * 10^6 = 2.4856392 * 10^{-2} \Omega^{-1} m^{-1}$$

Ordenando la información ésta se presenta de la siguiente manera:

Frecuencia	θ_x	Z_x	R_x	C_x	ϵ'	ϵ''	σ
100	-82.91	216.2	1753.6	7.3028	36.951	4.47502	0.0248

CAPITULO IV

RESULTADOS

Para el desarrollo experimental fue necesario el llevar a cabo un gran número de pruebas, hasta poder lograr resultados satisfactorios, debido a que no se contó con información suficiente para el desarrollo de la técnica.

ETAPA 1 DETERMINACIÓN DEL % DE SÓLIDOS ADECUADO DE TRABAJO

La primera parte de esta experimentación consistió en poder encontrar el porcentaje de sólidos adecuado que se debía trabajar y así poder correr las pruebas necesarias para encontrar la o las concentraciones adecuada para los reactivos activador y colector para el proceso de flotación de esfalerita.

A continuación se muestran algunos resultados de las pruebas realizadas con los distintos porcentajes de mineral utilizados en esta etapa del desarrollo experimental.

Tabla 4.1 ZnS(-70 +100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6hrs. y con un 5.88% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{total}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	1141.61	-5.5	1146.9	26.75	139.02	1442	0.0401
1	1128.62	-9.68	1144.9	23.73	123.3	722.2	0.0401
2	1079.66	-17.4	1131.4	22.03	114.5	365.4	0.0406
5	892.5	-36.28	1107.2	21.10	109.65	149.30	0.0415
10	623.52	-53.9	1058.0	20.62	107.06	78.03	0.0434
20	361.38	-67.01	925.6	20.27	105.01	44.4	0.0494
30	248.96	-72.04	807.4	20.27	104.6	33.87	0.0561
40	197.17	-73.61	698.91	19.35	99.43	28.91	0.0643
50	159.61	-75.26	627.4	18.28	98.44	25.44	0.0707
60	136.5	-75.8	558.7	18.84	95.50	23.57	0.0786
70	117.62	-76.75	513.26	18.81	94.57	21.56	0.0839
80	104.07	-76.88	458.5	18.61	92.72	20.75	0.0923
90	91.72	-77.06	409.67	18.79	92.58	20.22	0.1012
100	84.02	-77.27	381.4	18.47	90.09	19.16	0.1065

Tabla 4.2 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 11.11% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{res}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	α
0.5	700.37	-6.2	704.5	49.07	254.9	2347.5	0.0652
1	688.87	-8.83	697.14	35.40	184.37	1186.12	0.0659
2	660.68	-14.31	681.8	29.70	154.73	606.3	0.0674
5	568.7	-28.4	646.6	26.6	138.28	255.6	0.0710
10	432.7	-41.9	581.5	24.5	127.5	141.9	0.0789
20	286.6	-52.4	470.77	22.01	114.02	87.20	0.0970
30	215.8	-57.9	406.3	20.81	107.41	66.9	0.1116
40	182.04	-59.9	363.5	18.91	97.19	55.61	0.1237
50	154.06	-62.4	333.3	18.32	93.6	47.9	0.1332
60	135.58	-63.8	306.97	17.55	89.12	42.90	0.1432
70	119.69	-65.5	288.6	17.28	87.10	38.53	0.1500
80	107.9	-65.5	271.2	16.90	84.51	35.32	0.1519
90	96.6	-67.5	252.6	16.91	83.75	33.10	0.1657
100	88.5	-67.90	235.7	16.64	81.65	31.36	0.1744

Tabla 4.3 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 15.78% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{res}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	α
0.5	1121.4	-5.12	1125.9	25.3	131.7	1468.9	0.0408
1	1104.1	-7.91	1114.8	19.8	103.16	741.7	0.0412
2	1070.25	-15.5	1111.12	19.9	103.8	372.1	0.0414
5	934.2	-27.9	1057.6	15.9	82.9	156.3	0.0434
10	724.7	-42.9	990.06	14.9	77.6	83.4	0.0463
20	475.3	-57.11	875.6	14.05	72.9	47.02	0.0523
30	343.3	-64.6	803.1	13.96	72.22	34	0.0567
40	279.2	-67.9	745.08	13.2	68.08	27.31	0.0607
50	230.4	-70.71	697.6	13.03	66.91	23.14	0.0643
60	199.51	-72.24	654.08	12.66	64.7	20.38	0.0680
70	172.01	-74.11	628.5	12.71	64.56	17.96	0.0699
80	152.9	-74.9	590.5	12.56	63.4	16.52	0.0735
90	134.54	-75.8	551.6	12.74	63.8	15.5	0.0776
100	121.76	-76.4	519.13	12.70	63.12	14.60	0.0812

Tabla 4.4 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 20% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	1885.7	-5.75	1895.32	16.92	87.94	872.6	0.0242
1	1858.3	-9.45	1883.9	14.06	73.09	438.93	0.0244
2	1780.93	-16.76	1859.9	12.88	66.96	222.28	0.0247
5	1485.9	-33.8	1788.1	11.91	61.91	92.46	0.0257
10	1076.57	-49.9	1673.3	11.31	58.77	49.37	0.0274
20	657.8	-63.7	1488.3	10.85	56.28	27.7	0.0308
30	454.12	-70.39	1353.6	11.00	56.96	20.21	0.0337
40	364.6	-72.9	1245.7	10.43	53.88	16.38	0.0364
50	295.01	-74.9	1135.8	10.41	53.61	14.28	0.0397
60	255.6	-75.9	1056.18	10.06	51.62	12.70	0.0423
70	219.6	-77.5	1015.05	10.10	51.56	11.22	0.0426
80	194.7	-78.1	944.14	9.90	50.72	10.45	0.0465
90	170.7	-78.7	871.4	10.15	51.24	9.94	0.0497
100	154.6	-79.2	826.9	10.11	50.66	9.31	0.0517

Tabla 4.5 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 36.36% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	463	-6.91	466.3	82.7	430.04	3546.5	0.0985
1	448.4	-8.15	453.0	50.31	261.4	1825.3	0.1015
2	431.04	-11.67	440.1	37.3	194.04	939.2	0.1045
5	384.3	-21.65	413.5	30.5	158.75	399.6	0.1111
10	312.6	-31.4	366.2	26.5	137.6	225.3	0.1253
20	230.2	-39.14	296.9	21.81	112.9	138.3	0.1538
30	184.96	-43.21	253.7	19.63	101.36	107.18	0.1788
40	165.7	-44.2	231.47	16.76	86.27	87.55	0.1948
50	146.8	-46.25	212.3	15.66	80.21	75.7	0.2105
60	133.7	-47.13	196.6	14.53	74.07	67.46	0.2252
70	122.2	-48.65	184.98	13.96	70.73	60.79	0.2367
80	113.14	-49.33	173.61	13.33	67.19	56.03	0.2493
90	104.2	-50.5	163.9	13.1	65.52	52.03	0.2605
100	97.04	-50.8	154.44	12.66	62.90	49.05	0.2728

Tabla 4.6 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 57.17% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{total}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	3045.27	-5.04	3057.1	9.18	47.72	540.98	0.0150
1	3006.6	-9.61	3049.4	8.84	45.93	271.16	0.0150
2	2913.6	-17.4	3054.8	8.20	42.64	135.3	0.0150
5	2383.5	-36	2946.01	7.84	40.77	56.13	0.0156
10	1717.01	-52.8	2844.9	7.4	38.38	29.05	0.0161
20	1020.92	-66.85	2597.6	7.16	37.2	15.88	0.0176
30	676.8	-73.9	2443.2	7.53	39.03	11.22	0.0187
40	550.4	-76.17	2303.9	7.01	36.31	8.89	0.0197
50	436.2	-78.13	2121.3	7.14	36.85	7.7	0.0214
60	371.9	-79.5	2052.3	7.01	36.1	6.6	0.0220
70	316.2	-80.7	1964.4	7.1	36.4	5.86	0.0228
80	284.9	-81.12	1846.6	6.9	35.26	5.41	0.0240
90	249.4	-81.4	1673.4	7.0	35.67	5.26	0.0263
100	225.83	-81.97	1618.2	6.97	35.34	4.86	0.0270

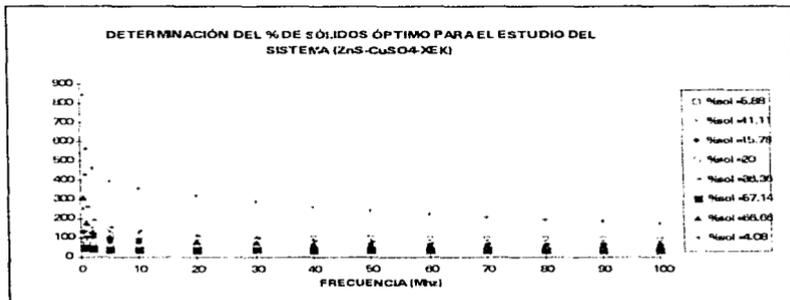
Tabla 4.7 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 6 hrs. y con un 66.66% de sólidos en peso, pH=5.

f	Z _{total}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	596.15	-6.4	599.8	59.4	308.85	2756.9	0.0766
1	586.9	-7.3	591.74	34.4	179.16	1397.4	0.0777
2	569.47	-10.28	578.7	24.9	129.61	714.31	0.0794
5	521.41	-19.31	552.5	20.18	104.8	299.2	0.0832
10	442.2	-29.93	510.3	17.95	93.24	161.82	0.0900
20	331.5	-40.61	436.8	15.62	80.9	94.2	0.1048
30	264.4	-46.6	385.5	14.6	75.4	70.8	0.1181
40	227.6	-49.13	348.02	13.21	68.13	58.47	0.1301
50	200.7	-51.8	324.5	12.46	64.02	49.79	0.1384
60	180.43	-53.14	300.8	11.76	60.16	44.41	0.1482
70	162.4	-55.19	284.5	11.49	58.5	39.85	0.1551
80	148.9	-56.17	267.5	11.09	56.19	36.71	0.1633
90	135.11	-57.43	251.03	11.03	55.49	34.35	0.1719
100	125.36	-58.21	238.9	10.8	53.95	32.21	0.1781

Tabla 4.8 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 2 hrs. Y con un 4% de sólidos en peso, pH=5.

t	Z _{real}	θ _r	R _r	C _r	e ^r	e ^o	σ
0.5	219.60	-2.63	221	162.72	845.47	7483.11	0.2081
1	213.73	-5.95	216.03	108.47	563.6	3827.3	0.2129
2	204.20	-11.71	209.82	89.58	465.41	1970.0	0.2191
5	178.88	-26.85	198.22	76.66	398.06	833.13	0.2317
10	140.5	-44.07	177.97	69.52	360.27	462.21	0.2571
20	94.90	-62.02	141.78	62.3	320.6	286.27	0.3185
30	72.56	-71.69	116.36	57.15	291.3	228.1	0.3806
40	59.73	-75.12	97.04	52.5	264.6	200.6	0.4454
50	51.35	-77.74	84	49.0	244	180.8	0.5029
60	45.58	-79.6	73.73	45.73	224.4	167.2	0.5581
70	41.11	-81.15	66.4	43.41	209.8	154.7	0.6024
80	37.72	-81.72	60.46	41.2	196.17	144.5	0.6431
90	33.99	-81.4	54.61	40.71	190.22	137.4	0.6879
100	31.68	-82.9	49.32	38.5	177.18	133.32	0.7417

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de la constante dieléctrica en función del % de sólidos en la celda de medición.



Gráfica 4.1 Determinación del % de sólidos a usar en las pruebas

ETAPA 2 ESTUDIO DE CTE. DIELECTRICA PARA DIVERSOS SISTEMAS

El desarrollo a seguir en esta técnica, fue el tomar en un tubo de acondicionamiento una pulpa de 4% de sólidos en peso, que posteriormente en la celda del equipo este porcentaje se incremento a un 18.18%, con lo que se lograron resultados satisfactorios. De este modo se corrieron las pruebas de interés para este estudio y los resultados obtenidos se presentan de la siguiente manera:

- 2.1) Mineral de esfalerita en seco, en presencia de agua y en presencia de solución buffer.
- 2.2) Mineral de esfalerita en presencia de reactivo colector y en ausencia de activador.
- 2.3) Mineral de esfalerita en presencia de reactivo activador
- 2.4) Pruebas de cinética de activación de esfalerita con CuSO_4 .
- 2.5) Mineral de esfalerita en presencia de reactivos activador y colector.
- 2.6) Pruebas de esfalerita activada en presencia de reactivo colector.

Etapa 2.1 Sistemas de ZnS: en seco, en agua y en buffer

Tabla 4.9 ZnS(-70+100 mallas) en polvo.

f	Z_{real}	θ_s	R_s	C_s	e'	e''	σ
0.5	629042	-79.27	3380636	0.49	2.58	0.48	0.000013
1	330000	-89.99	2.21e11	0.48	2.5	0	0.0000
2	165178	-88.69	7245768	0.48	2.5	0.05	5.56E-6
5	64288	-89.8	18458729	0.49	2.57	0.008	2.22E-6
10	31825	-88.73	1443347	0.49	2.59	0.057	3.22E-5
20	16741	-89.5	1926325	0.47	2.46	0.0214	2.38E-5
30	5456.3	-89.5	634399	0.97	2.7	0.004	6.67E-6
40	8139.94	-88.5	316444	0.48	2.53	0.006	1.33E-5
50	4847.44	-87.2	99544	0.65	2.6	0.16	4.45E-4
60	5338.06	-87.4	121247	0.49	2.57	0.11	3.67E-4
70	3939.5	-87.78	101721	0.57	2.99	0.11	4.28E-4
80	3898.7	-87.52	90209	0.50	2.64	0.11	4.89E-4
90	3234.07	-86.49	52922.1	0.54	2.83	0.17	8.51E-4
100	3080.2	-86.19	46455	0.51	2.67	0.17	9.45E-7

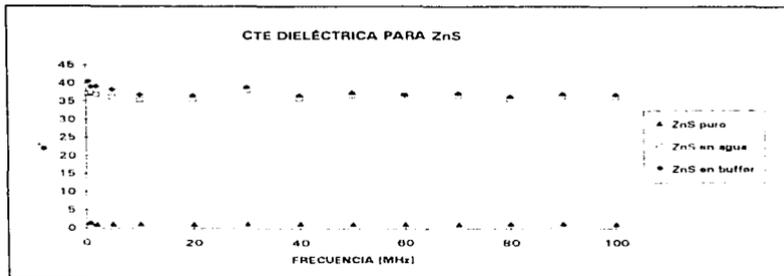
Tabla 4.10 ZnS(-70+100 mallas) + agua

f	Z _{real}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	9211.82	-11.92	9415.13	7.14	37.107	175.5	.0048
1	8670.33	-23.03	9421.54	7.18	37.319	87.76	0.0048
2	7111.12	-39.45	9210.29	7.11	36.95	44.89	0.0049
5	4065.66	-63.22	9024.55	6.98	36.31	18.52	0.0051
10	2256.55	-75.71	9024.77	6.82	35.47	9.15	0.0050
20	1148.57	-82.43	8727.18	6.86	35.64	4.72	0.0052
30	719.54	-85.31	8813.83	7.34	38.08	3.11	0.0051
40	573.23	-86.31	8926.95	6.92	35.84	2.29	0.0050
50	447.63	-86.60	7560.51	7.09	36.63	2.15	0.0059
60	371.59	-87.25	7760.9	7.13	36.69	1.74	0.0058
70	317.86	-87.64	7728.47	7.14	36.65	1.48	0.0057
80	284.66	-87.47	6460.8	6.98	35.68	1.54	0.0068
90	247.02	-87.35	5346.61	7.15	36.37	1.64	0.0082
100	222.61	-87.74	5560.2	7.14	36.16	1.38	0.0076

Tabla 4.11 ZnS(-70+100 mallas) + buffer (pH=10)

f	Z _{real}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	2184.16	-2.63	2186.5	6.82	35.44	756.36	0.0210
1	2189.14	-5.95	2201.0	7.54	39.18	375.7	0.0209
2	2141.72	-11.71	2187.31	7.54	39.21	189.02	0.0210
5	1947.8	-26.85	2183.3	7.38	38.35	75.73	0.0210
10	1556.73	-44.07	2166.75	7.11	36.93	38.14	0.0212
20	994.15	-62.02	2119.28	7.06	36.7	19.4	0.0215
30	669.4	-71.69	2131.3	7.52	38.99	12.86	0.0214
40	541.3	-75.12	2108.9	7.1	36.75	9.71	0.0216
50	428.14	-77.74	2016.7	7.26	37.49	8.1	0.0225
60	363.8	-79.6	2025.8	7.17	36.91	6.67	0.0222
70	308.3	-81.15	2005.07	7.28	37.35	5.73	0.0223
80	276.57	-81.72	1921.2	7.11	36.36	5.2	0.0231
90	239.5	-81.4	1605.9	7.3	37.11	5.48	0.0274
100	216.2	-82.9	1753.6	7.3	36.95	4.47	0.0248

En la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento de la constante dieléctrica para los tres casos anteriores, en función de la frecuencia.



Gráfica 4.2 Cte. Dieléctrica para ZnS seca, en agua y en buffer

Etapa 2.2 Sistema ZnS-XEK sin activación

Tabla 4.12 ZnS(-70+100 mallas)+XEK(5×10^{-3} M)+Acond. de 30 min., pH=10

f	Z _{real}	θ _z	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	727.67	-0.86	727.7	6.61	49.36	2272.5	0.0632
1	726.37	-2.44	730.64	9.30	48.35	1132.7	0.0630
2	725.03	-4.80	727.5	9.19	47.7	568.2	0.0632
5	695.05	-11.05	708.2	8.78	45.65	233.4	0.0649
10	661.39	-20.88	707.92	8.58	44.56	116.7	0.0649
20	562.25	-36.74	701.6	8.46	43.93	58.77	0.0653
30	451.79	-49.4	694.12	8.91	46.17	39.47	0.0658
40	388.50	-55.5	686.9	8.44	43.66	29.8	0.0663
50	324.26	-61.3	675.16	8.61	44.37	24.1	0.0670
60	280.99	-64.98	664.39	8.55	43.94	20.27	0.0676
70	247.83	-68.04	662.91	8.5	43.53	17.28	0.0672
80	221.11	-70.02	647.13	8.45	43.07	15.35	0.0683
90	194.66	-71.76	622.10	8.62	43.7	14.04	0.0702
100	175.67	-73.05	602.6	8.66	43.64	12.90	0.0717

Tabla 4.13 ZnS(-70+100 mallas) + XEK (1×10^{-3} M) + Acond. de 30 min.,pH=10

f	Z _{total}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	3369.2	-5.05	3382.4	8.33	43.29	488.94	0.0136
1	3335.5	-10.52	3392.6	8.71	45.30	243.73	0.0135
2	3160.8	-20.31	3370.5	8.74	45.41	122.66	0.0136
5	2469.3	-41.36	3289.97	8.51	44.25	50.26	0.0139
10	1666.09	-60.04	3336.2	8.27	42.98	24.77	0.0137
20	922.2	-73.72	3290.7	8.28	42.98	12.53	0.0139
30	596.03	-79.72	3341.49	8.75	45.36	8.2	0.0136
40	471.6	-81.62	3236.7	8.34	43.15	6.32	0.0140
50	369.2	-83.07	3064.3	8.55	44.11	5.31	0.0147
60	311.65	-84.24	3106.05	8.46	43.50	4.33	0.0144
70	266.3	-85.11	3127.6	8.50	43.51	3.66	0.0142
80	235.2	-85.13	2771.6	8.42	42.91	3.58	0.0159
90	204.2	-85.35	2524.4	8.63	43.71	3.46	0.0173
100	183.3	-85.59	2387.04	8.65	43.58	3.25	0.0180

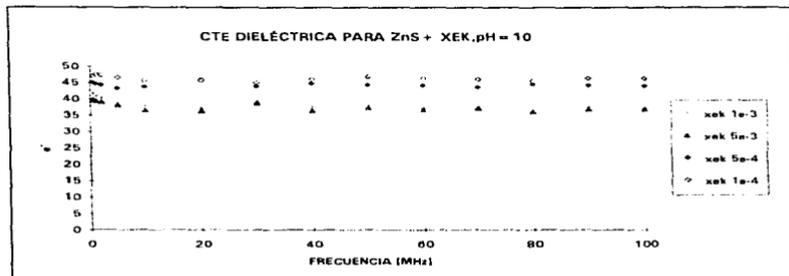
Tabla 4.14 ZnS(-70+100 mallas) + XEK (5×10^{-4} M) + Acond. de 30 min.,pH=10

f	Z _{total}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	4883.04	-7.99	4930.9	9.06	47.08	335.4	0.0093
1	4760.8	-15.89	4950.2	9.15	47.58	167.04	0.0092
2	4267.4	-29.25	4891.25	9.11	47.34	84.52	0.0094
5	2859.6	-53.83	4845.6	8.98	46.48	34.12	0.0086
10	1700.94	-69.57	4872.94	8.76	45.54	16.95	0.0094
20	886.8	-79.28	4771.6	8.81	45.75	8.64	0.0096
30	567.7	-83.20	4799.18	9.27	48.05	5.70	0.0095
40	444.03	-84.68	4790.4	8.92	46.10	4.26	0.0094
50	349.18	-85.43	4384.6	9.08	46.81	3.70	0.0102
60	293.08	-86.16	4380.5	9.03	46.35	3.07	0.0102
70	252.18	-86.68	4365.02	9.00	46.01	2.62	0.0102
80	221.77	-85.56	3706.2	8.95	45.55	2.67	0.0118
90	192.63	-86.47	3132.9	9.16	46.34	2.78	0.0139
100	172.63	-86.84	3136.09	9.20	46.27	2.47	0.0137

Tabla 4.15 ZnS(-70+100 mallas) + XEK (1×10^{-4} M) + Acond. de 30 min., pH=10

f	Z _{real}	θ_s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	9050.4	-4.65	9854.18	8.72	46.27	97.3	0.0027
1	8621.7	-28.04	9768.4	8.67	45.09	84.64	0.0047
2	6674.9	-46.17	9638.7	8.60	44.68	42.89	0.0047
5	3471.5	-68.49	9464.1	8.53	44.32	17.46	0.0048
10	1866.4	-78.71	9537.3	8.63	43.43	8.66	0.0048
20	940.9	-84.22	9346.4	8.41	43.66	8.66	0.0096
30	596.5	-86.33	9325.6	8.87	45.97	2.93	0.0048
40	468.3	-87.2	9610.8	8.48	43.86	2.12	0.0047
50	365.4	-87.3	7782.3	8.70	44.84	2.09	0.0058
60	307.3	-87.91	8442.3	8.62	44.29	1.59	0.0053
70	262.9	-88.12	8031.2	8.64	44.2	1.42	0.0055
80	232.21	-87.8	6177.1	8.56	43.6	1.60	0.0071
90	200.71	-87.8	5403.4	8.80	44.57	1.61	0.0080
100	180.95	-87.9	5035.6	8.78	44.24	1.54	0.0085

A continuación se muestra la gráfica para las tablas de la etapa 2.2 (cte. dieléctrica en función de la frecuencia).



Gráfica 4.3 Cte. Dieléctrica para ZnS sin activar + reactivo colector (XEK)

Etapa 2.3 Sistema ZnS-CuSO₄

Tabla 4.16 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (1x10⁻⁶ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	9499.73	-22.19	10258.8	12.65	67.76	161.19	0.0044
1	7807.7	-38.42	9965.8	12.66	65.81	82.97	0.0048
2	5278.4	-55.31	9275.3	12.39	64.40	44.57	0.0049
5	2547.16	-69.76	7364.2	11.72	60.91	22.45	0.0062
10	1415.8	-75.41	5623.6	10.87	56.49	14.7	0.0081
20	757.3	-78.5	3804.2	10.29	53.41	10.83	0.0120
30	501.6	-80.5	3049.0	10.43	54.0	8.97	0.0149
40	402.2	-81.0	2586.2	9.77	50.4	7.9	0.0175
50	319.9	-81.5	2179.09	9.83	50.63	7.45	0.0207
60	277.63	-81.4	1860.8	9.44	48.47	7.22	0.0241
70	237.6	-82.3	1776.2	9.4	48.42	6.42	0.0250
80	210.6	-82.1	1549.5	9.35	47.55	6.38	0.0283
90	184.12	-82.13	1376.5	9.51	48	6.31	0.0315
100	166.9	-82.4	1261.8	9.44	47.44	6.13	0.0341

Tabla 4.17 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (1x10⁻⁵ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	7194.16	-38.35	9174.73	27.45	142.66	180.26	0.0050
1	4909.5	-50.2	7673.3	24.9	129.44	107.7	0.0059
2	3082.3	-57.5	5747.3	21.7	113.21	71.93	0.0080
5	1636.5	-63.5	3680.2	17.4	90.5	44.9	0.0124
10	983.8	-67.2	2539.8	14.9	77.44	32.52	0.0180
20	574.1	-70.5	1725.2	13.07	67.77	23.87	0.0265
30	399.23	-73.2	1386.0	12.7	65.38	19.71	0.0328
40	323.8	-73.8	1165.0	11.8	60.88	17.5	0.0389
50	264.03	-74.7	1005.9	11.63	59.79	16.09	0.0447
60	232.11	-75.07	901.12	11.04	56.53	14.85	0.0495
70	200.3	-76.1	836.4	11.01	56.11	13.57	0.0528
80	178.11	-76.15	748.7	10.7	54.64	13.13	0.0584
90	158.25	-76.3	671.0	10.8	54.66	12.8	0.0640
100	143.5	-76.7	626.4	10.79	53.95	12.24	0.0680

Tabla 4.18 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (1x10⁻⁴M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{total}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	5807.7	-30.8	6762.8	28.06	145.8	244.5	0.0068
1	4255.6	-44.3	5953.4	26.15	135.88	138.89	0.0077
2	2759.5	-53.8	4677.1	23.2	120.9	88.4	0.0098
5	1485.6	-60.6	3034.6	18.6	97.05	54.47	0.0151
10	914.71	-64.29	2108.7	15.6	81.40	39.16	0.0217
20	545.2	-67.6	1434.2	13.5	69.99	28.7	0.0319
30	385.8	-70.4	1151.7	12.95	67.02	23.72	0.0395
40	314.9	-71	968.2	11.94	61.62	21.05	0.0468
50	259.2	-72.1	847.6	11.68	60.06	19.09	0.0531
60	229.21	-72.5	763.8	11.03	56.52	17.52	0.0584
70	198.81	-73.6	704.6	10.97	55.9	16.12	0.0627
80	178.23	-73.8	642.12	10.72	54.33	15.32	0.0681
90	158.1	-74.2	581.8	10.76	54.2	14.84	0.0743
100	143.82	-74.61	542.2	10.66	53.36	14.15	0.0787

Tabla 4.19 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (4x10⁻⁴M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{total}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	935.1	-10.6	951.33	62.63	325.4	1738.4	0.0483
1	880.8	-17.56	923.9	54.5	283.3	894.9	0.0497
2	752.2	-28.06	852.4	49.77	258.5	484.9	0.0539
5	502.11	-39.9	654.47	40.66	211.18	252.5	0.0702
10	351.13	-43.67	485.5	31.30	162.44	169.91	0.0945
20	246.74	-46.12	356.02	23.24	120.37	115.32	0.1283
30	201.63	-48.67	305.36	19.75	101.97	89.07	0.1465
40	176	-49.9	273.23	17.3	88.92	74.12	0.1649
50	154.87	-52.03	251.73	16.20	82.95	63.77	0.1773
60	140.07	-53.14	233.54	15.15	77.17	56.72	0.1893
70	126.94	-54.94	208.18	14.66	74.21	50.75	0.1976
80	116.57	-55.94	208.18	14.13	71.10	46.57	0.2072
90	106.5	-57.3	197.14	13.97	69.73	43.06	0.2156
100	98.83	-58.06	186.85	13.66	67.67	40.29	0.2241

Tabla 4.20 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	O _x	R _x	C _x	e'	e''	σ
0.5	219.60	-2.63	221	162.72	845.47	7483.11	0.2081
1	213.73	-5.95	216.03	108.47	563.6	3827.3	0.2129
2	204.20	-11.71	209.82	89.58	465.41	1970.0	0.2191
5	178.88	-26.85	198.22	76.66	398.06	833.13	0.2317
10	140.5	-44.07	177.97	69.52	360.27	462.21	0.2571
20	94.90	-62.02	141.78	62.3	320.6	286.27	0.3185
30	72.56	-71.69	116.36	57.15	291.3	228.1	0.3806
40	59.73	-75.12	97.04	52.5	264.6	200.6	0.4464
50	51.35	-77.74	84	49.0	244	180.8	0.5029
60	45.58	-79.6	73.73	45.73	224.4	167.2	0.5581
70	41.11	-81.15	66.4	43.41	209.8	154.7	0.6024
80	37.72	-81.72	60.46	41.2	196.17	144.5	0.6431
90	33.99	-81.4	54.61	40.71	190.22	137.4	0.6879
100	31.68	-82.9	49.32	38.5	177.18	133.32	0.7417

Tabla 4.21 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (6x10⁻⁴ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	O _x	R _x	C _x	e'	e''	σ
0.5	946.5	-7.88	955.54	48.13	239.69	1730.69	0.0481
1	896.46	-15.82	931.79	48.42	251.60	887.42	0.0493
2	768.51	-27.19	864.03	47.32	245.67	478.45	0.0532
5	514.23	-37.71	650.03	37.86	196.66	254.24	0.0707
10	379.35	-41.81	509.02	27.97	145.18	162.11	0.0901
20	298.06	-44.83	420.31	18.82	97.52	97.81	0.1088
30	227.15	-47.90	338.84	17.33	89.51	80.40	0.1341
40	201.85	-50.20	315.36	15.14	87.98	64.38	0.1432
50	155.66	-54.21	268.18	16.58	84.87	60.27	0.1676
60	137.11	-55.45	241.81	15.93	81.07	54.67	0.1824
70	126.33	-57.46	234.92	15.17	76.73	47.67	0.1856
80	120.93	-63.45	270.57	14.71	73.91	35.74	0.1590
90	117.00	-63.78	264.84	13.55	67.74	32.12	0.1608
100	110.43	-64.46	256.17	13.00	64.53	29.51	0.1641

Tabla 4.22 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (8x10⁻⁴ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	2581.38	-23.45	2813.82	49.07	254.97	587.75	0.0163
1	1958.59	-36.57	2438.85	48.42	251.57	339.05	0.0188
2	1514.30	-44.17	2111.22	36.61	190.24	195.81	0.0217
5	1145.62	-46.54	1510.70	15.98	113.02	135.6	0.0377
10	750.3	-50.2	977.3	15.76	92.45	104.2	0.0579
20	331.5	-52.3	436.8	15.62	80.9	94.2	0.1048
30	264.4	-59.7	385.5	14.6	75.4	70.8	0.1181
40	227.6	-65.5	348.02	13.21	68.13	58.47	0.1301
50	200.7	-70.2	324.5	12.46	64.02	49.79	0.1384
60	180.43	-73.4	300.8	11.76	60.16	44.41	0.1482
70	162.4	-78.1	284.5	11.49	58.5	39.85	0.1551
80	148.9	-80.2	267.5	11.09	56.19	36.71	0.1633
90	135.11	-82.5	251.03	11.03	55.49	34.35	0.1719
100	125.36	-81.5	238.9	10.8	53.95	32.21	0.1791

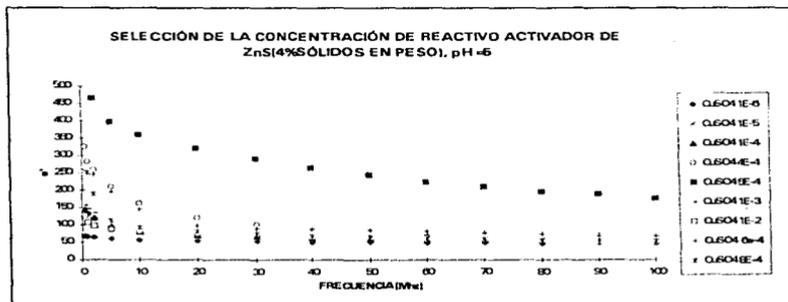
Tabla 4.23 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (1x10⁻³ M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	2617.2	-14.3	2700.8	30.02	155.99	612.3	0.0170
1	2362.7	-24.7	2600.5	28.13	146.2	317.9	0.0176
2	1872.5	-37.27	2353.1	25.73	133.71	175.7	0.0195
5	1143.25	-50.04	1780.14	21.34	110.86	92.86	0.0258
10	742.25	-56.65	1350.4	17.91	93	61.15	0.0340
20	458.03	-62.13	980.03	15.35	79.62	42	0.0467
30	333.1	-65.97	918.17	14.54	75.21	33.36	0.0556
40	273.83	-67.45	714.13	13.41	69.16	28.49	0.0633
50	229.31	-69.05	641.61	12.96	66.55	25.16	0.0699
60	200.55	-69.6	575.13	12.4	63.35	23.19	0.0774
70	175.05	-71.04	538.9	12.28	62.43	20.98	0.0817
80	157.07	-71.35	491.25	12	60.64	19.91	0.0776
90	139.45	-72.25	457.61	12.07	60.59	18.74	0.0938
100	127.23	-72.40	420.87	11.92	59.38	13.08	0.0727

Tabla 4.24 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (1x10⁻² M) + Acond. de 2 hrs., pH=5.

f	Z _{real}	o _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	1141.43	-5.0	1145.8	24.33	126.42	1443.3	0.0401
1	1125.73	-8.38	1137.8	20.61	107.10	726.70	0.0404
2	1080.58	-14.63	1116.81	18.60	96.66	370.19	0.0411
5	918.28	-29.37	1053.7	17	88.31	156.9	0.0436
10	695.5	-43.26	955.21	15.68	81.44	86.4	0.0480
20	457.65	-55.14	800.8	14.26	73.98	51.4	0.0571
30	335.35	-61.83	710.52	13.94	72.12	38.43	0.0641
40	275.65	-64.42	638.6	13.02	67.12	31.87	0.0709
50	230.6	-66.83	586.10	12.7	65.16	27.56	0.0766
60	201.36	-67.9	537.38	12.21	62.43	24.83	0.0828
70	175.51	-69.73	506.33	12.15	61.78	22.32	0.0869
80	157.15	-70.44	469.46	11.92	60.28	20.84	0.0927
90	139.35	-71.24	433.35	12.01	60.28	19.79	0.0990
100	126.71	-71.8	405.62	11.93	59.42	18.76	0.1043

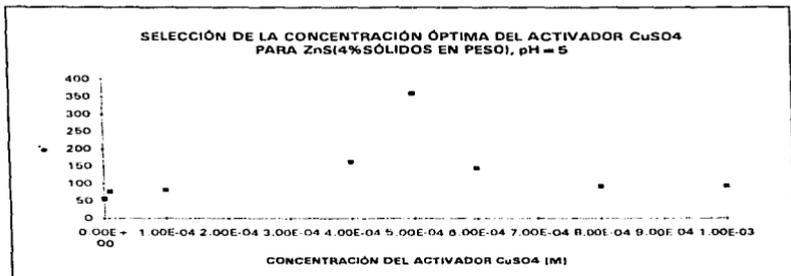
A continuación se muestra la gráfica de la etapa 2.3 (constante dieléctrica en función de la frecuencia).



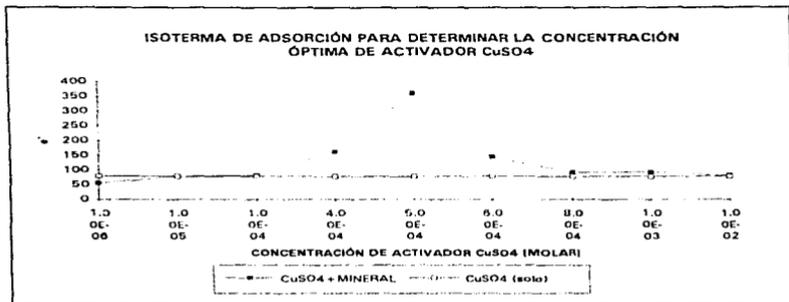
Gráfica 4.4 Esfalerita en presencia de CuSO₄ (1X10⁻⁴ - 1X10⁻² M)

Las concentraciones del activador CuSO_4 están dadas en moles por litro (M) y de donde se puede observar que la concentración que debe ser utilizada es la de 5×10^{-4} M.

Esto se puede visualizar mejor en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.5 Esfalerita en presencia de CuSO_4



Gráfica 4.6 Isoterma de adsorción para el activador a pH=5

Etapa 2.4 Cinética de Activación de ZnS en presencia de CuSO₄

Tabla 4.25 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴M) + Acond. de 30 min., pH=5.

f	Z _{real}	θ _a	R _a	C _a	e'	e''	σ
0.5	7809.7	-15.5	8104.4	10.9	56.60	204.06	0.0056
1	7046.41	-28.76	8038.65	10.87	56.47	102.86	0.0057
2	5358.3	-46.56	7793.2	10.78	56.02	53.08	0.0059
5	2768.9	-67.84	7350.4	10.64	55.32	22.49	0.0062
10	1519.1	-77.53	7059.2	10.23	53.13	11.70	0.0065
20	775.16	-82.96	6327.3	10.18	52.85	6.51	0.0072
30	499.25	-85.26	6051.9	1059	54.28	4.52	0.0075
40	388.4	-86.22	5894.5	10.22	52.78	3.46	0.0076
50	304.25	-86.34	4777.7	1044	53.72	3.39	0.0094
60	260.9	-86.61	4415.8	10.14	52.02	3.03	0.0101
70	220.4	-87.27	4643.3	10.30	52.54	2.45	0.0095
80	193.79	-87.17	3934.2	10.25	52.01	2.5	0.0111
90	167.78	-87.21	3453.3	10.52	53.04	2.5	0.0125
100	151.11	-87.3	3194.6	10.52	52.84	2.40	0.0133

Tabla 4.26 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴M) + Acond. de 60 min., pH=5.

f	Z _{real}	θ _a	R _a	C _a	e'	e''	σ
0.5	2155.5	-23.73	2572.2	54.51	282.7	642.95	0.0178
1	1941.60	-39.40	2512.70	52.03	270.33	329.08	0.0183
2	1695.35	-55.22	2972.27	38.55	200.30	139.09	0.0154
5	887.52	-59.56	1752.06	30.92	160.1	94.33	0.0262
10	766.10	-65.43	1842.9	18.89	98.10	44.80	0.0249
20	408.65	-69.67	1176.2	18.25	94.61	34.95	0.0388
30	285.3	-77.13	1281.6	18.12	93.61	21.24	0.0354
40	216.92	-80.52	1317.3	18.09	92.99	15.36	0.0341
50	179.33	-80.68	1108.3	17.51	89.55	14.45	0.0401
60	149.21	-83.33	1286.2	17.65	89.63	10.23	0.0341
70	129.67	-84.58	1373.7	17.45	87.93	8.09	0.0315
80	113.25	-85.42	1418.9	17.50	87.41	6.73	0.0299
90	102.50	-86.26	1571.21	17.21	85.17	5.31	0.0265
100	91.26	-86.94	1714.41	17.41	85.20	4.29	0.0238

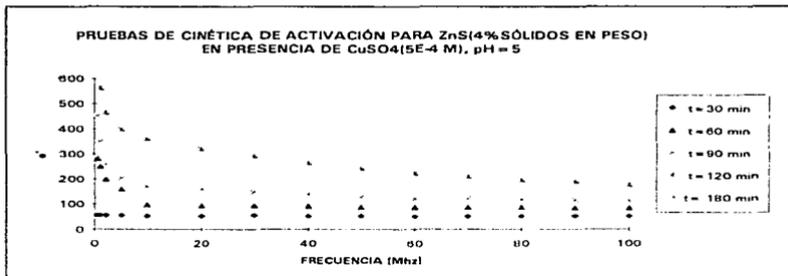
Tabla 4.27 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 90 min., pH=5.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	399.77	-6.27	402.2	86.96	451.82	4111.9	0.1143
1	397.62	-9.14	402.75	63.63	330.61	2053.09	0.1142
2	397.11	-14.40	410.01	49.86	259.07	1008.25	0.1121
5	337.17	-24.70	371.15	39.45	204.9	445.6	0.1239
10	288.39	-36.49	358.7	32.82	170.32	229.93	0.1279
20	185.20	-46.51	269.10	31.17	161.20	152.21	0.1693
30	141.00	-49.85	218.76	28.76	147.99	123.63	0.2063
40	120.78	-56.18	217.01	27.63	139.91	92.25	0.2052
50	108.3	-59.96	216.6	25.44	129.15	72.92	0.2028
60	95.78	-61.91	203.4	24.98	122.98	63.64	0.2124
70	81.62	-63.03	180.01	24.82	123.54	60.31	0.2348
80	76.34	-67.67	200.9	24.1	118.68	46.31	0.2061
90	70.57	-77.99	241.23	23.96	116.50	33.49	0.1676
100	66.81	-79.84	378.44	23.44	112.61	18.75	0.1043

Tabla 4.28 ZnS(-70+100 mallas) + CuSO₄ (5x10⁻⁴ M) + Acond. de 180 min., pH=5.

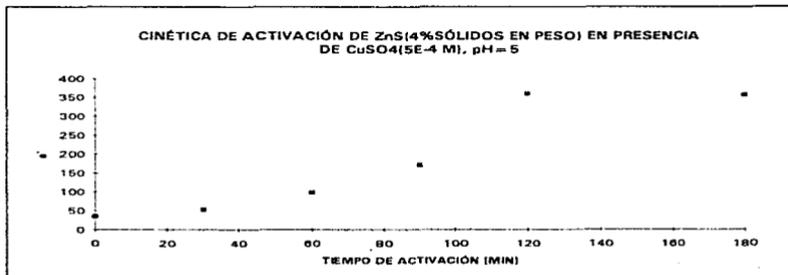
f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	220.60	-6.34	221.96	159.45	828.47	7450.70	0.2072
1	21.74	-8.28	217.75	10.75	554.65	3810.29	0.2119
2	205.20	-13.18	210.76	88.46	459.57	1961.23	0.2182
5	179.89	-25.41	19.16	75.92	394.21	829.20	0.2306
10	141.55	-37.74	179.00	68.82	356.66	459.57	0.2556
20	95.98	-47.85	143.00	61.45	316.41	283.89	0.3158
30	73.64	-51.25	117.68	56.18	286.76	225.76	0.3767
40	60.82	-51.80	98.38	51.40	259.28	198.17	0.4409
50	52.45	-52.06	85.32	47.86	238.38	178.37	0.4961
60	46.67	-51.51	75.00	44.48	218.81	164.88	0.5503
70	42.20	-51.36	67.59	42.08	203.85	152.60	0.5942
80	38.80	-50.93	61.56	39.80	190.02	142.66	0.6349
90	35.05	-50.94	55.63	39.17	183.69	135.78	0.6798
100	32.72	-49.35	50.23	36.90	170.59	131.89	0.7337

Para esta etapa se toman los valores obtenidos y se grafican (cte. dieléctrica en función de la frecuencia), además los valores de la tabla 4.23.



Gráfica 4.7 Cinética de activación de CuSO₄ sobre ZnS

Visto de otra manera, a continuación se presenta la siguiente gráfica (cte. dieléctrica en función del tiempo de activación).



Gráfica 4.8 Cinética de Activación de CuSO₄ sobre ZnS

Etapa 2.5 Sistema ZnS-CuSO₄-XEK con acondicionamiento simultáneo.

Tabla 4.29 ZnS(-70+100 mallas)+ XEK(5x10⁻³ M) +CuSO₄(5x10⁻⁴ M) +Acond. 30 min.

f	Z _{res}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	710.04	-3.58	711.43	28.03	154.66	2324.6	0.0641
1	700.8	-4.30	702.7	17.03	88.49	1176.6	0.0654
2	688.17	-5.84	691.7	11.76	61.14	597.6	0.0664
5	668.6	-11.07	681.35	9.14	47.56	242.6	0.0674
10	635.61	-19.3	673.49	8.27	43	122.70	0.0682
20	546.39	-33.10	652.3	7.95	41.28	63.23	0.0703
30	450.96	-44.56	633.01	8.25	42.77	43.30	0.0722
40	402.19	-53.72	679.71	7.97	41.23	30.12	0.0670
50	335.82	-54.90	584.17	7.75	40.00	27.90	0.0776
60	299.10	-58.28	568	7.54	38.80	23.74	0.0792
70	266.5	-61.30	554.98	7.48	38.35	20.71	0.0806
80	241.80	-63.96	533.83	7.33	37.45	18.71	0.0832
90	215.11	-65	509.11	7.45	37.86	17.27	0.0884
100	197.2	-66.32	491.10	7.39	37.38	15.97	0.0888

Tabla 4.30 ZnS(-70+100 mallas)+ XEK(1x10⁻³ M)+ CuSO₄ (1x10⁻² M)+Acond. 30 min.

f	Z _{res}	0 _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	385.6	-3.87	386.5	55.83	290.12	4278.2	0.1190
1	379.8	-4.16	380.8	30.43	158.13	2171.07	0.1207
2	372.4	-5.17	373.9	19.15	99.52	1105.6	0.1230
5	369.36	-8.4	373.9	13.39	69.60	442.19	0.1230
10	347.9	-15.42	360.9	12.16	63.19	228.9	0.1273
20	309.10	-25.99	343.89	11.28	58.52	119.8	0.1332
30	269.2	-34.61	327.13	11.19	57.93	83.62	0.1395
40	242.01	-38.62	309.7	10.26	52.99	65.92	0.1466
50	217.01	-43.05	297.02	10.01	51.54	54.65	0.1520
60	199.15	-45.64	284.86	9.52	48.85	47.17	0.1574
70	181.04	-48.83	275.05	9.45	48.29	41.52	0.1616
80	167.01	-50.51	262.6	9.19	46.74	37.71	0.1678
90	152.69	-52.47	250.69	9.18	46.45	34.74	0.1739
100	141.94	-53.94	241.2	9.06	45.58	32.15	0.1788

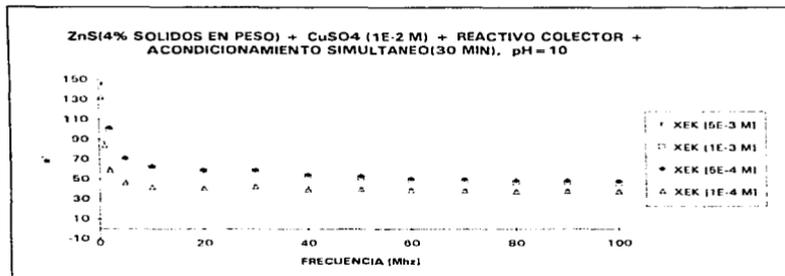
Tabla 4.31 ZnS(-70+100 mallas)+ XEK(5x10⁻⁴ M)+ CuSO₄(5x10⁻⁴ M)+ Acond. 30 min.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	379.68	-4.18	380.7	61.18	317.91	4344.18	0.1208
1	373.8	-4.27	374.9	31.74	164.95	2205.6	0.1227
2	366.41	-5.16	367.9	19.55	101.5	1123.7	0.1250
5	357.07	-8.84	361.3	13.71	71.24	457.5	0.1272
10	343.48	-15.19	355.9	12.14	63.05	232.11	0.1291
20	306.7	-28.05	341.4	11.39	59.12	120.6	0.1341
30	266.95	-35.03	326.04	11.40	59.04	83.89	0.1400
40	239.89	-39.58	311.25	10.56	54.56	65.58	0.1459
50	214.6	-43.93	298.01	10.28	52.96	54.44	0.1514
60	196.09	-46.86	286.81	9.87	50.61	46.81	0.1562
70	177.39	-49.99	275.9	9.81	50.11	41.33	0.1609
80	163.17	-51.99	265.03	9.60	48.80	37.3	0.1660
90	148.27	-53.89	251.66	9.63	48.66	34.52	0.1728
100	137.5	-55.41	242.3	9.52	47.82	31.90	0.1774

Tabla 4.32 ZnS(-70+100 mallas)+ XEK(1x10⁻⁴ M)+ CuSO₄(5x10⁻⁴ M)+ Acond. 30 min.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	642.8	-2.94	643.72	25.43	132.15	2569.19	0.0714
1	637.43	-3.71	638.7	16.15	83.94	1294.5	0.0720
2	628.2	-5.14	630.7	11.35	59.02	655.45	0.0729
5	613.85	-9.9	623.12	8.91	46.29	265.3	0.0737
10	591.4	-17.5	620.13	8.09	42.02	133.2	0.0741
20	521.01	-31.03	608.05	7.87	40.86	67.83	0.0754
30	437.5	-42.47	593.2	8.18	42.41	46.20	0.0771
40	385.34	-48.01	578.08	7.67	39.69	29.45	0.0655
50	329.88	-53.41	553.4	7.74	39.96	35.5	0.0887
60	293.77	-57.46	546.17	7.61	39.14	24.72	0.0825
70	263.00	-60.7	537.5	7.53	38.64	21.38	0.0832
80	238.36	-62.62	518.3	7.41	37.84	19.26	0.0857
90	211.45	-64.86	498.9	7.55	38.37	17.61	0.0881
100	194.2	-66.17	480.9	7.49	37.90	16.29	0.0906

A continuación se muestra la gráfica para la etapa 2.5 (cte. dieléctrica en función de la frecuencia).



Gráfica 4.9 Cte. Dieléctrica para sistemas con acondicionamiento simultáneo

Etapa 2.6 Sistema ZnS activada en presencia de reactivo colector (XEK)

Tabla 4.33 ZnS activada + XEK (5×10^{-3} M) + Acond. 30 min., pH=10.

f	Z_{real}	θ_s	R_s	C_s	e''	e''	σ
0.5	99.22	-3.68	99.43	206.15	1071.11	16632.4	0.4626
1	98.13	-3.03	98.27	85.32	488.60	9160.66	0.5096
2	96.82	-5.60	97.28	80.27	417.01	4248	0.4726
5	95.94	-10.11	97.45	58.27	302.15	1740.4	0.4841
10	95.89	-15.13	99.33	43.33	224.81	829.72	0.4616
20	96.16	-23.35	104.7	32.80	169.5	390.84	0.4348
30	95.34	-32.47	113.01	29.87	153.66	239.09	0.3990
40	95.16	-40.11	124.42	26.93	137.75	160.9	0.3580
50	93.82	-48.56	141.77	25.43	129.12	111.42	0.3099
60	93.43	-57.81	175.41	24.02	121.01	73.88	0.2466
70	92.01	-66.81	233.71	22.71	113.43	46.77	0.1821
80	90.76	-76.55	390.3	21.31	105.58	24.11	0.1073
90	87.41	-79.80	493.7	19.90	97.81	16.68	0.0835
100	84.79	-86.61	1434.4	18.74	91.34	4.26	0.0236

Tabla 4.34 ZnS activada + XEK (1×10^{-3} M) + Acond. 30 min., pH=10.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	86.22	-4.51	86.49	290.38	1508.6	19119.7	0.5318
1	84.73	-3.55	84.90	116.49	605.2	9739	0.5418
2	83.33	-8.08	84.17	134.36	697.2	4910.15	0.5463
5	82.36	-13.41	84.67	89.63	465.3	1949.8	0.5423
10	82.25	-16.48	85.78	54.89	284.4	959.9	0.5340
20	82.11	-25.22	90.77	41.30	213.27	449.9	0.5005
30	81.52	-36.15	100.97	38.39	196.95	266.12	0.4441
40	81.29	-43.03	111.21	33.40	170.8	178.8	0.3978
50	80.06	-51.65	129.05	31.18	157.5	121.21	0.3371
60	79.44	-59.65	157.2	28.81	144.27	81.48	0.2719
70	78.16	-68.71	215.32	27.10	134.38	50.06	0.1949
80	76.75	-76.19	321.64	25.16	123.63	28.82	0.1282
90	74.20	-82.46	566.17	23.62	114.97	14.29	0.0715
100	71.89	-88.53	2820.3	22.12	106.69	2.53	0.0140

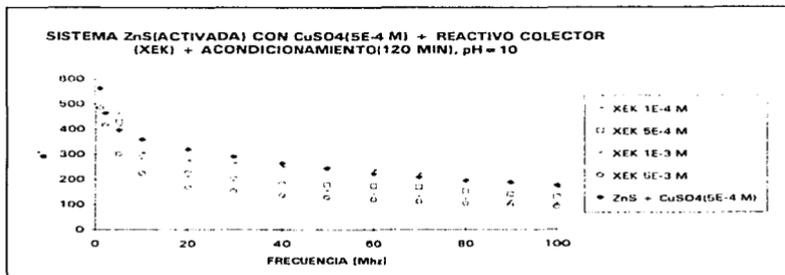
Tabla 4.35 ZnS activada + XEK (5×10^{-4} M) + Acond. 30 min., pH=10.

f	Z _{real}	θ _s	R _s	C _s	e'	e''	σ
0.5	65.12	-5.86	65.47	499.7	2596.2	25258	0.7025
1	63.53	-4.33	64.01	188.21	978.35	12915	0.7185
2	62.69	-6.90	63.15	152.69	793.17	6543	0.7280
5	61.87	-9.28	62.60	82.99	430.87	2633	0.7324
10	60.19	-12.43	63.11	55.58	288.97	1304.62	0.7258
20	61.43	-19.66	65.24	43.59	225.03	625.54	0.6960
30	60.81	-26.74	68.09	39.26	201.34	394.3	0.6580
40	60.48	-32.64	71.82	35.48	180.20	276.2	0.6146
50	60.08	-43.05	82.23	36.16	161.64	188.64	0.5247
60	60.76	-56	108.7	36.18	179.59	115.9	0.3868
70	60.69	-67.3	157.2	34.55	169.34	67.04	0.2610
80	60.10	-74.67	227.4	31.92	154.73	39.72	0.1767
90	59.59	-81.09	378.5	29.81	142.88	20.77	0.1039
100	57.23	-87.82	1507.5	27.78	131.75	4.60	0.0255

Tabla 4.36 ZnS activada + XEK (1×10^{-4} M) + Acond. 30 min., pH=10.

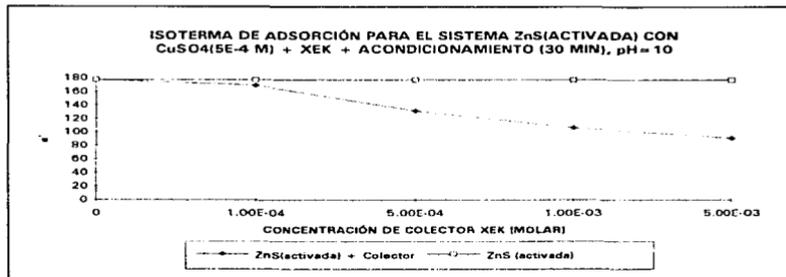
f	Z _{tot}	θ _c	R _c	C _c	e'	e''	σ
0.5	55.43	-8.11	55.99	810.8	4212.2	29531.2	0.8214
1	53.73	-5.88	54.02	303.77	1578.77	15302.8	0.8513
2	52.27	-4.57	52.43	121.31	630.21	7881.93	0.8769
5	51.11	-7.36	51.53	79.84	414.52	3204.13	0.8912
10	50.6	-10.81	51.51	59.00	305.83	1579.99	0.8790
20	49.73	-15.96	51.72	43.99	227.09	788.86	0.8777
30	48.57	-24.93	53.56	46.04	235.6	499.18	0.8331
40	48.16	-37.06	60.36	49.78	251.57	323.57	0.7200
50	47.36	-46.14	70.97	50.05	248.81	213.68	0.5943
60	47.15	-59.8	93.75	48.61	237.8	130.72	0.4363
70	46.65	-72.01	151.16	46.34	223.09	67.43	0.2625
80	45.83	-77.54	212.42	42.58	201.3	40.98	0.1823
90	44.65	-87.53	1038.68	39.56	185.33	7.25	0.0363
100	43.43	-89.4	4210.1	36.63	169.47	1.57	0.0087

Análogamente a lo que se realiza en cada etapa, a continuación se presenta la gráfica para ésta (cte. dieléctrica en función de la frecuencia)



Gráfica 4.10 Esferulita activada en presencia de reactivo colector

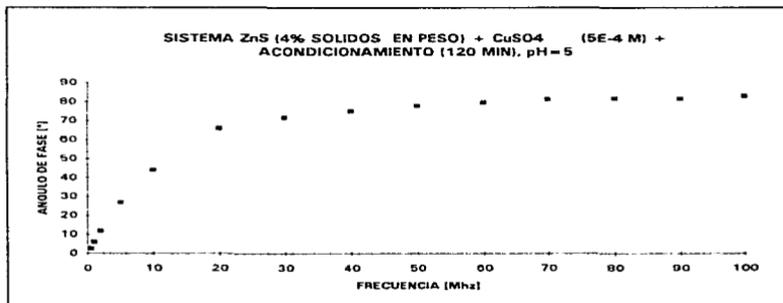
Como paso final de estas etapas, fue el encontrar la o las concentraciones más adecuadas de reactivo colector a utilizar en la flotación de ZnS, y se requiere la isoterma de adsorción, a frecuencia de 100 Mhz.



Gráfica 4.11 Isotherma de adsorción para el sistema ZnS(activada) - XEK

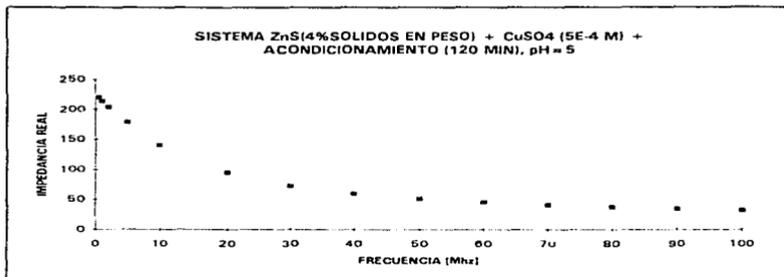
ETAPA 3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ESTUDIADOS

1) Ángulo de fase vs. frecuencia



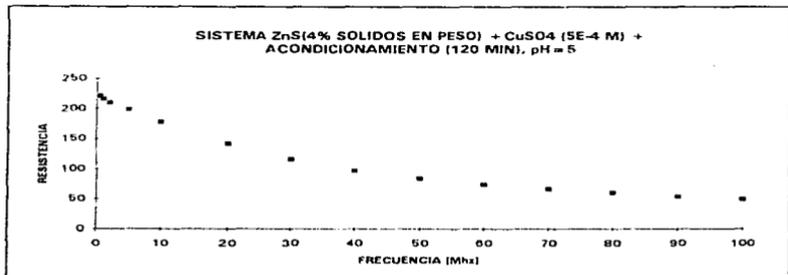
Gráfica 4.12 Ángulo de fase en función de la frecuencia

2) Impedancia real vs. frecuencia



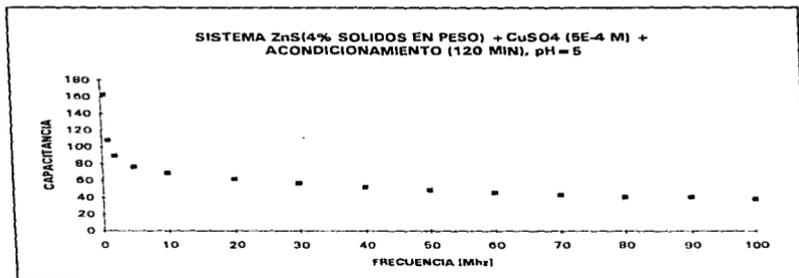
Gráfica 4.13 Impedancia real en función de la frecuencia

3) Resistencia vs. frecuencia



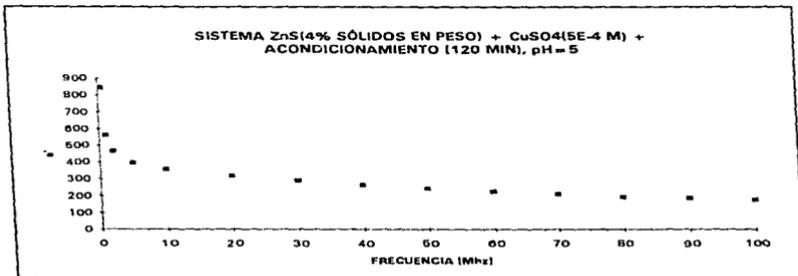
Gráfica 4.14 Resistencia en función de la frecuencia

4) Capacitancia vs. frecuencia



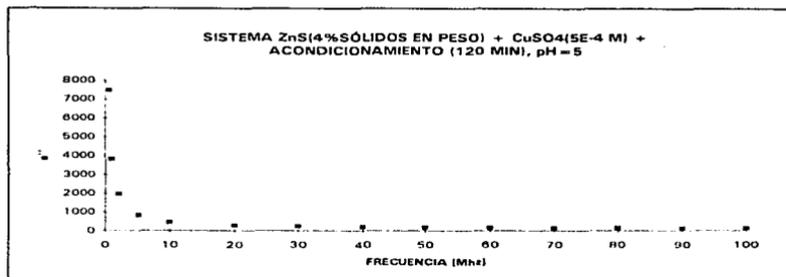
Gráfica 4.15 Capacitancia en función de la frecuencia

5) Constante dieléctrica vs. frecuencia



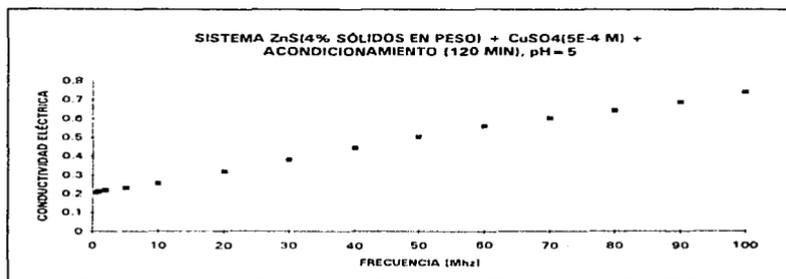
Gráfica 4.16 Cte. Dieléctrica en función de la frecuencia

6) Pérdidas por dielectricidad vs. frecuencia



Gráfica 4.17 Pérdidas por dielectricidad en función de la frecuencia

7) Conductividad eléctrica vs. frecuencia



Gráfica 4.18 Conductividad eléctrica en función de la frecuencia

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en tres etapas y a continuación se realiza el análisis de cada una de estas:

Etapa 1:

Consistió en encontrar el porcentaje de sólidos adecuado⁽¹⁹⁾, que se debería utilizar para conocer el comportamiento del sistema ZnS -CuSO₄ - XEK (mineral-activador-colector), y de esta manera determinar los valores de permitividad compleja⁽²⁰⁾ a los distintos valores de frecuencia.

Para ello se consideró el sistema ZnS - CuSO₄ con un acondicionamiento de 6 horas (tablas 4.1-4.9). Cabe mencionar que se realizaron pruebas con este sistema a los tiempos de 30, 60, 120 y 240 minutos, sin embargo, los resultados que se obtuvieron en estos últimos resultaron ser similares.

Se puede observar que el sistema que presenta la constante dieléctrica más elevada es aquel en donde el porcentaje de sólidos corresponde a 5.88% ($\epsilon' = 107.06$ a 10 Mhz), esto llevándolo a cabo en un tubo de acondicionamiento de 7ml de capacidad y el de menor es el que contenía un 57.14% ($\epsilon' = 38.38$ a 10 Mhz) de sólidos en peso, acondicionándolo en el mismo tubo.

Otro punto importante a mencionar en esta etapa es notar que los porcentajes de 15.78%, 66.66% y 20% de sólidos en peso tiene valores de constantes dieléctricas similares (gráfica 4.1).

A pesar de que se encontró que el sistema de 5.88% de sólidos en peso es en donde se obtuvo la constante dieléctrica más elevada, no fue tan satisfactorio para el estudio que se deseaba realizar ya que la cantidad de material que se utilizaba en esta prueba no era suficiente para poder cubrir en su totalidad al electuodo de la celda de medición (aproximadamente 0.25g) y es por ello que no tienen confiabilidad en estos resultados.

Dado que en la literatura se menciona que para poder obtener resultados confiables, se debe manejar una fracción volumínica de 0.4, entonces se optó por cambiar la técnica de trabajo utilizada por Solís⁽²¹⁾, en donde el acondicionamiento se realizó con tubos de una capacidad no muy grande (7 ml aproximadamente) y para ello se tomaron tubos en donde el porcentaje de sólidos

correspondiera a un 4% (durante el acondicionamiento de la pulpa, en tubos de 25 ml de capacidad) y poder garantizar que el electrodo quedara cubierto en su totalidad con el mineral. De esta forma se determinó que el % de sólidos antes mencionado es el que se utilizaría en este trabajo, lo cual se muestra en la tabla 4.9 y en la gráfica 4.1.

Etapas 2:

Una vez que se encontró cuál sería el % de sólidos a utilizar, se procedió a estudiar cuál era el comportamiento del mineral en presencia y ausencia de reactivos activador y colector.

Etapas 2.1

- El primer punto a conocer fue saber cuál era el comportamiento que presentaba el mineral de esfalerita en su estado natural, es decir se realizó el barrido de frecuencia para estudiar el mineral en polvo (-70 +100 mallas) y se obtuvo un valor de constante dieléctrica promedio $\epsilon' = 2.62$, posteriormente se realizaron mediciones en agua y en solución buffer, obteniéndose valores de $\epsilon' = 36.36$ y $\epsilon' = 37.40$ respectivamente.

Este incremento de constante dieléctrica se atribuye a que se está realizando las lecturas de un sistema líquido-sólido, en presencia de un electrolito (agua o solución buffer) y las propiedades eléctricas del mineral se incrementan. Se puede observar que el comportamiento del mineral en el electrolito es muy similar entre sí (gráfica 4.2).

Etapas 2.2

- En esta etapa se analizó el sistema ZnS - XEK (mineral-colector) en ausencia de reactivos activador (CuSO_4) y con acondicionamiento de 30 minutos (igual que la etapa anterior donde se llevaron a cabo pruebas de 30, 60, 120 y 240 minutos) y se observó que a medida que la concentración de reactivo colector se incrementa, la constante dieléctrica disminuye en una forma no muy considerable gráfica(4.3). Este comportamiento es debido a la posible formación de capas de metal xantato, modificando entonces las propiedades eléctricas del mineral siendo ligeramente

mayores, ya que la capa superficial del xantato de zinc confiere propiedades hidrofóbicas al mineral. Como se observa en la gráfica 4.3 los valores de constante dieléctrica para los sistemas a concentraciones de reactivo colector 1×10^{-3} M y 5×10^{-3} M son los más bajos $\epsilon' = 43.58$ y $\epsilon' = 43.64$ respectivamente y el de mayor es el de 5×10^{-4} M $\epsilon' = 46.27$. En comparación con el sistema mineral-agua, se puede observar que las propiedades eléctricas han mejorado por la presencia de reactivo colector, sin embargo es probable que no se existieran adsorciones considerables.

Etapa 2.3

- En esta parte del trabajo se analizó el sistema ZnS - CuSO_4 (mineral-activador), con el objeto de poder determinar cuál sería la concentración óptima de reactivo activador, capaz de modificar la superficie de la esfalerita y promover una mejor interacción del colector sobre ésta.

En esta etapa se realizó un barrido de concentraciones de CuSO_4 (1×10^{-6} M - 1×10^{-2} M) y se encontró que la concentración óptima a utilizar, fue de 5×10^{-4} M, debido a que a esta concentración de activador la esfalerita presenta las mejores propiedades eléctricas.

Esto se atribuye a que a esta concentración (5×10^{-4} M) el Cu^{2+} presenta una mejor depositación sobre el ZnS. En los estudios de tipo electrocinético realizados por D.W. Fuerstenau⁽²²⁾, los precipitados formados de CuS mostraron ser muy estables en la superficie del mineral y por consiguiente la activación resulta ser más eficiente. Con esta concentración el sistema se torna más catódico ($E^0 = 0.34 \rightarrow E^{5 \times 10^{-4} \text{ M}} = -0.2426$, para el caso de la primera reacción R1, mencionada en el apartado 1.5). Termodinámicamente es una reacción que ocurre espontáneamente (ΔG negativo). A una concentración mayor el efecto se invierte, probablemente debido a que se está llevando a cabo una redisolución de esta capa de activador que se ha depositado en la superficie del mineral y es por ello que la depositación que se logra con concentración más elevadas de CuSO_4 no es buena. Cabe mencionar también que con esto el activador, además de tornar conductor al

mineral le confiere propiedades de hidrofobicidad al sistema. Dicho valor de concentración concuerda con el obtenido en esta tesis.

El comportamiento que presenta el sistema en el intervalo de concentraciones de 1×10^{-6} M - 5×10^{-4} M, es que a medida que la concentración de activador se incrementa, se tiene una mejor activación de mineral y esto se refleja en un incremento de la constante dieléctrica. Sin embargo en el intervalo de 5×10^{-4} M - 1×10^{-2} M se observa que la constante dieléctrica disminuye conforme la concentración de activador se incrementa, por lo tanto el proceso de activación no resulta eficiente en este intervalo de concentraciones (probablemente el mineral se torna hidrofílico) y en una empresa, sería un gasto más el utilizar concentraciones más elevadas (gráfica 4.5).

En la gráfica 4.6 (isoterma de adsorción para el activador), se puede observar que la concentración de activador óptima es la de 5×10^{-4} M, ya que es donde el valor de constante dieléctrica es más elevado ($\epsilon' = 360.27$ a 10 Mhz), y si se compara con los valores obtenidos para el electrolito solo y electrolito con mineral, este último es el que presenta las mejores propiedades.

Etapa 2.4

- Una vez encontrada la concentración óptima de reactivo activador se procede a analizar la cinética de activación del CuSO_4 y para ello se realizaron pruebas de 0, 5, 30, 60, 90, 120 y 180 minutos de acondicionamiento del sistema $\text{ZnS} - \text{CuSO}_4$.

En esta etapa del trabajo se observó que a medida que se incrementa el tiempo de acondicionamiento del sistema, la activación del mineral de ZnS resulta ser más eficiente, esto debido a que los valores de constante dieléctrica se van incrementando.

Entonces realizados los experimentos se llega a la conclusión que el tiempo de activación óptimo en este trabajo es el de 120 minutos ($\epsilon' = 360.27$), que es cuando se presentan los valores mayores de constante dieléctrica.

Cabe mencionar que a nivel industrial esto resultaría muy costoso para la empresa, debido a que este tiempo de acondicionamiento en donde se presentan las mejores propiedades para ser flotado resulta ser demasiado grande.

Etapa 2.5

- En esta etapa se realizó el estudio del sistema $ZnS - CuSO_4 - XEK$ (mineral-activador-colector) con acondicionamiento simultáneo.

Se puede observar que el sistema que presenta una constante dieléctrica mayor es aquel donde la concentración de reactivo colector es de 5×10^{-4} M, $\epsilon' = 47.82$ (a 100Mhz) y el de constante dieléctrica más baja es el que tiene una concentración de 5×10^{-3} M como se muestra en la gráfica 4.9, entonces se puede decir que a medida que la concentración de reactivo colector se incrementa, la constante dieléctrica disminuye debido a la competencia que existe entre especies conductoras de sulfuro de cobre depositado superficial y metal xantato hidrofóbico.

Además se puede observar que a la frecuencia de 100 Mhz el valor de la constante dieléctrica es similar al del mineral en agua, esto debido a que a elevadas frecuencias el sistema tiende a desestabilizarse y no presenta alguna interacción entre el mineral y los reactivos.

Se observa que a bajas frecuencias en el sistema se está presentando una adsorción de reactivo colector o una depositación de reactivo activador y conforme esta se incrementa, el sistema tiende a alcanzar el equilibrio, sin que ocurra algún cambio en el sistema.

Otro aspecto importante a mencionar, es que si se comparan los productos de solubilidad del xantato etílico de zinc(XEZn) y el xantato etílico cuproso(XECu) 4.9×10^{-9} y 5.2×10^{-20} respectivamente, el primero de ellos es más soluble que el segundo y por lo tanto esta última especie es la que predominará probablemente en el sistema, además de que después de 50 seg se logra la formación de una primera capa de etil xantato⁽²²⁾ y conforme transcurre el tiempo estas capas se van incrementando.

Etapa 2.6

- Como etapa final se analiza el comportamiento que presenta el sistema ZnS - CuSO₄ - XEK (mineral-activador-colector).

En la gráfica 4.10 se puede observar que a medida que la concentración de reactivo colector se incrementa, la constante dieléctrica disminuye, esto debido a que la película de etil xantato y el dímero⁽¹²⁾, mostrados en reacción (R4), que se forma sobre la superficie de esfalerita activada, esta capa que se depositó es más compacta en comparación con la de menor concentración y por lo tanto las propiedades de hidrofobicidad que le proporciona el colector al mineral, son mayores a concentraciones más elevadas o también se puede decir que se tiene una mejor adsorción del colector.

En realidad al hacer el análisis de este sistema, la principal interacción que se lleva a cabo es entre el Cu⁺ y el XEK, debido a que la película formada por el activador es estable, debido a que el Cu²⁺ presenta una mayor afinidad por el S, en comparación con el Zn²⁺. Además de que el Cu²⁺ entra fácilmente al cuerpo reticular del mineral, por tener radios iónicos similares estos dos elementos.

Por lo tanto se encontró que el intervalo de concentración más apropiada de reactivo colector se encuentra en el intervalo de 1×10^{-4} - 5×10^{-4} , que es en donde se presenta una mayor constante dieléctrica y mejores propiedades eléctricas, además de que la diferencia entre los valores de constante dieléctrica ($\epsilon'' = 169.47$, $\epsilon'' = 131.75$ respectivamente a 100Mhz) es la máxima. Por lo tanto se tendrá una mejor flotabilidad en el mineral.

Etapa 3:

Como punto final a analizar en el desarrollo de este trabajo, es el analizar el comportamiento que presenta cada una de las variables que se mencionan, tomando como referencia la tabla 4.23, por ser una parte importante en el desarrollo del tema.

Primero se presenta la gráfica 4.12 del ángulo de fase contra frecuencia. En esta gráfica se puede observar como se incrementa el ángulo de fase al incrementarse la frecuencia, esto debido a que conforme se incrementa la frecuencia, el sistema en estudio tiende a comportarse como un capacitor y como se sabe, entre más capacitivo es un sistema, el ángulo de fase tiende a adquirir un ángulo de 90 grados.

La gráfica 4.13 corresponde a la Impedancia real contra frecuencia, donde se observa que a medida que la frecuencia en el sistema se incrementa, los valores que se obtienen de impedancia real disminuyen y tienden a una forma asintótica a partir de una frecuencia de 50 Mhz, por lo que se puede decir que a partir de esta frecuencia se ha logrado alcanzar el equilibrio líquido - sólido y entonces después de este intervalo los valores obtenidos tendrán una cierta confiabilidad.

En la gráfica 4.14 se presenta la Resistencia contra frecuencia, en donde se observa que la resistencia disminuye a medida que la frecuencia se incrementa y en esta gráfica no se observa un comportamiento asintótico.

A continuación se tiene la gráfica 4.15 donde se presenta la Capacitancia contra la frecuencia, en donde se puede observar que a bajas frecuencias la capacitancia presenta valores elevados y a frecuencias mayores tiende a disminuir, además se observa que a partir de la frecuencia de 50 Mhz se tiene un comportamiento asintótico en los valores de capacitancia, es por ello que a partir de esta frecuencia se puede tener confiabilidad en los resultados obtenidos.

En la gráfica 4.16 se presenta la constante dieléctrica contra la frecuencia y en esta gráfica se puede observar que a frecuencias menores a 20

Mhz, los valores de constante dieléctrica son muy elevados y, a partir de 20 Mhz se tiene una homogeneidad en los valores de constante obtenidos. Debido a que la gráfica presenta un comportamiento asintótico, es decir, que a partir de 20 Mhz la constante dieléctrica no cambia de forma tan severa como a bajas frecuencias.

En la gráfica 4.17 se presentan las Pérdidas por dielectricidad contra la frecuencia y se presenta un comportamiento similar al que se observa en la gráfica que se mencionó anteriormente (gráfica 4.16). Es decir que las pérdidas por dielectricidad o pérdidas de energía por calor en el sistema a partir de la frecuencia de 10 Mhz tiendan a tomar valores más pequeños conforme se incrementa la frecuencia en el sistema, logrando así que a las frecuencias más elevadas las pérdidas tienden a cero.

Por último, se presenta la gráfica de Conductividad eléctrica contra la frecuencia en donde se puede observar que la conductividad eléctrica se incrementa a medida que se incrementa el valor de la frecuencia, es decir, es directamente proporcional. Cabe mencionar que estos incrementos no son muy significativos, debido a que solo son centesimales, ya que si se utiliza una escala mayor, se podría notar que esta conductividad permanece constante durante el barrido de frecuencia que se lleva a cabo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

- 1) La técnica de IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS, resulto ser satisfactoria, para el estudio de un mineral no conductor, el cual presenta serios problemas a nivel industrial en la etapa de flotación, por presentar propiedades aislantes.**
- 2) La información obtenida en este trabajo resulta ser de gran importancia, debido a que con ello se proporciona información, la cual será útil en las plantas que se dedican a procesar minerales de ZnS (esfalerita) y de alguna manera puedan incrementar sus recuperaciones.**
- 3) Se encontró que el porcentaje de sólidos adecuados para el uso de la técnica de IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS, para un mineral de ZnS, es de 4% de sólidos en peso en el tubo de acondicionamiento.**
- 4) La concentración óptima de reactivo activador CuSO_4 , y pH sobre un mineral de ZnS son respectivamente de $5 \cdot 10^{-4}$ M y 5, valores donde la constante dieléctrica presenta el valor más elevado, lo que refleja mejores propiedades eléctricas y más posibilidades de ser flotado.**
- 5) El tiempo más adecuado para lograr una mayor activación de esfalerita (-70 +100 mallas y 4% de sólidos en peso), es de 120 minutos, debido a que a tiempos más elevados, el sistema mineral - activador se comporta de forma asintótica.**
- 6) El intervalo de concentración más apropiado de reactivo colector para la flotación de un mineral de esfalerita activada, se encuentra entre $1 \cdot 10^{-4}$ M - $5 \cdot 10^{-4}$ M, por presentar los valores más elevados de constante dieléctrica y que de una a otra concentración, la variación no es muy grande.**

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES

- Como primer punto a mencionar, es el poder lograr de alguna forma el diseño de otro tipo de celda, en la cual las lecturas que se realizan sean de una forma más eficiente.
- Haciendo referencia a la activación del mineral de esfalerita, se podría trabajar con otro tipo de activadores, como es Fe, Pb, Ag, etc. y de esta manera observar y analizar cual es el comportamiento que presenta
- En cuanto a la cinética de activación, se propone el realizar las pruebas en intervalos más cortos, es decir que se lleven pruebas en intervalos de 10 minutos hasta llegar al tiempo de 120 minutos.
- Utilizar otros intervalos de concentración de reactivo colector (XEK), ya sea a concentraciones más elevadas o menores a la aquí utilizadas.
- Se propone el uso de otros reactivos colectores, ya sean de cadenas más cortas o más largas y en función de esto realizar una comparación entre éstos.
- Realizar pruebas con pulpas obtenidas del proceso industrial y poder comparar estos resultados con las obtenidos en este trabajo.
- Realizar las pruebas de flotación a nivel laboratorio, con las concentraciones aquí propuestas como adecuadas, para así poder discernir en qué tan confiables son los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

1.- Willis B.A., TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES.

Tratamiento de menas y recuperación de minerales. Editorial Limusa. Primera edición. México , 1987, pags. 346-349, 486-488.

2.- D:W: Fuerstenau, Froth Flotation, 50th Aniversary, Editorial Society of Mining Engineers of AIME, New York, 1962, pag. 9

3.- Zavala M., MANUAL DE FLOTACIÓN, Septiembre de 1993, pags. 8, 18-21.

4.- Leja Jan, SURFACE CHEMISTRY OF FROTH FLOTATION, Plenum Press. U.S.A. 1982, pags. 20, 229-259

Trans. Am. Inst. Engrs. 169, 1946, pags. 248 - 258.

5.- Ibidem, pags. 346-349.

6.- Gaudin A.M., PRINCIPLES OF MINERAL DRESSING, McGraw-Hill. U.S.A. 1967. pags. 334 - 358.

7.- Ibidem, pag. 348.

8.- Prof. V.A. Glembotskii, FLOTATION, Editorial Primary Sources, New York, 1972, pags. 70-115.

9.- Maurice C. Fuerstenau, Jan D. Miller, Martin C. Kuhn, CHEMISTRY OF FLOTATION, Editorial AIME, New York, 1970, pag. 28-31, 68-71.

10.- Gaudin A.M. and Preller G.S., SURFACE AREAS OF FLOTATION CONCENTRATES AND THE THICKNESS OF COLLECTOR COATINGS, Trans. Am. Inst. Engrs. 169, pags. 248-258.

- 11.- Valverde Valdes José Manuel, IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA DE LA GALENA EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN, Tesis de licenciatura, México 1992, Facultad de Química, UNAM, pag. 35
- 12.- Mckelvey J.P and Grotch Howard, FÍSICA PARA CIENCIAS E INGENIERÍA, Tomo 2, Editorial Harla, México 1981, pags. 676-684, 911.
- 13.- Bueche Frederick J., FÍSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS E INGENIERÍA, Tomo 2. Editorial McGraw-Hill, México 1990, pags. 238-241, 262- 265.
- 14.- Pang J., Briceño A. and Chander., A STUDY OF PYRITE / SOLUTION INTERFACE BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY. J. Electrochem. Soc. Vol. 137, No. 11, November 1990, pags. 3447 - 3455.
- 15.- Francis W. Sears, Mark W. Zemansky and Hugh D. Young., FÍSICA UNIVERSITARIA, Editorial Addison - Wesley Iberoamericana, México D.F. 1986. pags 599 - 607.
- 16.- Purcell E.M., ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO, Volumen 2. Berkeley Physics Course. Segunda edición, Editorial Reverte S.A, España 1990, pags. 338 - 342.
- 17.- Halliday D. and Resnick R., FÍSICA, PARTE 2. C.E.C.S.A., México 1991, Decimoprimer edición. Pags. 18, 315 - 319.
- 18.- Genesca Llongueras Joan., APUNTES DEL CURSO DE DIELECTRICIDAD Universidad de Nancy. Francia, 1992.
- 19.- Grosse Constantino and Greffe Jean - Louis, PERMITTIVITÉ STATIQUE DES ÉMULSIONS, Journal de Chimie Physique 1979, 76, No. 4. pags. 309 - 310.

20.- Thiebaut J.M., Roussy G., Chlihi K. and Bessiere, DIELECTRIC STUDY OF THE ACTIVATION OF BLENDE WITH CUPRIC IONS, J. Electroanal. Chem. 262, 1989, pags. 131 - 144.

21.- Solís Gallardo Armando, Tesis de licenciatura, México 1996, Facultad de Química, UNAM, pags. 38-53

22.- D.W. Fuerstenau, FLOTATION OF SULPHIDE MINERALS, Editado por K.S. Eric Forssberg, Amsterdam-Oxford-New York-Tokio 1985, pags. 141-174