

20
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DE DIELECTRICIDAD DEL SISTEMA
PbS-XEK-K₂Cr₂O₇ 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 :

ARMANDO SOLIS GALLARDO



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**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.

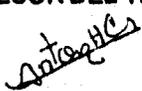
JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	prof. Joan Genescá Llongueras.
VOCAL	prof. Antonio Huerta Cerdán.
SECRETARIO	prof. Francisco Javier Rodríguez Gómez.
1er. SUPLENTE	prof. Carlos Rodríguez Rivera.
2do. SUPLENTE	prof. Faustino Juárez Sánchez.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

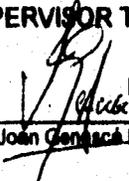
Laboratorio de electroquímica, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Edificio "D", U.N.A.M., México D.F.

ASESOR DEL TEMA:



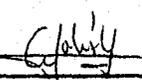
M. en C. Antonio Huerta Cerdán

SUPERVISOR TECNICO:



Dr. Joan Genescá Llongueras

SUSTENTANTE:



Armando Solís Gallardo

A DIOS:

Que siempre me ha acompañado
y favorecido en cada momento
de mi vida.

A MIS PAPÁS:

Sr. Armando Solís Mijangos y
Sra. Ana María Gallardo de Solís.
Quienes con su gran amor,
sacrificio y fortaleza moral, crearon
en mí el deseo de superación,
enseñándome a luchar por
objetivos como el que hoy alcanzo,
dándome siempre su apoyo y
comprensión constituyendo su más
valiosa herencia, por esto y mucho
más les ofrezco este trabajo con
todo mi amor, admiración y
respeto.

A MI HERMANA LUPITA:

Por el amor que nos une y
por saber el verdadero
significado de ser "hermana"
demostrándome siempre
con tu amor en todo
momento.

**A MAMÁ LUPITA
(Q.E.P.D.):**

Que sé que desde el
cielo me manda sus
bendiciones.

**A PAPÁ ARMANDO (Q.E.P.D.)
Y TIA HAYDEÉ (Q.E.P.D.):**

Por el amor que siempre recibí de
ellos y a quienes nunca olvidaré.

**A PAPÁ ENRIQUE
(Q.E.P.D.) Y MAMÁ
CHAYITO (Q.E.P.D.):**

En recuerdo a su cariño.

A MIS PADRINOS:
Dr. Carlos Solís Mijangos y
Profa. Eloisa Gallardo de
Solís:

Agradeciéndoles el cariño
tan especial y apoyo que
siempre me han brindado.

A MIS TIOS:
Arq. Javier Solís Mijangos y
Sra. Mirna Bernal de Solís:
Por el cariño que me han
brindado y sus valiosos
consejos.

A MIS TIOS:
Sr. José Antonio Solís
Mijangos y Sra. Hilda
González de Solís:
Agradeciéndoles siempre
su cariño.

A MIS PRIMOS:

**Antonio, Carlos,
Haydeé, Alejandro y
Javier.:**

Por todos los
momentos que hemos
compartido desde
nuestra infancia, con
cariño.

A MIS TIOS:

**Lic. Benjamin Mijangos
Martínez y Sra. María de la Luz
Borja de Mijangos:**

Con cariño y agradecimiento por su
gran apoyo.

A MIS TIAS:

**Profa. Consuelo Mijangos
Martínez y Sra. Alicia
Mijangos de Chavan
(Q.E.P.D.):**

Con cariño y agradecimiento.

A MIS AMIGOS:

**Ing. Héctor Reyes Avilés y
Sra. Martha González de
Reyes.:**

Por su amistad y consejos
que siempre recordaré.

AL PROFESOR:

**M. en C. Antonio Huerta
Cerdán.:**

Por la amistad que siempre me ha
demostrado y agradeciéndole sus
enseñanzas, confianza y gran
ayuda.

A MIS AMIGOS:

**Nicolás M., Noel M., Elena
O., Alfonso L., Enrique B,
Manuel R., Carlos C.,
Airam E., Verónica C.,
Arturo C., Gerardo P.,
César R., Marco T.,
Heriberto T. y L. Antonio
G. Por la amistad que me
brindaron durante estos años.**

**A LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO:**

Institución de la cual me siento
orgulloso de pertenecer a ella y
como un agradecimiento por la
oportunidad que me brindó.

INDICE

Resumen	1
Introducción	3
Objetivos	5
CAPITULO I	
FLOTACION POR ESPUMA.	
Principios de flotación	7
Colectores	12
Depresores	13
Espumantes	14
Sistema Galena - Xantato Etílico de Potasio - Oxígeno en las condiciones de flotación	15
Sistema Galena - Dicromato de Potasio en las condiciones de flotación	19
TEORIA DE LA IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS.	
Corriente alterna	21
Impedancia	23
Circuito con elemento resistivo	25
Circuito con elemento capacitivo	26
Circuito con elemento inductivo	27
CAPACITANCIA Y PROPIEDADES DE LOS DIELECTRICOS.	
Capacitores	29
Capacitor de placas paralelas	30
Capacitores en serie y paralelo	31
Dielectricos y constante dieléctrica	34

CAPITULO II.	
Metodología de cálculo	39
Método de determinación de Ca y K	43
CAPITULO III.	
Desarrollo experimental	47
Ejemplo numérico del cálculo para determinar ϵ' y ϵ''	52
CAPITULO IV.	
Resultados del sistema PbS - XEK utilizando 15% sól. PbS.	55
Influencia del porcentaje de sólidos en la medición de permitividad compleja	58
Propiedades eléctricas de la galena sin reactivos	62
Resultados del sistema PbS - XEK	67
Resultados del sistema PbS - $K_2Cr_2O_7$	72
Influencia de las concentraciones de reactivo sobre la constante dieléctrica	77
Resultados del sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$	80
CAPITULO V.	
Análisis de resultados	85
CAPITULO VI.	
Conclusiones	94
Recomendaciones para trabajos posteriores	96
CAPITULO VII.	
Bibliografía	98

RESUMEN

En esta obra se realizó un estudio de impedancia a altas frecuencias con transformación a constantes dieléctricas, en el sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$ (mineral - colector - depresor) bajo las condiciones adecuadas de flotación.

De manera paralela, este trabajo describe la metodología más adecuada para utilizar la técnica de "IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS" aplicada al estudio de minerales y suspensiones en general, debido a que esta tesis comprendió la primera experimentación en México y América Latina con el uso de dicha técnica. 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 de relativamente reciente aparición; situación que dificulta la reproducción confiable de resultados.

México es un país que procesa una gran variedad de minerales, entre ellos se tiene el beneficio de minerales de plomo, principalmente PbS (Galena), 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 Xantato Etilico de Potasio (colector) y Dicromato de Potasio (depresor), lo cual será de gran utilidad a nivel industrial, ya que al aplicarse los intervalos de concentración de cada uno de los reactivos aquí estudiados, se podrá observar muy probablemente un incremento en la eficiencia del proceso así como la reducción en los costos de operación.

Para tener este conocimiento se utilizó esta técnica, en donde se determinaron los parámetros de ϵ' y ϵ'' de la galena, la cual se encuentra afectada por las distintas concentraciones de reactivos - colector y depresor -; las concentraciones que se utilizaron son para el XEK de $1 \times 10^{-2} M$, $5 \times 10^{-3} M$, $1 \times 10^{-3} M$, $6 \times 10^{-4} M$ y $1 \times 10^{-4} M$, y para el $K_2Cr_2O_7$ se utilizan $1 \times 10^{-3} M$, $5 \times 10^{-4} M$, $1 \times 10^{-4} M$, $5 \times 10^{-5} M$ y $1 \times 10^{-5} M$.

En este estudio se determinó que para poder analizar mejor los fenómenos dieléctricos ocurrientes en el sistema, era necesario concentrarnos 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.

En lo que respecta a las tendencias de los resultados obtenidos, se tiene que en el sistema PbS - Buffer el valor de la constante dieléctrica a dicha frecuencia (100 MHz) es de 417.4; por otro lado, la tendencia que presenta el sistema PbS - XEK, es que a concentraciones muy diluidas de XEK se obtienen los valores máximos de constante dieléctrica ($1 \times 10^{-4} \text{M}$), y a medida que se va incrementando la concentración del colector, se observa un decremento en los valores de las constantes, llegando a un punto (concentración óptima de colector) en donde ya no se tiene variación significativa en la constante dieléctrica al aumentar la concentración de colector. En los resultados de este trabajo se encuentra que el intervalo de concentración adecuado para flotar galena a un $\text{pH}=9.1$ es de $1 \times 10^{-3} \text{M}$ - $1 \times 10^{-4} \text{M}$ de XEK ($\epsilon' = 328.01$ y $\epsilon'' = 390.9$ respectivamente).

En lo que respecta a el sistema PbS - $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ se tiene el efecto contrario al comportamiento antes mencionado, es decir, a concentraciones elevadas de Dicromato de Potasio ($1 \times 10^{-3} \text{M}$) la constante dieléctrica presenta su valor máximo, y a medida que la concentración de depresor disminuye, la constante dieléctrica de igual manera disminuye. En los resultados de este trabajo se estima que la concentración mínima para deprimir a la galena a un $\text{pH}=9.1$ es $1 \times 10^{-4} \text{M}$, en donde se obtiene una constante dieléctrica de 425.2.

INTRODUCCIÓN

La flotación es una técnica de concentración dentro del procesamiento de minerales; siendo ésta muy utilizada en la primera etapa de la mayoría de los procesos de concentración de minerales sulfurados. 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, actualmente también se procesan los minerales oxidados y los no metálicos, como es el carbón fino.

El método de flotación por espuma consiste en trabajar una suspensión acuosa llamada pulpa, constituida por agua + mineral molido, en donde este debe de tener un tamaño promedio de 10 - 100 micrones (dependiendo de su tamaño de liberación). Con la ayuda de un tensoactivo llamado colector, se modifican las características superficiales de las partículas metálicas, otorgándoles propiedades hidrofóbicas y aerofílicas, es decir, que repelen el agua, o en otras palabras, tienen mayor afinidad por el aire que por el agua.

Después del tratamiento con reactivos, las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales sulfurados que contiene la pulpa de flotación son aparentes y para que pueda existir flotación, es necesario inyectar aire a la pulpa, con el objeto de que las burbujas de aire se adhieran a las partículas de mineral y de esta manera sean elevadas hasta la superficie, formando así, una espuma concentrada en sulfuro metálico; y dejando en el fondo de la celda a los minerales ajenos a nuestro interés.

México se encuentra en el quinto lugar en la producción mundial en lo que respecta a plomo, posición que nos sitúa dentro de los principales productores de este metal a nivel mundial. Sin embargo, en México se procesa tal cantidad de mineral (generalmente por flotación), prácticamente de manera empírica, es decir, no existe un control real en la adición de reactivos, lo que provoca un incremento en los costos de operación. Es por eso el interés que tienen estas industrias para poder optimizar su proceso y lograr con esto leyes más altas, repercutiendo esto indudablemente en las utilidades de la empresa.

Tal situación es un problema a resolver, por ende se han estado desarrollando estudios a nivel mundial, para poder controlar el proceso, analizando las interacciones presentes entre el mineral y el reactivo adicionado.

En varios de los estudios antes mencionados se trata de explicar lo que ocurre en la interfase mineral - solución; se han llevado a cabo interesantes investigaciones acerca de la cinética de flotación mediante el análisis de los potenciales que presenta; también se han realizado estudios acerca del potencial zeta, para poder conocer más acerca de las interacciones que se presentan entre el mineral y el reactivo colector, es decir, para determinar si es una adsorción química (quimiadsorción) o una adsorción física (fisiadsorción), también con la interpretación correcta de estos potenciales también llamados electrocinéticos, se ha podido determinar cual es el valor más adecuado para poder flotar de manera más eficiente un mineral.

En particular, para el sistema PbS - XEK se han llevado a cabo estudios de identificación de las especies responsables de la flotación, sin embargo, las técnicas utilizadas no han sido lo más apropiado para su identificación, ya que las especies al ser analizadas, sufren transformaciones al momento de ser preparadas.

Es por esto que surge la necesidad de estudiar más acerca de este sistema, por lo que se hace uso de una técnica novedosa, la cual es no destructiva, y es factible obtener información in situ de los fenómenos químico - superficiales que ocurren en la interfase mineral - solución que son concentrados vía flotación por espuma.

Es importante señalar que esta técnica no solo se utiliza para el estudio de minerales, sino que es posible estudiar a cualquier dieléctrico, como pueden ser otras suspensiones o recubrimientos, como por ejemplo, pinturas.

OBJETIVOS

- Difundir la técnica de impedancia a altas frecuencias a nivel licenciatura, presentándola como una herramienta poderosa para el estudio de interfaces mineral - solución.
- Describir la metodología de esta técnica, para el estudio de minerales.
- Aportar información importante que ayude a comprender mejor las interacciones que existen en el sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$, para así, poder contribuir con herramientas de control más eficientes en el proceso de flotación industrial.
- Obtener las concentraciones de reactivo colector y depresor adecuadas para flotar y deprimir a un mineral de galena a un pH=9.1.
- Determinar el efecto de las concentraciones de los reactivos colector y depresor en forma aislada y como mezcla en el mineral de galena sobre la constante dieléctrica.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

FLOTACIÓN POR ESPUMA

PRINCIPIOS DE FLOTACIÓN

En el procesamiento de minerales existen dos operaciones fundamentales, principalmente la liberación o desprendimiento de los minerales valiosos de los minerales de desecho o ganga y la separación de estos valores de la ganga; este último proceso se le conoce como Concentración.

La separación de minerales valiosos de la ganga se realiza por medio de la pulverización o molido lo cual implica trituración y molienda, hasta un tamaño de partícula tal que el producto sea una mezcla de partículas de mineral y de ganga relativamente limpias. El grado correcto de liberación es la clave para el éxito en el procesamiento de minerales. Un proceso que sobremuele la mena es dañino, puesto que consume energía innecesariamente en la molienda y hace más difícil alcanzar una recuperación eficiente.

Después que los minerales han sido liberados de la ganga, la mena se somete a algún proceso de concentración que separa los minerales en dos o más productos. La concentración por lo general se logra utilizando alguna diferencia específica en las propiedades físicas o químicas entre el mineral valioso y los minerales de la ganga en la mena.

El procesamiento de minerales está relacionado principalmente con los métodos físicos de separación, los cuales pueden ser:

A) Separación que depende de las diferencias en la gravedad específica⁽¹⁾. Utiliza el movimiento diferencial de los minerales debido a los efectos de masa, por lo general en corrientes hidráulicas⁽²⁾. Aunque el método declinó en importancia con el desarrollo del proceso de flotación por espuma, ahora se usa cada vez más debido a las técnicas mejoradas y a su relativa simplicidad comparado con otros métodos. También tiene la ventaja de producir menos contaminación ambiental.

B) Separación que depende de las propiedades magnéticas. Los separadores magnéticos de baja intensidad se usan para concentrar minerales ferro-magnéticos tales como la magnetita (Fe_3O_4), mientras que los separadores de alta intensidad se usan para separar minerales paramagnéticos de su ganga. La separación magnética es un proceso importante en el beneficio de menas de hierro, pero también encuentra aplicación en el tratamiento de minerales no-ferrosos paramagnéticos. Se usa ampliamente para extraer wolframita $\{(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4\}$ y hemalita (Fe_2O_3) paramagnéticas de menas de estaño y encuentra considerable aplicación en el procesamiento de minerales no metálicos, tales como los que se encuentran en los depósitos de arena de las playas.

C) Separación que utiliza las diferentes propiedades superficiales de los minerales. La flotación por espuma, que indudablemente es el método de concentración más importante, es afectado por el grado de afinidad de los minerales por las burbujas de aire ascendentes dentro de la pulpa agitada. Ajustando las condiciones de la pulpa por medio de varios reactivos químicos, es posible hacer que los minerales valiosos desarrollen avidez por el aire (aerofílicos) y que los minerales de la ganga busquen el agua y rechacen el aire (aerofóbicos). Esto da por resultado una separación por la transferencia de los minerales valiosos a las burbujas de aire que forman la espuma flotante sobre la superficie de la pulpa.

Como se mencionó anteriormente el método de concentración más utilizado para los minerales sulfurados es el proceso de flotación, a continuación se mencionan los fundamentos de esta técnica:

La flotación por espuma aprovecha las diferencias en las propiedades físico - químicas de la superficie de las partículas minerales. Después del tratamiento con reactivos, las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales que contiene la pulpa de flotación son aparentes y para que pueda existir la flotación, una burbuja de aire se debe adherir a partículas minerales y elevarla hasta la superficie del agua (como se muestra en la figura 1).

El proceso se aplica únicamente a partículas relativamente finas (10 - 100 micrones)⁽³⁾⁽⁴⁾, ya que si son demasiado grandes, la adhesión entre la partícula y la burbuja será menor que el peso de la partícula y por lo tanto la burbuja deja caer su carga⁽⁵⁾.

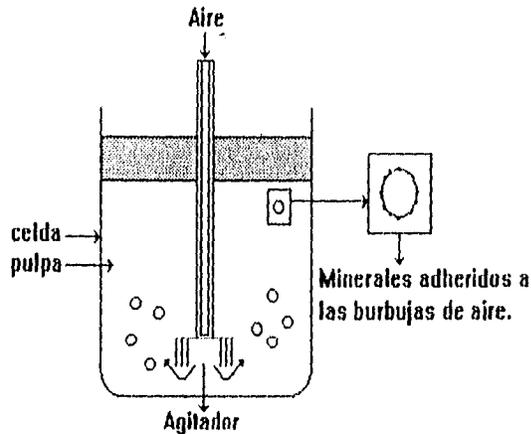


Figura 1. Principio de la flotación por espuma.

En la concentración por flotación, el mineral normalmente es transferido a la espuma o fracción flotante, dejando la ganga en la pulpa o las colas, es decir, en el fondo de la celda. Esta es la flotación directa opuesta a la flotación inversa, en la cual la ganga se separa en la fracción flotada, dejando en el fondo el concentrado.

Las burbujas de aire solamente se adhieren a las partículas minerales si éstas desplazan agua de la superficie mineral, lo cual únicamente sucede si el mineral repele al agua o es hidrofóbico.

Una vez que las burbujas de aire alcanzan la superficie, únicamente pueden continuar sosteniendo la partícula mineral si forman una espuma estable; de otro modo revientan y cae la partícula mineral.

Para alcanzar estas condiciones, es necesario utilizar algunos 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 esa superficie.

En la figura 2 se muestran las fuerzas que tienden a separar una partícula y una burbuja⁽⁶⁾.

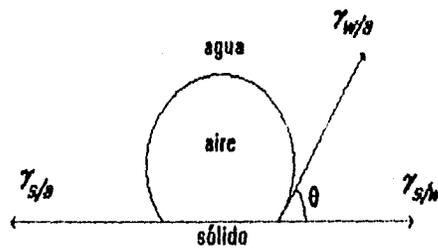


Figura 2. Ángulo de contacto entre burbujas y partícula en un medio acuoso.

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

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

Al combinar con la ecuación (1.1), se tiene

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

Mientras mayor sea el ángulo de contacto⁽⁷⁾ más grande será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja; además el sistema es más elástico ante las fuerzas de rompimiento.

Por lo tanto, 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 necesario 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 depresores los cuales tienen la función de darles a las partículas de mineral la propiedad de ser hidrofílico, provocando de esta forma que estas partículas se hundan en el fondo de la celda. 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.

COLECTORES.

Todos los minerales se clasifican en tipos no polares o polares según sus características superficiales. Las superficies de los minerales no polares se caracterizan por enlaces moleculares relativamente débiles. Los minerales están compuestos de moléculas covalentes que se mantienen juntas por las fuerzas de Van der Waals; las superficies no polares no se unen fácilmente a los dipolos de agua y en consecuencia son hidrofóbicas. 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° ⁽⁸⁾. Las superficies polares reaccionan fuertemente con las moléculas de agua y estos minerales son naturalmente hidrofílicos.

Para flotar los minerales se les debe otorgar cierto grado de hidrofobicidad. Para lograrlo se le agregan surfactantes a la pulpa, los que se conocen como colectores y el tiempo concedido para la adsorción durante la agitación se conoce como tiempo de acondicionamiento.

Los colectores son compuestos orgánicos que convierten a los minerales seleccionados en repelentes al agua por la adsorción de moléculas o iones sobre la superficie mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa la superficie mineral de la burbuja de aire, hasta un nivel tal que la adhesión de la partícula a la burbuja puede hacerse por contacto. La mayoría de los colectores son ácidos débiles, bases ó sus sales son heteropolares y pueden considerarse que tienen dos "extremos" funcionales, uno iónico, que puede ser adsorbido en la superficie mineral ya sea por reacción química con los iones de la superficie mineral (quimiadsorción) o por atracción electrostática a la superficie mineral (adsorción física) y el otro, una cadena o grupo orgánico, que proporciona la superficie hidrofóbica al mineral⁽⁹⁾.

En general los colectores se usan en pequeñas cantidades, sólo las necesarias para formar una capa monomolecular sobre la superficie de la partícula, ya que al aumentar la concentración, aparte del costo que esto implica, tienden a flotar otros minerales, reduciendo la selectividad.

DEPRESORES.

La depresión se usa para incrementar la selectividad de la flotación volviendo hidrofílicos (ávidos de agua) a ciertos minerales y evitando así su flotación. La flotación se lleva a cabo generalmente en un medio alcalino ya que la mayor parte de los colectores bajo esas condiciones son estables y la corrosión de las celdas, tubería, etc., es minimizada. El control de pH es extremadamente importante, especialmente en la flotación selectiva y la alcalinidad se controla por la adición de cal, hidróxido de sodio, carbonato de sodio y ácido sulfúrico⁽¹⁰⁾.

La cal debido a su bajo costo, tiene una gran aplicación para regular la alcalinidad de la pulpa y se emplea en forma de lechada de cal, o sea una suspensión de partículas de hidróxido de calcio en una solución acuosa saturada. La cal evita los efectos adversos de las sales solubles sobre la flotación, precipitándolas como hidróxidos metálicos. También se usa como depresor de la pirita y arsenopirita.

El ion hidroxilo y el ion calcio participan en el efecto depresivo de la cal sobre la pirita para la formación de películas mezcladas de $\text{Fe}(\text{OH})$, $\text{FeO}(\text{OH})$, CaSO_4 y CaCO_3 sobre la superficie, reduciendo la adsorción del xantato, la cual no tiene efecto depresor en los minerales de cobre, pero deprime la galena en cierto grado.

Por consiguiente, en la flotación de la galena, el control de pH frecuentemente se modifica por el uso de ceniza de sosa (Na_2CO_3), deprimiendo la pirita y la esfalerita por el cianuro. El dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) se usa para deprimir la galena en las separaciones plomo-cobre, la acción depresiva se debe a la reacción química entre la superficie de la galena y los aniones CrO_4^{2-} , los cuales producen cromato de plomo insoluble que aumenta la mojabilidad y evita la flotación.

ESPUMANTES.

Cuando 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 amplio trabajo de prueba.

En la flotación de mineral sulfurado 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.

SISTEMA GALENA - XANTATO - OXÍGENO EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN.

Sobre este tema existe una gran variedad de teorías propuestas por varios investigadores, a continuación se mencionan a grandes rasgos algunas de ellas:

Gaudin⁽¹¹⁾ 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⁽¹²⁾.

A partir de sus estudios con relación al ángulo de contacto entre la superficie de la galena y la solución, observó que la adsorción del colector no es inmediata; un ángulo de contacto estable aparece varios minutos después de la interacción con el mineral. Posteriormente en otra de sus investigaciones propone que el xantato se oxida en la solución, formando una molécula neutra llamada dixantógeno⁽¹³⁾.

Por otro lado, se encontró que el potencial de reposo de un electrodo de galena, se desplazaba a valores más negativos (catódicos) cuando se agregaba xantato a la solución. Cuando la galena era lavada con un disolvente orgánico, después de haber sido tratada con este reactivo, se detectaba la presencia de xantato de plomo en los lavados.

El mecanismo de reacción propuesto por Leja y colaboradores⁽¹⁴⁾, consiste en la formación del dixantógeno, tomando en consideración la necesidad de la presencia de oxígeno, concluyendo que el xantato se oxida a dixantógeno en la solución. Después se disocia al ser adsorbido sobre la superficie de la galena, y reacciona con el PbS para formar el xantato de plomo. Posteriormente se demostró que la reacción del xantato con la galena no dependía de la formación del dixantógeno en la solución.

Posteriormente Finkelstein⁽¹⁵⁾ propone un modelo electroquímico, el cual consiste en un mecanismo de dos etapas:

1.- La primera etapa consiste en el proceso anódico, la quimiadsorción del xantato con la formación subsecuente del xantato de plomo:



donde X⁻ es el ion xantato y PbX₂ es el xantato de plomo.

2.- La segunda etapa consiste en el proceso catódico, el cual trata de la reducción del oxígeno:



Esta teoría electroquímica difiere con respecto a la propuesta de Leja, en el hecho de que la oxidación del xantato no ocurre en el seno de la solución, sino en la superficie del sólido.

Yarar⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ en sus estudios de potencial zeta sobre este sistema observó que el potencial zeta negativo de la galena se incrementa con la concentración de xantato. A valores de pH=9.2 existió una concentración crítica de xantato (1X10⁻³M) hasta la cual el potencial zeta de la galena se incremento gradualmente y posteriormente se elevó en forma rápida.

Por otro lado; estudios realizados por Huerta⁽¹⁸⁾, muestran el modelo electroquímico para la reacción catódica del oxígeno y la reacción anódica del xantato sobre un mineral de galena (representado en la figura 3).

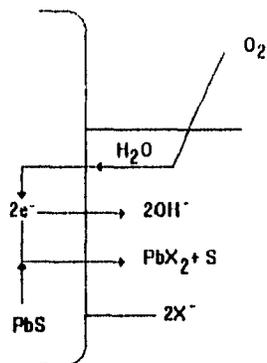
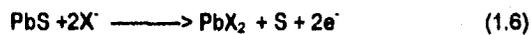


Figura 3. Modelo electroquímico propuesto por Antonio Huerta, para la reducción del oxígeno y la oxidación del xantato sobre un mineral del galena.

En este modelo se proponen las siguientes reacciones que ocurren en el sistema xantato - oxígeno - galena en un proceso de flotación:

Para la reacción anódica:



Para la reacción catódica :



Y sumando las dos reacciones anteriores se obtiene la reacción global :



Huerta⁽¹⁹⁾ también encontró que a mayor concentración de xantato adicionado, mayor fue el desplazamiento del potencial de reposo hacia valores más negativos. Esto nos lo muestra en su trabajo de tesis de maestría en donde observó que antes de adicionar el xantato etílico de potasio, el potencial de reposo de la galena tomó valores entre -85 y -100 mV vs. SCE., 159 y 144.5 mV vs. NHE respectivamente, pero al adicionar el reactivo colector al sistema, el potencial de reposo se desplazaba en valores promedio de 80, 40 y 20 mV más negativos, para las concentraciones correspondientes de 1×10^{-2} , 1×10^{-3} y 1×10^{-4} M de xantato etílico de potasio. Dice también que una de las razones principales que se puede adjudicar a este comportamiento es la generación de carga eléctrica superficial de la galena, a través de los iones determinantes de potencial mediante la interacción química específica entre la superficie de la galena y el colector denominada quimiadsorción.

Estos iones de los colectores forman sales insolubles de colector-metal, las cuales son capaces de establecer dicha carga; este es el caso entre la galena y la quimiadsorción del xantato donde se forma el etil-xantato de plomo y dixantógeno, proponiéndose la oxidación del sistema xantato-galena.

Este tipo de compuestos fue obtenido por Woods⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ en una experimentación de tipo electroquímico. La manifestación del desplazamiento del potencial de reposo, al agregar xantato en un sistema electroquímico, fue observada también por Tolun⁽²²⁾ en donde el potencial de reposo inicial de una galena con valor de -280 mV vs. SCE se elevaba a valores mayores de -310 mV, aún a concentraciones de xantato de 1×10^{-3} M.

SISTEMA GALENA - DICROMATO DE POTASIO EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN.

Como se mencionó anteriormente los depresores impiden la adsorción de un colector sobre la superficie de las partículas de mineral, lo cual impide la flotación. El dicromato de potasio al reaccionar con las partículas de PbS, producen el cromato de plomo, teniendo este muy poca solubilidad. La reacción ocuriente en este sistema es^{(23) (24)}:



Por otro lado, Taggart⁽²⁵⁾ observó multicapas de cromato de plomo sobre la galena, después del contacto con la solución de cromato. En los estudios realizados por Bougdanov se ha encontrado que la adsorción de xantato no disminuye cuando se forma el cromato de plomo sobre la superficie. La depresión⁽²⁶⁾ es atribuida a la fuerte hidratación del cromato adsorbido sobre la superficie por lo que la hidrofobicidad de la capa de colector es vencida.

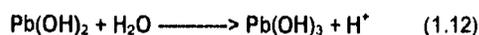
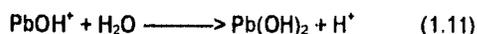
Tolun⁽²⁷⁾ observó que no existía contacto de burbujas cuando el xantato ($1 \times 10^{-3} \text{M}$) fue añadido a la solución aerada ($1 \times 10^{-4} \text{M}$ de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Este comportamiento se explica según las observaciones de Taggart, el cual indica que el potencial de la galena cae de -0.012 a -0.110 V, mostrando la acción reductora del xantato ($1 \times 10^{-3} \text{M}$), llevando a la formación de una pequeña cantidad de dixantógeno e hidróxido de cromo (III).

No es esperada la completa transformación de xantato a dixantógeno, a causa de la baja concentración del ion cromo ($1 \times 10^{-4} \text{M}$). Se establece por consiguiente un equilibrio en la parte del sistema galena - xantato - oxígeno entre las especies redox (X^- ion xantato, X^{2-} ion dixantógeno, $\text{Cr}(\text{OH})_3$ y $(\text{CrO}_4)^{2-}$).

El dixantógeno producido en el proceso seguramente no se adherirá a esta superficie de acuerdo al estudio de Tolun.

Otros depresores son los iones hidróxido. La galena se deprime a valores de pH alrededor de 11; lo anterior se debe a la formación y estabilidad de las especies de plomo, plumbita ($\text{Pb}(\text{OH})_2$), sobre la superficie relativa de xantato de plomo

El esquema de la hidrólisis del ion plomo es:



El sulfuro de plomo es un compuesto altamente insoluble así que adiciones de sulfato de sodio darán como resultado la formación del sulfato de plomo mejor que la del xantato de plomo si las dos especies en solución acuosa se presentan al mismo tiempo. Por lo tanto, es posible deprimir a la galena mediante el uso de sulfuros.

Si el xantato llega a ser adsorbido se presentará una reacción del siguiente tipo:



Con respecto a la depresión de la galena en presencia de cianuro de sodio, los iones cianuro no complejan el ión plomo a concentración moderada. Como resultado de que la concentración de cianuro no tiene efecto sobre el contacto de las burbujas sobre la galena, la depresión se debe a la presencia del ion hidrógeno y no a la de los iones cianuro. Diferentes tipos de reactivos de flotación y modificadores cambian el potencial de reposo de la galena y esto ha sido considerado para oxidar o reducir el mineral. Así, el XEK disminuye el potencial de la galena. El aire o el oxígeno no fue excluido de estos experimentos. El K_2CrO_4 eleva el potencial de la galena, teniéndose una reducción con $\text{Na}_2\text{S} + \text{FeSO}_4$, ambos en el punto donde el contacto de la burbuja se pierde.

TEORÍA DE LA IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS

CORRIENTE ALTERNA.

Las líneas de energía eléctrica, que transportan la electricidad a los hogares y a las industrias, proporcionan corriente alterna (ca) y voltaje de ca. Muchos dispositivos electrónicos operan por medio de corrientes alternas.

El voltaje (y la corriente) proporcionados por la compañía de electricidad son de forma senoidal. En la figura 4 se muestra una curva muy común de voltaje contra tiempo. Como puede verse, la amplitud de la curva seno es v_0 , su frecuencia de oscilación es f , y su periodo es $1/f$, en donde f está en Hertz⁽²⁶⁾.

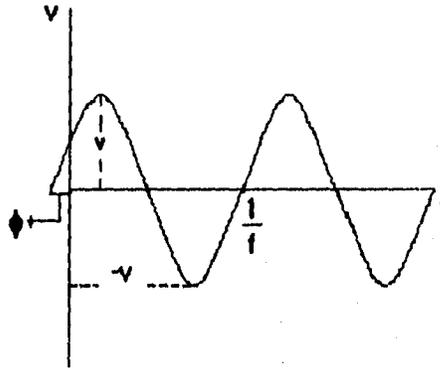


Figura 4. Onda senoidal de voltaje

En la figura anterior se muestra la onda senoidal de voltaje. La ecuación que representa esta curva es:

$$v = V_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (1.14)$$

donde: V_0 es la amplitud de la onda del voltaje, ω es la frecuencia angular en radianes por segundo, t es el tiempo en segundos, ϕ es el ángulo de fase⁽²⁹⁾.

De forma análoga, la ecuación que representa a la onda senoidal de corriente es:

$$i = I_0 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (1.15)$$

El ángulo de fase (ϕ), representa la posición relativa 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 se encuentran dos curvas. Existe un ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente resultante, cuando ésta se adelanta o se atrasa con respecto al anterior (como se muestra en la figura 5).

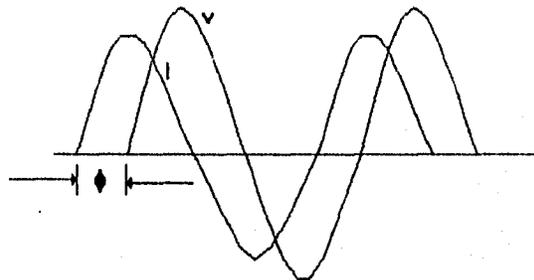


Figura 5. Desfase de dos ondas senoidales.

Como podemos observar en la figura anterior, la onda de voltaje y la onda de corriente tienen la misma frecuencia, pero tienen diferente amplitud y fase.

Es importante señalar que las expresiones matemáticas que representan las ondas senoidales, se refieren a corrientes y voltajes instantáneos en función del tiempo.

IMPEDANCIA.

Es el término utilizado para relacionar el voltaje y la corriente en un circuito eléctrico perturbado con corriente alterna, es decir, la impedancia es una forma generalizada del concepto de resistencia usado en circuitos de corriente continua.

Si hacemos una analogía con la ley de Ohm, la impedancia se define como la diferencial de voltaje con respecto a la diferencial de corriente, se representa con la letra Z y se mide en Ohms (Ω).

$$|Z| = \frac{dE}{dI} \quad (1.16)$$

La impedancia⁽³⁰⁾ es un número complejo, que no varía con respecto al tiempo. Cuando se está analizando los valores de impedancia de un sistema dado, a cada valor de frecuencia corresponde un ángulo de fase y un valor absoluto de la impedancia (es la magnitud del vector impedancia), con los cuales se determina el vector de impedancia en coordenadas polares. En el plano complejo se representa de la forma: $Z=Z'+jZ''$ (coordenadas cartesianas), conociendo las expresiones de Z' y Z'' :

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

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

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (c)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (d) \quad (1.17)$$

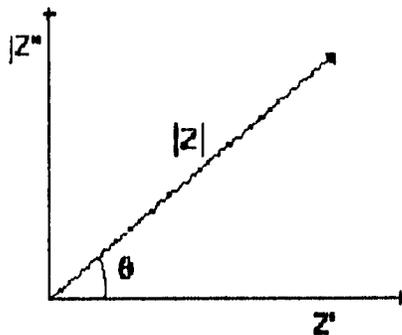


Figura 6. Representación del vector de impedancia en el plano complejo.

Como ya se mencionó, la impedancia es un vector, el cual tiene como componentes una parte real (Z') y una parte imaginaria (Z''); a la parte real se le denomina Resistencia, se representa con la letra R, y a la parte imaginaria se le llama Reactancia y se expresa con la letra X. Entonces, redefiniendo la impedancia la expresamos así:

$$Z = R + jX \quad (1.18)$$

Si queremos definir a la resistencia y a la reactancia, tendremos que decir que, la Resistencia es la oposición que tiene el sistema al paso de un voltaje. Y la reactancia produce un ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente resultante. El elemento que da lugar a una reactancia negativa en un circuito es el capacitor, y el elemento que genera una reactancia positiva en un circuito es el inductor.

A continuación trataremos a los elementos Resistencia - Capacitor e Inductor³¹⁾ considerados por separado:

1.- CIRCUITO RESISTIVO:

En la figura 7 se muestra un circuito que sólo consta de un elemento resistivo, sobre la cual actúa un potencial expresado por la siguiente expresión:

$$v = V_0 \text{sen} \omega t \quad (1.19)$$

De la ecuación anterior y con la definición de la resistencia, se obtiene:

$$v_R = V_0 \text{sen} \omega t \quad (1.19)$$

$$v_R = i_R R \quad (1.20)$$

De donde si igualamos y despejamos i_R , obtenemos:

$$i_R = \left(\frac{V_0}{R} \right) \text{sen} \omega t \quad (1.21)$$

La comparación de las ecuaciones 1.19 y 1.21 demuestra que las cantidades v_R e i_R , las cuales varían con el tiempo, están en fase, es decir, alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo. También tienen la misma frecuencia angular ω , lo cual era de esperarse a partir de la ecuación 1.15.

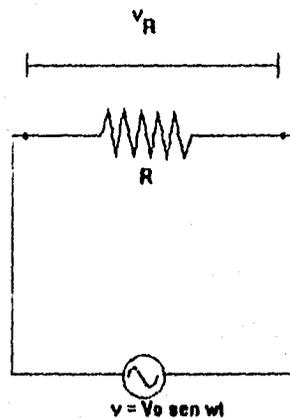


Figura 7. Circuito resistivo de una sola malla que contiene un generador de ca.

2.- CIRCUITO CAPACITIVO

La figura 8 muestra un circuito que sólo contiene un elemento capacitivo, sobre el cual actúa un potencial alternante del tipo establecido en la expresión 1.19. Partiendo de la expresión 1.19 y de la definición de la capacitancia, se puede escribir:

$$v_c = V_o \text{ sen } \omega t \quad (1.19)$$

$$v_c = q/C \quad (1.20)$$

De estas relaciones se obtiene

$$q = V_o C \text{ sen } \omega t \quad (1.21)$$

o

$$i_c = \left(\frac{dq}{dt} \right) = \omega C V_o \text{ cos } \omega t \quad (1.22)$$

La comparación de las ecuaciones 1.19 y 1.21 demuestra que las cantidades v_c e i_c , las cuales varían con el tiempo, están fuera de fase por un cuarto de ciclo. v_c se retrasa respecto de i_c , es decir, conforme transcurre el tiempo, v_c llega a un máximo después de que lo ha hecho i_c , en una cantidad que corresponde a un cuarto de ciclo ($= 90^\circ$).

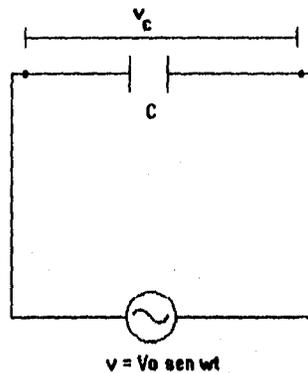


Figura 8. Circuito capacitivo de una sola malla, el cual contiene un generador de ca.

Por razones de simetría en la notación, la ecuación se escribe como:

$$i_c = \left(\frac{V_o}{X_c} \right) \cos \omega t \quad (1.23)$$

en la que se debe cumplir que:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (1.24)$$

A la cantidad X_c se le llama reactancia capacitiva, y su unidad es el ohm.

3.- CIRCUITO INDUCTIVO.

En la figura 9 se muestra un circuito que sólo contiene un elemento inductivo, sobre el cual actúa un potencial alternante del tipo representado en la ecuación 1.19.

De la ecuación 1.19 y de la definición de la inductancia, se obtiene:

$$v_L = V_o \text{ sen } \omega t \quad (1.19)$$

$$v_L = L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (1.25)$$

A partir de estas relaciones se ve que:

$$di = \left(\frac{V_o}{L} \right) \text{ sen } \omega t dt \quad (1.26)$$

ó

$$i = \int di = - \left(\frac{V_o}{\omega L} \right) \cos \omega t \quad (1.27)$$

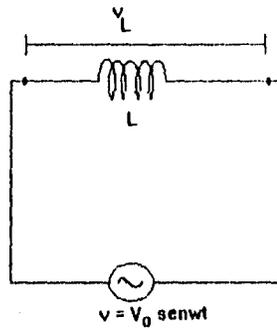


Figura 9. Circuito inductivo de una sola malla que contiene un generador de ca.

La comparación de las ecuaciones 1.19 y 1.27 demuestra que las cantidades v_L e i_L , las cuales varían con el tiempo, están fuera de fase en un cuarto de ciclo ($=90^\circ$); v_L llega a su valor máximo un cuarto de ciclo antes que i_L .

Nuevamente por razones de notación, la ecuación 1.27 puede escribirse como:

$$i_L = -\left(\frac{V_0}{X_L}\right) \cos \omega t \quad (1.28)$$

en la que se debe cumplir que:

$$X_L = \omega L \quad (1.29)$$

A la cantidad X_L se le llama reactancia inductiva, la cual tiene como unidad el ohm.

CAPACITANCIA Y PROPIEDADES DE LOS DIELECTRICOS.

CAPACITORES

Dos conductores cualesquiera separados por un aislador se dice que forman un capacitor⁽³²⁾. 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 entre los conductores es también proporcional a la magnitud de la carga Q de uno cualquiera de los conductores y la diferencia de potencial V entre ellos:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1.30)$$

La unidad de capacitancia en el SI, que se obtiene de la ecuación anterior (1.30), es el coulomb/volt. Sin embargo, se utiliza un nombre especial para representarla: el faradio (siendo su símbolo F). Se le ha dado este nombre en honor a Michael Faraday quien desarrolló, entre otros, el concepto de capacitancia. Entonces:

$$F = 1 \frac{C}{V} \quad (1.31)$$

En la práctica se utilizan los siguientes submúltiplos del farad, que son más convenientes: el microfaradio ($1 \mu F = 10^{-6} F$) y el picofaradio ($1 pF = 10^{-12} F$).

La capacitancia de un sistema dado de conductores depende de dos factores importantes⁽³⁹⁾:

- 1.- La disposición geométrica de los conductores, que incluye el tamaño, la forma y el espaciado de las placas, al igual que sus relaciones geométricas.
- 2.- Las propiedades del medio en que están dichos conductores (aire, vacío, material aislante o dieléctrico, etc.).

CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS.

El tipo de capacitor más frecuente consiste en principio en dos placas paralelas y separadas por una distancia que es pequeña comparada con las dimensiones lineales de las placas, ver figura 10.

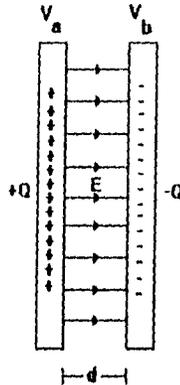


Figura 10. Capacitor de placas paralelas.

Como se muestra en la figura anterior, prácticamente todo el campo de este capacitor está situado en la región comprendida entre las placas. Hay una ligera dispersión del campo en su frontera exterior (curvatura hacia fuera de las líneas de campo cerca de los bordes), pero si las placas están suficientemente próximas, puede despreciarse. El campo entre las placas es entonces uniforme y las cargas sobre ellas están uniformemente distribuidas sobre sus superficies opuestas. Esta disposición se conoce como capacitor de placas paralelas.

Ahora si consideramos que las placas están en el vacío. Se ha demostrado que la magnitud del campo eléctrico entre un par de láminas paralelas muy próximas es:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}, \quad (1.32)$$

donde σ es el valor de la densidad superficial de carga en cada placa. A el área de cada una de ellas y Q la magnitud de la carga total de cada placa.

Como el campo eléctrico (gradiente de potencial) es uniforme, la diferencia de potencial entre las placas es:

$$V_{ab} = Ed = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Qd}{A}, \quad (1.33)$$

donde d es la separación entre las placas. Por consiguiente, la capacitancia de un capacitor de placas paralelas en el vacío es:

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.34)$$

Como ϵ_0 ($= 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$), A y d son constantes para un capacitor dado, la capacitancia es una constante independiente de la carga del capacitor, y es directamente proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a su separación. Si se utilizan unidades SI, A se expresa en metros cuadrados y d en metros. La capacitancia se expresa entonces en Farads.

CAPACITORES EN SERIE Y EN PARALELO.

En la figura 11 se han conectado en serie dos capacitores entre los puntos a y b , que se mantienen a una diferencia de potencial constante V_{ab} . Inicialmente ambos capacitores están descargados. En esta conexión, los dos capacitores tienen siempre la misma carga Q . Podría plantearse la cuestión de que la placa inferior de C_1 y la superior de C_2 tuvieran cargas diferentes que las otras placas, pero en ese caso la carga neta de cada capacitor no sería nula y el campo eléctrico resultante en el conductor de unión de los capacitores ocasionaría un flujo de corriente que circularía hasta reducir a cero la carga total de cada uno.

Por consiguiente, en una conexión en serie la magnitud de la carga de todas las placas es la misma.

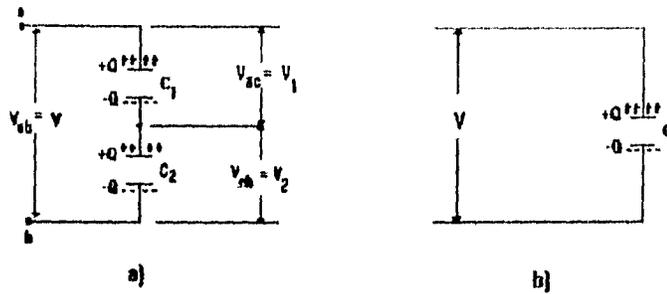


Figura 11. a) Dos capacitores en serie, y b) su equivalente.

En la figura anterior se tiene:

$$\begin{aligned}
 V_{ac} = V_1 &= \frac{Q}{C_1}, & V_{cb} = V_2 &= \frac{Q}{C_2}, \\
 V_{ab} = V &= V_1 + V_2 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right), & (1.35) \\
 \frac{V}{Q} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}
 \end{aligned}$$

La capacitancia equivalente C de la combinación en serie se define como la de un sólo capacitor de carga Q igual a la de la combinación, cuando la diferencia de potencial V es igual. Para este capacitor, (Figura 11.b) :

$$Q = CV, \quad \frac{V}{Q} = \frac{1}{C} \quad (1.36)$$

Por consiguiente, en virtud de las ecuaciones (1.35) y (1.36),

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.37)$$

Igualmente, para un número cualquiera de capacitores en serie,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1.38)$$

El recíproco de la capacitancia equivalente es igual a la suma de los recíprocos de las capacitancias individuales.

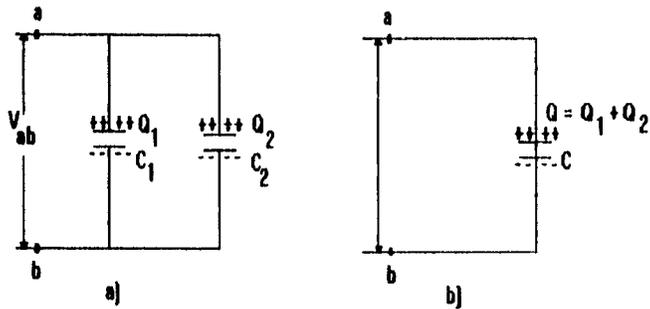


Figura 12. a) Dos capacitores en paralelo, y b) su equivalente.

En la figura 12a hay dos capacitores conectados en paralelo entre los puntos a y b. En este caso, la diferencia de potencial $V_{ab} = V$ es la misma para ambos, y las cargas Q_1 y Q_2 no son necesariamente iguales, son:

$$Q_1 = C_1 V, \quad Q_2 = C_2 V.$$

La carga total suministrada por la fuente fue:

$$Q = Q_1 + Q_2 = V(C_1 + C_2),$$

y (1.39)

$$\frac{Q}{V} = C_1 + C_2.$$

La capacitancia equivalente C de una combinación en paralelo se define como la de un sólo capacitor (ver figura 12b), cuya carga total es igual que la del inciso. Para este capacitor

$$\frac{Q}{V} = C,$$

y de ahí,

$$C = C_1 + C_2.$$

Igualmente, para cualquier número de capacitores en paralelo;

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (1.40)$$

La capacitancia equivalente es igual a la suma de las capacitancias individuales.

DIELÉCTRICOS Y CONSTANTE DIELÉCTRICA.

Se pueden emplear dos formas distintas para tener una explicación de las propiedades eléctricas de los sólidos, líquidos y gases. Se puede tratar de describir en detalle al campo eléctrico y a las cargas dentro del material. Por ejemplo, el campo variará amplamente 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, es un problema de una gran complejidad. Cuando se consideran los campos de muchos átomos todos 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 de un material. Ciertamente el movimiento errático y el campo de un único átomo o molécula no tendrá un efecto notable sobre las propiedades 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. En este trabajo se considerarán sólo los efectos promedio y los campos promedio a través del material. Los campos muy variables y erráticos que se encuentran entre puntos separados sólo por uno o dos átomos, no son de interés. Se restringe el estudio al campo promedio en regiones lo suficientemente grandes para que muchos átomos o moléculas estén contenidos dentro de ellas.

Un dieléctrico⁽³³⁾ es cualquier material que no contiene un número apreciable de cargas libres, es decir, cualquier no conductor o aislante. En teoría un aislante no tiene carga neta, aun cuando el campo eléctrico varía mucho de punto a punto dentro de él y se tiene interés sólo sobre el campo promedio en regiones suficientemente grandes como para contener muchos átomos. Este campo promedio es cero, ya no existe una carga neta promedio en el dieléctrico.

La mayor parte de los capacitores tienen entre sus placas un material sólido no conductor o dieléctrico. Un tipo normal de capacitor es el constituido por tiras de chapa metálica, que forman las placas, separadas por tiras de papel parafinado o láminas de plástico como el Mylar, que actúan de dieléctrico. Una combinación alternada de estos materiales y enrollada forma una unidad compacta que puede proporcionar una capacitancia de varios microfarads en un volumen relativamente pequeño.

En los capacitores electrolíticos el dieléctrico es una película finísima de un óxido no conductor situada entre una placa metálica y una disolución conductora. Debido al pequeño espesor del dieléctrico, capacitores electrolíticos de dimensiones relativamente pequeñas pueden llegar a tener capacitancias entre 100 y 1000 μF .

La función de un dieléctrico sólido entre las placas de un capacitor es triple.

Primero, resuelve el problema mecánico de mantener dos láminas de metal grandes con una separación extremadamente pequeña, pero sin llegar a tener contacto.

Segundo, cualquier material dieléctrico, sometido a un campo eléctrico suficientemente grande, experimenta una rotura dieléctrica, una ionización parcial, que permite la conducción a través de un material que se supone aislador. Muchos materiales aisladores pueden tolerar campos eléctricos más intensos sin rotura que el aire.

Tercero, la capacitancia de un capacitor de dimensiones dadas es mayor cuando hay un dieléctrico entre las placas que cuando éstas están separadas únicamente por el aire o el vacío.

Faraday demostró de manera concluyente que en el caso de cualquier configuración geométrica, el efecto de llenar completamente el espacio entre los conductores con un dieléctrico equivale a multiplicar la capacitancia por una constante k , que sólo depende de la elección del dieléctrico.

Dicha constante es independiente de la configuración del capacitor, y también es prácticamente independiente de la diferencia de potencial en el dispositivo, siempre que el campo interior no sea excesivamente grande.

La constante k recibe el nombre de constante dieléctrica del aislante. En el caso del vacío tiene el valor de 1, mientras que para el aire es apenas ligeramente mayor, 1.0006 en condiciones normales. La constante dieléctrica del vidrio es aproximadamente 6, en tanto que la del agua vale 81.

Las constantes dieléctricas son obtenidas con frecuencia por medio de medidas de capacidad. Ya que como se mencionó anteriormente, si una carga Q se coloca sobre una placa de un condensador y si V es la diferencia de potencial entre las placas, entonces, $C = Q/V$. Se puede considerar ahora un capacitor de placas paralelas, midiéndolo bajo dos condiciones distintas: primero, con vacío (o en la práctica en aire) entre las placas y después con el material que se investiga entre las placas.

Supóngase que en ambos casos se coloca una carga Q sobre las placas. La densidad de carga sobre las placas será Q/A , en donde A es el área de la placa. En el caso de que haya vacío entre las placas, E será σ / ϵ_0 , que es $Q/A\epsilon_0$. Con el dieléctrico entre las placas, el campo eléctrico será $1/k$ más grande.

Si la separación entre las placas es d , la diferencia de potencial entre las placas será (de $V = Ed$)

$$V_v = \frac{Q}{A\epsilon_0} d$$

para el vacío

$$V_d = \frac{Q}{kA\epsilon_0} d$$

para el dieléctrico

Entonces, ya que $C = Q/V$, se obtiene

$$C_v = \frac{A\epsilon_0}{d} \quad C_d = k \frac{A\epsilon_0}{d}$$

para el vacío para el dieléctrico

Se ve que el efecto del dieléctrico ha sido el de incrementar la capacidad del capacitor por un factor igual a la constante dieléctrica. Por tanto, si se mide el capacitor sin ningún dieléctrico y se encuentra que su capacidad es C_v , si se repite la medición con un dieléctrico entre sus placas en el que se obtiene C_d , entonces:

$$k = \frac{C_d}{C_v} \quad (1.41)$$

Tabla 1. Constantes dieléctricas de varias sustancias a 20°.

Material	k
Vacio	1
Aire	1.006
Parafina	2.1
Aceite de petróleo	2.2
Benceno	2.29
Mica	6
Acetona	27
Alcohol metílico	38
Agua	81
Vidrio Pyrex 7070	4
Porcelana	7
Silicio, Si	11.7
Azufre, S	4
NaCl	6.12

CAPITULO II

METODOLOGÍA DE CÁLCULO.

En este capítulo se presentará la metodología de cálculo para poder determinar la permitividad compleja de cualquier sistema.

Primeramente, es necesario saber que el equipo utilizado Vector Impedance Meter 4193A, Hewlett Packard cuenta con un par de expresiones, que son utilizadas para corregir las resistencias internas del equipo y proporcionar un valor confiable de impedancia real, en base a su resistencia y su reactancia. Estas expresiones son:

Para la parte real:

$$R_x = \frac{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o) * |Z_m| * |Z_o|}{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o)^2 + (|Z_m| \operatorname{sen} \theta_o - |Z_o| \operatorname{sen} \theta_m)^2} - |Z_i| \cos \theta_i \quad (2.1)$$

Para la parte imaginaria:

$$X_x = \frac{(|Z_o| \operatorname{sen} \theta_m - |Z_m| \operatorname{sen} \theta_o) * |Z_m| * |Z_o|}{(|Z_o| \cos \theta_m - |Z_m| \cos \theta_o)^2 + (|Z_m| \operatorname{sen} \theta_o - |Z_o| \operatorname{sen} \theta_m)^2} - |Z_i| \operatorname{sen} \theta_i \quad (2.2)$$

Cabe mencionar que estas ecuaciones son válidas siempre y cuando $Z_o \gg Z_i$.

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.

$|Z_i|$ y θ_i son la magnitud de la impedancia y el ángulo de fase de un circuito cerrado, en este caso mercurio.

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

$$|Z_r| = \sqrt{R_r^2 + X_r^2} \quad (2.3)$$

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{X_r}{R_r} \quad (2.4)$$

En esta etapa es muy importante 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 obtenidas de esos parámetros son los mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados para la calibración de los valores de impedancia.

Frecuencia (Mhz)	Aire	Aire	Mercurio	Mercurio
	θ_o	$Z_o (\Omega)$	θ_s	$Z_s (\Omega)$
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

Posteriormente, se deben calcular los valores de R_x y C_x igualmente para cada frecuencia, mediante las siguientes ecuaciones:

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

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

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 conocidas la resistencia y la capacitancia real, el siguiente paso es determinar la permitividad compleja ($\epsilon^* = \epsilon' + j \epsilon''$ donde ϵ' es la constante dieléctrica y ϵ'' son las pérdidas de dielectricidad). Las ecuaciones que aquí se presentan son obtenidas a partir del trabajo de Gottmann⁽³⁴⁾ en 1964:

CONSTANTE DIELECTRICA.

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

PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD.

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

Donde:

C_s y K son las constantes de la celda, C_s esta dada en pF y K en MHz^2 ;

f = Frecuencia en MHz^2 .

C_r = Capacitancia del sistema.

R_r = Resistencia del sistema.

ω = Frecuencia angular (Hz)

Como se muestra a continuación dichos conceptos son adimensionales:

Para e' :

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

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

$$4 C_s K f^2 C_r = 4 * C_s (\text{pF}) * K (\text{MHz}^2) * f^2 (\text{MHz}^2) * C_r (\text{pF}) = \sqrt{\text{pF}^2} = \text{pF}$$

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

Para e'' :

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

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

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

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

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

Para determinar estas constantes es necesario realizar un barrido de frecuencias desde 0.5 a 100 Mhz (frecuencias elegidas) con la celda llena de agua bidestilada (Generalmente se elige agua para simplificar, ya que su constante dieléctrica es conocida y vale 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:

Tabla 3. Valores utilizados en la determinación de C_a Y K .

Frecuencia (Mhz)	Frecuencia $\wedge 2$	θ_m	Z_m	θ_x	Z_x	C_x
0.5	0.25	-85.9	15630	-84.6	20556	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	2068	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 anteriormente obtenidos se procede a graficar la capacitancia en función de la frecuencia, esta última elevada al cuadrado:

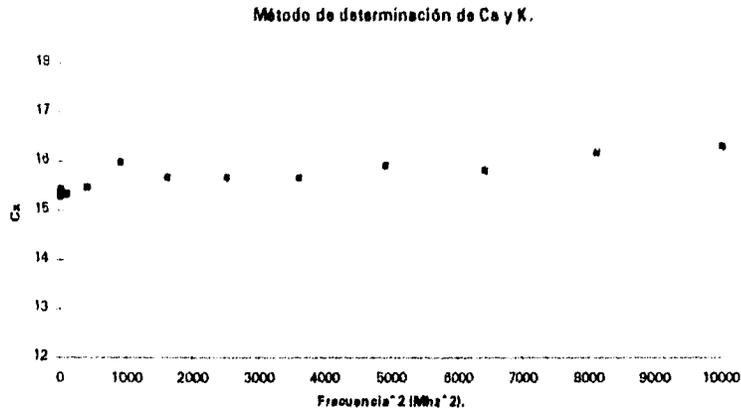


Figura 13. Método de determinación de C_a y K .

donde:

a) La ordenada al origen = $80 C_a$; despejando de la igualdad anterior se obtiene el valor de C_a y,

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

Entonces, haciendo una regresión lineal, eliminando a los valores de $F = 2 \times 10^6$, 30×10^6 , 70×10^6 , se obtiene:

$$a = 15.39726211 \quad b = 8.953414434 \times 10^{-5} \quad r = 0.9696084509$$

Los cuales están dados de la siguiente manera: $Y = a + bX$

a) Cálculo de C_a :

Ordenada al origen = $80 * C_a$

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

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

b) Cálculo de K :

$$\text{Pendiente} = 80^2 \cdot K \cdot C_0$$

$$\frac{8.953414434 \cdot 10^{-3}}{80^2 \cdot 0.1924657764} = K = 7.268674106 \cdot 10^{-8}$$

$$K = 7.268674106 \cdot 10^{-8} \text{ MHz}^{-2}$$

Por último, se calcula la conductividad eléctrica mediante a la siguiente expresión:

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon'' \omega \quad (2.9)$$

donde ϵ_0 es la constante de permitividad⁽³⁵⁾ o la constante dieléctrica del vacío y vale $8.854187810 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ y la conductividad eléctrica está dada en $\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

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

Primeramente se realizó una caracterización del mineral de llegada utilizando las técnicas de Absorción Atómica y Microscopía Electrónica de barrido, encontrando una pureza en el mineral de 86.5%Pb.

Posteriormente se redujo el tamaño de partícula, para que todas estuvieran en un intervalo de tamaño de -200 a +400 mallas; esto se realizó utilizando un mortero y las cribas correspondientes.

Con la idea de reproducir las condiciones presentes en un proceso de flotación de galena, se utilizó un pH de 9.1, el cual se generó con una solución buffer de ácido bórico ($1 \times 10^{-2} \text{M}$) - borato de sodio. Los cálculos hechos para la preparación de solución buffer son los siguientes:

$$pH = pk_a + \log \frac{|A|}{|HA|}$$

donde el pk_a del par ácido bórico - borato de sodio es 9.22.

Entonces, si fijamos el valor de la concentración del ácido bórico (HA), en este caso $1 \times 10^{-2} \text{M}$ y del pH (9.1), se puede despejar la concentración necesaria de borato de sodio requerida para producir dicho pH. Haciendo los cálculos obtenemos lo siguiente:

pH	(A) Moles	(HA) Moles	A (gramos)	HA(gramos)
9.1	7.585×10^{-3}	0.01	0.5786	0.123

Para 200 ml.

Una vez que se tiene la solución buffer y el mineral a la granulometría establecida, el paso siguiente fue la preparación de soluciones con las concentraciones de XEK o $K_2Cr_2O_7$, requeridas:

Las concentraciones de reactivos colector y depresor que fueron utilizados son:

XEK (M)	$K_2Cr_2O_7$ (M)
1×10^{-2} M	1×10^{-3} M
5×10^{-3} M	5×10^{-4} M
1×10^{-3} M	1×10^{-4} M
6×10^{-4} M	5×10^{-5} M
1×10^{-4} M	1×10^{-5} M

Se utilizaron estas concentraciones ya que generalmente éstas, tienen aplicación a nivel industrial.

También en este trabajo hicieron algunas mediciones de pulpas que contenían colector y depresor, dichas concentraciones se presentan a continuación:

Mezclas de XEK (M)	+	$K_2Cr_2O_7$ (M).
1×10^{-4} M	+	1×10^{-5} M
1×10^{-4} M	+	1×10^{-4} M
1×10^{-4} M	+	1×10^{-5} M

Una vez que se tenían las soluciones preparadas, el siguiente paso fue la preparación de la pulpa:

Como se podrá observar en el capítulo de resultados, el conocer cual era el % de sólidos en peso fue la mayor dificultad que presentó este trabajo.

Después de varias pruebas realizadas se determinó que la cantidad apropiada de sólidos en la pulpa para hacer las mediciones era el tener una fracción volumínica 0.4 - 0.5 en la celda, esto porque así se favorece el equilibrio sólido - líquido.

En este caso, la fracción volumínica que se manejó fue de 0.4; 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 galena, resulta ser que dicha fracción volumínica de 0.404 es equivalente a el 71.42% de sólidos en peso. Pero debido a que esta es una fracción volumínica relativamente alta, en el sentido de que físicamente es muy densa, al vaciar a la celda se perdía una gran cantidad de sólidos, los cuales quedaban adheridos a las paredes del tubo. Es por eso que se decidió incrementar un mililitro más de solución a la pulpa, lo cual evidentemente repercutía en la fracción volumínica que bajaba a 0.369 y el % de sólidos igualmente disminuía a 65.2, pero esto únicamente durante el tiempo de acondicionamiento, es decir, en el tubo de ensayo existía 7.5 g de PbS + 4 ml de solución, la solución era agua más la concentración de reactivo correspondiente, ya sea colector, depresor o ambos.

Posteriormente, ya que se tenía la pulpa en un tubo de ensayo, se procedía a acondicionar el mineral. Aquí es muy importante que la pulpa fuera sujeta a una agitación vigorosa, para favorecer la interacción entre el mineral y el reactivo.

Esto se logró utilizando el Ro - tap, un recipiente y una base para fijar a los tubos.

El tiempo de acondicionamiento para todos los tubos sin excepción fue de 25 minutos.

Obtenido el acondicionamiento de la pulpa en los tubos de ensayo, el paso siguiente era vaciar la pulpa a la celda. Esto se hacía 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. Inmediatamente se vaciaba a la celda 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 adecuado de medición, se dejaba reposar 2 minutos a el sistema, para favorecer que se realizara perfectamente la separación de fases (mineral - solución).
- 4.- Al concluir ese tiempo (2 minutos), era necesario el eliminar el millilitro de solución sobrante, para así poder recuperar la fracción volumínica de sólidos deseada (0.404), esto se hacia por medio de una jeringa milimétrica.
- 5.- Una vez que ya se tenían en la celda el 71.42 % sólidos, el cual equivale a una fracción volumínica de 0.404, se tenia que dejar decantar otros 3 minutos el sistema, para asegurar que se obtendría el equilibrio de fases en el sistema.

Al finalizar las operaciones antes citadas, 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.; para obtener el ángulo de fase y la magnitud de la impedancia para cada frecuencia.

Para estudiar las interacciones ocurrentes en el sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$ mediante la técnica de impedancia a altas frecuencias, se utilizó el equipo llamado Vector Impedance Meter 4193A, Hewlett Packard el cual se muestra en la figura 14.

SISTEMA DE MEDICION DE IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS

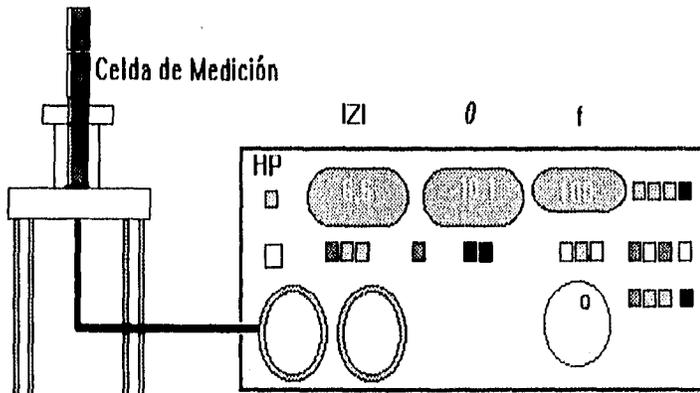


Figura 14. Equipo Medidor del vector de impedancia, Hewlett Packard.

Como se muestra en la figura anterior, este aparato nos proporciona el ángulo de fase y la magnitud del vector de impedancia para cada frecuencia, el intervalo de frecuencias va de 0.4 a 110 Mhz, pero como ya se mencionó, los valores leídos de este equipo son susceptibles de error por lo que es necesario corregirlos, mediante el uso de las expresiones 2.1 y 2.2.

Paralelamente, se muestra la celda de medición que esta construida de un acero inoxidable 304 y tiene una capacidad de 5 ml., la cual tiene un papel muy importante en la veracidad de los resultados, ya que como se expone en el capítulo 1, la capacitancia depende de la geometría del capacitor y en este caso nuestro sistema se comporta como un capacitor.

Una vez terminada las mediciones, es muy importante el limpiar perfectamente la celda, después de cada muestra, ya que si queda un poco de mineral o solución remanente en la celda, esto modificará muy probablemente los resultados de pruebas posteriores. Es por esto que la celda se lavaba con agua abundante, con papel absorbente hasta estar seguro de que no existe residuo alguno.

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

Donde :

$$|Z_o| = 326.3\Omega$$

$$\theta_o = -89.3^\circ$$

$$|Z_i| = 9.1\Omega$$

$$\theta_i = 86.0^\circ$$

Experimentalmente se obtiene que :

$$|Z_m| = 6.45\Omega$$

$$\theta_m = -58.7^\circ$$

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

$$R_s = \frac{(|326.3 \cos(-58.7) - 6.45 \cos(-89.3)| * |6.45 * |326.3|}{(|326.3 \cos(-58.7) - 6.45 \cos(-89.3)|^2 + (6.45 \operatorname{sen}(-89.3) - |326.3 \operatorname{sen}(-58.7)|)^2} - |9.1 \cos(86)$$

$$= 2.831143536\Omega$$

$$X_s = \frac{(|326.3 \operatorname{sen}(-58.7) - 6.45 \operatorname{sen}(-89.3)| * |6.45 * |326.3|}{(|326.3 \cos(-58.7) - 6.45 \cos(-89.3)|^2 + (6.45 \operatorname{sen}(-89.3) - |326.3 \operatorname{sen}(-58.7)|)^2} - |9.1 \operatorname{sen}(86)$$

$$= -14.6490072\Omega$$

$$|Z_s| = \sqrt{(2.831143536^2) + (-14.6490072^2)} = 14.92007995\Omega$$

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

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{-14.6490072}{2.831143536} = -79.06157687$$

Posteriormente se deben calcular los valores de R_x y C_x :

$$R_x = \frac{14.92007995}{\cos(-79.06157687)} = 78.62857638 \Omega$$

$$C_x = -\frac{\text{sen}(-79.06157687)}{628.3185307 * 10^6 * 14.92007995} * 1 * 10^{12} = 104.733598 \text{ pF}$$

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

El cálculo de la constante dieléctrica es:

$$\epsilon' = \frac{-0.1924657764 + \sqrt{0.1924657764^2 + (4 * 0.1924657764 * 7.268674106 * 10^{-8} * 100^2 * 104.733598)}}{2 * 0.1924657764 * 7.268674106 * 10^{-8} * 100^2}$$

$$= 417.4812381$$

El cálculo de las pérdidas de dielectricidad es:

$$\epsilon'' = \frac{1}{78.62857638 * 628.3185307 * 10^6 * 0.1924657764 * (1 + (2 * 417.4812381 * 7.268674106 * 10^{-8} * 100^2))}$$

$$= 65.44786095$$

Por último, se calcula la conductividad eléctrica:

$$\sigma = 8.854187818 * 10^{-12} * 65.44786095 * 628.3185307 * 10^6 = 0.3641028308 \Omega^{-1} m^{-1}$$

Ordenando la información ésta se presenta de la siguiente manera:

Frecuencia (MHz)	θ_x	Z_x	R_x	C_x	ϵ'	ϵ''	Cond. eléct.
100	-79.06	14.92	78.62	104.73	417.48	65.44	0.3641

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, ordenados en dos etapas; uno son los resultados que son originados para desarrollar la técnica, aquí se podrán ver tablas a distintas concentraciones y distintos porcentajes de sólidos en peso en la celda, hasta determinar un porcentaje de sólidos adecuado. Y dos, ya que se tiene el porcentaje de sólidos adecuado entonces, se presentan los resultados producidos para conocer acerca de la interacciones existentes en el sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$, es decir a un porcentaje definido de sólidos se tienen resultados sobre la influencia que tiene el reactivo adicionado sobre la superficie de la galena con respecto a sus propiedades eléctricas.

ETAPA 1

Tabla 4.

Sin reactivos + 15 % sól. PbS Buffer pH = 9.1..							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-11.28	401.02	408.9	155.26	806.68	4044.2	0.1124
1	-11.49	373.4	381	84.96	441.4	2169.9	0.1207
2	-13.76	350.47	360.8	54.03	280.7	1145.6	0.1274
5	-22.91	317.91	345.1	38.99	202.5	478.7	0.1331
10	-36.73	271.37	338.6	35.07	182.02	243.5	0.1354
20	-54.82	192.02	333.3	33.87	175.1	122.7	0.1365
30	-64.66	141.08	329.7	33.98	174.58	81.73	0.1364
40	-69.67	111.05	319.7	33.59	171.15	62.17	0.1383
50	-73.34	90.3	315	33.76	170.19	49.43	0.1374
60	-75.54	76.03	304.6	33.78	168.12	41.57	0.1387
70	-77.38	65.22	298.7	34.01	166.82	35.34	0.1376
80	-78.44	57.13	285.1	34.11	164.63	31.43	0.1396
90	-79.52	49.91	274.6	34.84	164.99	28.01	0.1402
100	-79.97	44.52	255.7	35.2	163.47	26.12	0.1453

Tabla 5.

XEK = 1×10^{-4} M + 15 % sol. PbS + Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-11.91	475.26	485.7	138.26	718.3	3404.7	0.0947
1	-12.27	447.8	458.3	75.52	392.3	1804	0.1003
2	-14.63	419.45	433.5	47.93	249	953.59	0.1061
5	-24.28	376.92	413.5	34.73	180.39	399.6	0.1111
10	-38.75	316.89	406.3	31.44	163.1	203	0.1129
20	-56.97	216.98	398	30.74	159.01	102.9	0.1144
30	-66.45	159.34	398.8	30.52	156.97	67.71	0.113
40	-71.03	125.17	385	30.06	153.44	51.83	0.1153
50	-74.58	101.36	381.3	30.27	153.03	41.08	0.1142
60	-76.52	85.36	366.4	30.21	151.04	34.85	0.1163
70	-78.42	73.06	364	30.48	150.34	29.31	0.1141
80	-79.38	64.06	347.6	30.52	148.34	26.12	0.1162
90	-80.29	55.98	331.9	31.13	148.74	23.55	0.1179
100	-80.73	49.93	310	31.45	147.6	21.95	0.1221

Tabla 6.

XEK = 6×10^{-4} M + 15 % sol. PbS + Buffer pH = 9.1.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-11.6	482.26	492.3	132.78	689.9	3359.1	0.0934
1	-12.16	450.88	461.2	74.38	386.4	1792.7	0.0997
2	-14.02	420.35	433.2	45.88	238.3	954.1	0.1061
5	-21.71	378.11	406.9	31.14	161.74	406.1	0.1129
10	-34.34	328.51	397.8	27.33	141.85	207.4	0.1153
20	-52.06	240.36	390.9	26.11	135.13	104.9	0.1167
30	-62.34	180.41	388.6	26.04	134.14	69.6	0.1161
40	-67.71	143.96	379.5	25.57	130.87	52.8	0.1174
50	-71.78	116.94	374.1	25.85	131.21	42.18	0.1173
60	-74.14	99.49	364.1	25.64	128.89	35.45	0.1183
70	-76.39	85.27	362.5	25.91	128.73	29.84	0.1162
80	-77.55	74.86	347.4	25.95	127.29	26.59	0.1183
90	-78.58	65.49	330.8	26.46	127.88	24.13	0.1208
100	-79.29	58.51	314.9	26.72	127.11	22.16	0.1232

Tabla 7.

XEK = 1×10^{-3} M + 15% sól. PbS + buffer pH = 9.1.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduc. t. eléct.
0.5	-11.05	536.4	546.5	113.8	591.27	3025.9	0.0841
1	-11.77	503.16	513.9	64.53	335.27	1608.8	0.0895
2	-14.15	471.1	485.8	41.3	214.5	850.8	0.0946
5	-23.27	426.09	463.8	29.51	153.32	356.3	0.0991
10	-37.19	361.78	454.1	26.59	138.03	181.71	0.101
20	-55.26	254.2	446.1	25.72	133.15	91.95	0.1023
30	-65.11	187.18	444.8	25.7	132.43	60.91	0.1016
40	-69.98	148.01	432.5	25.25	129.29	46.4	0.1032
50	-73.7	120	427.7	25.45	129.23	36.93	0.1027
60	-75.73	101.31	411.1	25.37	127.58	31.42	0.1048
70	-77.84	86.76	411.9	25.61	127.32	26.29	0.1023
80	-78.86	75.92	393.1	25.71	126.17	23.52	0.1046
90	-79.84	66.39	376.5	26.21	126.76	21.23	0.1062
100	-80.31	59.38	352.8	26.41	125.76	19.81	0.1102

Si graficamos concentración de reactivo vs. Constante dieléctrica, utilizando los valores obtenidos a una frecuencia de 100 Mhz, tenemos:

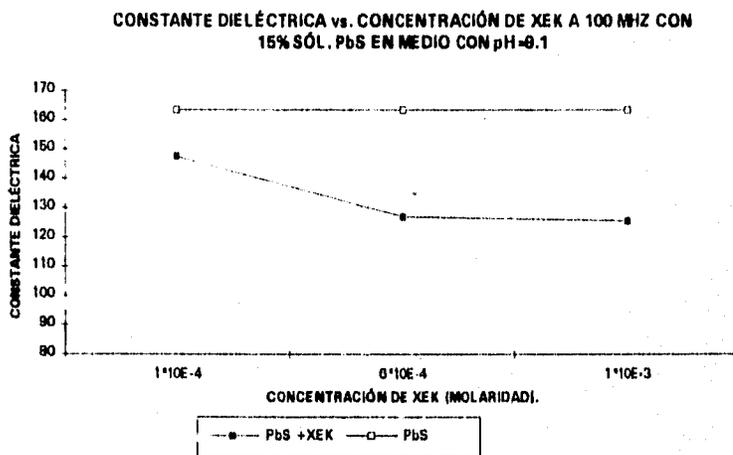


Figura 15. e' vs. concentración de XEK con 15% sól. PbS a 100 Mhz.

Como se puede observar de la figura 15 encontramos que al aumentar la concentración de XEK disminuye la constante dieléctrica, hasta casi volverse asintótica, situación que era de esperarse, sin embargo, se requería de operar con una concentración de sólidos adecuada en la se mostrase una independencia de la constante dieléctrica en función del porcentaje de sólidos. Para lo cual se operaron las siguientes condiciones:

Tabla 8.

Sin reactivos + 20 % sól. Pbs + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-13.07	301.86	309.9	238.6	1239.8	5336.4	0.1484
1	-12.97	280.09	287.4	127.5	662.73	2876.6	0.16
2	-14.48	260.67	269.2	76.37	396.78	1535.2	0.1708
5	-22.07	235.98	254.6	50.7	263.3	648.7	0.1804
10	-35.07	206.08	251.8	44.38	230.2	327.2	0.182
20	-52.75	149.22	246.5	42.44	219.16	165.5	0.1841
30	-62.87	111	243.4	42.53	217.88	110.09	0.1837
40	-68.12	87.77	235.6	42.06	213.2	83.5	0.1858
50	-72.04	71.58	232.1	42.29	211.62	68.13	0.1839
60	-74.44	60.53	225.7	42.21	208.01	55.05	0.1837
70	-78.51	51.95	222.8	42.55	206	48.22	0.1799
80	-77.66	45.48	212.9	42.73	202.87	40.82	0.1816
90	-78.64	39.82	202.2	43.53	202.11	36.68	0.1836
100	-79.25	35.35	189.7	44.22	200.56	33.75	0.1877

Tabla 9.

Sin reactivos + 13 % sól. PbS + Agua.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-11.93	679.03	694	96.91	503.5	2382.9	0.0662
1	-13.44	638.52	656.5	57.96	301.14	1259.4	0.07
2	-17.77	595.55	625.4	40.79	211.92	661	0.0735
5	-31.75	510.91	600.8	32.79	170.32	275	0.0764
10	-48.9	387.78	589.9	30.92	160.5	139.8	0.0777
20	-65.57	236.82	572.7	30.59	158.23	71.5	0.0795
30	-72.85	166.3	564	30.48	156.77	47.8	0.0797
40	-76.28	128.51	542.2	30.07	153.53	36.81	0.0819
50	-78.77	103.14	530	30.26	153.01	29.55	0.0821
60	-80.23	86.56	510.2	30.2	150.94	25.03	0.0835
70	-81.6	73.79	505.2	30.48	150.32	21.12	0.0822
80	-82.16	64.5	473.3	30.55	148.49	19.18	0.0853
90	-82.68	56.25	441.8	31.17	148.93	17.69	0.0885
100	-83.03	50.19	413.7	31.47	147.67	16.45	0.0915

Tabla 10.

Sin reactivos + 15 % sól. PbS + Agua.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-12.42	570.63	584.3	120.05	623.79	2830.2	0.0787
1	-13.43	530.59	545.5	69.67	362	1515.7	0.0843
2	-16.99	497.2	519.9	46.77	242.9	795.1	0.0884
5	-29.84	432.14	498.1	36.65	190.36	331.7	0.0922
10	-46.32	337.18	488.2	34.13	177.14	168.9	0.0939
20	-63.49	211.1	473	33.73	174.39	86.5	0.0962
30	-71.34	150.3	469.9	33.44	171.82	57.3	0.0956
40	-74.99	116.44	449.8	33	168.19	44.22	0.0984
50	-77.83	93.57	443.9	33.25	167.66	35.11	0.0976
60	-79.32	78.6	424.1	33.16	165.16	29.9	0.0998
70	-80.83	67.09	421.3	33.45	164.22	25.1	0.0977
80	-81.46	58.71	395.5	33.5	161.9	22.7	0.101
90	-81.95	51.17	365.5	34.21	162.27	21.1	0.1056
100	-82.38	45.52	343.3	34.65	161.15	19.5	0.1084

Tabla 11.

Sin reactivos + 17 % sól. PbS + Agua.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-14.14	442.29	456.1	175.92	914.06	3625.7	0.1008
1	-14.34	410.85	424	95.96	498.6	1949.8	0.1084
2	-16.98	382.32	399.7	60.78	315.8	1034.1	0.115
5	-27.57	337.97	381.2	43.59	226.4	433.4	0.1205
10	-42.92	274.37	374.7	39.5	204.9	220	0.1223
20	-60.35	182.09	368.1	37.98	196.2	111	0.1235
30	-69.22	130.15	366.9	38.11	195.51	73.2	0.1221
40	-73.42	101.3	365	37.64	191.33	55.7	0.1239
50	-76.6	81.74	352.7	37.87	190.23	43.8	0.1218
60	-78.25	68.72	337.6	37.78	187.17	37.17	0.124
70	-79.94	58.69	336.2	38.13	185.85	31.02	0.1208
80	-80.84	51.59	324.4	38.06	182.32	27.23	0.1211
90	-81.42	45.01	301.91	38.84	182.28	25.05	0.1254
100	-81.96	39.9	285.4	39.49	181.31	22.92	0.1275

Tabla 12.

Sin reactivos + 20% sól. PbS + Agua.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-14.40	379.1	391.4	208.93	1085.5	4225.1	0.1175
1	-14.25	348.4	359.5	112.44	584.22	2299.6	0.1279
2	-16.07	323.4	336.6	68.13	353.9	1228.0	0.1366
5	-25.19	289.2	319.7	46.84	243.2	516.8	0.1437
10	-39.36	241.2	311.9	41.85	217.1	264.2	0.1469
20	-57.05	167.79	308.5	39.80	205.56	132.4	0.1473
30	-66.4	121.96	304.74	39.86	204.37	88.09	0.1470
40	-71.13	95.55	295.5	39.40	200.06	66.8	0.1486
50	-74.46	77.55	289.5	39.54	198.3	53.28	0.1482
60	-76.48	65.28	279.3	39.50	195.27	44.76	0.1494
70	-78.35	55.92	276.9	39.82	193.5	37.4	0.1456
80	-79.36	48.95	265.2	39.94	190.62	33.09	0.1472
90	-80.21	42.77	251.7	40.73	190.33	29.8	0.1492
100	-80.67	38.03	234.6	41.28	188.65	27.65	0.1538

Como se observa en las tablas anteriores, la influencia que tiene el % de sólidos en la celda es un factor que afecta las mediciones de constante dieléctrica.

Entonces para resolver este problema, se consideró la fundamentación dada por Bruggeman-Hanai, en donde se manifiesta la importancia que tiene la fracción volumínica de sólidos para las determinaciones de permitividad. Se menciona que para que exista en la celda el equilibrio sólido-líquido es necesario el utilizar una fracción volumínica de 0.5 o cercana a ella. Por otro lado, en información procedente de Francia se tenía el antecedente de un estudio hecho con tales fracciones volumínicas. Y se sabía que la capacidad de la celda de medición era de 5 ml., también se conocía que con 1 ml de mineral se garantizaba que entre las placas del capacitor existente en la celda, estuviera saturado de dieléctrico, en este caso de mineral. O lo que es igual, se llegó a que el % de sólidos adecuado para medir el comportamiento eléctrico de la galena fuera 71.42% de sólidos en peso de galena. Esto si la celda se llena a una capacidad de 4 ml.

Una vez conocido el % de sólidos adecuado (71.42% PbS) se pasó a la etapa 2. Consistente en obtener información acerca de las propiedades dieléctricas del sistema PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$.

ETAPA 2.

Tabla 13.

Sin reactivos + 71.42% sól. PbS + Buffer pH = 9.1.							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-20.1	159.4	169.81	688.2	3575.4	9738.1	0.2708
1	-18.27	141.97	149.51	351.51	1826.13	5529.3	0.3076
2	-18.82	128.05	135.29	200.5	1041.6	3054	0.3398
5	-25.8	112.19	124.68	123.7	642.2	1323.3	0.3680
10	-38.4	94.34	120.53	105.0	543.4	680.6	0.3786
20	-55.5	65.92	116.63	99.5	509.8	344.2	0.3829
30	-64.77	48.55	113.96	98.83	497.3	227.0	0.3788
40	-69.84	37.91	110.03	98.52	484.6	168.8	0.3756
50	-73.2	30.94	107.05	98.48	471.34	131.8	0.3666
60	-75.2	25.98	102.14	98.73	458	108.8	0.3631
70	-77.09	22.46	100.6	98.6	442.7	89.2	0.3473
80	-78.14	19.65	95.69	99.07	429.1	77.19	0.3435
90	-78.8	17.03	88.37	101.8	423.5	69.3	0.3469
100	-79.06	14.92	78.62	104.7	417.4	65.4	0.3638

Se ha elegido esta tabla (blanco o estudio del mineral en ausencia de reactivos de flotación) para caracterizar los comportamientos que tienen cada uno de los componentes eléctricos, en función de la frecuencia (MHz).

**ÁNGULO DE FASE vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH =9.1 +
71.42% sól. PbS.**

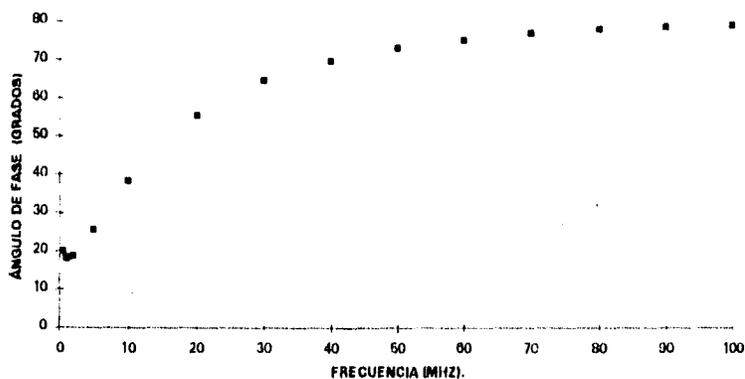


Figura 16. Angulo de fase vs. Frecuencia con 71.42% sól. PbS.

**IMPEDANCIA vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH =9.1 +
71.42% sól. PbS.**

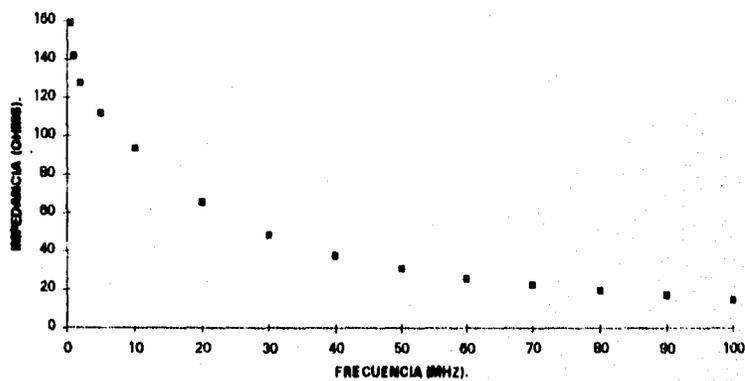


Figura 17. Impedancia vs. Frecuencia con 71.42% sól. PbS.

RESISTENCIA vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH =9.1 +
71.42% sól. PbS.

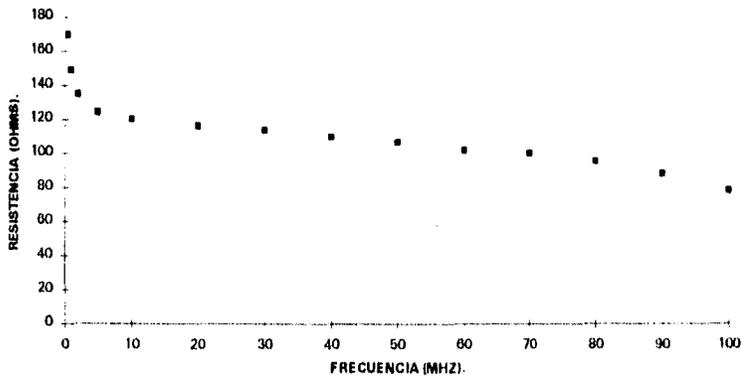


Figura 18. Resistencia vs. Frecuencia con 71.42% sól. PbS.

CAPACITANCIA vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH =9.1 +
71.42% sól. PbS.

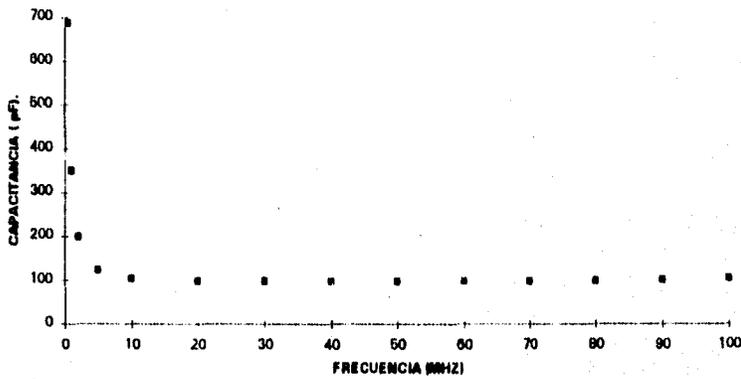


Figura 19. Capacitancia vs. Frecuencia con 71.42% sól. PbS.

CONSTANTE DIELECTRICA vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH=0.1 +71.42%sol. PbS.

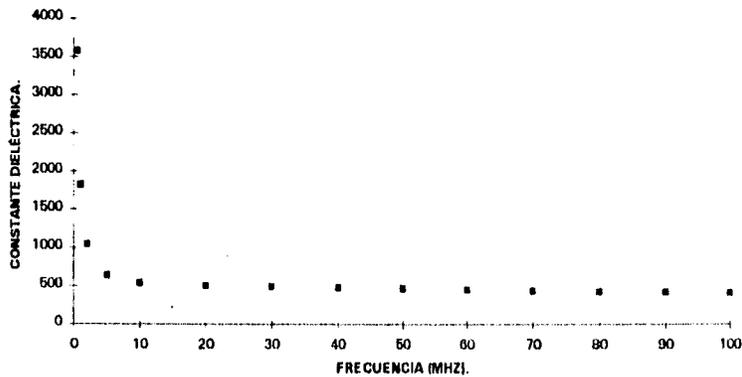


Figura 20. e' vs. Frecuencia con 71.42%sol. PbS.

PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER pH=0.1 +71.42%sol. PbS.

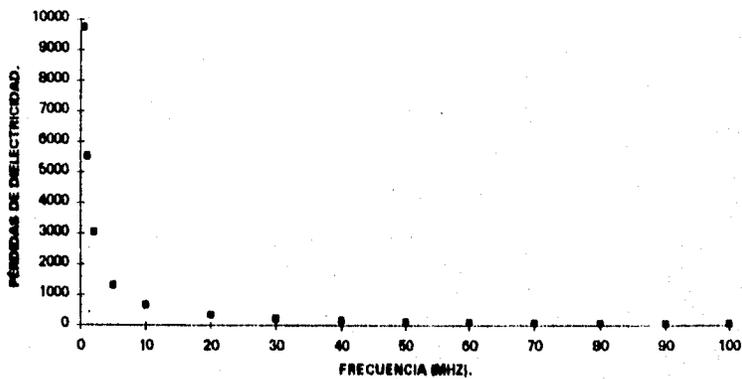


Figura 21. e'' vs. Frecuencia con 71.42%sol. PbS.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA BUFFER
pH=9.1 +71.42% sól. PbS.

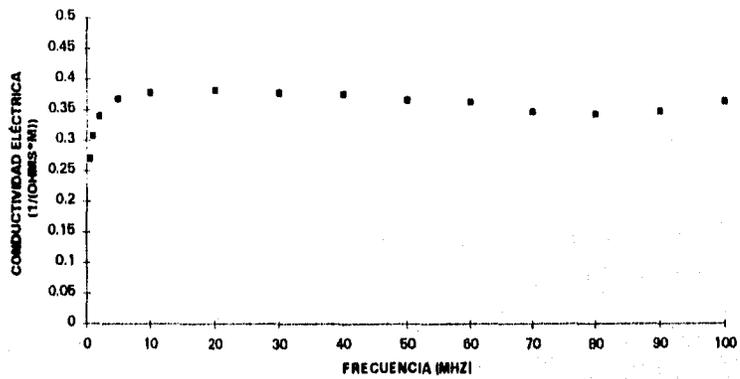


Figura 22. Conductividad eléctrica vs. Frecuencia con 71.42% sól. PbS.

RESULTADOS DEL SISTEMA PbS - XEK.

Tabla 14.

XEK = $1 \times 10^{-2} M$ + 71.42% sól. PbS + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-24.4	93.04	102.17	1413.3	7342.3	16182.3	0.4501
1	-21.58	78.86	84.81	742.3	3856.1	9744.6	0.5421
2	-19.35	68.02	72.1	387.7	2013.5	5727.6	0.6372
5	-18.22	58.13	61.2	171.2	888.3	2693.4	0.7492
10	-20	53.01	56.42	102.6	531.5	1454.3	0.809
20	-27.15	47.43	53.31	76.55	393.2	758.1	0.8435
30	-34.66	42.78	52.02	70.52	358	506.1	0.8446
40	-40.75	38.48	50.8	67.48	337.4	377.3	0.8396
50	-46.41	34.68	50.3	66.47	326	293.9	0.8175
60	-50.74	31.18	49.28	65.87	316.1	239.9	0.8007
70	-54.67	28.11	48.63	65.97	308.8	199.1	0.7753
80	-57.89	25.45	47.89	66.19	301.6	168.5	0.7499
90	-60.1	23.02	46.2	66.57	294.7	147.6	0.739
100	-61.56	20.7	43.48	67.59	290	133.7	0.7438

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK = $1 \times 10^{-2} M$.

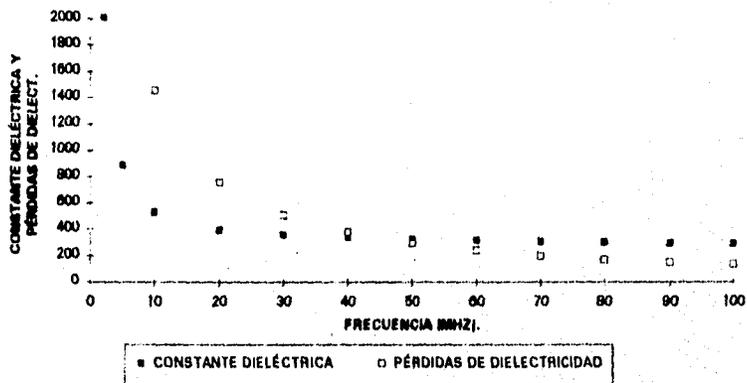


Figura 23. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK= $1 \times 10^{-2} M$.

Tabla 15.

XEK = $5 \times 10^{-3} M$. + 71.42% sól. PbS + Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-21.90	131.47	141.71	903.38	4693.3	11668.2	0.3245
1	-19.35	114.31	121.16	461.32	2396.4	6822.6	0.3795
2	-17.74	101.41	106.48	239.17	1242.2	3880.06	0.4317
5	-19.16	89.38	94.63	116.91	606.76	1743.8	0.4850
10	-25.20	81.28	89.83	83.37	431.84	914.7	0.5088
20	-38.02	68.30	86.71	71.77	368.94	466.7	0.5192
30	-48.27	56.85	85.42	69.63	353.60	308.4	0.5147
40	-55.30	47.77	83.91	68.47	342.16	228.1	0.5075
50	-60.66	40.48	82.64	68.53	335.62	178.3	0.4959
60	-64.36	34.87	80.60	68.57	328.13	145.9	0.4870
70	-67.54	30.51	79.88	68.87	321.10	120.3	0.4684
80	-69.74	26.98	77.94	69.17	313.6	102.6	0.4566
90	-71.28	23.89	74.46	70.10	308.2	90.5	0.4531
100	-72.24	21.19	69.49	71.52	304.3	82.4	0.4584

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK = $5 \times 10^{-3} M$.

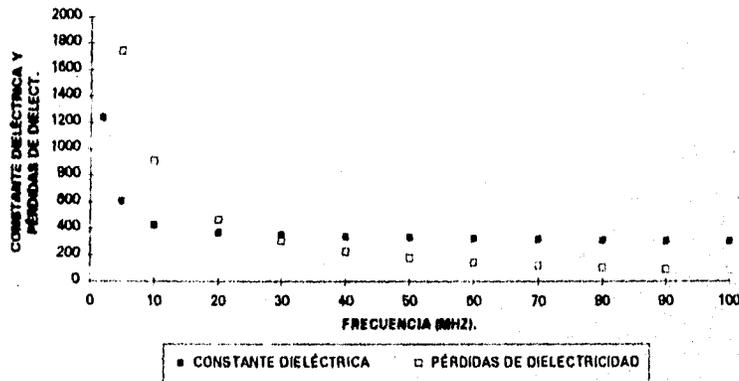


Figura 24. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK = $5 \times 10^{-3} M$

Tabla 16.

XEK = $1 \times 10^{-3} M.$ + 71.42% sód. Pbs + Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	ϵ'	ϵ''	Conduct. eléct.
0.5	-19.73	177.83	188.93	604.3	3139.9	8752.7	0.2434
1	-17.93	158.31	166.39	309.5	1608.2	4968.4	0.2764
2	-17.95	142.51	149.81	172.1	894.3	2758.4	0.3069
5	-23.19	125.78	136.84	99.66	517.3	1206.2	0.3355
10	-33.92	109.20	131.60	81.33	421.31	624.49	0.3474
20	-50.41	81.14	127.33	75.58	388.3	317.5	0.3532
30	-60.50	61.79	125.52	74.72	378.85	209.21	0.3491
40	-66.28	49.08	122.05	74.21	369.72	155.95	0.3470
50	-70.13	40.36	118.79	74.16	361.56	123.04	0.3422
60	-72.80	34.03	115.13	74.46	354.07	100.99	0.3370
70	-75.07	29.41	114.17	74.69	345.54	83.02	0.3233
80	-76.40	25.97	110.49	74.45	334.73	71.33	0.3174
90	-77.37	22.68	103.82	76.07	330.81	63.68	0.3188
100	-77.88	20.04	95.55	77.61	326.01	58.71	0.3266

**CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs.
FRECUENCIA DEL SISTEMA Pbs + XEK = $1 \times 10^{-3} M.$**

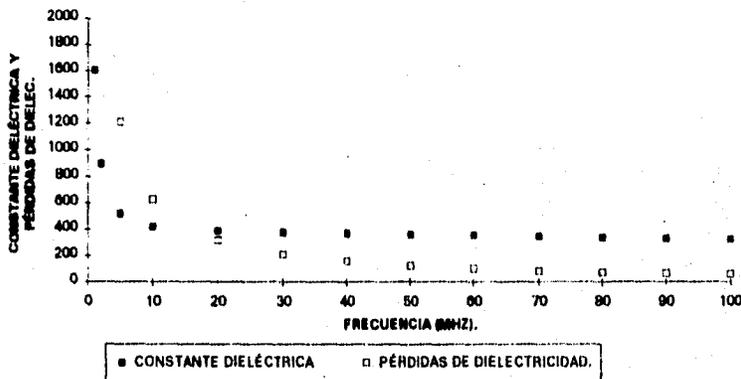


Figura 25. ϵ' y ϵ'' vs. Frecuencia con XEK= $1 \times 10^{-3} M.$

Tabla 17.

XEK = $6 \times 10^{-4} M$ + 71.42% sól. PbS + Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-24.67	104.06	114.5	1277.01	6634.2	14438.1	0.4016
1	-21.84	88.48	95.33	669.3	3476.8	8669.8	0.4823
2	-20.0	76.65	81.5	355.0	1843.9	5062.7	0.5633
5	-20.51	65.82	70.2	169.4	878.8	2345.5	0.6524
10	-25.33	59.18	65.4	115.06	595.2	1252.0	0.6965
20	-36.80	50.04	62.5	95.25	488.0	643.1	0.7155
30	-46.34	42.21	61.1	90.91	458.6	425.1	0.7094
40	-53.11	35.72	59.5	89.07	440.2	315.02	0.7010
50	-58.37	30.54	58.2	88.72	427.7	245.6	0.6831
60	-62.16	26.49	56.7	88.53	414.9	199.5	0.6659
70	-65.33	23.43	56.1	88.15	400.8	163.5	0.6367
80	-67.58	20.87	54.7	88.09	387.7	138.7	0.6172
90	-69.14	18.32	51.4	90.16	382.3	123.04	0.6160
100	-70.02	16.21	47.4	92.23	376.2	112.5	0.6258

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK = $6 \times 10^{-4} M$.

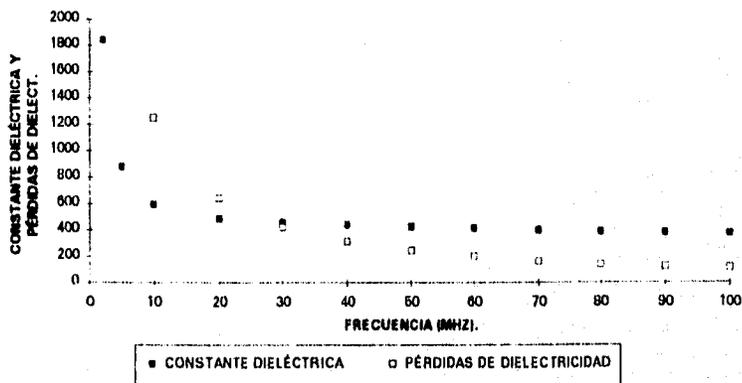


Figura 26. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK = $6 \times 10^{-4} M$.

Tabla 18.

XEK = 1×10^{-4} M. + 71.42% sól. PbS + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Z_x	R_x	C_x	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-23.2	110.7	120.5	1134.6	5894.6	13715.7	0.3815
1	-20.51	95.38	101.8	584.7	3037.5	8115.8	0.4515
2	-19.05	83.77	88.6	310.0	1610.3	4660.8	0.5185
5	-20.70	72.88	77.9	154.3	800.9	2116.3	0.5886
10	-27.25	65.35	73.5	111.5	577.0	1115.3	0.6204
20	-40.4	53.68	70.5	96.2	492.8	569.4	0.6335
30	-50.6	43.85	69.0	93.49	471.2	375.7	0.6270
40	-57.22	36.32	67.1	92.09	454.4	278.5	0.6197
50	-62.19	30.6	65.6	91.98	442.3	217.0	0.6036
60	-65.62	26.22	63.5	92.12	430.2	177.0	0.5908
70	-68.5	23.03	63.0	91.87	415.7	144.5	0.5627
80	-70.33	20.39	60.6	91.85	402.0	124.1	0.5523
90	-71.79	17.83	57.0	94.18	396.6	109.6	0.5487
100	-72.45	15.7	52.1	96.62	390.9	101.1	0.5624

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK = 1×10^{-4} M.

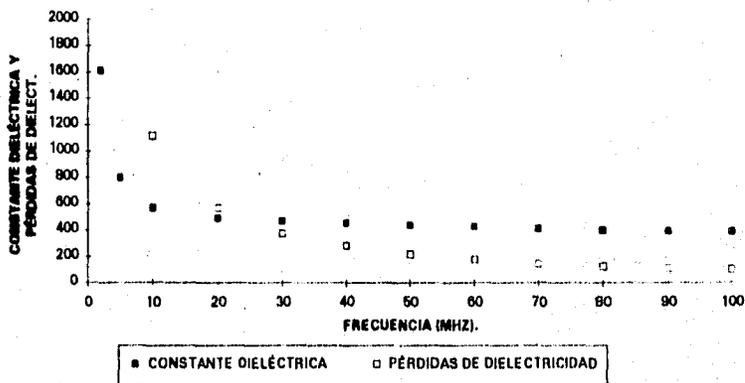


Figura 27. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK = 1×10^{-4} M.

RESULTADOS DEL SISTEMA PbS- $K_2Cr_2O_7$.

Tabla 19.

$K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-3} M.$ + 71.42% sól. PbS + Buffer pH= 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Z_x	R_x	C_x	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-24.43	80.53	88.4	1635.3	8495.2	18690.4	0.5198
1	-21.12	69.14	74.1	829.6	4309.1	11148.5	0.6202
2	-19.21	60.70	64.2	431.4	2240.2	6423.1	0.7146
5	-20.64	52.94	56.5	211.9	1099.2	2911.1	0.8097
10	-27.18	47.67	53.5	152.4	787.8	1525.4	0.8486
20	-40.63	39.07	51.4	132.6	675.8	772.6	0.8596
30	-50.82	31.92	50.5	128.8	642.3	503.1	0.8396
40	-57.57	26.36	49.1	127.3	617.5	367.6	0.8180
50	-62.56	22.37	48.5	126.2	592.1	280.1	0.7791
60	-66.03	19.20	47.2	126.1	570.5	224.4	0.7490
70	-68.9	16.73	46.4	126.7	550.6	182.5	0.7107
80	-70.94	14.78	45.2	127.1	529.9	152.8	0.6800
90	-72.16	12.85	41.9	130.9	520.6	135.6	0.6789
100	-72.7	11.22	37.8	135.3	512.4	125.2	0.6965

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-3} M.$

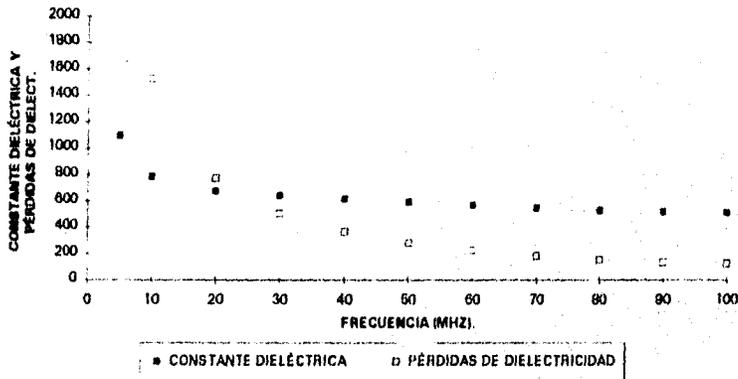


Figura 28. e' y e'' vs. Frecuencia con $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-3} M.$

Tabla 20.

$K_2Cr_2O_7 = 5 \times 10^{-4} M. + 71.42\% \text{sd. PbS} +$ Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-23.87	104.35	114.1	1234.3	6412.7	14488.9	0.4030
1	-20.83	89.97	96.2	629.1	3268.1	8585.1	0.4776
2	-19.28	79.25	83.9	331.5	1721.7	4919.0	0.5473
5	-21.86	69.18	74.5	171.3	888.9	2211.3	0.6151
10	-29.8	61.48	70.8	128.6	665.2	1155.9	0.6430
20	-44.5	48.58	68.1	114.8	586.7	586.5	0.6525
30	-54.7	38.61	66.8	112.1	562.0	384.1	0.6410
40	-61.04	31.33	64.7	111.1	543.0	283.6	0.6310
50	-65.72	26.13	63.5	111.04	526.5	218.4	0.6075
60	-68.8	22.37	61.9	110.54	507.0	175.7	0.5864
70	-71.37	19.44	60.8	110.7	490.0	143.8	0.5599
80	-72.86	17.12	58.1	111.0	472.7	123.4	0.5492
90	-74.1	14.89	54.3	114.1	465.4	109.1	0.5462
100	-74.52	13.05	48.9	117.4	457.9	101.4	0.5641

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + K₂Cr₂O₇ = 5*10⁻⁴M.

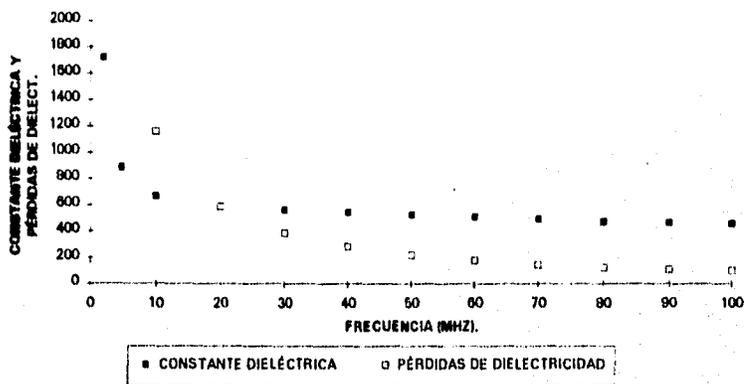


Figura 29. e' y e'' vs. Frecuencia con K₂Cr₂O₇=5X10⁻⁴M.

Tabla 21.

K ₂ Cr ₂ O ₇ = 1X10 ⁻⁴ M. + 71.42% sól. PbS + Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θx	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-25.19	97.55	107.8	1388.9	7215.4	15335.7	0.4265
1	-21.96	82.97	89.4	717.5	3727.3	9237.2	0.5138
2	-19.83	72.24	76.7	373.6	1940.5	5377.7	0.5983
5	-20.66	62.50	66.8	179.7	932.2	2467.1	0.6862
10	-26.54	56.17	62.8	126.6	654.7	1304.3	0.7256
20	-39.07	46.64	60.0	107.5	549.8	666.8	0.7419
30	-49.04	38.6	58.9	103.7	521.4	438.0	0.7310
40	-55.7	32.17	57.1	102.1	501.5	324.2	0.7214
50	-60.7	27.29	55.8	101.7	485.8	251.5	0.6995
60	-64.31	23.42	54.0	102.02	471.8	204.4	0.6822
70	-67.26	20.65	53.4	101.4	463.9	167.0	0.6603
80	-69.3	18.31	51.9	101.6	438.6	141.2	0.6284
90	-70.6	15.99	48.2	104.3	432.1	126.1	0.6313
100	-71.38	14.07	44.0	107.1	425.2	115.9	0.6447

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs.
FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS +K₂Cr₂O₇ =1*10⁻⁴M.

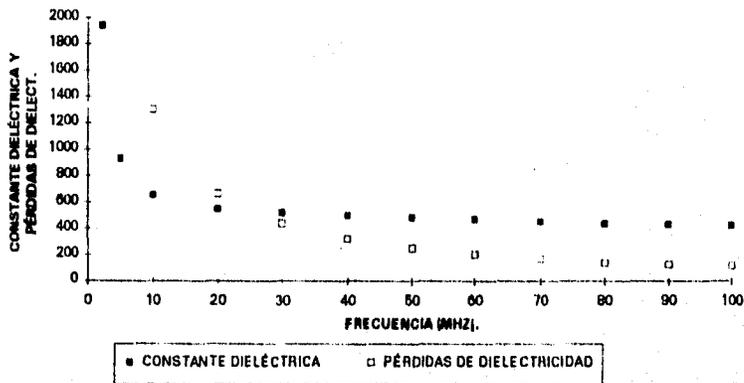


Figura 30. e' y e'' vs. Frecuencia con K₂Cr₂O₇=1X10⁻⁴M.

Tabla 22.

$K_2Cr_2O_7 = 5 \times 10^{-6} M. + 71.42\% \text{ sol. PBS} +$ Buffer pH = 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-20.9	141.6	151.7	804.7	4180.7	10896.4	0.3030
1	-18.91	125.1	132.2	412.3	2142.2	6249.2	0.3476
2	-18.69	112.3	118.6	227.0	1179.0	3482.6	0.3874
5	-24.39	98.65	108.3	133.2	691.6	1522.8	0.4235
10	-35.6	84.68	104.2	109.55	566.8	786.9	0.4377
20	-52.32	61.7	100.9	102.07	522.4	397.3	0.4420
30	-62.09	46.29	98.9	101.2	509.2	261.2	0.4359
40	-67.5	36.5	95.5	100.7	494.9	193.9	0.4314
50	-71.2	29.9	93.2	100.5	480.4	151.0	0.4200
60	-73.65	25.24	89.6	100.8	466.8	123.4	0.4119
70	-75.6	21.88	88.5	100.6	450.6	100.9	0.3929
80	-76.93	19.18	84.8	101.0	436.2	86.6	0.3854
90	-77.68	16.63	78.0	103.8	430.5	78.16	0.3913
100	-78.04	14.56	70.3	106.9	424.4	72.6	0.4038

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PBS + $K_2Cr_2O_7 = 5 \times 10^{-6} M.$

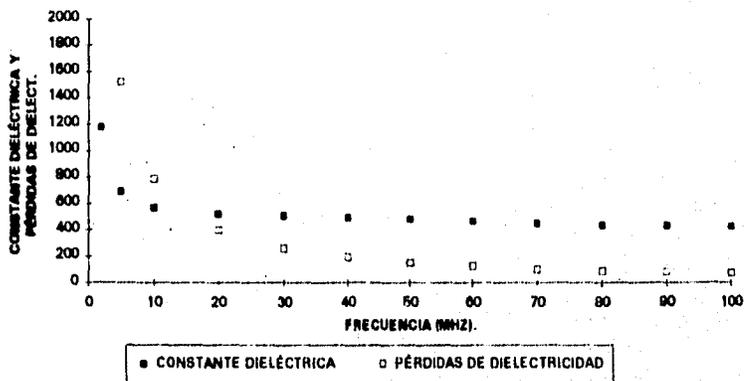


Figura 31. e' y e'' vs. Frecuencia con $K_2Cr_2O_7 = 5 \times 10^{-6} M.$

Tabla 23.

$K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M. + 71.42\% \text{ sól. PbS}$ + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Z_x	R_x	C_x	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-24.5	103.66	113.9	1277.1	6634.6	14505.5	0.4034
1	-21.44	88.38	94.9	658.3	3419.9	8704.2	0.4842
2	-19.69	77.15	81.9	347.6	1805.2	5039.8	0.5607
5	-21.09	66.85	71.6	171.4	889.1	2300.6	0.6399
10	-27.53	59.8	67.5	122.8	635.4	1213.5	0.6751
20	-40.59	49.11	64.6	105.4	539.2	619.8	0.6896
30	-50.62	40.16	63.3	102.0	513.1	407.9	0.6807
40	-57.2	33.22	61.3	100.6	494.5	302.2	0.6724
50	-62.15	28.03	60.0	100.3	479.8	234.6	0.6525
60	-65.61	24.06	58.3	100.3	464.9	190.1	0.6345
70	-68.46	21.16	57.6	99.9	447.7	155.3	0.6047
80	-70.2	18.70	55.4	100.1	433.0	132.8	0.5910
90	-71.72	16.34	52.1	102.7	426.5	117.2	0.5868
100	-72.36	14.38	47.4	105.4	419.8	108.1	0.6013

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M.$

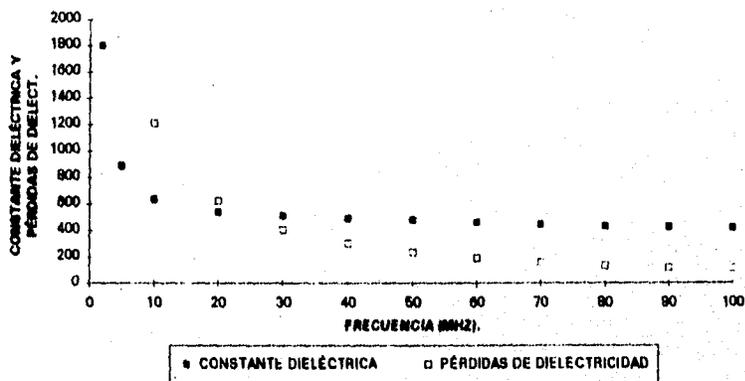


Figura 32. e' y e'' vs. Frecuencia con $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M.$

Si analizamos graficamente el comportamiento de la constante dieléctrica al modificar las concentraciones de reactivo, entonces encontramos lo siguiente:

CONSTANTE DIELECTRICA vs. FRECUENCIA A DISTINTAS CONCENTRACIONES DE XEK.

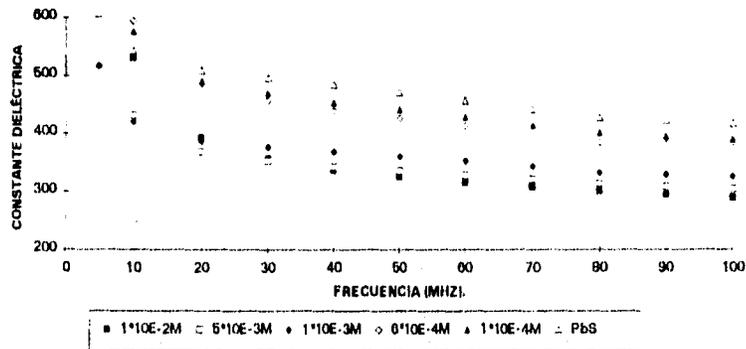


Figura 33. ϵ' vs. Frecuencia a distintas concentraciones de XEK.

CONSTANTE DIELECTRICA vs. FRECUENCIA A DISTINTAS CONCENTRACIONES DE DICROMATO DE POTASIO.

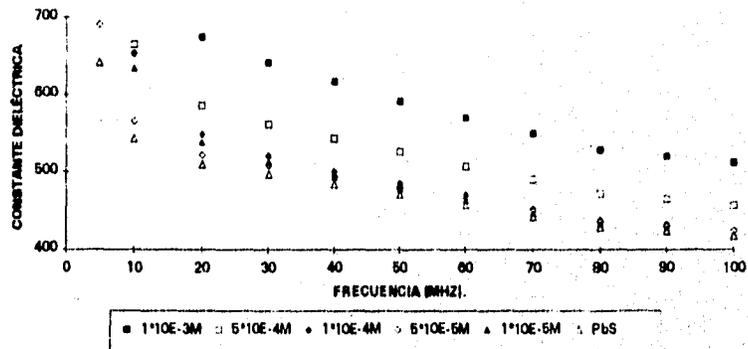


Figura 34. ϵ' vs. Frecuencia a distintas concentraciones de $K_2Cr_2O_7$.

CONSTANTE DIELECTRICA vs. CONCENTRACION DE XEK. A 100 MHZ.

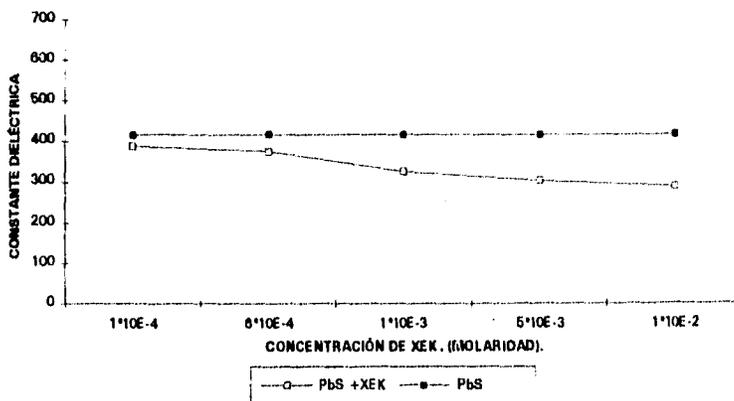


Figura 35. e' vs. Concentración de XEK a 100 MHz.

CONSTANTE DIELECTRICA vs. CONCENTRACION DE DICROMATO DE POTASIO A 100 MHZ.

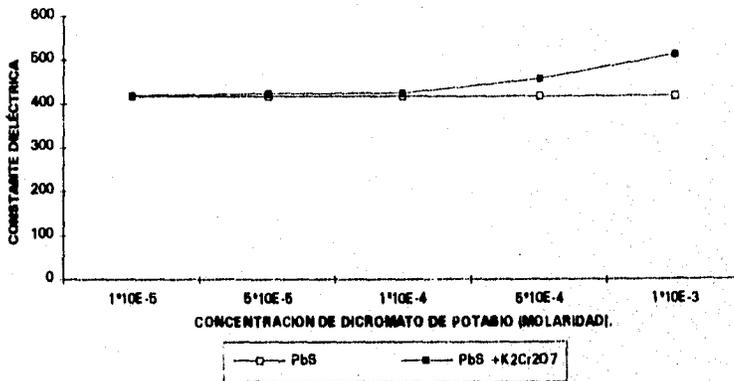


Figura 36. e' vs. Concentración de K₂Cr₂O₇ a 100 MHz.

También se analizaron tres sistemas en donde la pulpa estaba acondicionada con la presencia simultánea de colector y depresor, siendo éstos los resultados:

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

RESULTADOS DEL SISTEMA PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$

Tabla 24.

XEK = $1 \times 10^{-4} M$ + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M$. + 71.42% sol. PbS + Buffer pH= 9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-18.7	154.7	163.4	661.4	3436.4	10115.8	0.2813
1	-16.7	139.2	145.4	329.8	1713.7	5684.6	0.3162
2	-16.5	126.6	132.1	178.5	927.6	3126.9	0.3479
5	-21.5	113.4	121.9	102.8	533.9	1353.8	0.3765
10	-31.7	100.1	117.8	83.6	433.3	897.5	0.3880
20	-48.1	76.3	114.4	77.6	398.6	353.0	0.3927
30	-58.5	58.8	112.8	76.9	389.6	232.3	0.3877
40	-64.6	47.1	110.2	76.3	379.9	172.3	0.3834
50	-68.9	38.8	108.0	76.4	371.9	134.8	0.3749
60	-71.6	32.8	104.5	76.6	363.5	110.7	0.3695
70	-74.1	28.3	104.0	77.1	355.6	90.5	0.3524
80	-75.6	25.0	100.7	76.9	344.6	77.6	0.3453
90	-76.7	21.8	95.0	78.7	340.8	68.9	0.3449
100	-77.2	19.2	87.2	80.5	336.4	63.6	0.3538

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK $4 \times 10^{-4} M$ + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M$.

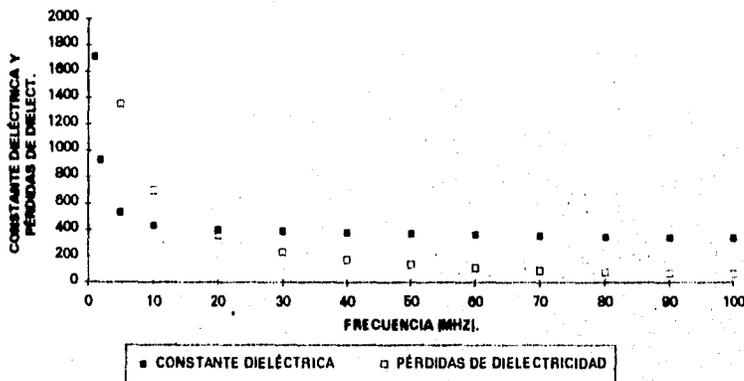


Figura 37. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK= $1 \times 10^{-4} M$ y $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-5} M$.

Tabla 26.

XEK = $1 \times 10^{-4} M$ + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-4} M$. + 71.42% sol. PbS + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-18.3	177.3	186.7	564.5	2933.1	8852.9	0.2462
1	-16.7	159.8	166.9	286.4	1488.2	4951.7	0.2754
2	-17.2	145.8	152.6	161.7	840.2	2706.8	0.3011
5	-23.7	129.6	141.6	98.8	513.3	1165.0	0.3240
10	-35.8	111.4	137.4	83.5	432.9	598.0	0.3326
20	-52.9	80.4	133.6	78.9	405.5	302.1	0.3361
30	-62.7	60.1	131.2	78.3	396.6	199.6	0.3331
40	-68.1	47.4	127.6	77.8	387.2	148.5	0.3304
50	-71.9	38.7	124.7	78.1	379.9	116.4	0.3237
60	-74.2	32.5	120.3	78.3	371.2	95.8	0.3197
70	-76.3	28.0	119.2	78.7	362.3	78.7	0.3064
80	-77.6	24.6	114.8	78.9	352.2	67.7	0.3013
90	-78.4	21.5	107.2	80.5	347.4	60.8	0.3044
100	-78.9	18.9	98.5	82.5	343.4	55.9	0.3109

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs.
FRECUENCIA DEL SISTEMA PbS + XEK = $1 \times 10^{-4} M$ + $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-4} M$

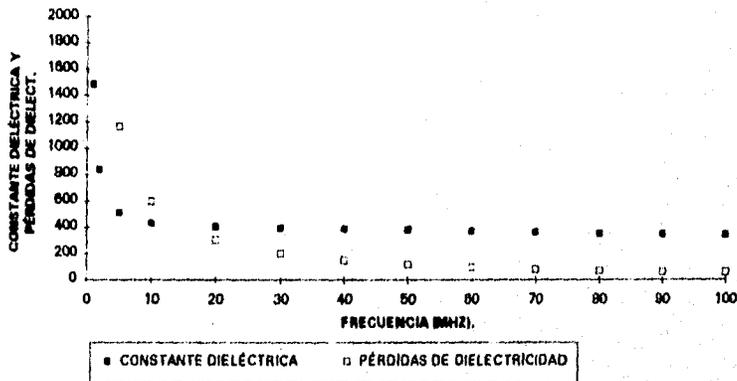


Figura 38. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK= $1 \times 10^{-4} M$ y $K_2Cr_2O_7 = 1 \times 10^{-4} M$.

Tabla 26.

XEK = $1 \times 10^{-4} \text{M}$ + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 1 \times 10^{-3} \text{M}$. + 71.42% sol. PBS + Buffer pH=9.1							
Frecuencia (Mhz)	θ_x	Zx	Rx	Cx	e'	e''	Conduct. eléct.
0.5	-18.5	177.8	187.5	568.8	2955.6	8817.6	0.2452
1	-17.0	160.2	167.5	290.9	1511.2	4934.4	0.2745
2	-17.5	145.7	152.8	164.6	855.0	2704.0	0.3008
5	-24.2	129.0	141.6	101.3	526.1	1165.6	0.3242
10	-36.5	110.2	137.2	85.9	445.3	598.7	0.3330
20	-53.6	78.7	132.9	81.3	417.7	303.5	0.3376
30	-63.4	58.7	131.5	80.8	409.0	198.9	0.3319
40	-68.6	46.1	126.8	80.3	398.9	149.0	0.3315
50	-72.3	37.6	123.9	80.5	390.9	116.7	0.3246
60	-74.6	31.7	119.6	80.6	381.0	96.0	0.3204
70	-76.6	27.2	118.1	81.3	372.9	79.0	0.3076
80	-77.8	24.0	114.0	80.8	360.0	67.8	0.3017
90	-78.6	20.8	106.4	83.0	356.5	60.7	0.3039
100	-79.0	18.3	96.8	85.0	351.8	56.4	0.3137

CONSTANTE DIELECTRICA Y PÉRDIDAS DE DIELECTRICIDAD vs. FRECUENCIA DEL SISTEMA XEK = $1 \times 10^{-4} \text{M}$ + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 1 \times 10^{-3} \text{M}$.

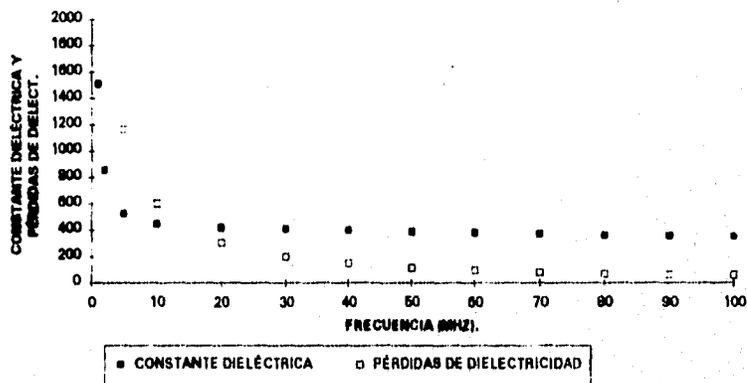


Figura 39. e' y e'' vs. Frecuencia con XEK = $1 \times 10^{-4} \text{M}$ y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 = 1 \times 10^{-3} \text{M}$.

Por último se presenta la comparación gráfica de la constante dieléctrica de las mezclas vs. concentración de reactivo, para de esta manera analizar y predecir cual será el comportamiento que tendrá la galena sujeta a éstas concentraciones de reactivo, es decir, determinar si la galena flotará o se deprimirá, ya que tiene interacción con un colector y con un depresor.

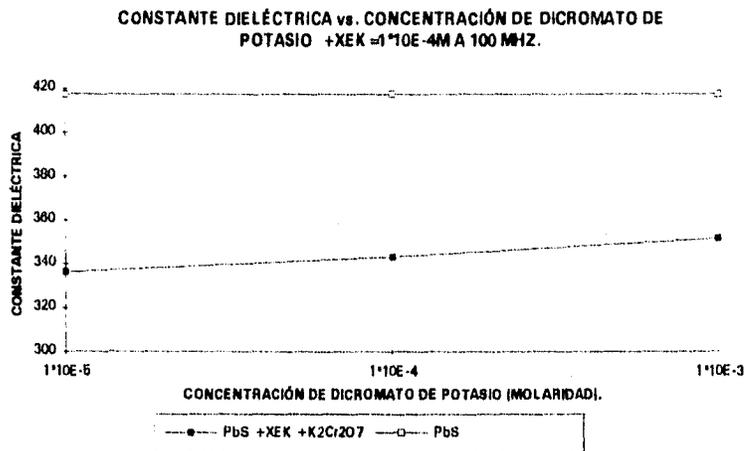


Figura 40. ϵ' vs. Concentración de $K_2Cr_2O_7$ con $XEK=1 \times 10^{-4}M$ a 100 MHZ.

Como se puede observar, los valores de constante dieléctrica de las mezclas están por debajo de la constante dieléctrica del mineral sin reactivos, y aun por debajo de la ϵ' del sistema PbS -XEK ($1 \times 10^{-4}M$), la cual es de 390.9.

Dicho comportamiento, nos dice que las concentraciones de dicromato de potasio utilizadas en éste trabajo en combinación con una concentración de $1 \times 10^{-4}M$ de xantato etílico de potasio proporcionan mejores propiedades hidrofóbicas al mineral, es decir el mineral es más factible que fote; en comparación con el sistema PbS - XEK solo.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, los resultados que se presentan en este trabajo, se encuentran clasificados en dos partes:

- 1.- Determinación del porcentaje de sólidos en peso de mineral en la pulpa⁽³⁶⁾ para realizar mediciones correctas de impedancia a altas frecuencias, para posteriormente a partir de ellas, conocer los valores de permitividad compleja⁽³⁷⁾ a cada frecuencia y para cada sistema bajo análisis.
- 2.- Una vez conocida la metodología correcta para determinar dichos conceptos eléctricos, la etapa 2 consistió en estudiar los sistemas PbS - XEK, PbS - $K_2Cr_2O_7$ y PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$, observando el efecto que tiene la concentración de tales reactivos sobre las partículas de galena.

ETAPA 1.

Es importante señalar que todas las constantes dieléctricas que se expresan entre paréntesis como en el párrafo posterior, son las constantes dieléctricas medidas a una frecuencia de 100 Mhz en todos los casos. La razón por la que se determinó reportar las constantes a esta frecuencia, es porque a este valor se tienen las menores pérdidas de dielectricidad y también porque se tiene un valor de constante dieléctrica homogéneo en relación con frecuencias anteriores (mayores a 20 Mhz).

En esta etapa se comenzó a realizar mediciones de impedancia a sistemas que tenían 15% de sólidos en peso de galena y concentraciones de colector de $1 \times 10^{-4} M$ ($\epsilon' = 125.76$), $6 \times 10^{-4} M$ ($\epsilon' = 127.11$), $1 \times 10^{-3} M$ ($\epsilon' = 147.6$) y PbS sin reactivos ($\epsilon' = 163.47$).

Donde se observa claramente que a medida que se incrementa la concentración de reactivo colector, la constante dieléctrica disminuye.

Consiguientemente, al estudiar el efecto de la concentración, vemos que si aumentamos la concentración de colector, ayudamos a una activación mayor de partículas, esto hasta cierta concentración (concentración óptima), ya que si seguimos aumentando la concentración de reactivo, el valor de la constante dieléctrica no varía más. Esto repercutiría al mismo tiempo y en forma práctica en efectos nocivos en la flotación, así como en el incremento de los costos de operación; entonces, como vemos en las tablas 4-7, a pesar de tener valores de constante dieléctrica muy bajos, la tendencia obtenida es la adecuada.

A partir de ahí se busca la influencia del % de sólidos en la pulpa y en la celda, para determinar % adecuado. Primero, se hicieron varias pruebas teniendo 4% de sólidos en la celda, obteniendo valores de constante dieléctrica muy cercanos a los del agua pura, descartándolos por la misma razón. Por ello se invalidó este argumento y se realizaron diversas pruebas modificando el porcentaje de sólidos (tablas 8 a 12), encontrando que a medida que el porcentaje de sólidos aumenta, la constante dieléctrica igualmente se incrementa, pero no se notaba una estabilidad en el intervalo de resultados obtenidos. Por esto se recurrió a considerar la expresión de Bruggeman-Hanai⁽³⁶⁾ en donde se aprecia la importancia de la fracción volumétrica en las mediciones de permitividad.

Y también se tomó un segundo criterio, al cual consistía en favorecer el equilibrio líquido-sólido teniendo una fracción volumétrica de 0.4 - 0.5, correspondiente al 71.42% sólidos en peso en la celda llenando 4 ml de la celda (4/5 partes de la capacidad total de la celda).

Otra razón por la que se tomó este criterio es que la geometría de la celda que se comporta como un capacitor, es complicada pensando en que las placas paralelas no son del mismo tamaño, ya que una placa se encuentra en el fondo de la celda y la otra placa es la pared de la misma. Teniendo en cuenta este factor se determinó que cuando en la celda existiera el equilibrio líquido - sólido, el sólido (en este caso la gelena) que va a fungir como dieléctrico debería cubrir perfectamente el espacio existente entre las dos placas paralelas.

Sucediendo esto con un ml de mineral, es decir para el caso de la galena (densidad=7.5 g/ml) se agregaba 7.5 g para asegurar que un ml de la celda fuera llenado.

De esta manera, se considera satisfecha esta etapa del trabajo.

ETAPA 2.

Esta etapa comienza con la tabla 13, la cual habla sobre las propiedades eléctricas de la galena ($\epsilon' = 417.4$) sin ser perturbada por ningún reactivo (colector o depresor). A continuación de dicha tabla se llene una serie de gráficas en donde podemos el comportamiento que tiene cada uno de los conceptos tratados en este trabajo.

En la figura 16 se presenta la gráfica de ángulo de fase contra frecuencia. Aquí se muestra como se incrementa el ángulo de fase al aumentar la frecuencia. Este efecto se puede explicar debido a que mientras más aumentemos la frecuencia, provocamos que nuestro sistema se comporte como un capacitor y como sabemos, entre más capacitivo sea un sistema, su ángulo de fase tenderá cada vez más a 90 grados.

En este tipo de equipos se estudian sistemas capacitivos únicamente. Si se deseara que el sistema se comportará como una resistencia o como un inductor se deben utilizar otras técnicas como por ejemplo Impedancia Faradaica.

La figura 17 corresponde a la variación de la impedancia contra la frecuencia; en donde vemos que a bajas frecuencias se tienen valores de impedancia altos, y a altas frecuencias se obtienen valores de impedancia bajos, es decir tienen un comportamiento inverso.

En la figura 18 se tiene la gráfica de resistencia contra la frecuencia en donde se tiene que la resistencia disminuye de manera no significativa al aumentar la frecuencia.

Posteriormente en la figura 19 se grafica la capacitancia contra la frecuencia, en donde se observa que a bajas frecuencias la capacitancia es relativamente elevada en comparación con la capacitancia a frecuencias mayores. También se observa que a partir de la frecuencia de 20 Mhz se tiene una uniformidad de valores de capacitancia al incrementar la frecuencia. Es decir, a partir de 20 Mhz se puede medir confiablemente el valor de la capacitancia del sistema bajo estudio.

En la figura 20 se representan graficamente los valores de la constante dieléctrica contra la frecuencia. En esta gráfica podemos observar que a bajas 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. Es decir, desde la frecuencia de 20 Mhz la constante dieléctrica no cambia significativamente.

En el caso de la figura 21 se grafican las pérdidas de dielectricidad contra la frecuencia se tiene un comportamiento muy parecido al que tiene la gráfica anterior (constante dieléctrica vs. frecuencia). Sólo que aquí no se tienen pérdidas de dielectricidad constantes, sino que aquí las pérdidas de dielectricidad disminuyen a cualquier frecuencia con respecto a la frecuencia inmediata inferior.

Por último, en la figura 22 se tiene la gráfica de conductividad eléctrica contra la frecuencia; en donde se observa que la conductividad eléctrica es la misma a cualquier frecuencia. Debido a que se está midiendo la conductividad eléctrica del sistema y esta es una propiedad del mismo.

Una vez que se contaba con las propiedades eléctricas bajo estudio del mineral sin estar interaccionando con ningún tipo de reactivo (colector o depresor), los resultados del sistema PbS-XEK a distintas concentraciones de colector (tablas 14 a 18). $1 \times 10^{-2} \text{M}$ ($\epsilon' = 290$); $5 \times 10^{-3} \text{M}$ ($\epsilon' = 304.3$); $1 \times 10^{-3} \text{M}$ ($\epsilon' = 326.01$); $6 \times 10^{-4} \text{M}$ ($\epsilon' = 376.2$) y $1 \times 10^{-4} \text{M}$ ($\epsilon' = 390.9$) muestran que al aumentar la concentración de XEK disminuye la constante dieléctrica.

Este comportamiento era esperado, ya que al hacer interaccionar el XEK con el PbS, se fomenta la reacción para formar una película muy delgada de xantato de plomo en la superficie y al generarse esta película, evidentemente se ven modificadas las propiedades eléctricas del mineral, ya sea aumentando o disminuyendo la permitividad compleja del mismo (en el caso del sistema PbS - XEK, el efecto del xantato sobre la galena es la de dar características de no conductor), es por eso que la constante dieléctrica disminuye.

Este comportamiento concuerda con los estudios previos elaborados por Huerta⁽¹⁴⁾ en su tesis de maestría, en donde observó que a mayor concentración de xantato adicionado, mayor fue el desplazamiento del potencial de reposo hacia valores más negativos (comportamiento análogo con los valores de constante dieléctrica).

Una de las razones principales que se puede adjudicar a este comportamiento es la generación de una carga eléctrica superficial en la galena, a través de los iones determinantes del potencial, mediante la interacción química específica entre la superficie de la galena y el colector, denominada quimiadsorción. Estos iones de colectores forman sales insolubles de colector-metal, las cuales son capaces de establecer dicha carga; este es el caso entre la galena y la quimiadsorción del xantato, donde se forma etil-xantato de plomo y dixantógeno, proponiéndose la oxidación del sistema xantato - galena.

Como se observe en la gráfica de constante dieléctrica vs concentración de xantato etílico de potasio (figura 35), observamos la tendencia antes mencionada. Pero además vemos que a altas concentraciones de colector, llega un momento en que la gráfica que tiende a hacerse asintótica.

Este comportamiento parece indicar que a pesar de que sigamos aumentando la concentración de colector, se va a llegar al punto en que ya no se tendrán mayores activaciones de partícula (concentración óptima de colector), haciendo infructuoso el seguir añadiendo reactivo.

Los resultados que nos proporciona este trabajo nos indican que el intervalo de concentraciones de colector óptimos para flotar galena a un pH=9.1 está comprendido entre $1 \times 10^{-3} \text{M}$ - $1 \times 10^{-4} \text{M}$.

Posteriormente en las tablas 19 a 23 se presentan los resultados del sistema PbS - $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a distintas concentraciones de depresor. $1 \times 10^{-3} \text{M}$ ($e'=512.4$); $5 \times 10^{-4} \text{M}$ ($e'=457.9$); $1 \times 10^{-4} \text{M}$ ($e'=425.2$); $5 \times 10^{-5} \text{M}$ ($e'=424.4$) y $1 \times 10^{-5} \text{M}$ ($e'=419.8$).

En este sistema, las partículas de galena al interactuar con el dicromato de potasio reaccionan y se forma muy probablemente una película de cromato de plomo en la superficie de las partículas, dándole propiedades hidrofílicas, favoreciendo a que se hundan.

Como se observa en la figura 36, en donde se presenta la gráfica de constante dieléctrica contra concentración de dicromato de potasio se observa la tendencia contraria a la anterior, es decir, aquí a concentraciones altas de depresor se tienen las mayores constantes dieléctricas y por tanto las mayores activaciones de partícula, donde es más factible deprimir al mineral de galena. Pero también se observa en esta gráfica que a concentraciones menores a $1 \times 10^{-4} \text{M}$ no se tienen activaciones superficiales de partícula y por lo tanto no se deprimirá el mineral. Por lo que se recomienda, si se requiere deprimir a la galena a un pH=9.1, utilizar concentraciones mayores a $1 \times 10^{-4} \text{M}$. Esto es, si la pulpa sólo está acondicionada con el depresor.

Por último, en las tablas 24 a 26, se presentan los resultados de 3 mezclas constituidas por PbS + XEK + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Las 3 mezclas eran: mezcla 1 (XEK= $1 \times 10^{-4} \text{M}$ + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7=1 \times 10^{-5} \text{M}$) su $e'=336.4$; mezcla 2 (XEK= $1 \times 10^{-4} \text{M}$ + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7=1 \times 10^{-4} \text{M}$) su $e'=343.4$; mezcla 3 (XEK= $1 \times 10^{-4} \text{M}$ + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7=1 \times 10^{-3} \text{M}$) su $e'=351.8$.

En donde podemos ver que las constantes dieléctricas de las tres mezclas están por debajo de la constante dieléctrica del mineral puro ($\epsilon' = 417.4$), lo que nos indica que las partículas de galena tienen propiedades hidrofóbicas, tendiendo a flotar.

Pero algo interesante es que el valor de la constante dieléctrica del sistema PbS - XEK ($1 \times 10^{-4} \text{M}$) a una frecuencia de 100 MHz. es de 390.9, es decir, es una constante dieléctrica mayor a la obtenida en los sistemas de mezclas. Lo que nos indica que la galena en presencia de XEK y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ tiene una activación mayor con características de hidrofobicidad a las concentraciones utilizadas en este trabajo.

En donde lo que probablemente sucede es que las partículas de galena son limpiadas de alguna manera por el dicromato de potasio, favoreciendo la interacción entre el mineral y xantato etílico de potasio.

El comportamiento esperado es que al agregar una concentración mayor de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, éste rompa parcialmente la película de xantato de plomo modificando sus propiedades, llegando a una concentración tal, en que la película de xantato de plomo se rompa totalmente haciendo que el mineral se deprima, logrando así una flotación selectiva si el objetivo es separarlo de otro mineral de interés (como por ejemplo, la esfalerita).

Estos resultados confirman el estudio hecho por Huerta, y colaboradores⁽³⁴⁾ en donde presentan información la cual nos dice que en las mezclas de PbS + XEK + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, si se adicionan pequeñas concentraciones de depresor, el dicromato de potasio actuará y favorecerá la flotación del PbS. Haciéndose necesaria la adición de concentraciones elevadas de dicromato de potasio para lograr que la galena se deprima, cuando está en contacto con el XEK.

Por último, es importante remarcar la trascendencia que tiene esta técnica para el estudio de interacciones mineral - solución y en general para cualquier tipo de suspensión. Ya que con dicha técnica se pueden conocer las propiedades eléctricas globales de cualquier sistema, sin importar si es dieléctrico o conductor (gran ventaja de esta técnica).

Si nos enfocamos a la aplicación que tiene esta técnica, vemos con agrado que puede ser una herramienta poderosa para poder conocer parámetros importantes de algún proceso y de esta manera optimizar y controlar el mismo. Por ejemplo, en el caso de beneficio de minerales, se puede ir a planta y tomar un muestreo de mineral de cabeza (con las características propias del proceso - granulometría, pH ,etc.), y realizar un estudio a diversas concentraciones de reactivo, encontrar la concentración óptima de reactivo a adicionar y, comparar esta concentración con la existente en el proceso. De ser igual, se están manejando concentraciones adecuadas, pero si no, sería pertinente modificar la concentración de reactivo utilizada en el proceso, ya que esto muy probablemente mejoraría la eficiencia del proceso y esto sería evidentemente un incremento en las utilidades de la empresa.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

Con los resultados experimentales obtenidos se puede concluir:

A) En este trabajo se logró una amplia recopilación de los aspectos teóricos relacionados con estudios electroquímicos, con el fin de correlacionarlos con la técnica de impedancia a altas frecuencias y al mismo tiempo difundir el empleo de esta técnica a nivel licenciatura.

B) Es posible estudiar las interacciones mineral - solución analizando las propiedades eléctricas del sistema, mediante el uso de la técnica de "IMPEDANCIA A ALTAS FRECUENCIAS".

C) Se desarrolló el procedimiento experimental de esta técnica, la cual presenta nuevas y fructíferas investigaciones en los minerales.

D) La técnica de Impedancia a altas frecuencias no presenta valores significativos del sistema, si no se utilizan para las mediciones el porcentaje de sólidos adecuado en la celda de medición.

E) Se encontró que la concentración óptima de colector, para flotar el mineral de galena a un pH de 9.1, se encuentra en el intervalo de 1×10^{-3} - 1×10^{-4} M.

F) Se encontró que las concentraciones adecuadas para deprimir galena a un pH de 9.1 son a partir de $1 \times 10^{-4} \text{M}$.

G) En lo que respecta a las mezclas, se concluye que a las concentraciones estudiadas de depresor (con una concentración de $1 \times 10^{-4} \text{M}$ de XEK) se espera que el mineral tenga características de hidrofobicidad.

RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES

Es deseable que en trabajos futuros relacionados a este, se realicen mediciones de permitividad compleja de estos mismos sistemas (PbS - XEK, PbS - XEK - $K_2Cr_2O_7$), pero haciendo un barrido de concentraciones más detallado, es decir, en el caso del sistema PbS - XEK se recomienda utilizar varias concentraciones intermedias localizadas en el intervalo de $1 \times 10^{-3}M$ - $1 \times 10^{-4}M$. Para poder analizar con más argumentos el comportamiento de este sistema de flotación.

Y también hacer lo mismo con las mezclas. Ya que en este trabajo sólo se utilizaron tres. Quedando aun sin resolver el problema de saber cual es la combinación adecuada para deprimir galena en presencia de xantato etílico de potasio.

Por otro lado, también es recomendable el estudiar algunas variables que pueden modificar el comportamiento de los conceptos eléctricos aquí estudiados; por ejemplo, se pueden modificar pertinentemente algunas variables como tamaño de partícula, fuerza iónica de las soluciones, pH, tiempo de acondicionamiento, etc..

También se recomienda que se experimente con minerales que normalmente se encuentren asociados a la galena; tal es el caso de minerales de cobre, hierro y zinc.

Por último, es importante que se efectúen pruebas de flotación bajo las condiciones aquí recomendadas en celdas convencionales, para tener así, plena seguridad de que los resultados e interpretación de los mismos presentados en este trabajo fueron correctos.

CAPITULO VII

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **Wills B.A. TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES.**
Tratamiento de menas y recuperación de minerales. Editorial Limusa. Primera edición. México , 1987, pag. 280.
- 2.- **Ibidem pag. 283 - 310.**
- 3.- **Zavala M. MANUAL DE FLOTACIÓN. Septiembre de 1993, Pag. 8.**
- 4.- **Leja Jan. SURFACE CHEMISTRY OF FROTH FLOTATION. Plenum Press. U.S.A. 1982, pag. 20.**
- 5.- **Wills B.A. TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES.**
Tratamiento de menas y recuperación de minerales. Editorial Limusa. Primera edición. México , 1987, pag. 346.
- 6.- **Ibidem pag. 346 - 348.**
- 7.- **Gaudin A.M. PRINCIPLES OF MINERAL DRESSING. McGraw-Hill. U.S.A. 1967. Pag. 334 - 358.**
- 8.- **Ibidem pag. 348.**
- 9.- **Zavala M. MANUAL DE FLOTACIÓN. Septiembre de 1993, Pag. 18 - 20.**
- 10.- **Wills B.A. TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DE MINERALES.**
Tratamiento de menas y recuperación de minerales. Editorial Limusa. Primera edición. México , 1987, pag. 361 - 364.

11.- Gaudin A.M. and Preller G.S. SURFACE AREAS OF FLOTATION CONCENTRATES AND THE THICKNESS OF COLLECTOR COATINGS.

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

12.- Valverde Valdes José Manuel. IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA DE LA GALENA EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN. Tesis de licenciatura. México 1992, Facultad de Química. U.N.A.M. pag. 35.

13.- Leja Jan. SURFACE CHEMISTRY OF FROTH FLOTATION. Plenum Press. Pag. 228 - 258.

14.- Huerta Cerdan Antonio. ESTUDIOS DE CINÉTICA DE FLOTACIÓN EN MENAS SULFURADAS A PARTIR DE MODELOS ELECTROQUÍMICOS. Tesis de maestría. México, 1991, Facultad de Química, U.N.A.M. pag. 60.

15.- Ibidem pag. 61 - 62, 70 - 73.

16.- Ibidem pag. 54 - 55.

17.- Yarar B., Haydon B.C. and Kitchener J.A. ELECTROCHEMISTRY OF THE GALENA - DIETHYLDITHIOCARBAMATE - OXYGEN FLOTATION SYSTEM.

Trans. Inst. Min. Metall. (Sect C: Mineral Process Extr. Metall.) 78, 1969, pag. 181 - 184.

18.- Huerta Cerdan Antonio. ESTUDIOS DE CINÉTICA DE FLOTACIÓN EN MENAS SULFURADAS A PARTIR DE MODELOS ELECTROQUÍMICOS. Tesis de maestría. México, 1991, Facultad de Química, U.N.A.M. pag. 144 - 147.

19.- Ibidem pag. 134 - 137.

20.- Ibidem pag.135.

21.- Woods R. THE ANODIC OXIDATION OF ETHYLXANTHATE ON METAL AND GALENA ELECTRODES. Aust. J. Chem. 1972, 25, pag. 2329 -2335.

22.- Huerta Cerdan Antonio. ESTUDIOS DE CINÉTICA DE FLOTACIÓN EN MENAS SULFURADAS A PARTIR DE MODELOS ELECTROQUÍMICOS. Tesis de maestría. México, 1991, Facultad de Química, U.N.A.M. pag.135.

23.- Gaudin A.M. FLOTATION ; 2^{da} edition, McGraw - Hill. U.S.A. 1957 pag.306.

24.- Cota Romero Francisco R. ESTUDIOS DE VOLTAMETRÍA CÍCLICA DE XANTATO ETÍLICO DE POTASIO Y DICROMATO DE POTASIO SOBRE GALENA. Tesis de licenciatura. México 1992. Facultad de Química U.N.A.M. pag. 3.

25.- Taggart A.F. and Ziehl O.A. THE CASE FOR THE CHEMICAL THEORY OF FLOTATION. Trans. Am. Inst. Min. Ingrs. 112, 1934, pag. 348 - 381.

26.- Fuerstenau M.C. FLOTATION. Vol.1. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers. U.S.A. 1976, pag. 393 - 413.

27.- Tolun R. And Kitchener J.A. ELECTROCHEMICAL STUDY OF THE GALENA - XANTHATE - OXYGEN FLOTATION SYSTEM. Trans. Instrn. Min. Metall. 73,1963 - 64, pag. 313 - 322.

28.- Bueche F.J. FÍSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS E INGENIERÍA. Tomo 2. Editorial McGraw-Hill, México 1990, pag. 261- 262.

29.- Valverde Valdes José Manuel. IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA DE LA GALENA EN LAS CONDICIONES DE FLOTACIÓN. Tesis de licenciatura. México 1992, Facultad de Química. U.N.A.M. pag. 7 - 8.

30.- Pang J., Briceño A. and Chander. A STUDY OF PYRITE / SOLUTION INTERFACE BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY. J. Electrochem. Soc. Vol. 137. No. 11, November 1990. Pag. 3447 - 3455.

31.- Halliday D. and Resnick R. FÍSICA, PARTE 2.
C.E.C.S.A. México 1991. Decimoprimer edición. Pag. 315 - 319.

32.- Sears F.W., Zemansky M.W. and Young H.D.. FÍSICA UNIVERSITARIA.
Editorial Addison - Wesley Iberoamericana, México D.F. 1986. Pag 599 - 604.

33.- Purcell E.M. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO. Volumen 2. Berkeley Physics Course. Segunda edición, Editorial Reverte S.A, España 1990. Pag. 338 - 342.

34.- Genescá J. APUNTES DEL CURSO DE DIELECTRICIDAD
Universidad de Nancy. Francia, 1992.

35.- Halliday D. and Resnick R. FÍSICA, PARTE 2.
C.E.C.S.A. México 1991. Decimoprimer edición. Pag 18.

36.- Grosse C. and Greffe J.L. PERMITTIVITÉ STATIQUE DES ÉMULSIONS.
Journal de Chimie Physique 1979, 76, No. 4. Pag.309 - 310.

37.- Thiebaut J.M., Roussey G., Chihhi K. and Beelere. DIELECTRIC STUDY OF THE ACTIVATION OF BLENDE WITH CUPRIC IONS. J. Electroanal. Chem. 262, 1989, pag. 131 - 144.

38.- Huerta A., Genescá J., Cota F.R., Hernandez H. CYCLIC VOLTAMMETRY OF THE ANODIC OXIDATION OF POTASSIUM ETHYL XANTHATE ON THE GALENA ELECTRODE UNDER FLOTATION CONDITIONS. THE MEMORIAS 8TH CONFERENCE ON PHYSICAL CHEMISTRY. University of Bucharest., Rumania, sept 25 - 27, 1996 art. 5.17.

39.- Mckelvey J.P and Grotch H. FÍSICA PARA CIENCIAS E INGENIERÍA. Tomo 2. Editorial Haria, México 1981. Pag. 675 - 700.