



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

“HIDRO - ELECTRODEPOSITACIÓN DE LATÓN A
PARTIR DE POLVOS DE FUNDICIÓN DE COBRE”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO METALÚRGICO

Y DE INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

P R E S E N T A N :

IBÁÑEZ BECERRIL GERMÁN BENJAMIN

MÉNDEZ RODRÍGUEZ PERFECTO DE JESÚS

DIRECTOR: M C. JESÚS SALVADOR MEZA ESPINOZA

MÉXICO, D.F. OCTUBRE DE 2013



AGRADECIMIENTOS:

EN PRIMER LUGAR AGRADEZCO A DIOS: POR ESTAR A MI LADO EN TODO ESTE TIEMPO.

A MIS HERMANOS, CUÑADOS Y SOBRINOS QUIENES EN TODO MOMENTO CREYERON EN MI.

A TODOS MIS COMPAÑEROS DE LA CARRERA Y PROFESORES QUE ME DIERON SU APOYO PARA LLEGAR AL FINAL.

A MI FAMILIA, A MALENA POR SU AMOR, PACIENCIA Y APOYO PARA LLEGARA AL FINAL DE ESTA TAREA.

A MIS HIJOS: BENJAMIN Y LUIS QUE SON MI INSPIRACION PARA CONTINUAR ADELANTE.

UN RECONOCIMIENTO A MI COMPAÑERO JESÚS POR INSISTIR.

A MI ASESOR Y AMIGO EL MAESTRO JESÚS SALVADOR MEZA ESPINOZA. POR SU APOYO PARA TERMINAR ESTE TRABAJO.

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres: por su gran apoyo y que sin este, no estuviera viviendo y disfrutando de este gran momento.

A mis hermanos: que siempre estuvieron conmigo apoyándome en todo.

A mi amada Julia: por compartir la vida conmigo y estar apoyándome siempre en las buenas y en las malas.

A Susana, a Gabriela, a Jesús y Francisco: por brindarme ánimos y permitirme compartir la vida con ellos.

Al Licenciado Cesar Rubio: por el apoyo brindado a mi persona el cual no tiene precio y siempre estaré agradecido por eso.

A los profesores: Flor del Monte Arrazola D. y Eliodoro Hernández Luna: por el inmerecido apoyo dado, permitiéndome así concluir mi carrera.

Al profesor y amigo: Maestro Jesús Salvador Meza Espinoza por la dedicación y paciencia puestas en este trabajo.

A los profesores: Dr. Elías Rangel Salinas y Dr. Ezequiel Cruz Sánchez: por sus atinados comentarios hechos a este trabajo.

A los profesores y amigos: Humberto Ángel Concha y German Lozano: por la amistad que tienen para con mi persona.

Y en especial a todas aquellas personas que de una u otra forma han compartido un poco o mucho de su tiempo conmigo, mediante su amistad y confianza pero sobre todo su cariño.

GRACIAS

ÍNDICE	Págs.
Lista de Figuras	1
Lista de Tablas	1
RESUMÉN	3
I. INTRODUCCIÓN	4
II. FUNDAMENTOS TEORICOS	10
2.1 Cobre y aleaciones de cobre.	10
2.1.1 Latones en general.	10
2.1.2 Latones alfa.	13
2.1.3 Latones amarillos.	13
2.1.4 Latones rojos.	13
2.2 Hidrometalurgia	13
2.2.1 Fisicoquímica de la Hidrometalurgia	15
2.2.2 Hidro electrometalurgia del zinc.	16
2.2.3 Preparación de las menas de zinc.	17
2.2.4 Lixiviación de las menas de zinc.	18
2.2.5 Reacciones que ocurren durante la Lixiviación.	19
2.2.6 Electrolisis del zinc (de la solución de sulfato de zinc).	21
2.2.7 Hidro electrometalurgia del cobre.	22
2.2.8 Hidro metalurgia de las menas oxidadas de cobre.	23
2.2.9 Cementación	24
2.2.10 Electrolisis de las soluciones de CuSO_4	24
2.2.11 Ventajas del proceso Hidro metalúrgico contra el Piro metalúrgico.	27

ÍNDICE	Págs.
III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	31
3.1 Preparación para la Lixiviación y el electro depositado	32
3.2 Equipo de laboratorio utilizado en la experimentación.	33
3.3 Procedimiento.	34
3.3.1 Lixiviación del concentrado de los polvos.	34
3.3.2 Calculo estequiometrico del Cianuro.	35
3.3.3 Experimentación.	36
IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	40
4.1 Efecto del porciento de cianuro en el depósito de latón.	42
4.2 Evidencia fotográfica del depósito de latón obtenido.	45
4.3 Análisis de los depósitos por Difracción de rayos X.	47
CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	49

	Págs.
Lista de Figuras.	1
Figura 1. Incremento de la producción de cobre en México en 2011 con respecto de 2010.	4
Figura 2. Diagrama de fase binario Cu – Zinc.	12
Figura 3. Diagrama de predominancia de áreas para el sistema Me-H ₂ O.	16
Figura 4. Diagrama de flujo del trabajo.	31
Figura 5. Equipo experimental para la lixiviación de los polvos.	34
Figura 6. Valor en porcentaje del análisis químico	35
Figura 7. Celda electrolítica.	37
Figura 8. Efecto del porcentaje de cianuro contra elementos Cu – Zn el depósito	43
Figura 9. Comparación entre el contenido original y el obtenido.	44
Figura 10. Depósito de latón obtenido con un 96-1 de exceso.	45
Figura 11. Depósito de latón obtenido con un 96-2% de exceso.	45
Figura 12. Depósito de latón obtenido con un 98-1% de exceso de NaCN	46
Figura 13. Depósito de latón obtenido con un 98-2% de exceso de NaCN	46
Figura 14. Difracto grama de rayos X del latón obtenido.	47
 Lista de Tablas.	
Tabla I. Principales países productores de cobre.	4
Tabla II. Producción de cobre en México desde 2010 hasta octubre de 2011.	5
Tabla III. Efecto del zinc sobre las propiedades tensiles de aleaciones recocidas del cobre.	12
Tabla IV. Potenciales de reducción de la serie electromotriz	25
Tabla V. Diferentes materiales que pueden ser tratados por lixiviación	26
Tabla VI. Comparativo del proceso Hidro-metalurgico y Piro metalúrgico.	28
Tabla VII. Valor de las variables para el concentrado por separación electrostática.	32
Tabla VIII. Valor de las variables para llevar a cabo la lixiviación.	32

Tabla IX. Análisis químico de los polvos de latón.	34
Tabla X. Variables iniciales de trabajo.	37
Tabla XI. Valor de los excesos del NaCN en la solución y en porcentaje peso	37
Tabla XII. Porcentaje de CN contra elementos (Cu, Zn) depositados.	43
Tabla XIII. Comparativo entre el latón obtenido y los contenidos de los elementos de polvo de Cobre.	44

RESUMEN

En nuestro país, la producción de aleaciones a partir de la fundición de cobre y otros metales como lo son el zinc y el estaño para producir nuevas aleaciones, entre estas el latón y el bronce, las cuales son muy apreciadas por sus propiedades físicas y químicas y la alta resistencia a la corrosión, se han visto afectadas por el alto costo del cobre, esto ha provocado que muchas empresas dedicadas a este tipo de producción, se vean en la imperiosa necesidad de buscar como eficientar sus procesos.

Dentro de las fuentes en la que los empresarios han puesto sus ojos, es en los polvos de desperdicios generados a partir de la producción de dichas aleaciones. En la actualidad los desperdicios generados por estas industrias son tan grandes y tienen un gran valor económico que se pierde cuando estos se vuelven a fundir, además como consecuencia se tiene una contaminación al medio ambiente.

El estudio del presente trabajo abarco cinco aspectos primordiales de los cuales nos enfocamos en los dos últimos: Caracterización fisicoquímica de los polvos metálicos (Molienda y homogenización de los polvos). Limpieza, Separación y Concentración electrostática de los polvos, Lixiviación o disolución del concentrado. Establecimiento de los parámetros y variables de operación para el desarrollo del electro depósito y obtención de latón.

El propósito inicial de este trabajo, fue desarrollar un proceso Hidro - electrometalúrgico en los polvos de fundición de cobre, ya que dicho proceso resulta ser más económico, y ecológicamente más amigable con el medio ambiente, que la tecnología que propone que los productos se vuelvan a fundir. Obteniéndose los parámetros que nos permitieron tener un depósito de latón satisfactoriamente en una placa de acero inoxidable que sirvió como electrodo base. Teniendo menos contaminación del medio ambiente y así como evitar la contaminación en los mantos freáticos por la disolución de los polvos al tenerlos expuestos al medio ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

El cobre desempeña un papel vital en la formación de nuestras vidas. La gente ha usado el cobre desde el 9000 A.C. Uno de los motivos de que el cobre sea tan importante es que puede utilizarse en aleaciones. Esto significa que puede combinarse con otros metales para hacer nuevas aleaciones, como el latón y el bronce. Estas aleaciones son más duras, fuertes y resistentes a la corrosión que el cobre puro. Hoy en día es apreciado por sus diferentes cualidades. Es un excelente conductor de la electricidad y el calor, es fuerte, dúctil, y puede unirse fácilmente por soldadura; además, es higiénico, fácil de allear y resistente a la corrosión. Se puede encontrar cobre por todas partes. Como en los teléfonos, las cañerías, las cerraduras y los cableados eléctricos.

Producción minera y los principales países productores de Cobre.

La producción mundial de cobre durante el 2011 alcanzó un total de 16.10 millones de toneladas métricas de cobre fino. Como se muestra en la tabla I el principal país productor es Chile, con más de un tercio del total, seguido de Perú y China.

Tabla I. Principales países productores de Cobre.

Rango	País	Producción en 2011 (en mill. Ton/año)
1	Chile	5420
2	Perú	1,220
3	China	1,190
4	Estados Unidos	1,120
5	Australia	0,940
6	Zambia	0,715
7	Rusia	0,710
8	Indonesia	0,625
9	Canadá	0,550
10	Republica Democrática del Congo	0,440
11	Polonia	0,425
12	México	0,365
13	Kazajistán	0,360

Como se puede observar México ocupa el décimo segundo lugar.

En la tabla II se puede apreciar la producción de cobre en nuestro país de 2010 hasta octubre de 2011. Así mismo en la figura 1 se muestra dicho incremento de la producción de cobre en nuestro país en 2011 con respecto de 2010.

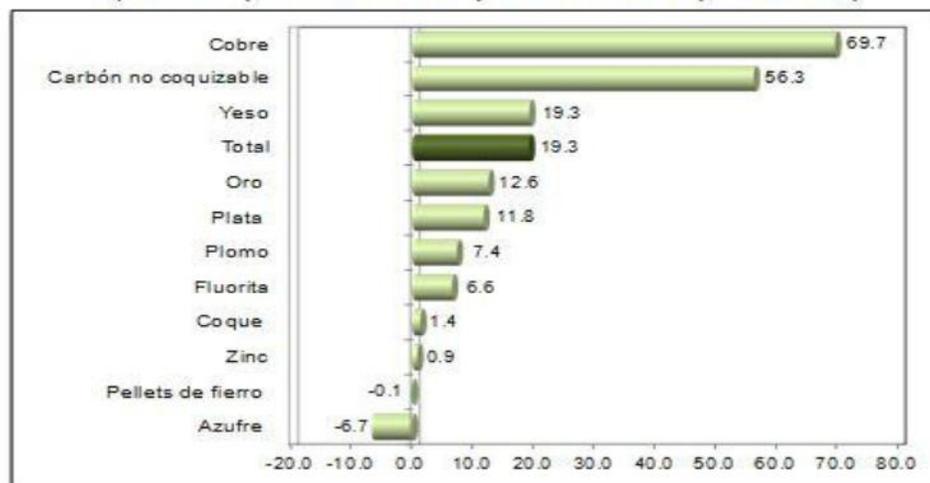
Tabla II. Producción de cobre en México desde 2010 hasta octubre de 2011.

PRODUCCIÓN MINEROMETALÚRGICA DURANTE OCTUBRE
(Toneladas*)

Productos	2010	2011	Variación porcentual respecto al mismo mes del año anterior
Cobre	16,504	37,357	126.4
Yeso	223,687	392,873	75.6
Carbón no coquizable	880,405	1,392,104	58.1
Oro	5,257	6,722	27.9
Fluorita	97,511	105,876	8.6
Plata	319,572	313,317	(-) 2.0
Azufre	80,465	77,628	(-) 3.5
Coque	144,954	139,638	(-) 3.7
Pellets de fierro	664,155	633,411	(-) 4.6
Plomo	15,860	13,849	(-) 12.7
Zinc	43,424	37,405	(-) 13.9

*/ Excepto el oro y la plata que son kilogramos.
Fuente: INEGI.

PRODUCCIÓN MINEROMETALÚRGICA DURANTE ENERO-OCTUBRE DE 2011
(Variación porcentual real respecto al mismo lapso de 2010)



Fuente: INEGI.

Figura 1. Incremento de la producción de cobre en México en 2011 con respecto de 2010

La producción de cobre ha tenido un considerado crecimiento a nivel mundial, debido a que la demanda de este metal por parte de China (país que ha tenido un crecimiento industrial muy elevado en los últimos años) ha sido muy grande, esto también ha contribuido al incremento del precio de este metal y por consiguiente el de sus aleaciones o subproductos.

Una consecuencia del uso excesivo del cobre y sus derivados, es la gran cantidad de desperdicios de este y sus subproductos a nivel mundial. Nuestro país también se ha visto afectado por este fenómeno y no ha quedado al margen de la situación que se ha derivado de este. Es importante el hacer notar que los polvos metálicos son recuperados fundiéndose, sin embargo, un análisis de la operación da resultados desastrosos pues el rendimiento es excesivamente bajo, a más de los altos consumos de energía eléctrica y sobre todo de la contaminación ambiental, esto último, debido a que como son partículas muy finas que se oxidan y se volatilizan inmediatamente yéndose a la atmósfera. Por este motivo nuestro país al igual que los demás países se ha visto en la necesidad de buscar otras formas de obtener dichos subproductos y se ha propuesto desarrollar procesos alternos y de bajo costo para la recuperación de estos desperdicios. Es por ello que se pretende aprovechar los polvos metálicos mediante el uso de una técnica alternativa no contaminante, que es el desarrollo de un proceso Hidro electrometalúrgico, que consiste en la disolución acida o alcalina de los principales constituyentes, para posteriormente electro depositarlos en forma de aleación de latón. Metal que tiene gran importancia a nivel industrial.

El nacimiento del electro-deposito, se puede considerar que se dio con Volta y el descubrimiento de la producción de electricidad por medios químicos en 1779. El gran interés en los efectos químicos producidos por medio de la corriente eléctrica y que en pocos años, se produjo la electrólisis de muchas soluciones y la producción de depósitos metálicos, los cuales sin embargo no tenían una forma coherente, y no auguraba las posibilidades que tenía para la industria del electro-deposito. La electrólisis fue principalmente una curiosidad científica, hasta que cerca de 1839, se le dio valor al depósito para la reproducción de superficies y objetos y esto fue anunciado por algunos científicos al mismo tiempo. La invención del electro formado fue de gran importancia para el futuro del depósito, porque esto estimuló grandemente el interés público.

El primer proceso para producir una capa de aleación se patentó en Inglaterra en 1838 por EIKINGTON Y BARRATT. Una capa difundida de zinc en cobre, se formó por la inmersión de artículos de cobre unidos a una pieza de zinc, el cual fue como un ánodo interno, dentro de una solución hirviendo de cloruro de zinc. El primer depósito de aleaciones se llevó a cabo probablemente al mismo tiempo que el cianuro se introdujo dentro del depósito. Ruolz es generalmente el acreditado con la obtención del primer depósito de latón y bronce. El baño de bronce que fue descrito en 1842, aparentemente es similar al baño moderno.

Las primeras aleaciones comerciales electro-depositadas fueron de metales nobles y latones (Cu – Zn), cuyo depósito es gobernado por las mismas variables y parámetros del depósito de metales solos, y cuyo progreso ha dependido en ambos sobre los mismos avances:

- Pureza de los productos químicos comerciales.
- Potencial eléctrico comercialmente disponible.
- Equipó seguro de conversión para suministrar corriente eléctrica directa.
- Instrumentación adecuada.
- Cambio de práctica artística a tecnológica.

Se ha estudiado e investigado mucho el electro-deposito de aleaciones con el fin de obtener nuevas aplicaciones, así por ejemplo, se ha incrementado el interés en aleaciones de oro y de plata para aplicaciones electrónicas, las de metales de transición de hierro, níquel y cobalto con o sin fósforo para dispositivos magnéticos, así como las aleaciones denominadas “Monel” constituidas principalmente de cobre–níquel y cobre–níquel–hierro. Las cuales son utilizadas ampliamente en trabajos de ingeniería con el fin de evitar la corrosión. También se ha estudiado una gran gama de aleaciones para varios fines entre las que destacan:

- | | |
|-------------------|--------------------|
| – Plata – Cadmio. | - Níquel – Estaño. |
| – Plata – Zinc. | - Cobre – Plata. |
| – Plata - Plomo. | - Cobre – Plomo. |
| – Cobre – Estaño. | |

Es importante mencionar que la estructura de algunas de las fases formadas en aleaciones producidas por electro-deposito puede o no ser las mismas de aquellas formadas metalúrgicamente. Es evidente que las propiedades de una aleación dependen de la forma y tipo de las fases que conforman su estructura, para una aplicación determinada.

De esta manera las aleaciones pueden ser:

- Densas y pesadas.
- Resistentes a la corrosión.
- Duras.
- Resistentes al desgaste.
- De mejores propiedades magnéticas.
- Más aprovechables para posteriores recubrimientos.
- Más aprovechables para tratamiento termo – químico.
- Útiles en servicios antifricción.

En la actualidad la tendencia de la producción de aleaciones es hacia el campo de nuevos materiales con una amplia variedad de propiedades y aplicaciones, a un costo razonablemente bajo. Para ello se han estado desarrollando métodos de procesamiento de materiales tales como los procesos de no-equilibrio como son la solidificación rápida y la aleación mecánica. Sin embargo, la obtención de nuevos materiales por métodos convencionales como por ejemplo, el deposito de aleaciones vía electroquímica son también de gran interés a nivel industrial debido a su versatilidad, bajo costo y a la posibilidad de obtener una gran gama de materiales con propiedades muy específicas por el simple control de la corriente aplicada. Este tipo de materiales es ampliamente utilizado en las industrias, automotriz, eléctrica, electrónica, nuclear y espacial entre otras.

Por otra parte la electro-depositación de aleaciones binarias ha sido ampliamente utilizada a nivel industrial y existen algunos estudios fundamentales sobre los procesos que ocurren al llevarse a cabo. Mientras que la electro-depositación de aleaciones ternarias ha sido poco estudiada, lo que hace aun más interesante la electro-depositación de aleaciones de latón y bronce a partir de polvos metálicos de fundición.

Las propiedades de las aleaciones electro-depositadas son de particular interés, porque estas aleaciones poseen considerablemente mejores propiedades que un electro-deposito puro, para compensar el incremento en la dificultad que envuelve en la operación de la obtención de esta aleación. Tienen tamaño de grano fino, dureza, resistencia y pueden ser más resistentes a la corrosión que los metales base. Las aleaciones electro depositadas usualmente tienen una mejor apariencia que el metal base, son tersos, brillantes, y de grano fino. Los granos de muchas aleaciones electro depositadas son tan pequeños para ser vistos con el microscopio y su tamaño debe ser estimado por medio de rayos "X". La dureza de las aleaciones electro-depositadas puede ser consideradamente más grande que los depósitos base electro-depositados. También esta dureza es más grande a la obtenida por tratamiento térmico de una aleación convencional.

Como en el caso de un electro-recubrimiento de un metal simple, el principal uso de las aleaciones electro-depositadas son propuestas o alternativas para decoración o protección, principalmente para acero y otros metales base. Por la virtud de su gran rango y diversificación de propiedades, las aleaciones electro-depositadas tienen mucho potencial en aplicaciones especiales, algunas de estas han sido reconocidas pero no explotadas.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Los materiales metálicos, pueden dividirse en dos grandes grupos: ferrosos y no ferrosos. Los primeros tienen como base al hierro y los segundos poseen algún elemento diferente de este como constituyente principal. La mayoría de los materiales no ferrosos está formado por aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo, y zinc. Para los fines de este trabajo nos enfocaremos específicamente al cobre y la aleación que forma con el zinc, de la cual se obtiene el material llamado latón.

2. 1. Cobre y aleaciones de cobre.

Las propiedades del cobre más importantes son la resistencia y facilidad de fabricación, la alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión y maquinabilidad. El latón fácilmente se termina por revestimiento metálico (galvanizado) o barnizado.

El cobre electrolítico también se utiliza en materiales para techos, albañales, tuberías, radiadores y empaques para automóvil, cubas, recipientes de presión en equipos para destilería y otros procesos. El cobre libre de oxígeno se utiliza en tubos electrónicos o aplicaciones similares porque logra un sello perfecto con el vidrio. El uso más importante del cobre en el mundo, es en conductores eléctricos. Sin embargo el cobre al alearse (combinarse) con otros metales presenta una gran variedad de aleaciones, con diferentes usos y aplicaciones.

Como el cobre y la mayoría de las aleaciones de cobre constituyen fases homogéneas únicas, no son susceptibles a tratamientos térmico y su resistencia puede alterarse por trabajado en frío. Hay dos clases de temple para aleaciones de cobre forjadas, no tratables térmicamente: el temple proporcionado por el trabajo en frío y el temple suave o recocido. Dentro de las aleaciones de cobre más importantes se encuentra la que se prepara con zinc para obtener latón.

2.1.1 Latones en general. Esencialmente, los latones son aleaciones de cobre y zinc, algunas de las cuales tienen pequeñas cantidades de otros elementos, como plomo, estaño o aluminio. Las variaciones en la composición darán como resultado las

características de color, resistencia, ductilidad, maquinabilidad, resistencia a la corrosión o una combinación de tales propiedades. El latón se puede clasificar de la siguiente forma.

a). Latones alfa.- Aleaciones que contienen hasta 36% de zinc y a su vez estos se dividen en dos clasificaciones importantes.

1.- Latones amarillos alfa, que contienen 20 a 36 % de zinc.

2.- Latones rojos, que contienen 5 a 20 % de zinc.

b). Latones alfa (α) más beta (β), que contienen de 54 a 62 % de cobre.

En el diagrama de fase binario Cu – Zn se muestra la porción de cobre - zinc aplicable a aleaciones comerciales. La solubilidad del zinc en la solución alfa (α) sólida aumenta desde 32.5 % a 902.7 °C (1657 °F) hasta 39 % a 454.4 °C (850 °F). Como el cobre es f.c.c. (Cúbico centrado en las caras), la solución α sólida es f.c.c. La fase (β) es un compuesto de electrones b.c.c. (cúbico centrado en el cuerpo) y sufre un ordenamiento, señalado por la línea punteada, en la región de 454.4 a 468.3 °C (850 a 875 °F). Al enfriar en este intervalo de temperatura, la fase β b.c.c. con los átomos de cobre y de zinc dispersados al azar en los puntos de la red, cambia continuamente hasta convertirse en estructura β' ordenada, la cual es todavía b.c.c. pero con los átomos de cobre en las esquinas y los de zinc en los centros de los cubos unitarios. La reacción de ordenamiento es tan rápida que no puede retardarse o evitarse por templado. Lo anterior se muestra en el siguiente diagrama de fase binario representado en la figura 2.

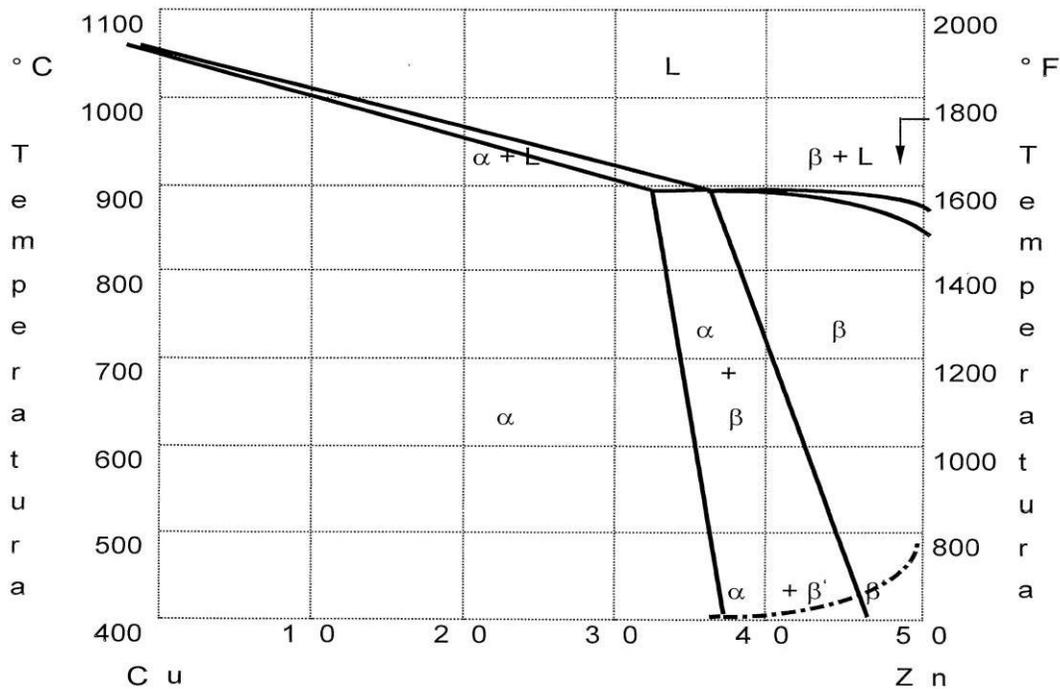


Figura 2. Diagrama de fase binario Cu – Zn.

La adición de zinc incrementa la ductilidad junto con la resistencia. La mejor combinación de resistencia y ductilidad se obtiene en un latón 70 % Cu - 30 % Zn. Los latones comerciales se pueden dividir en dos grupos: Latones para trabajo en frío (Latones α) y latones para trabajo en caliente (Latones α más β). Como se muestra en la tabla III.

Tabla III. Efecto del zinc sobre las propiedades ténsiles de aleaciones recocidas del cobre.

Zn. %	RESISTENCIA TENSIL lb. / plg ²	ELONGACION % EN 2 pulg.	BHN. 10 mm. 500 Kg:
0	32000	46	38
5	36000	49	49
10	41000	52	54
15	42000	56	58
20	43000	59	56
25	45000	62	54
30	46000	65	55
35	46000	60	55
40 (+ β')	54000	45	75

Como se observa en la anterior tabla a un mayor incremento del % de zinc tenemos una mayor resistencia en el latón formado lo que se refleja en mejores propiedades mecánicas.

2.1.2 Latones alfa. Son latones que contienen hasta 36% de zinc poseen relativamente buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades de trabajo. El color de los latones α varía de acuerdo con el contenido de cobre desde rojo en las aleaciones al alto cobre, hasta amarillo en los contenidos de 62 % de cobre. Los latones α se pueden dividir en dos grupos: latones amarillos alfa y latones rojos.

2.1.3 Latones amarillos α . Estos contienen de 20 a 36% de zinc, combinan la buena resistencia con la alta ductilidad, son adecuados para trabajo en frío. Los latones amarillos α también están sujetos a corrosión por formación de cavidades en la superficie, llamada deszincado. Este tipo de corrosión ocurre cuando el latón está en contacto con agua de mar o aguas dulces con alto contenido de oxígeno y bióxido de carbono.

Los latones amarillos α que más se utilizan son el latón para cartuchos (70 % Cu - 30 % Zn) y el latón amarillo (65 % Cu - 35 % Zn). Entre las aplicaciones típicas para estos latones están: paneles para radiador, tanques, fanales; cubiertas para linternas eléctricas portátiles, aditamentos para lámpara, cubiertas para portalámpara, cubiertas para tornillo; ferretería: ojos de cerraduras, sujetadores, anillos para cordones de talegas, remaches, resortes, accesorios para plomería y componentes para municiones. La adición de 0.5 a 3 % de plomo mejora la maquinabilidad, el latón plomado se utiliza en piezas de máquinas para hacer tornillos, placas para grabado, llaves, piezas de cerraduras, tambores, engranes y piezas para reloj.

2.1.4 Latones rojos. Estos contienen entre 5 y 20 % de zinc; generalmente tienen mejor resistencia a la corrosión que los latones amarillos y no son susceptibles a la presencia de fisuras por esfuerzo de corrosión o deszincado. ⁽³⁾

2.2 HIDRO METALURGIA

Hidro metalurgia se refiere a los procesos de lixiviación selectiva (disolución) de los componentes valiosos de las menas y su posterior recuperación de la solución por

diferentes métodos. Este nombre lo recibe por el empleo generalizado de soluciones acuosas como agente de disolución. La Hidro-electrometalurgia comprende el conjunto de procesos de lixiviación y precipitación por medio de electrólisis, donde los procesos electroquímicos son precedidos por los procesos Piro metalúrgicos.

Hay tres principales etapas de los procesos Hidro-metalúrgicos:

- 1). Disolución del componente deseado presente en la fase sólida.
- 2). Purificación de la solución obtenida.
- 3). Precipitación del o los metales deseados o sus compuestos.

Los reactivos químicos empleados (agentes lixiviantes) deben reunir muchas propiedades para poder usarse, por ejemplo: no deben ser muy caros, deben ser fácilmente recuperables y deben ser bastante selectivos para disolver determinados compuestos. Los procesos de lixiviación y purificación de la solución corresponden a las mismas operaciones que se practican en el análisis químico, solamente que en escala industrial. Una vez que se tiene la solución purificada surge el problema de la precipitación de los metales deseados. Actualmente existen tres grupos de posibilidades técnicas para llevar a cabo la precipitación.

- 1) Electrólisis de la solución obtenida.
- 2) Precipitación de metal por medio de gases como H_2 (g), SO_2 (g), CO (g).
- 3) Precipitación del metal o compuesto por descomposición térmica de los compuestos en solución por cambio del pH de la solución, por cristalización, extracción con solventes e intercambio iónico y además por cementación.

La discusión de los procesos de precipitación se limitara a la electrólisis y cementación por ser los que están más relacionados a las plantas metalúrgicas de los metales no ferrosos, aunque actualmente se desarrolla la extracción por solventes.

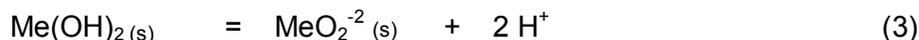
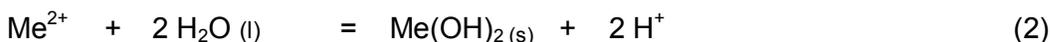
Muy frecuentemente en metalurgia se prefiere la electrólisis debido a su simplificación, a la experiencia ganada desde muchos años y a la gran pureza del producto.

2.2.1 Físicoquímica de la Hidro metalurgia.

La química de la lixiviación es muy simple. Los disolventes que se utilizan incluyen tanto soluciones ácidas como alcalinas y algunas sales. Los minerales sulfurosos y los óxidos de los metales pesados son buenos conductores electrónicos. En consecuencia, la cinética de su disolución en electrolitos acuosos está controlada por los procesos electroquímicos. La fisicoquímica de cada tipo de proceso se puede describir en términos del equilibrio termodinámico o en términos de la cinética de reacción. La cinética de reacción es más crítica a bajas temperaturas y por esto limita procesos Hidro metalúrgicos en comparación a los piro-metalúrgicos, cuya cinética es mayor a temperaturas elevadas. Debido a esto hay muchas investigaciones en el campo de la cinética de la lixiviación.

Como ejemplo se considera el sistema $\text{Me} - \text{H}_2\text{O}_{(aq)}$ en el proceso de lixiviación. Supóngase que un metal posee valencia positiva Me^{2+} , forma un Ion complejo MeO_2^{-2} y además un hidróxido sólido $\text{Me}(\text{OH})_2_{(s)}$. Estas fases en solución acuosa participan en diferentes reacciones. Determinando las constantes de equilibrio, las cuales están relacionadas con las actividades de los iones. La figura 3 describe gráficamente todo el sistema antes mencionado.

En este ejemplo se consideran las siguientes reacciones:



La constante de equilibrio de la primera reacción es:

$$K = \frac{a_{\text{Me}^{2+}}}{a_{\text{H}^+}^4 \cdot P_{\text{O}_2}} \quad (4)$$

Después de usar logaritmos se obtiene:

$$\log K = 2 \log a_{\text{Me}^{2+}} - 4 \log a_{\text{H}^+} - \log P_{\text{O}_2} \quad (5)$$

Ahora se introduce el termino pH, el cual se define como el logaritmo de la concentración (actividad) de los iones Hidrogeno [H⁺].

$$\text{pH} = - \log [\text{H}^+] = \log \frac{1}{[\text{H}^+]} \quad (6)$$

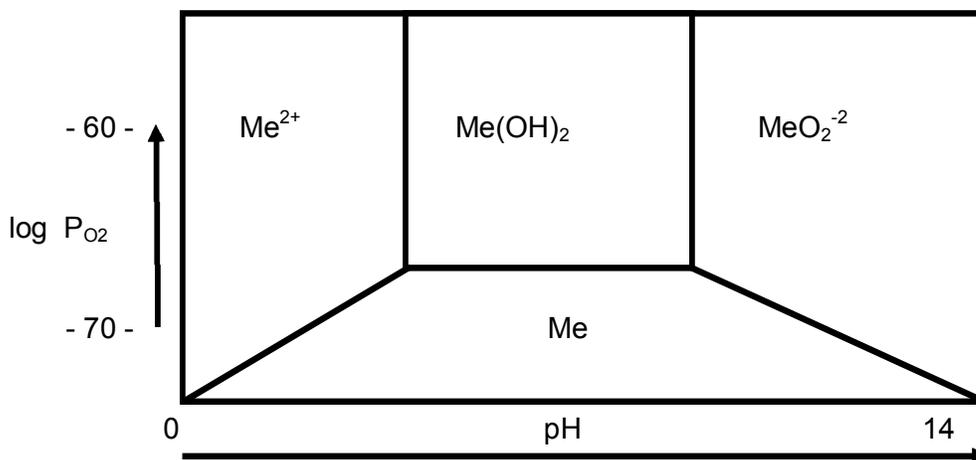


Figura 3. Diagrama de predominancia de áreas para el sistema Me-H₂O.

Finalmente se obtiene: $\log K = 2 \log a_{\text{Me}^{2+}} + 4 \text{ pH} - \log P_{\text{O}_2}$ (7)

Se hace lo mismo para las otras reacciones químicas y esto permite constituir el diagrama pH - P_{O₂}, cuyas líneas representan el equilibrio existente entre varias fases sólidas y los iones con actividades unitarias. El cambio en las actividades de los iones causa el desplazamiento de dichas líneas, sin cambiar su pendiente.

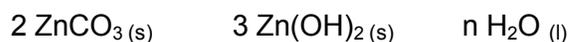
2.2.2 Hidro-electrometalurgia del zinc.

La Hidro-electrometalurgia del zinc es un proceso combinado de procesamiento de las menas por lixiviación con el consiguiente depósito electrolítico del zinc, a partir de soluciones acuosas de sulfato de zinc. En estos procesos no se pueden evitar algunas operaciones piro-metalúrgicas como la tostación de sulfuros y la fusión con refinación simultánea de los cátodos de Zinc. En este complejo proceso de la Hidro-electrometalurgia del zinc se distinguen las tres principales operaciones siguientes:

- a) Lixiviación de las menas preparadas con solución de ácido sulfúrico, para obtener el Zinc en forma de solución de ZnSO_4 (l)
- b) Purificación de la solución de ZnSO_4 (l)
- c) Electrólisis de la solución de ZnSO_4 (l)

Estos procesos también están relacionados con las operaciones auxiliares de procesamiento de subproductos que conducen a la recuperación de Cd, Cu, Ag, Pb, Co, entre otros. La participación del zinc electrolítico en la producción mundial es cada vez mayor como consecuencia de las ventajas que presenta el método húmedo. Este método contamina menos el ambiente con gases y polvos, y permite la obtención de zinc de alta ley, con un grado elevado de recuperación de subproductos metálicos.

El continuo desarrollo de los procesos electrolítico permite disminuir costos de producción del zinc. Los más nuevos esquemas tecnológicos de los electrolitos de este metal incluyen alto índice de automatización. Un factor importante en el desarrollo de la electrólisis son las fuentes baratas de energía, como la Hidroeléctrica, eólica y otras. El zinc está considerado metalúrgicamente como un metal no noble, pero tiene resistencia a la corrosión atmosférica como consecuencia de su pasivación por las compactas capas de los productos de su corrosión (ZnO (s), o el carbonato básico complejo).



Grandes cantidades de zinc se utilizan como recubrimiento protector de los productos de acero. Este metal también tiene aplicación en la fabricación de importantes aleaciones técnicas con participación de Al, Cu y Mg.

2.2.3 Preparación de las menas de zinc.

El contenido de zinc en las menas varía del 4 al 8% y generalmente es acompañado con Fe, Pb, Ag, Cu, Cd, As, Sb, Ge, In, entre otros. Las menas sulfuradas son procesadas inicialmente por métodos de enriquecimiento (concentración por flotación). Los

concentrados sulfurados son destinados a tostación donde se oxidan a bajas temperaturas $747 - 847 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1020 - 1120 \text{ }^\circ\text{K}$), en forma parecida a los procesos piro metalúrgicos.

Las condiciones del proceso de tostación para la electrolisis son antagónicas. Por un lado, se desea remover totalmente el azufre, lo cual solo es posible a temperaturas muy elevadas, y por otra parte, se desea obtener la menor cantidad posible de compuestos perjudiciales como son los silicatos y ferritas, lo cual solo es posible a temperaturas más bajas. A más bajas temperaturas y con un exceso de aire, una menor cantidad de óxido de hierro se combina con los óxidos de zinc y forman $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (s) difíciles de disolver durante la lixiviación. A temperaturas de tostación más bajas se forma sulfato de zinc (ZnSO_4) (s) lo cual es ventajoso para la electrólisis. También se aprovechan en la lixiviación, las menas oxidadas de zinc después de un enriquecimiento en horno giratorio, donde se efectúa la remoción de Pb, Cd y Cl que pueden contener dichas menas.

2.2.4 Lixiviación de las menas de zinc.

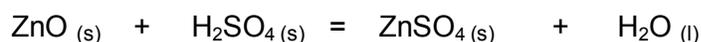
La lixiviación de las menas tostadas de zinc se realiza en dos etapas, una ácida y otra neutra. Resulta que las operaciones de lixiviación, purificación y electrólisis forman un circuito cerrado. El material tostado entra al tanque de lixiviación neutra, al cual también se dirige la solución ya neutralizada proveniente de la lixiviación ácida. Antes de la lixiviación ácida el electrolito de retorno contiene de 80 a 100 g de H_2SO_4 (aq) / L y sale de ella aproximadamente con 5 g de H_2SO_4 (l) / L

Se denomina electrolito de retorno a la solución que después de pasar por la operación de electrolisis, donde se precipita la mitad de su contenido de zinc y el H_2SO_4 (aq) es regenerado, se retorna de nuevo a una sección de lixiviación. Es necesario mencionar que en el proceso de lixiviación se emplean proporciones adecuadas de material tostado sólido (T) y solución lixivante líquida (L); a esta mezcla se le llama pulpa. Al inicio de la lixiviación se usa la relación $T/L = 1/14$ en peso y al final de la lixiviación esta proporción cambia a $1/25$. En la práctica industrial algunas compañías establecen sus propios esquemas tecnológicos que dependen de la composición de las menas y tipo de equipo usado. La arena obtenida en la operación de decantación se retorna para someterla a otra

dilución neutra adicional. El derrame del clasificador se decanta para separar los sólidos insolubles que acompañan todavía a la solución y el decantado se envía al circuito de lixiviación ácida para disolver los restos de zinc que pueda contener. Los tanques de lixiviación ácida también son alimentados de vez en cuando con solución acuosa de ácido sulfúrico fresca, para regenerar las pérdidas de ácido. En la etapa de lixiviación neutra se disuelve cerca del 50% de zinc del mineral tostado. El propósito de esta lixiviación es remover las impurezas contenidas en la solución, las cuales entran al circuito neutro con el derrame de la lixiviación ácida debido a que estos derrames contienen muchas impurezas.

2.2.5 Reacciones que ocurren durante la lixiviación.

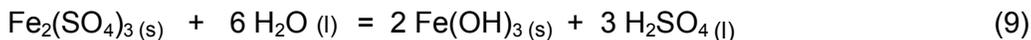
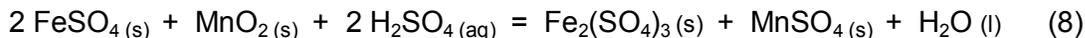
El material tostado contiene zinc en forma de ZnO, ZnSO₄, ZnO.Fe₂O₃, ZnO.SiO₂ y también los componentes de otras menas como Fe, Al, Pb, Cu, Ni, Co, Sb, Ga, entre otros. Mientras mayor es la concentración de H₂SO₄ (l) tanto más rápida es la lixiviación. El contenido de H₂SO₄ (l) disminuye durante el transcurso de lixiviación. Hasta obtener una solución de ZnSO₄ (s) según la reacción:



Similarmente otros compuestos de la mena reaccionan, el silicato ZnO.SiO₂ (sol) se disuelve más lento sin llegar a disolverse completamente. Durante la lixiviación cerca del 10% del hierro que entra en la solución proviene principalmente del FeO (sol) en pequeñas partes del Fe₂O₃ libre, permaneciendo los ferritos, ZnO (s) Fe₂O₃ (s), sin disolver. El PbO forma el PbSO₄ (s) insoluble.

Cerca de la mitad del cobre contenido en la mena entra en la solución. El Cd y el Sb se disuelven fácilmente y no así el Ni y Co que se disuelven solo parcialmente durante el transcurso de la lixiviación. Es necesario señalar que el As y el Sb pertenecen a las impurezas más dañinas en la electrolisis de la solución de sulfato de zinc. Los metales preciosos no se disuelven y se quedan en los lodos. Parte de las impurezas como Fe, Al, Sb, As, se remueven inicialmente durante la lixiviación neutra, la cual es conducida con un pH = 5. En estas condiciones el Fe y el Al se precipitan en forma de hidróxidos. Para su

completa oxidación se adiciona un oxidante como el MnO_2 ilustrado por la siguiente reacción:



Los efectos de la lixiviación neutra son:

- Todo el material tostado entra en el proceso y casi $\frac{3}{4}$ partes de zinc se disuelven.
- Los componentes del hierro se oxidan a Fe^{+3} y se precipitan.
- Además del hierro y el aluminio, también se remueve el sílice, el cual parcialmente se disuelve en forma coloidal y en solución neutra se coagula.
- Parte de hidróxido de cobre se precipita.
- Junto con los hidróxidos mencionados precipitan casi completamente el $\text{As}(\text{s})$ y el $\text{Sb}(\text{s})$ cuyos compuestos se absorben sobre una gran superficie de los hidróxidos.

Los hidróxidos ayudan a la coagulación del sílice, el cual en forma coloidal dificulta mucho la filtración subsiguiente. Después los residuos sólidos de la lixiviación neutra son dirigidos en la lixiviación ácida, cuyos efectos son:

- Disolución del $\text{Zn}(\text{s})$ y $\text{Cu}(\text{s})$ residuales.
- Disolver el hierro en la cantidad apropiada para remoción posterior de As y Sb , en el circuito de purificación.

La solución clara de la lixiviación neutra se conduce a la purificación, donde por medio de cementación con polvo de $\text{Zn}(\text{sol})$ se precipitan $\text{Cd}(\text{sol})$ y $\text{Cu}(\text{sol})$. La cementación es un proceso en el cual es precipitado, de una solución, un metal por otro menos noble, según las reacciones redox.



Las condiciones termodinámicas del proceso de cementación radican en la diferencia entre los potenciales de equilibrio de los electrodos metálicos mencionados, por ejemplo:

$$E^{\circ}_{\text{Cd}} = E^{\circ}_{\text{Zn}} \quad (12)$$

La efectividad de la cementación también depende del pH de la solución, cuyo valor evita la precipitación de los hidróxidos y otros complejos básicos del metal, los cuales pueden pasivar el metal reductor, frenando la cementación. La velocidad de la cementación también depende de la agitación de la solución. Después de filtrar el producto de la cementación se obtiene una torta que contiene $\text{Cu}_{(s)}$ y $\text{Cd}_{(s)}$ que después se procesa para obtener dichos metales y una solución clara que se conduce a procesos de electrolisis. La eficiencia en el proceso de lixiviación del $\text{Zn}_{(s)}$ es alrededor del 90%.

2.2.6 Electrolisis del zinc (de la solución de sulfato de zinc).

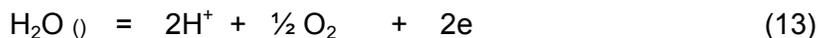
La solución filtrada y clara obtenida por la lixiviación de las menas de Zn es el electrolito casi neutro, a base de solución de sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4_{(s)}$) con una concentración de 100 a 0 g/L. De este electrolito durante la electrolisis se extrae la mitad y dos tercios del contenido de Zn. (Prácticamente, cuando se aumenta la concentración de $\text{H}_2\text{SO}_4_{(l)}$ hasta 100 g/L). El electrolito usado regresa a lixiviación.

El éxito del proceso electrolítico depende ante todo de la pureza del electrolito. Las impurezas más dañinas son, principalmente, aquellas más electropositivas que el Zinc, las cuales se depositan simultáneamente con este metal en el cátodo. Estas impurezas corroen el Zinc catódico, porque las micro-celdas locales formadas por ellas, sobre la superficie del Zinc provocan la disolución de este metal en el electrolito. En general las contaminaciones del electrolito causan la corrosión secundaria de los cátodos, forman protuberancias en la superficie del cátodo ocasionando cortos circuitos, dificultando el depósito del Zinc, causan la fragilidad del depósito.

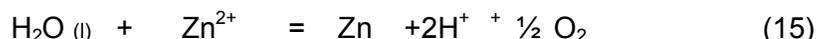
La electrolisis se lleva cabo en recipientes denominados celdas o cubas electrolíticas donde son colocados suspendidos los electrodos insolubles denominados cátodos de lámina de Al y ánodos de lámina de plomo con 1% de Ag. En el electrolito están presentes principalmente los iones Zn^{2+} , H^+ , OH^- , y SO_4^{2-} . El flujo de la corriente a través del electrolito causa la transportación de los cationes hacia el cátodo donde se descargan,

cediendo sus electrones al cátodo. Simultáneamente en el ánodo se descargan los aniones con desprendimiento de oxígeno. En el electrolito tiene lugar la generación de H_2SO_4 (aq), en una cantidad equivalente del Zinc (s) depositado.

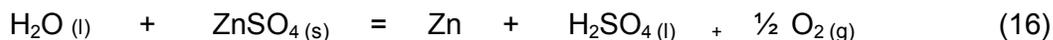
Entre las posibles reacciones más importantes son las anódicas y catódicas:



Siendo la reacción sumaria de electrolisis



Esta reacción también se puede expresar según la reacción molecular:



De esta reacción resulta que durante el transcurso del proceso disminuye el contenido de Zinc conforme aumenta la concentración de H_2SO_4 (l).

Los electrodos se conectan en paralelo por medio de barras de soporte. Mientras que las cubas se conectan en serie en forma de grupos que a su vez son conectados en paralelo. Durante la electrolisis es necesario controlar la composición y la temperatura del electrolito y la tensión en las cubas, la cual durante los cortos circuito disminuye. Periódicamente las cubas se desconectan para remover las lamas que pueden causar los cortos circuitos. Estas lamas contienen MnO y sirven como oxidante del Fe^{2+} en el proceso de lixiviación.

2.2.7 Hidro electrometalurgia del cobre.

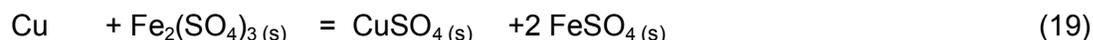
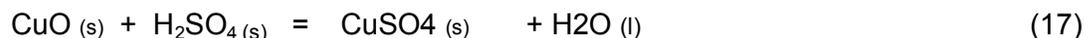
Cerca del 20% de la producción mundial de Cu se produce por este método. Recientemente se puede ver que aumenta el interés por la Hidro metalurgia del Cu. Esto se puede explicar, ya que con los procesos Hidro metalúrgicos se conjuga una esperanza para mejorar la economía en la obtención del Cu. Lo más importante es que se supone un mejoramiento en las condiciones de trabajo y una disminución de la contaminación del ambiente. Desde el punto de vista de la Hidro metalurgia del Cu, las materias primas pueden dividirse en oxidadas, que contienen Cu_2O (s), CuO (s), $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ (s) y otros,

principalmente menas y concentrados sulfurosos, como Cu_2S (s), CuFeS_2 (s), CuFeS_4 (s). Las menas oxidadas se disuelven fácilmente en soluciones ácidas y estos progresos son muy conocidos por su gran aplicación industrial. De las soluciones ácidas el Cu es precipitado fácilmente por electrolisis. El problema del procesamiento Hidro metalúrgico de los sulfuros es más difícil, pero la fisicoquímica de este tipo de procesos está bastante desarrollada, lo que permite su aplicación industrial. En la actualidad ya existen plantas piloto Hidrometalurgias en México. Trabajando menas de sulfuros.

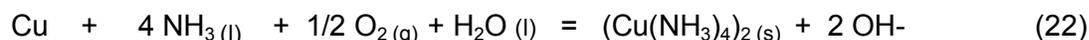
Hasta ahora los procesos Hidro metalúrgicos se aplican en escala industrial solamente a menas oxidadas pobres. Como lixiviante se usa agua, soluciones diluidas de H_2SO_4 (s) o HCl (l), soluciones concentradas de H_2SO_4 (l), sales como $\text{HCl} + \text{NaCl}$ en solución, soluciones amoniacales y cianuros. Solamente los minerales como $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ y CuCl_2 , y otros alógenos, se disuelven en H_2O ; Para los otros minerales oxidados es necesario usar soluciones ácidas o amoniacales. El uso del lixiviante depende del carácter químico del mineral y de la ganga. Estos procesos se han perfeccionado mucho y debido a su gran variedad solamente se hace una presentación esquemática de ellos.

2.2.8 Hidrometalurgia de las menas oxidadas de cobre.

Un lixiviante clásico de estas menas es la solución diluida de H_2SO_4 ; Durante la lixiviación pueden ocurrir las siguientes reacciones:



Las menas oxidadas también se pueden lixiviar con soluciones amoniacales según el esquema.





Después de la filtración, los componentes complejos de cobre se descomponen térmicamente y precipitan CuO y Cu₂O. Por reducción posterior de estos óxidos se obtiene cobre metálico y se recupera el amoníaco. De estas reacciones se puede ver que para disolver el cobre metálico es necesaria la presencia de sustancias oxidantes.

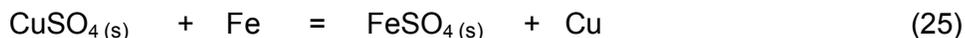
También existe la posibilidad de la lixiviación ácida de los sulfuros



Dependiendo del carácter químico de la solución obtenida después de la lixiviación, se pueden aplicar diversos métodos de precipitación del cobre de la solución. Principalmente para soluciones ácidas se emplea la precipitación electrolítica o la cementación.

2.2.9 Cementación.

Este método se aprovecha en el caso de que se tengan soluciones pobres en cobre (0.5 a 15 g Cu /L). Estas soluciones contienen sulfato de cobre, de hierro, H₂SO₄ (l) libre y otras impurezas. El cobre se precipita por medio de hierro en forma de polvo o chatarra según la reacción:

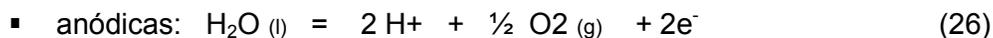


La reacción de cementación es prácticamente irreversible porque su constante de equilibrio a la temperatura ambiente tiene valor alto. Un gran valor de K significa que la concentración de iones Fe₂₊ en solución en equilibrio es grande, es decir, que la reacción tiene gran eficiencia y es fuertemente desplazada hacia la derecha. Gracias a esto, la cementación se puede conducir en soluciones pobres en cobre.

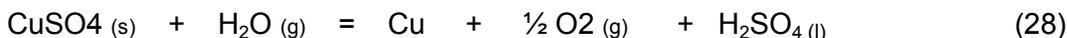
2.2.10 Electrolisis de las soluciones de CuSo4.

En el proceso de electrolisis de las soluciones acuosas de CuSO₄ (aq) se usan ánodos del tipo insoluble a base de plomo, con pequeña adición de antimonio. Los cátodos están formados por delgadas láminas de cobre electrolítico. Como electrolito se usa la solución obtenida en la lixiviación mediante una solución de H₂SO₄ (s) y aplicación previa de purificación. El electrolito contiene de 20 a 50 g de Cu (l) / L y de 10 a 20 g de H₂SO₄ (l) /L. El proceso de electrolisis es relativamente sencillo porque el cobre es más noble y las

impurezas como Fe y Zn son más electronegativas permaneciendo en la solución. Las reacciones son:



Siendo la reacción sumaria de la electrolisis:



De esta manera, durante la electrolisis la concentración de iones cobre disminuye a medida que aumenta la concentración de $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{(aq)}$. La electrolisis se interrumpe cuando aparece un depósito en forma de polvo. La planta de electrolisis colabora con la lixiviación y el electrolito usado, que contiene de 10 a 15 g de Cu / L y de 60 a 75 g de $\text{H}_2\text{SO}_4 \text{(l)}$ / L que regresa a la lixiviación. Las impurezas del electrolito se acumulan continuamente debido a su retorno constante de la lixiviación y para evitar esto periódicamente se sacan del circuito cierta cantidad de electrolitos que se reponen con solución nueva de H_2SO_4 .

El producto de la electrolisis se denomina cobre catódico y tiene un grado de pureza similar al cobre refinado electrolíticamente ⁽⁹⁾. En la tabla IV. Se presentan los potenciales de reducción estándar de la serie electromotriz de los elementos químicos.

Tabla IV. Potenciales de reducción estándar de la serie electromotriz.

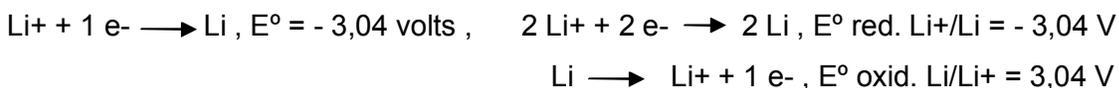
Electrodo	E° (voltios)	Electrodo	E° (voltios)
Li^+ / Li	- 3,04	$\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}$	0,34
Cs^+ / Cs	- 3,02	I_2 / I^-	0,54
K^+ / K	- 2,92	$\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$	0,77
$\text{Ca}^{2+} / \text{Ca}$	- 2,87	Ag^+ / Ag	0,80
Na^+ / Na	- 2,71	$\text{NO}_3^- / \text{NO}$	0,96
$\text{Al}^{3+} / \text{Al}$	- 1,67	$\text{Br}_2 / \text{Br}^-$	1,09
$\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2 + \text{OH}^-$	- 0,83	$\text{IO}_3^- / \text{I}_2$	1,20
$\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}$	- 0,76	$\text{O}_2 + \text{H}^+ / \text{H}_2\text{O}$	1,23
$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}$	- 0,44	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} / \text{Cr}^{3+}$	1,33
$\text{Ni}^{2+} / \text{Ni}$	- 0,25	$\text{Cl}_2 / \text{Cl}^-$	1,36
$\text{Pb}^{2+} / \text{Pb}$	- 0,13	$\text{ClO}^- / \text{Cl}^-$	1,46
H^+ / H_2	0	$\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$	1,51
$\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}^+$	0,15	Au^+ / Au	1,68
$\text{SO}_4^{2-} / \text{SO}_2$	0,20	F_2 / F^-	2,85

El F_2 es el mejor oxidante, ya que a mayor E° mayor tendencia a reducirse y, por tanto mayor poder oxidante.

El Li es el mejor reductor, porque su E° es el más bajo y, por tanto, frente a cualquier sustancia se oxidaría.

Notas: - Si una ecuación se multiplica por un número n, el potencial del par no varía.

- Si una ecuación se invierte, el potencial del par cambia de signo (ya que sería potencial de oxidación):



La tabla o serie de potenciales es de gran utilidad, ya que permite determinar en qué sentido transcurre una reacción redox.

Ejemplo: La reacción $Zn + Cu^{2+} \hat{=} Zn^{2+} + Cu$, está desplazada hacia la derecha porque el $E^\circ Cu^{2+}/Cu$ (0,34 V) > $E^\circ Zn^{2+}/Zn$ (-0,76 V) y por tanto el Cu^{2+} tiene más tendencia a reducirse que el Zn^{2+} .

En la tabla V se presentan los diferentes tipos de materiales que pueden ser tratados por lixiviación.

Tabla V. Diferentes materiales que pueden ser tratados por lixiviación.

Categoría.	Ejemplos.
Metales.	Metales preciosos, metales nucleares, metales oxido-reducidos; cobre, níquel y cobalto.
Óxidos e hidróxidos.	Bauxita, lateritas, minerales de uranio, minerales de zinc, y calcinados, minerales de manganeso nódulos, rutilo, minerales de óxidos de cobre.
Óxidos complejos.	Cromita, novita-tantalita, pyrocloro, Jimenita, Wolframita, schelita, titano, ferrita magnetita.
Sulfuros	Sulfuros de metales primarios tales como, cobre, níquel, plomo o zinc, molibdenita.
Fosfatos	Roca fosfórica, arenas de monosita
Silicatos	Berilo, caolín, serpentina, zirconio.
Selenitas y telurios.	Lodos aniónicos de cobre electrolítico.
De catálisis.	Níquel, Molibdeno y Vanadio.
Escoria y cenizas.	Escoria de convertidor, ceniza de vanadio de cobre, escoria de ferro aleaciones.

2.2.11 Ventajas del proceso Hidrometalúrgico contra el proceso Piro metalúrgico.

A continuación se presentan algunas de las ventajas que se tienen al usar el proceso hidrometalurgico y no el proceso Piro metalúrgico.

1. Al hacer la comparación con los costos de capital, el gasto de la piro metalurgia se incrementa tan rápido como decrece la escala de operación y en el proceso Hidro metalúrgico en la mayoría de los casos es más favorable.
2. El proceso Hidro metalúrgico tiene la flexibilidad para el tratamiento de complejos minerales y para la producción de una variedad de metales subproducto. Los minerales complejos y concentrados en los cuales una variedad de metales recuperables pueden ser efectivamente procesados por las rutas de la Hidro metalurgia lo que la hace altamente atractiva.
3. Las pérdidas económicas de la Hidro metalurgia son más bajas que las pérdidas del proceso piro metalúrgico.
4. La Hidro metalurgia en algunos casos puede ser usada en minerales de baja ley donde los costos de la piro metalurgia son incosteables y no sería factible tratarlos por este proceso.
5. La Hidro metalurgia es el único método en donde se extrae los metales sin necesidad de triturar, moler y flotar. Únicamente se tritura y se trata con soluciones acuosas y esto tiene un considerable ahorro.
6. La Hidro metalurgia consume menos energía pues la operación es barata, al ambiente y bajas temperaturas comparadas a las altas temperaturas 1500 °C que son típicas en los hornos de fundición.
7. La Hidro metalurgia también es una alternativa de la piro metalurgia porque reduce la contaminación del aire, en especial la causada por la fundición en la emisión de SO₂ (Dióxido de azufre).
8. En las plantas Hidro metalúrgicas. Las soluciones son fácilmente transferidas en un sistema cerrado de tubos.

9. En el proceso piro metalúrgico, por otro lado, el metal fundido y la escoria deben ser transferidos de un horno a otro en una línea de cuchareo en refractarios pesados el cual es un proceso inconveniente y costoso. ⁽⁹⁾

En la tabla VI se puede observar un comparativo de las características más importantes de los dos procesos.

Tabla VI. Comparativo del proceso Hidro metalúrgico y Piro metalúrgico.

TERMINOS DE REFERENCIA	PIRO METALURGIA	HIDRO METALURGIA
Tratamiento de minerales de alto grado.	Menos económico.	Más económico.
Tratamiento de minerales de bajo grado.	Inusual porque grandes cantidades de energía son requeridas para fundir la ganga asociada.	Susceptible a proveer una selectiva lixiviación.
Tratamiento de minerales complejos.	Inusual porque la separación es difícil.	Posee la flexibilidad para el tratamiento de minerales complejos y para la producción de una variedad de subproductos.
Aspecto económico.	La operación a gran escala requiere un gran capital de inversión.	Puede ser usado para operaciones a pequeña escala, este tiene un bajo capital de inversión sensible al tamaño de la planta en bajos rangos de capacidad.
Tratamiento de fuentes secundarias.	Inusual en la mayoría de los casos.	Adecuado.
Separación química de metales similares.	No es posible.	Si es posible.

Continúa de la Tabla VI. Comparativo del proceso Hidro metalúrgico y Piro metalúrgico.

Tratamiento de minerales sulfurados.	Dióxido de azufre.- Este es generado en altas cantidades y debe ser convertido a ácido sulfúrico y en una baja concentración deberá disponerse de otra manera, para el primero existe un mercado establecido y para el último existen métodos probables pero son caros.	Pueden ser tratados sin generación de dióxido de azufre, la necesidad de hacer un ácido sulfúrico para el mercado es eliminada. Existe la posibilidad de recuperar azufre en forma elemental.
Velocidad de reacción.	Rápido ya que envuelve altas temperaturas.	Generalmente lento, ya que todas las operaciones son llevadas a bajas temperaturas.
Manejo de materiales.	Manejo de metales fundidos, escorias, matas etc. Acarrea problemas.	Las soluciones pueden ser fácilmente transferidas en una línea de tubos cerrada.
Contaminación ambiental.	Problemas de desperdicio de gas y ruido, muchos procesos emiten gran cantidad de polvos el cual puede ser recuperado para abatir la contaminación o porque los polvos por si mismos contienen valor metálico.	No existen problemas de contaminación, problemas de agua de desecho. No hay problemas de polvos, ya que los materiales se manejan usualmente húmedos.
Residuos sólidos.	Muchos residuos tales como escoria, cuarzos que pueden ser almacenados en pilas expuestas sin peligro de disolución y estéticamente inaceptable.	La mayoría de los residuos sólidos están finamente divididos: en su estado seco crea problemas de polvos, en su estado húmedo libera iones metálicos en la solución. Este puede contaminar el medio ambiente.
Gases tóxicos.	Muchos procesos generan gases tóxicos; sistemas costosos, son requeridos para combatir la liberación de los mismos a la atmósfera.	Muchos procesos no generan gases, y si estos son generados el reactor puede comprimirlos fácilmente.

Continúa de la Tabla VI. Comparativo del proceso Hidro metalúrgico y Piro metalúrgico.

Alimentación del proceso.	Conveniente para una alimentación no homogénea.	El proceso de alimentación en general es más uniforme y más atento a la composición y mineralogía que el piro-metalúrgico.
Principal operación.	Representa únicamente plantas metalúrgicas principalmente, la ingeniería no es considerada compleja.	En general, es un esquema más sofisticado de control para mantener satisfactoriamente la operación. Las plantas operan más como plantas químicas con control, la ingeniería de la planta es más compleja.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo se partió del concentrado de los polvos de fundición obtenido a partir del proceso de Muestreo por el Método de Jones y una Separación Electrostática. Y se realizó una serie de pruebas de Lixiviación para encontrar los parámetros óptimos de esta y poder tener un licor rico, estos parámetros se encuentran en el trabajo de Tesis denominada “Estudio Cinético de la Lixiviación de Polvos de Fundición de Cobre” ⁽¹³⁾ y a partir de estos valores obtenidos, se realizaron las pruebas de Hidro electrodeposición. En la figura 4 se presenta el diagrama de flujo de la fase experimental.

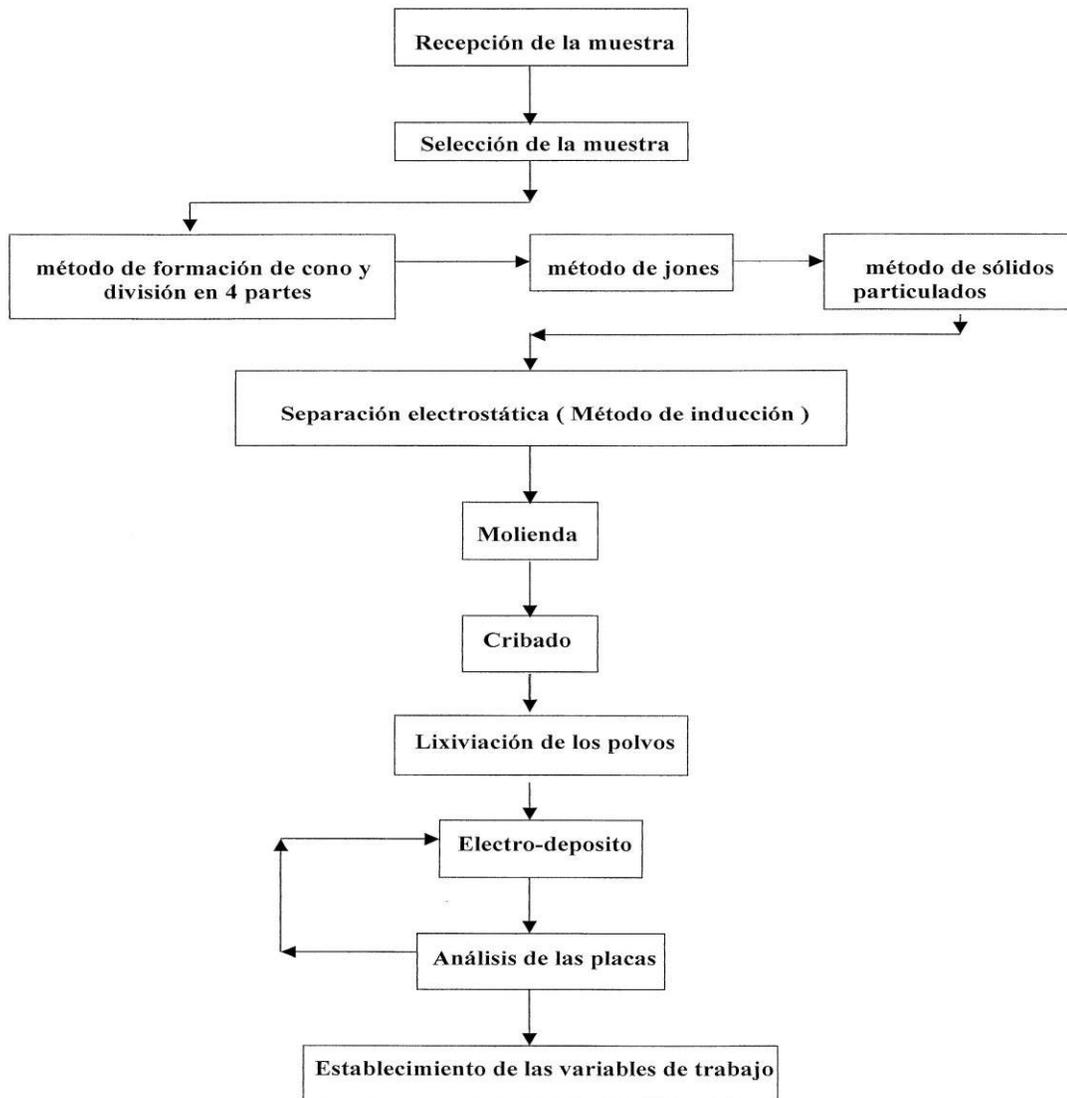


Figura 4. Diagrama de la fase experimental.

En las tablas VII y VIII respectivamente se pueden observar los valores óptimos que se obtuvieron para el concentrado por separación electrostática y los valores óptimos para llevar a cabo la lixiviación del licor rico.

Tabla VII. Valor de las variables para el concentrado por separación electrostática.

VARIABLES PARA EL CONCENTRADO DE LOS POLVOS.	VALORES OPTIMOS
SEPARACIÓN DEL ELECTRODO (cm)	8
VOLTAJE (Kv)	4
RPM	140

Tabla VIII. Valor de las variables para llevar a cabo la lixiviación.

VARIABLES PARA LA LIXIVIACIÓN	VALORES OPTIMOS
CONC. H_2SO_4 [M]	2
TEMP. SOLN. [°C]	60
PESO DE MUESTRA [g]	10
VEL. AGITACIÓN [RPM]	300

3.1 Preparación para la Lixiviación y el electro depositado.

Lixiviación Isotérmica.- La alternativa planteada en este trabajo desde el inicio, fue la de un proceso menos contaminante, que el sistema tradicional (piro metalurgia) y esta propuesta fue un proceso Hidro metalúrgico a base de un reactivo ácido como lo es el H_2SO_4 (l), que es un disolvente potente y barato así como el HNO_3 (l) usado como agente oxidante, proceso en el cual se tomaron los parámetros de lixiviación más importantes como concentración del H_2SO_4 (s), temperatura, peso de la muestra y velocidad de agitación.

Electro deposito.- Esta es la parte final de este trabajo en la cual se adicionaran compuestos de alta basicidad al licor rico obtenido anteriormente, dichos compuestos son $NaOH$ (s), Ca (s), $NaCO_3$ (s) e NH_4OH (s). Para conseguir una solución básica (con pH de 10) y de esta forma poder adicionar el $NaCN$ necesario para tener el depósito de latón.

3.2 Equipo de laboratorio utilizado en la experimentación.

Material, reactivos y equipo usado para la lixiviación isotérmica.

- 1.- Baño isotérmico marca PRESICION SCIENTIFIC con regulador de temperatura y capacidad de 40 L
- 2.- Balanza analítica con capacidad de 200 g.
- 3.- Agitador para laboratorio marca kaframo con regulador de revoluciones.
- 4.- Reactor de vidrio con tapa (tres bocas salidas) marca PIREX con 2 L de capacidad.
- 5.- Termómetro de mercurio con escala de 0 a 100 °C.
- 6.- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) (l) grado analítico de 95 a 98 % de pureza.
- 7.- Ácido nítrico (HNO_3) (l) grado analítico de 63 % de pureza.
- 8.- Potenciómetro manual (Medidor de pH).

Material, reactivos y equipo usados para el electro-deposito.

- 1.- Calentador de laboratorio marca KAMAC RCT con control de temperatura y agitación.
- 2.- Rectificador para laboratorio marca MEIKO con regulador de voltaje y amperaje
- 3.- Vasos de precipitados marca PIREX con capacidad de 1000 mL
- 4.- Termómetro para laboratorio con escala de 0 a 100 °C.
- 5.- Agitadores magnéticos para laboratorio.
- 6.- Frasco con Carbonato de sodio (NaCO_3 (s)) de ½ Kg
- 7.- Frasco de Cianuro de sodio (NaCN (s)) de ½ Kg.
- 8.- Frasco de Hidróxido de sodio (NaOH (s)) de ½ Kg.
- 9.- Ánodos de Cobre, Grafito y Acero inoxidable tipo 304 para laboratorio.
- 10.- Pipeta graduada de 20 mL
- 11.- Probeta graduada de 100 mL
- 12.- Cal comercial.

3.3 Procedimiento

3.3.1 Lixiviación del concentrado de los polvos.

Con el concentrado de los polvos procedente de la separación electrostática, y teniendo los valores óptimos para llevar a cabo la lixiviación de estos. Se tomaron dos muestras, cada una de 10 g y ambas se sometieron a una lixiviación, obteniendo los licores ricos, estos se enviaron a un laboratorio externo (Perkin Elmer), con el fin de conocer su composición química. En la figura 5 se esquematiza el equipo experimental usado para llevar a cabo la lixiviación de los polvos.

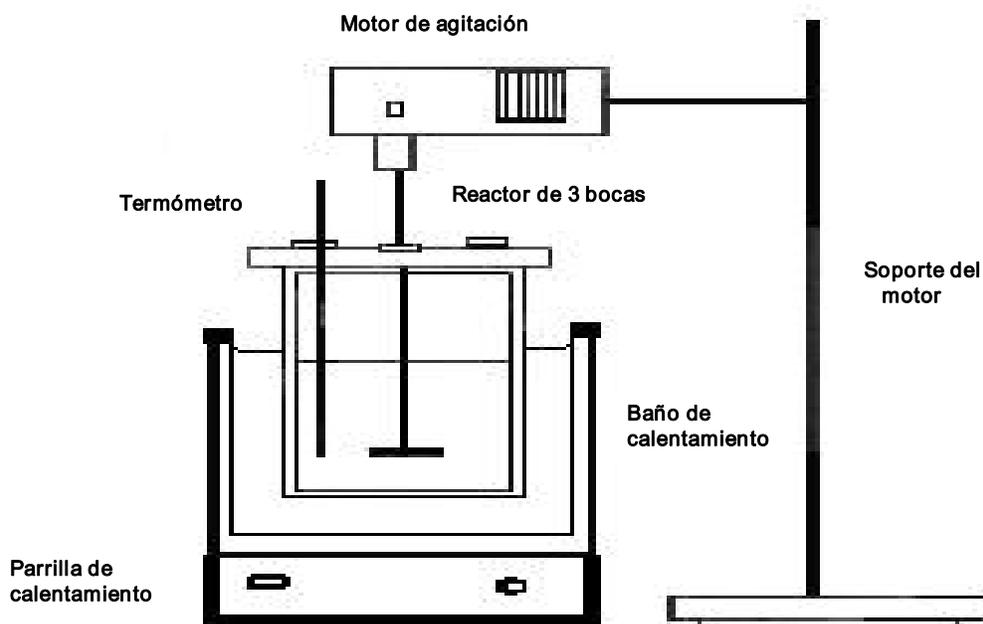


Figura 5. Equipo experimental para la lixiviación de los polvos.

La tabla IX muestra los resultados del análisis químico de los polvos, el cual se hizo con un Espectrofotómetro de Absorción Atómica por Flama marca Perkin Elmer.

Tabla IX. Análisis químico de los polvos de latón.

Cobre (g/L)	Zinc (g/L)	Plomo (g/L)	Fierro (g/L)	Residuos (g/L)	Total (g/L)
5.75	0.208	0.124	0.098	3.810	9.99
5.95	0.212	0.135	0.105	3.588	9.99
X = 5.85	X = 0.210	X = 0.1295	X = 0.1015	X = 3.699	X =9.99

En la figura 6 se presentan los valores en porcentaje del análisis químico de los polvos.

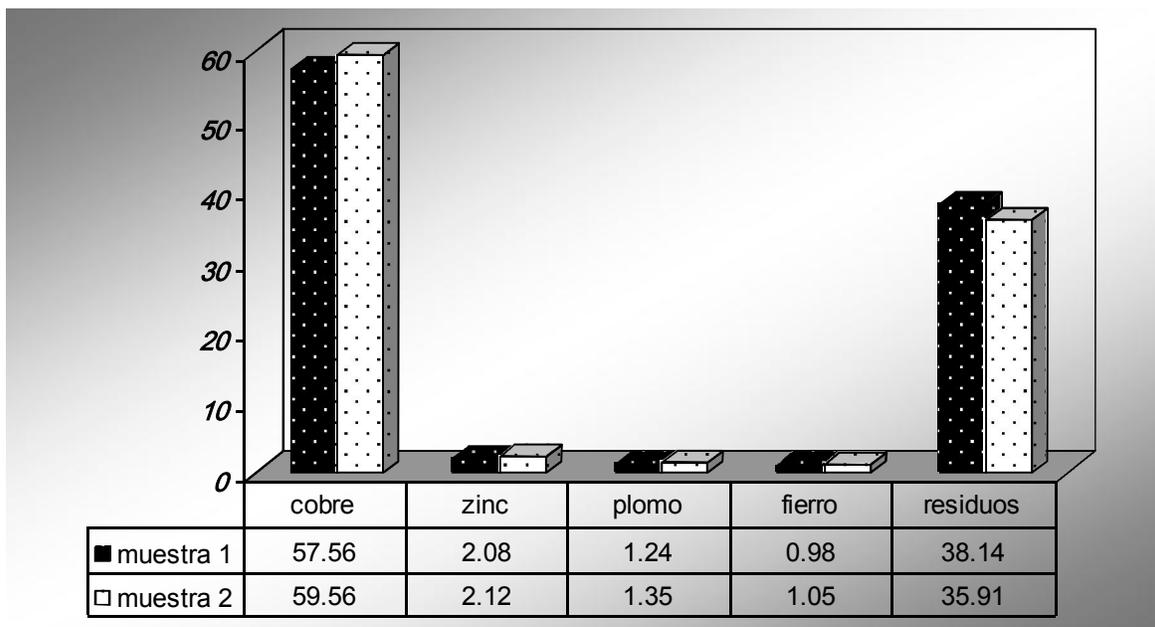
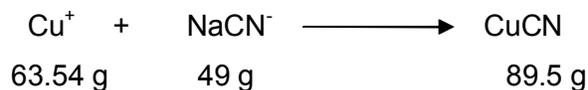


Figura 6. Valor en porcentaje del análisis químico.

3.3.2 Cálculo estequiométrico del Cianuro de NaCN.

Teniendo el licor rico y conociendo su composición química, se calculó la cantidad de cianuro de sodio ($\text{NaCN}_{(s)}$) estequiométrico necesario.

Para calcular el NaCN necesario



Si la solución rica (lixiviada) tiene 5.85 g/L de Cu, se calcula el NaCN necesario

$$\begin{array}{l}
 63.54 \text{ g Cu} \quad 49 \text{ g NaCN} \\
 5.85 \text{ g Cu} \quad X \text{ g NaCN} = (5.85 \text{ g Cu} \times 49 \text{ g NaCN}) / 63.54 \text{ g Cu}
 \end{array}$$

$$X = 4.51 \text{ g NaCN}$$

3.3.3 Experimentación

Teniendo el valor del NaCN (s) necesario se procedió a encontrar un reactivo que permita llevar el licor rico ácido a un licor rico básico (con pH de 10) para no formar ácido cianhídrico (gas muy peligroso) con la adición del cianuro de sodio (NaCN) (s). Usando los reactivos básicos o alcalinos siguientes.

- a).- Hidróxido de Sodio (NaOH) (s)
- b).- Carbonato de Sodio (NaCO₃) (s)
- c).- Carbonato Acido de Sodio o Bicarbonato de sodio (NaHCO₃) (s)
- d).- Cal comercial CaO (s) (Oxido de Calcio)
- e).- Hidróxido de Amonio (NH₄OH) (l)

1.- El licor rico se mezcló con NaOH (s), adicionando a la solución rica lenteja por lenteja hasta un pH de 10, se generó una fuerte reacción exotérmica que elevo hasta 80 °C la temperatura de la solución, haciendo peligroso el manejo del recipiente con la solución. Por lo que se descartó el uso del NaOH (s).

Se adiciono NH₄OH (l) al licor rico y se obtuvo el pH, pero el olor que despidió la solución era muy molesto, y se optó por no usar este reactivo.

Con la cal comercial no se tuvo ningún incremento en el pH, al contrario, hubo una disminución de este desechándose su uso.

Al ocupar NaCO₃ (s) se obtuvo el pH buscado de manera rápida y utilizando una cantidad adecuada.

Al usar NaHCO₃ (s) se obtuvo el pH requerido, pero se usó doble cantidad que la del NaCO₃ (s)

2.- Teniendo el agente básico adecuado para obtener el pH de 10 se procedió a determinar el tipo de material ideal a usarse como cátodo y ánodo. Por lo que se probaron los siguientes materiales.

- a).- Cobre
- b).- Grafito
- c).- Acero Inoxidable tipo 304

Acondicionada la solución a un pH de 10 esta se transfiere a una celda electrolítica de vidrio como se muestra en el esquema de la figura 7 la cual a su vez es montada en una parrilla de calentamiento con control de temperatura y agitación magnética. Se adicionó el $\text{NaCN}_{(s)}$ acondicionando la solución durante una hora y se realizaron las pruebas con los materiales antes mencionados para encontrar el más adecuado a usarse como ánodo y cátodo. La celda de electro depósito es conectada a un regulador de voltaje y de corriente.

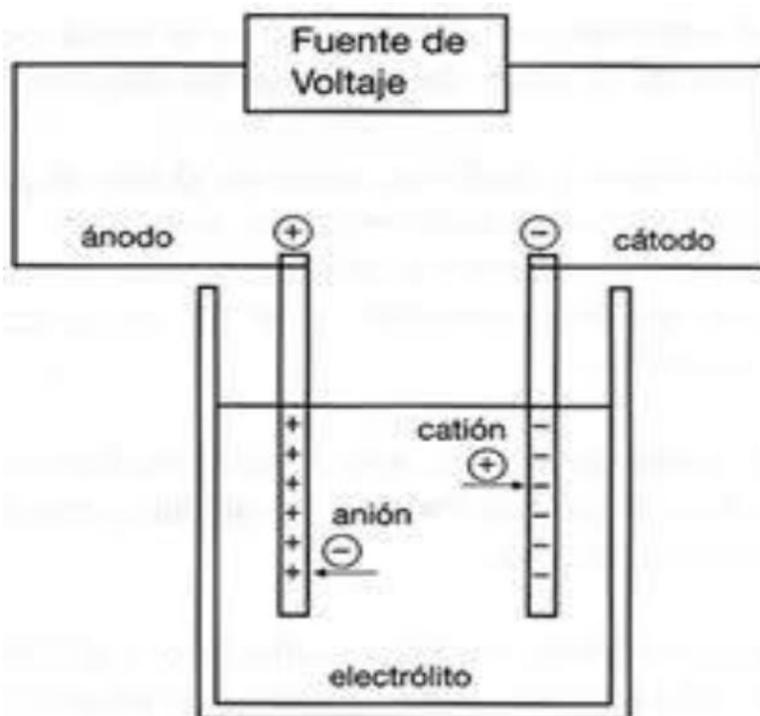


Figura 7. Celda electrolítica.

Se determinó usar las siguientes variables: temperatura, agitación y corriente eléctrica. La tabla X muestra las variables y los valores con los cuales se iniciaron las pruebas.

Tabla X. Variables iniciales de trabajo.

VARIABLE	VALOR DE LAS VARIABLES
Temperatura (°C)	30, 35, 40
Corriente (amperes)	2, 3, 4, 5
Agitación	Baja o moderada

Se realizaron las pruebas y no hubo depósito de latón, por lo que se adiciono un exceso del 2 % de $\text{NaCN}_{(s)}$ y con un amperaje de 2 amperes y $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura y se obtuvo un depósito de cobre rozado en el material conductor. Con estos depósitos de cobre se procedió a determinar cuál es el mejor material conductor.

Cobre.- Tuvo una buena adherencia de la capa de cobre al inicio de la experimentación.

Grafito.- Este material presento problemas como pasivación del cátodo, y contaminación de la solución por cenizas.

Acero Inoxidable tipo 304.- En este tipo de acero, el ánodo y el cátodo, presentaron buena superficie de depósito.

Se decidió que el mejor material a utilizar es el acero inoxidable tipo 304

3.- Al tener los parámetros de basicidad con $\text{NaCO}_3_{(s)}$, los ánodos y cátodos de acero inoxidable pulidos y limpios, se variaron los excesos de cianuro de 2%, 4%, 6%, y 8% a temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 2 amperes de corriente, con agitación moderada obteniendo únicamente soluciones azules después de adicionar el NaCO_3 , se obtuvieron soluciones verdes oscuras cuando se adiciono un exceso de cianuro y se aumentó de temperatura. Se obtuvieron depósitos de cobre con una tonalidad rosa salmón al inicio y café oscura al final del electro depósito.

4.- Se aumentaron los % de exceso del cianuro de un 10% al 20%, y la solución no cambio. Se aumentaron los excesos de un 20 al 30 y 40%. Continúo sin haber cambios. En toda la experimentación anterior tuvo una coloración verde jade al agregar el NaCO_3 y cuándo se agregó el NaCN la solución viro a una coloración verde pasto y el único deposito obtenido era el de cobre, se incrementó el exceso de cianuro en forma importante 90%, la solución, de una coloración verde pasto viro a un transparente claro amarillento, se dejo reposar esa solución y al siguiente día se realizaron las pruebas con esa solución, con 2 amperes de intensidad, 40°C y agitación baja, se logró un depósito de una coloración rosa salmón (depósito de cobre) y posteriormente se depositó una película de latón color amarillo verdoso. Por lo que se trabajó con valores de 90 al 100% de exceso de cianuro de sodio ($\text{NaCN}_{(s)}$).

Los valores de los excesos de cianuro de sodio ($\text{NaCN}_{(s)}$) y su equivalente en peso se muestran en la tabla XI.

Tabla XI. Valor de los excesos del NaCN en la solución y en porcentaje peso.

Exceso de NaCN (%)	Valor en peso (g)	Exceso de NaCN (%)	Valor en peso (g)
2	4.6	40	6.3
4	4.7	50	6.8
6	4.8	60	7.2
8	4.9	70	7.6
10	5.0	80	8.1
20	5.4	90	8.5
30	5.9	100	9.0

5.- Cuando se obtuvo la película de latón, se buscó un producto capaz de conducir y permitir que el depósito de latón se lleve a cabo entre este producto y el cátodo y así tener el latón en una laminilla fácil de manejar y analizar, se probó con polvo de grafito, pero contamina la solución, una grasa conductora que no funciona como se esperaba y por último se colocó papel aluminio en el cátodo depositándose el latón pero la permanencia en el fue muy pobre por lo que se dejó depositar libremente en la placa de acero inoxidable.

Inicialmente se ocuparon los rectificadores del laboratorio de electro metalurgia pero cuando se tuvo una mejor respuesta en el depósito de latón. Los equipos comenzaron a tener variaciones en las lecturas de la intensidad de corriente y el voltaje, se consiguió un rectificador portátil de laboratorio con el cual se controlaron mejor las variables y los depósitos, ya que no presentaron variaciones, con este rectificador a 5 amperes de intensidad y 4.75 volt. Se obtuvieron buenos depósitos de latón.

6.- En este paso se optó por revisar los extremos del exceso de 90% y 100% se observó que a 20% y 80% no hubo depósitos, de cobre ni de latón. Se realizaron las pruebas en 90, 92, 94, 96, 98, y a 100 % de NaCN con los parámetros que se tenían de 5 amperes, 4.5 volt y 40°C con agitación y se observó, que se depositó primero el cobre y posteriormente el latón pero presentaba quemaduras, esta prueba se realizó tres veces

dando el mismo acabado por lo que se disminuyó el amperaje a 3 amperes y 3.75 volts lográndose un mejor depósito y sin la mancha oscura en el cátodo, también fue importante controlar la temperatura y la optima esta entre 35° y 40 °C para tener un deposito sin quemaduras.

Después de corregidos y revisados todos los parámetros se decidió realizar pruebas únicamente en el intervalo de 90 a 100 % de exceso NaCN, 35 a 40 °C de temperatura, agitación baja o moderada, 3 amperes, 3.75 volt. Obteniéndose una serie de depósitos representativos de los cuales solo el de 96 % se llevó a difracción de rayos X. Así como también se disolvió una barra de latón comercial para comparación de datos.

IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Durante la experimentación se concluye que el mejor reactivo para alcanzar el pH de 10 y de esta forma evitar la formación de ácido cianhídrico al adicionar el NaCN (s) fue el NaCO₃ (s). Ya que este reacciona rápido, es fácil de conseguir y es relativamente barato.

Se determinó cuál es el material para usarse como cátodo y ánodo tomándose en consideración los siguientes resultados:

Cobre.- Tuvo un buen depósito de cobre, pero por ser del mismo material que el buscado este podría influir en la concentración de la solución y en los resultados, por lo que se descartó su uso.

Grafito.- Este presentó problemas, como pasivación del cátodo, contaminación de la solución por cenizas, desechándose su uso.

Acero Inoxidable tipo 304.- En este tipo de material de acero, tanto el ánodo como el cátodo presentaron buena superficie de depósito.

Estas observaciones determinaron que el material a usar como cátodo y ánodo fuera el acero inoxidable tipo 304, por lo que este se ocupó durante toda la experimentación.

Teniendo los parámetros de pH de 10 usando NaCO₃, y los ánodos y cátodos de acero inoxidable pulidos y limpios, se decidió incrementar los excesos de cianuro de sodio de 2%, 4%, 6%, y 8%, con una temperatura de 40 °C, 2 amperes de corriente y agitación moderada, se adicionó el NaCO₃ y la solución permaneció azul. Se agregó el cianuro de sodio y se aumentó la temperatura, la solución cambió a un color verde oscuro. Obteniéndose depósitos de cobre con una tonalidad salmón al inicio y café oscura al final del electro depósito.

Se aumentaron los % de exceso del cianuro de un 10% al 20%, pero no hubo cambio. Se continuaron las pruebas aumentando los excesos de un 20 al 30% y 40%. Continúo sin

haber cambios. Se adiciono el NaCO_3 y la solución continuo color verde jade, y viro a una coloración verde pasto al agregar el $\text{NaCN}_{(s)}$ y solo se depositó cobre, se incrementó el exceso de cianuro en forma importante hasta 90% y la solución de color verde pasto viro a un transparente claro amarillento, se dejó reposar esa solución y se realizan las pruebas con 2 amperes de intensidad, 40°C y agitación baja, se obtuvo un depósito de cobre color rosa salmón y posteriormente se depositó una película de latón color amarillo verdoso. Por lo que se trabajó con valores de 90 al 100% de exceso de cianuro de sodio ($\text{NaCN}_{(s)}$).

Se llevaron a cabo las pruebas con 90, 92, 94, 96, 98, 100 % de exceso de NaCN con los parámetros que se tenían de 5 amperes, 4.5 volt y 40°C con agitación moderada. Se depositó primero el cobre y después el latón pero este presento quemaduras por lo que se disminuyó a 3 amperes y 3.75 volts lográndose un mejor depósito en el cátodo, también se controló la temperatura y la óptima estuvo entre 35° y 40°C y se logró deposito sin quemaduras.

Después de corregidos y revisados todos los parámetros se decidió realizar pruebas únicamente en el intervalo de 90 a 100 % de exceso NaCN , 35 a 40°C de temperatura, agitación baja, 3 amperes y 3.75 volts. Obteniéndose una serie de depósitos representativos de los cuales solo el de 96 % de exceso de NaCN se llevó a difracción de rayos X.

4.1 Efecto del porcentaje de cianuro en el depósito de latón.

En la tabla XII se muestra el porcentaje de NaCN contra elementos de Cobre y Zinc después del depósito cuando se usa un exceso del 90 al 100%, se observa que en las placas de 96-1% y 96-2% de exceso de cianuro es donde se tiene un mejor depósito de latón. También en la figura 8 se presentan estos valores obtenidos en porcentaje.

Tabla XII. % de CN contra elementos (Cu, Zn) depositados.

MUESTRA % CN.	g Cu	g Zn	Suma de cobre mas Zinc obtenidos
90-1	2.0	0.002	2.002
90-2	1.9	0.001	1.9001
92-1	2.5	0.060	2.56
92-2	2.0	0.030	2.03
94-1	2.7	0.060	2.76
94-2	2.3	0.024	2.32
96-1	3.6	0.080	3.68
96-2	3.1	0.060	3.16
98-1	2.7	0.080	2.78
98-2	2.3	0.040	2.34
100-1	2.3	0.060	2.36
100-2	1.7	0.007	1.707

EFECTO DEL %CIANURO EN LOS DEPOSITOS

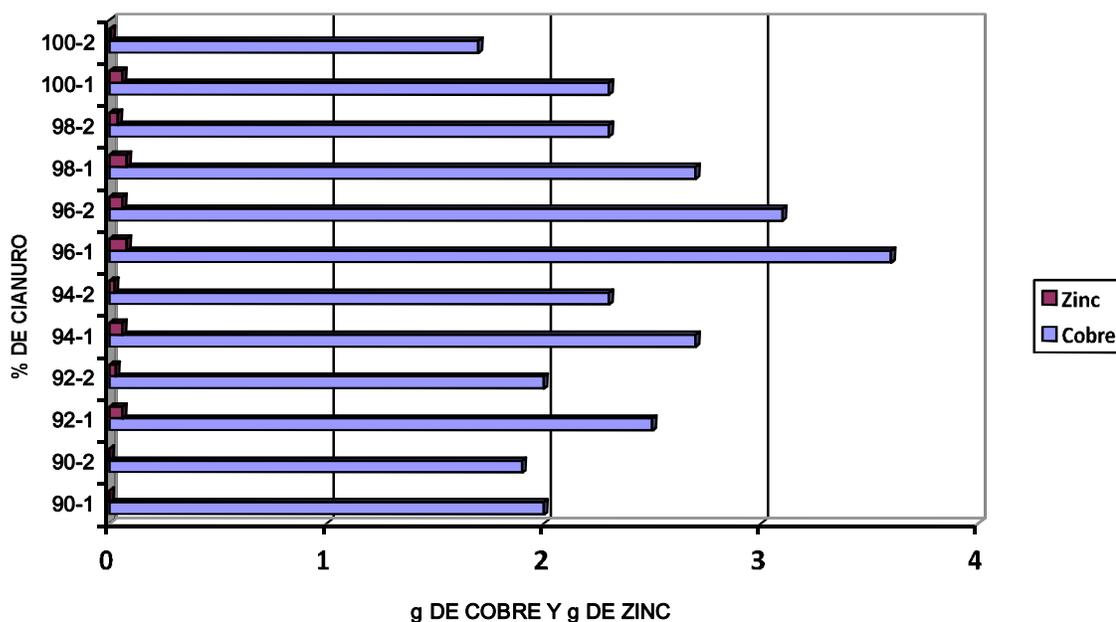


Figura 8. Efecto del porcentaje de cianuro contra elementos Cu – Zn en el depósito.

En la tabla XIII se hace una comparación entre el latón obtenido y los contenidos de los elementos de los polvos de Cu.

Tabla XIII Comparativo entre el latón obtenido y los contenidos de los elementos
De los polvos de Cobre.

MUESTRA % CN.	Suma de cobre mas Zinc obtenidos	Cobre (g/L)	Zinc (g/L)	Suma de elementos en solución.	
94-1	2.76	5.75	0.208	5.958	
94-2	2.32	5.95	0.212	6.162	
96-1	3.68	X = 5.85	X = 0.210	6.060	
96-2	3.16				
98-1	2.78				
98-2	2.34				

También la figura 9 muestra la comparación entre el contenido original y el obtenido.

Comparación entre contenido original y obtenido

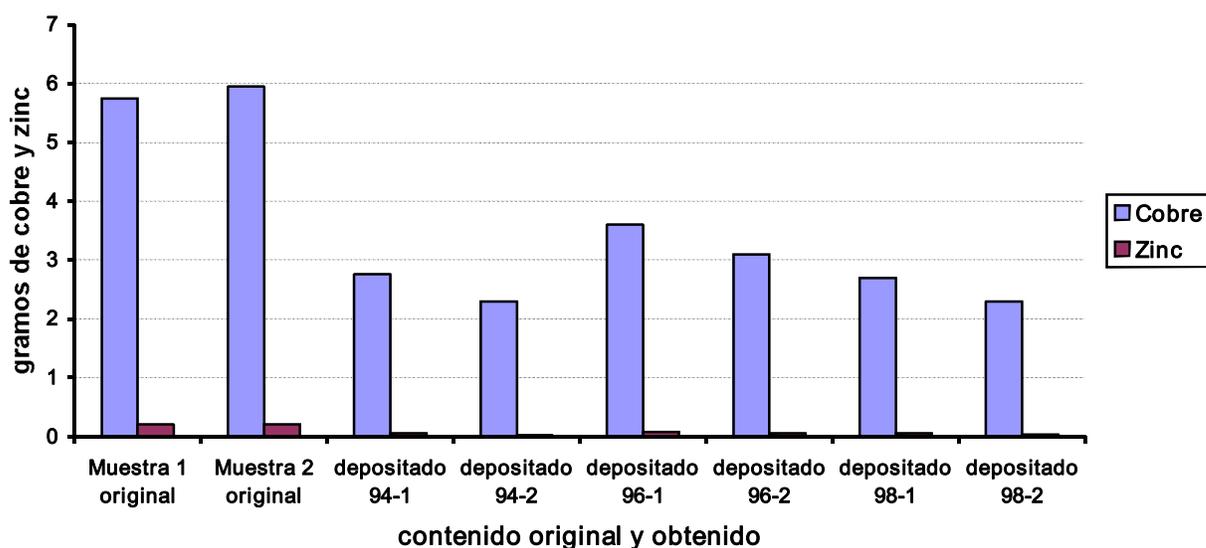


Figura 9. Comparación entre el contenido original y el obtenido.

Se puede observar en este comparativo como los picos principales del depósito de 96-1% y 96-2% de exceso de cianuro de sodio (NaCN) muestran claramente que en estos se tuvo el mejor depósito, comparado con las muestras iniciales.

4.2 Evidencia Fotográfica del depósito de latón obtenido.

En la figura 10 se muestra el depósito obtenido para un 96 -1 % de exceso de NaCN, la cual se tomó de la parte frontal de la placa con el depósito, el color amarillo es idéntico al del latón comercial con el cual se realizó la prueba comparativa de rayos X.

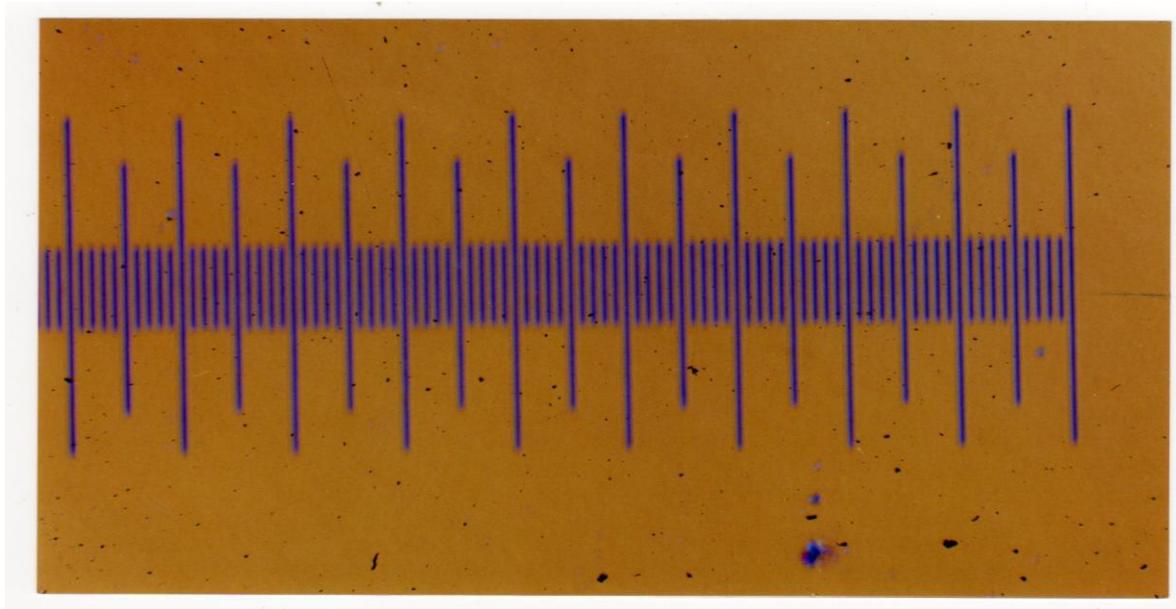


Figura 10. Depósito de latón obtenido con un 96-1% de exceso de NaCN.

En la figura 11 se observa el mismo depósito de 96-1 % de NaCN se observa como la delgada capa de latón se realza a través de los filtros contrastando en una línea azulosa entre la tonalidad negra de la baquelita y la base del acero inoxidable, esta capa es homogénea y constante a lo largo del depósito.



Figura 11. Depósito de latón obtenido con un 96-1% de exceso de NaCN.

En la figura 12 se muestra como resalta el depósito de latón obtenido para un 96% -2 de exceso de NaCN resalta entre la capa de la baquelita y la base de acero inoxidable.

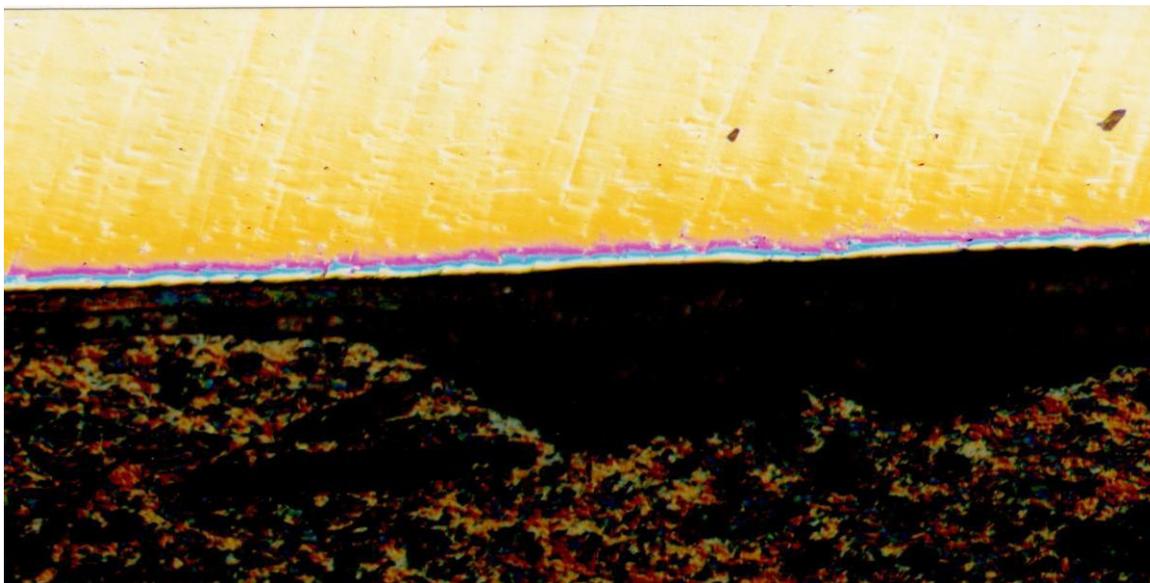


Figura 12. Depósito de latón obtenido con un 96-2% de exceso de cianuro de sodio

En la figura 13. Se observa también el depósito obtenido para un 98-1% de exceso de NaCN y este también resalta entre la capa de baquelita y la base de acero inoxidable.

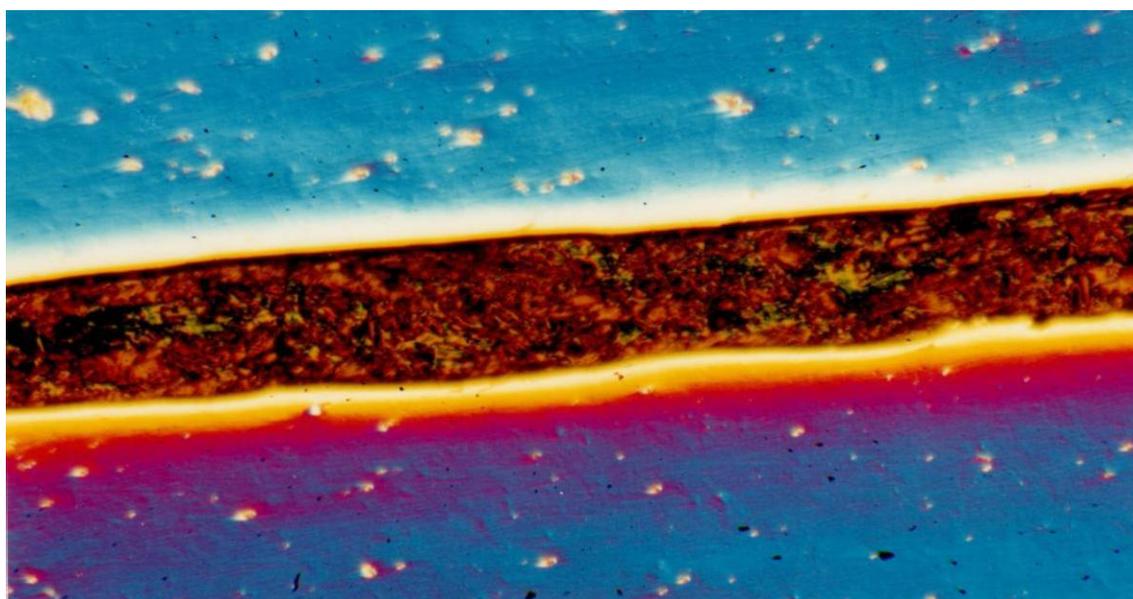


Figura 13. Depósito de latón obtenido con un 98-1% de exceso de cianuro.

4.3 Análisis de los Elementos por Difracción de rayos X.

De acuerdo al análisis por difracción de rayos X que se realizó a un latón comercial que se disolvió y se comparo contra el latón obtenido en los polvos, se observa que hay coincidencias en los picos principales, es decir el depósito obtenido se comporta como un latón.

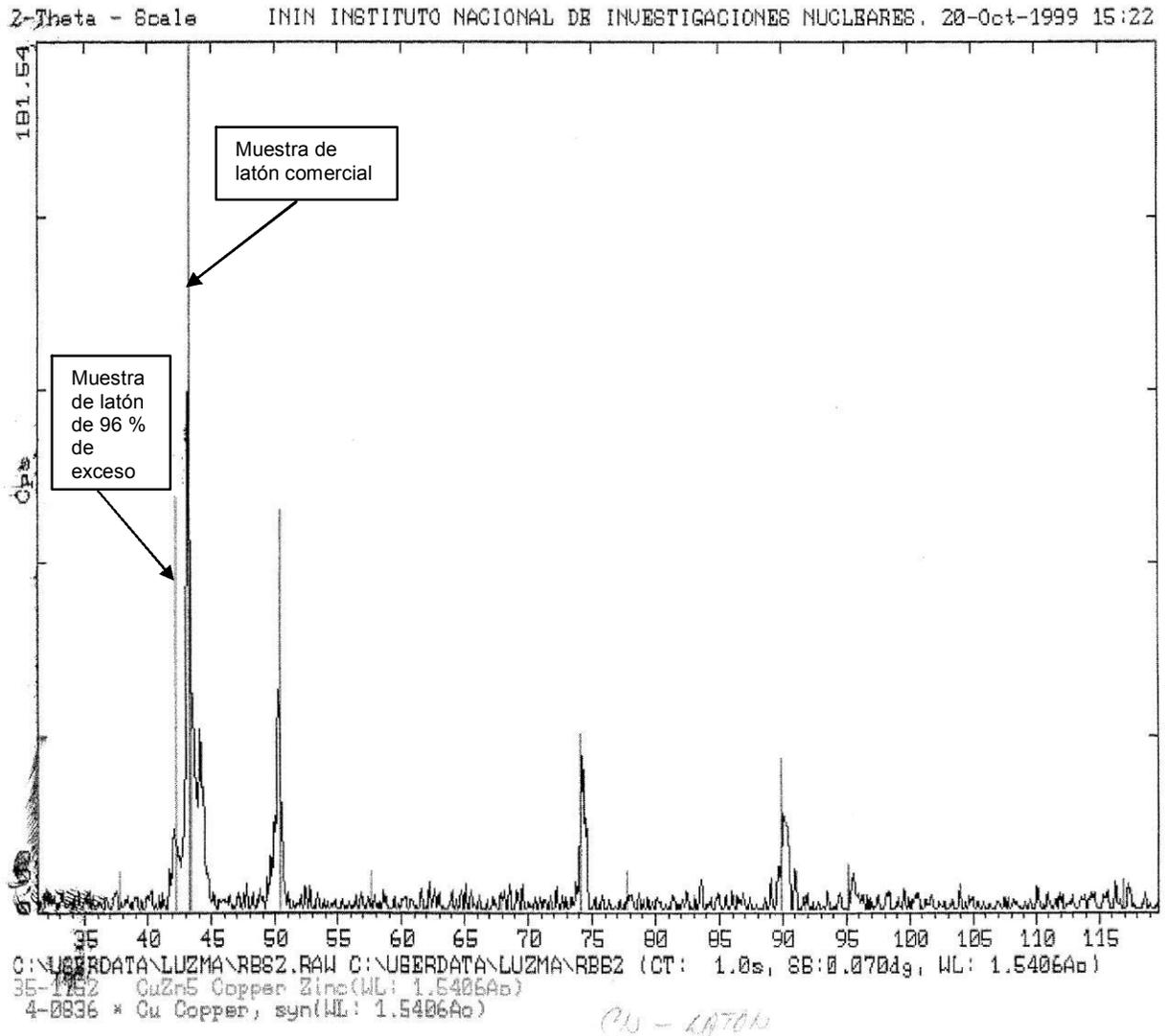


Figura 14. Difracto grama de rayos X del latón obtenido.

CONCLUSIONES

Al hacer el análisis de resultados se concluye lo siguiente:

Que el proceso hidro electrometalúrgico propuesto si se puede llevar a cabo ya que cumple con los siguientes puntos:

- 1.- Que si se cumplió el objetivo planteado en este trabajo. Puesto que si se obtuvo el depósito de latón. Dado que este cumple con las características físicas y químicas, cuya presencia del depósito se comprobó a través de difracción de rayos X y la observación de las fotografías obtenidas.
- 2.- Que las mejores electro depositaciones se obtuvieron con los excesos de 96% y 98% de cianuro de sodio ($\text{NaCN}_{(s)}$) en el licor rico, con los valores de 3.75 volts y 3 Amperes con un intervalo de temperatura de 35 a 40 ° C y agitación baja o moderada.
- 3.- El latón depositado se obtuvo de manera rápida y eficiente sin necesidad de agregar ningún tipo de proceso o aditivo complementario. Por lo cual lo hace un depósito económicamente atractivo.
- 4.- Con este tipo de procesos se apoya a la reducción de la contaminación del medio ambiente. Ya que estos polvos en solución se pueden tener en un circuito cerrado y con esto se reduciría el impacto ambiental
- 5.- Este tipo de latón se puede usar para productos de ornato o recubrimientos industriales que no requieren un recubrimiento muy denso en su superficie.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **PEDRO JOSEPH – NATHAN** “ANÁLISIS ELECTROQUÍMICOS”
Editorial ANUIES 1975
1ª. Edición Pp. (14 – 21)

- 2.- **JOHN H. PERRY.** “MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO” TOMO II
Editorial. Mac. Graw Hill Book Company
5a. Edición Pp. (1704 – 1719)

- 3.- **SYDNEY H. AUNER** “INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA “
Editorial. Mac. Graw Hill Book Company
2a. Edición 1992 Pp. (457 - 468)

- 4.- **FEDERICO A. LOWENHEIN** “MODERN ELECTROPLATIN “
Editorial Mac. Graw Hill, NUEVA YORK, 1978
(487 - 505)

- 5.- **GARRY W. WARREN** “DETOXIFICATION AND EXTRACTION OF METAL
VALUES FROM BRASS FOUNDRY WASTE MOLDING SAND “
EPD CONGRESS 1991,
THE MINERALS, METALS AND MATERIAL SOCIETY Pp. (85 – 100)

- 6.- **JEAN GOLDSCHMIDT** “HIDROMETALURGICAL RECOVERY OF NON-
FERROUS METALS FROM SECONDARY SOURCES”
THIRD INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON RECYCLING OF METALS 1995
(5 – 12)

- 7.- **ABNER BRENNER** “ELECTRODEPOSITION OF ALLOYS “
VOL I 1963 ACADEMIC PRESS
Pp. (230 – 258)

- 8.- **C. L. MANTE II** “INGENIERIA ELECTROQUIMICA “
ED. REVERTEE S. A 1962
Pp. (195 – 205)

- 9.- **C. K. GUPTA, T. K. MUKHERSEE** “HIDROMETALLURGY IN EXTRACTION
PROCESS “ VOL I Y II
CRC PRESS 1990
Vol. I Pp. (11) y Vol. II Pp. (57 – 62)

- 10.- **C. A. ROSS** ELECTRODEPOSITED MULTILAYER THIN FILMS “
ANNU. REV. MATER SCI 1994
Pp. (159 – 189)
- 11.- **B. A. MILLS, bsc. PhD,** “TECNOLOGIA DE PROCESAMIENTO DE
MINERALES “
CENG. MIMM 1987.
Editorial Limusa S. A. de C. V.
1ª. Edición. Pp. (66 – 91) (277 – 320)
- 12.- **MULAR, BHAPPU** “MINERAL PROCESSING PLANT DESIG”
2a EDITION
SOCIETY OF MINING ENGINEERS
AIME
- 13.- **Alejandro Adrián Spínola Cárdenas** TRABAJO DE TESIS “ESTUDIO
CINETICO DE LA LIXIVIACIÓN DE POLVOS DE FUNDICIÓN DE COBRE”
TRABAJO ASESORADO POR EL M.C JESÚS SALVADOR MEZA ESPINOZA