

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

---



PROYECTO DE UN LABORATORIO PARA ELECTRO-  
RREFINADO Y ELECTROBENEFICIO DE METALES

**TESIS PROFESIONAL**

Que para obtener el Título de  
Ingeniero Químico Metalúrgico

P r e s e n t a

PEDRO MARTINEZ BECERRA

1 9 7 7



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.

Tesis 1977  
M- [REDACTED]  
ECHA \_\_\_\_\_  
PROG. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

258



QUÍMICA

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE  
SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE, PROF IQ. MANUEL FELIPE GUERRERO FERNANDEZ.

VOCAL, " IQ. ALBERTO OBREGON PEREZ.

SECRETARIO, " IQM. HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA.

1º SUPLENTE, " IQM. HUMBERTO MALAGON ROMERO.

2º SUPLENTE, " IQM. MARCO ANTONIO CHAMORRO DIAZ.

Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Química.

Nombre completo y firma del sustentante: PEDRO MARTINEZ BECERRA.

Nombre completo y firma del asesor del tema: MANUEL F GUERRERO F.

A mis padres

A Yola

# INDICE GENERAL

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

I

## CAPITULO 2

### PARAMETROS USADOS EN ELECTROREFINADO

#### Y ELECTROBENEFICIO DE METALES

9

2.1.	Unidades eléctricas.	9
2.2.	Conductores eléctricos.	15
2.2.1.	Conductores de primera clase o electrónicos.	15
2.2.2.	Conductores de segunda clase o electrolíticos.	15
2.3.	Productos de la electrólisis.	17
2.4.	Leyes de la electrólisis.	19
2.5.	Densidad de corriente.	22
2.6.	Eficiencia de corriente.	23
2.7.	Arreglo de resistencias.	24
2.7.1.	Arreglo de resistencias en serie.	25
2.7.2.	Arreglo de resistencias en paralelo.	26
2.8.	Resistencia total de un conductor.	27
2.9.	Origen del potencial en la interfase metal-solución.	28
2.10.	Polarización.	33

## CAPITULO 3

### DISEÑO DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL

#### DE METALURGIA EXTRACTIVA V

36

3.1.	Intensidad de corriente recomendable.	36
3.2.	Caída de potencial recomendable.	37
3.3.	Dimensiones de las caras electródicas.	39
3.3.1.	Número de electrodos por cuba.	40
3.3.2.	Distribución de la intensidad de corriente.	40
3.3.3.	Áreas para altas y bajas densidades de corriente.	43
3.4.	Dimensiones electródicas óptimas de trabajo.	44
3.4.1.	Diafragmas.	45
3.5.	Diseño de la cuba electrolítica.	46
3.5.1.	Dimensiones interiores.	47
3.5.2.	Alimentación y descarga.	48
3.6.	Diseño de la casa electrolítica.	48
3.6.1.	Líneas colectoras y distribuidoras de electrolito.	51
3.7.	Cálculo de la barra conductora principal.	53
3.8.	Suspensión de los electrodos.	55
3.9.	Características del rectificador.	56
3.10.	Sistema de calentamiento.	58
3.11.	Constitución del electrolito.	59

CAPITULO 4

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

61

4.I. Costos de inversión

61

4.I.I. Costos de equipo.

62

4.I.2. Costos de materia prima.

66

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

70

BIBLIOGRAFIA

74

FIGURAS Y TABLAS

75

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

*Junto al  
como*  
El electrorrefinado y electrobeneficio de metales son procesos de naturaleza electrolítica, en que se divide, --- para su estudio, la Electroquímica que a su vez, se define como la parte de la Fisicoquímica que estudia las relaciones existentes entre la transformación de la energía química en energía eléctrica y viceversa.

El inicio del estudio de la Electroquímica debe su nacimiento a los descubrimientos de Volta que culminaron con la invención de su pila voltaica hacia el final del siglo - XVII. Este descubrimiento fue empleado inmediatamente por - Sir Humpre Davy para estudiar el efecto químico producido - por la corriente eléctrica, habiendo logrado la obtención - del sodio y potasio derivados de sus respectivos hidróxidos en estado fundido, en tal forma que sus trabajos, pioneros en esta disciplina, pavimentaron el camino para llegar al - desarrollo de la Electroquímica moderna que actualmente tie ne una enorme importancia en el mundo en que vivimos. Sin -

embargo, el servicio más importante de Davy a esta ciencia fue el haber encontrado y entrenado a su colaborador ----- Michael Faraday, a quien la Electroquímica debe más que a nadie.

Se puede establecer que el nacimiento del electrorrefinado fue en el año de 1865, cuando James Elkinton en Inglaterra publicó las primeras patentes sobre el electrorrefinado del cobre. Mientras que para el electrobeneficio fue en el año de 1912 cuando la Chile Exploration Co, obtuvo cobre a partir de minerales pobres que no eran económicamente factibles por los procesos pirometalúrgicos convencionales.

No es sorpresa, pues, que sea necesario para el estudio de estos procesos, el apoyarse en los principios y leyes necesarias para comprender la Electroquímica.

Puesto que hasta el momento los procesos electrometalúrgicos en la Facultad de química se han tratado exclusivamente en forma teórica la presente tesis "Proyecto de un laboratorio para electrorrefinado y electrobeneficio de metales" es un intento para hacer notar los aspectos por los que éstos deben de enseñarse en la forma teórico-práctica.

Una enseñanza teórica puede ser muy brillante, pero nunca adecuada para la formación de buenos profesionales sino dañinos para la sociedad en la que trabajan y perjudiciales para llevar a la práctica, por sí mismos, lo que han aprendido en forma teórica, su desempeño profesional de----

semboca en actividades poco técnicas y científicas de ahí a pasar insensiblemente a ponerse al servicio de las técnicas y experiencias extranjeras.

Mientras no se tenga una conciencia clara, por parte de todos, de que la electrometalurgia se aprende manejando experimentalmente las variables involucradas y no sólo en el papel, será muy difícil progresar en serio sobre este campo. Evidentemente, no se puede pretender aprender sin comenzar con la exposición teórica de los fundamentos, pero el error grave consiste en creer que profundizando en los principios teóricos se puede llegar a dominar toda esta materia ya que la enseñanza exclusivamente teórica trata de demostrar una verdad, perdiendo a veces la idea final por entusiasmarse con la lógica del medio, al contrario, la experimental debe tender a que el estudiante descubra la manera de encontrar por sí mismo qué es lo que ocurre, apoyado en los principios teóricos, con los tipos más representativos de técnicas y métodos. Esa mezcla de teoría y práctica debe ser equitativa en cuanto a la capacidad material para asimilar los conocimientos.

Ya que la experimentación es mucho más costosa que la teoría, este es un tema en que se habrá de insistir, pues quizá sea la causa más importante de que se desista para una enseñanza cabal por lo que no se cree estar muy lejos de lo cierto al afirmar que, de todas las enseñanzas supe--

riores la química es la más costosa, cuando menos en mantenimiento y a causa de su índole experimental.

Por consiguiente, se necesita equilibrar la enseñanza electrometalúrgica con más horas de laboratorio y menos de teoría, no sólo si se trata de una especialidad, sino del total de una carrera de química, la razón de las horas de clases teóricas a las de prácticas debiera ser de una a tres o más.

La enseñanza bien hecha comprende la construcción de laboratorios, instalación de servicios, obtención de sustancias, adquisición y manejo de aparatos, a fin de que cada alumno, individualmente, vaya aprendiendo los ejercicios prácticos, más siempre en tal forma que implique un conjunto de experimentos representativos de principios, métodos y técnicas, permitiendo que el estudiante realice, con sus propias manos, algo que ha planteado o previsto después de estudios teóricos y de razonamientos lógicos. Debe fomentar la capacidad de distinguir entre observar un fenómeno o una reacción y el poder interpretarlo. La correcta observación le dará el dominio real sobre la materia, la confianza necesaria para hacer la electrometalurgia en cualquier nivel, o sea, que le dará la aptitud profesional. La capacidad de interpretación le proporcionará además la preparación científico-técnica necesaria para ser un investigador o uno de los escasos profesionales capaces de crear y desarrollar --

nuevas tecnologías. Permitiendo además seleccionar trabajos de laboratorio a base de materias primas y de productos nacionales. Si el dominio de la electrometalurgia, que tiene como remate el conocimiento experimental, se llega a complementar con un dominio específico de los recursos naturales del país, dominio preferentemente experimental, se logrará la más eficaz formación de profesionales para el desarrollo nacional; ya que "la universidad debe ser útil a la sociedad que la sostiene".

Es de todos conocido que la corriente eléctrica se reconoce porque produce tres efectos distintos, a saber:

- Efecto térmico.
- Efecto magnético.
- Efecto químico.

Caracterizados por las siguientes observaciones respectivamente:

Efecto térmico: Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor, éste se calienta. Su aplicación se tiene en la fabricación de planchas y parrillas eléctricas.

Efecto magnético: Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor provoca la formación de un campo magnético diferente al campo magnético terrestre. La utilización de este fenómeno se traduce en la fabricación de instrumentos para medir la corriente eléctrica como son los --

amperímetros y voltímetros, así como construcción de electroimanes.

Efecto químico: Si un conductor eléctrico que conduce corriente directa se corta y los extremos se introducen en una solución conductora de la corriente eléctrica, se nota que hay cambios químicos en las terminales del conductor en contacto con la solución. Al conjunto de cambios químicos se le denomina "electrólisis".

El estudio de este efecto químico de la corriente eléctrica es lo que constituye el estudio de la Electroquímica y por consiguiente de los procesos de naturaleza electrolítica, que son considerados como parte de la Electroquímica que estudia los parámetros y técnicas necesarias para obtener depósitos metálicos por medio de la corriente eléctrica directa sobre piezas metálicas a partir de piezas metálicas o de soluciones.

La característica antes mencionada, es decir, que el electrodeposito sea a partir de una pieza metálica o de una solución, subdivide el estudio de los procesos de naturaleza electrolítica en: electrorrefinado y electrobeneficio, respectivamente.

Una celda o cuba electrolítica en la cual se lleva a cabo estos procesos, se puede definir como la concepción física de un sistema de oxidoreducción. Esto significa que es el acoplamiento de dos sistemas metal-ion metálico, deno

minados electrodos, o medias celdas, en los que, en uno, hay oxidación al cual se le llama ánodo en tanto que en el otro llamado cátodo, hay reducción.

El electrorrefinado utiliza el procedimiento de ánodo soluble, es decir, el metal a purificar constituye el ánodo, el electrólito es una solución acuosa de una sal de este metal, el metal puro va a depositarse sobre el cátodo, mientras que el ánodo se disuelve poco a poco. Para preparar un metal por electrobeneficio, se escoge un ánodo de tipo insoluble en el proceso, es decir, cuya materia no pueda pasar a la forma soluble en el electrólito, por lo que el metal a obtener se introduce a éste en forma de una sal en solución acuosa y se le recupera en el cátodo.

En general, el electrorrefinado se utiliza cuando se han tratado minerales por vía seca o pirometalúrgica, que presentan dificultad para solubilizarlos con disolventes, por el contrario, cuando los minerales son fácilmente solubles por alguna solución ácida o alcalina, son tratados por vía húmeda o hidrometalúrgica, proceso que también se denomina electrobeneficio.

Por todo lo antes dicho, en este trabajo se propondrá el diseño de un laboratorio para metalurgia extractiva V, materia incluida en el plan de estudios para la carrera de ingeniero químico metalúrgico, que además de equilibrar la enseñanza teórica puede ser utilizable no sólo para un pro-

ceso específico sino para todos los posibles tomando en --- cuenta ciertas características que lo hagan realizable y -- que serán tratadas conforme se avance. Aun más en el desarrollo del tema, este podrá ayudar en la enseñanza de otras materias, diferentes a la metalurgia extractiva V como, por ejemplo, el electrólito se podría obtener por medio de los minerales beneficiados en el laboratorio de preparación de minerales y el control de la concentración podría estar a -- cargo del laboratorio de análisis cuantitativo. Por otro la do, la obtención de electrodos podría provenir del laborato rio de ingeniería de fundición donde se funde y moldea. Con todo esto se haría una concentración de esfuerzos y una --- enorme economía puesto que se tratarían los procesos meta-- lúrgicos involucrados en forma coherente y continuada, pre-- parando al ingeniero químico metalúrgico para su desarrollo profesional.

CAPITULO 2  
PARAMETROS USADOS EN ELECTORREFINADO  
Y ELECTROBENEFICIO DE METALES

2.1. UNIDADES ELECTRICAS.

Antiguamente se empleaban dos sistemas diferentes basados en las unidades absolutas cgs para medir las cantidades eléctricas. Ambos sistemas de unidades eran derivados de las unidades fundamentales de longitud, masa y tiempo. Estos sistemas eran; el sistema electrostático basado en los efectos de atracción y repulsión electrostáticas y el sistema electromagnético que a su vez era derivado de los efectos de repulsión entre dos polos magnéticos iguales. La relación de una unidad electromagnética a la correspondiente unidad electrostática es un múltiplo o submúltiplo exacto de una constante "c", cuyo valor es  $3.0 \times 10^{10}$ . Puede mencionarse que, dentro de los límites del error experimental, este valor es idéntico con la velocidad de la luz, lo cual era de esperarse, ya que en el siglo pasado el investigador Maxwell demostró que la velocidad de propagación de -

las ondas electromagnéticas es exactamente igual a la velocidad de la luz.

Como ambas unidades de los sistemas cgs, es decir, --- electromagnéticas y electrostáticas son, en la mayoría de -- las veces inconvenientemente grandes o pequeñas para la --- expresión de las cantidades eléctricas utilizadas en el tra-- bajo ordinario; fue necesario crear un sistema de unidades prácticas que es el que casi siempre se emplea en la cien-- cia eléctrica, en la Electroquímica y en la ingeniería eléc-- trica. En este sistema de unidades todas las cantidades --- eléctricas son múltiplos o submúltiplos exactos de la ----- correspondiente unidad electromagnética. Para facilitar la expresión de las cantidades eléctricas en términos de estas unidades, un número grande de gobiernos y en diferentes --- congresos de ingenieros electricistas han adoptado equiva-- lentes de ciertas unidades que son fácilmente realizables -- experimentalmente. Estos equivalentes experimentales han -- sido denominados unidades internacionales para el propósito de distinguirlas de las unidades prácticas verdaderas.

La unidad práctica de intensidad de corriente eléctrica, se llama ampere, en honor al físico y químico francés -- A.M. Ampere. Un ampere es un décimo de la unidad electro-- magnética de intensidad de corriente y se le denomina ab--- ampere, definiéndose como la intensidad de una corriente -- que cuando fluye a través de un alambre en la forma de un -

arco de un centímetro de longitud y un centímetro de radio, ejerce una fuerza de una dina sobre la unidad de polo magnético colocado en el centro. El ampere internacional se define como la intensidad de una corriente que deposita 1.1180 mg de plata ó 0.3294 mg de cobre de soluciones apropiadas de sales de estos metales en un segundo. La intensidad de corriente puede ser medida por medio de instrumentos denominados amperímetros.

La unidad práctica de resistencia eléctrica se llama ohm, después de que el físico alemán G. S. Ohm descubrió la relación entre I, E y R que lleva su nombre. Un ohm es igual a  $10^9$  unidades electromagnéticas de resistencia y se le denomina abohm definiéndose como la resistencia de un alambre o conductor, cuando la unidad de diferencia de potencial entre sus extremos produce una intensidad de corriente de una unidad electromagnética. El ohm internacional es igual a la resistencia de 14.4521 g de mercurio en la forma de una columna de sección uniforme y 106.3 cm de longitud a la temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$ ,

La unidad práctica de fuerza electromotriz y de diferencia de potencial se llama volt, en reconocimiento a los trabajos del físico italiano, conde A. Volta. Un volt es igual a  $10^8$  unidades electromagnéticas de fuerza electromotriz y se le denomina abvolt, definiéndose como la diferencia de potencial que existe entre dos puntos cuando se nece

sita gastar un erg de trabajo para traer la unidad de electricidad positiva de un punto a otro contra la fuerza eléctrica. El volt internacional es la fuerza electromotriz requerida para mantener una corriente de un ampere a través de un conductor que tiene la resistencia de un ohm. El voltímetro es el instrumento adecuado para medir la fuerza electromotriz y la diferencia de potencial.

Justamente, como la cantidad de agua que pasa a través de una tubería se determina por la intensidad de corriente y el tiempo durante el cual el agua está fluyendo, la cantidad de electricidad ( $Q$ ) que fluye a través de un conductor depende de estos mismos factores. La unidad de cantidad de electricidad recibe el nombre de coulomb en honor al físico francés C. A. Coulomb. Un coulomb es la décima parte de la unidad electromagnética de cantidad de electricidad y se le denomina abcoulomb, y ésta a su vez es la cantidad de electricidad conducida a través de un conductor por la unidad electromagnética de intensidad de corriente en la unidad de tiempo. Esto es, si 4 amperes fluyen a través de un conductor durante medio segundo, o un ampere durante 2 segundos, la cantidad de electricidad que pasa a través del conductor es en cada caso:

$$Q \text{ (Cb)} = I \text{ (amp)} \times t \text{ (seg)} = 2 \text{ Cb}$$

La cantidad de electricidad se mide por medio de un --

instrumento llamado coulombímetro. Como un ampere internacional es aquella intensidad de corriente que deposita ---- I.1180 mg de plata de una solución de una sal de plata en un segundo, el número de coulombs de cantidad de electricidad que pasa a través de la solución puede ser obtenido dividiendo el peso, expresado en miligramos, de plata depositada entre I.1180. Si se coloca un coulombímetro de plata en serie en un circuito eléctrico, la cantidad de electricidad que pasa a través del circuito podrá calcularse en la forma que se indicó.

La energía puede ser definida como aquello que produce un cambio en las propiedades de los cuerpos, manifestándose asimismo en diferentes formas: energía cinética, energía -- térmica (calor), energía gravitacional, energía química, -- energía eléctrica, etc. La unidad de energía eléctrica es el volt-coulomb, que recibe el nombre de joule en honor al experimentador inglés J. B. Joule. Al igual que otras formas de energía, la energía eléctrica puede ser resuelta como el producto de un factor intensidad y un factor capacidad. Para la energía eléctrica, estos factores son respectivamente, la fuerza electromotriz y la cantidad de electricidad:

$$\begin{aligned} \text{Energía eléctrica} &= \text{Fem} \times \text{cantidad de electricidad.} \\ &= \text{volts} \times \text{coulombs} \\ &= \text{joules.} \end{aligned}$$

Consecuentemente cuando una intensidad de corriente de 2 amp se mantiene por una fuerza electromotriz de 0.5 volts o una intensidad de corriente de 1 amp se mantiene por una fuerza electromotriz de 1 volt, la cantidad de energía eléctrica consumida es de 1 joule por segundo.

Como la potencia representa la cantidad de energía consumida por segundo, se sigue que la unidad de potencia eléctrica es aquella potencia que consume un joule de energía eléctrica por segundo. A esta unidad se le da el nombre de watt en honor al investigador James Watt.

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule} \times \text{segundo}$$

$$746 \text{ watt} = 1 \text{ horsepower (hp)}$$

$$\text{potencia eléctrica} = \frac{\text{joule}}{\text{segundo}} = \frac{\text{volt-coulomb}}{\text{segundo}} = \text{volt-amperes}$$

entonces

$$1 \text{ watt-seg} = 1 \text{ joule}$$

como el watt-segundo o joule es muy pequeño, se usan unidades más grandes tales como:

- watt-hora = 3 600 joules
- kilowatt-hora (kw-hr) = 3 600 000 joules
- kilowatt-año (kw-a) =  $31.536 \times 10^6$  joules.

La tabla N° I resume lo antes dicho para las unidades eléctricas y éstas quedan relacionadas entre sí por las siguientes ecuaciones:

$$R \text{ (ohm)} \quad i \text{ (amp)} = E \text{ (volt)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$i \text{ (amp)} = \frac{Q \text{ (Cb)}}{t \text{ (seg)}} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$P \text{ (joule)} = Q \text{ (Cb)} \quad E \text{ (volt)} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$W \text{ (watts)} = i \text{ (amp)} \quad E \text{ (volt)} \dots\dots\dots (2.4)$$

## 2.2. CONDUCTORES ELECTRICOS.

Los conductores eléctricos serán empleados en las instalaciones para los procesos de electrorrefinado y electrobeneficio por lo cual es necesario conocer algunas de sus propiedades y clasificación de los mismos. Los conductores eléctricos se dividen en dos tipos fundamentales; conductores de primera clase o electrónicos y conductores de segunda clase o electrolíticos.

### 2.2.1. CONDUCTORES DE PRIMERA CLASE O ELECTRONICOS.

A estos pertenecen todos los metales, aleaciones y el carbón grafitizado. Estos conductores tienen la característica principal de que la conducción de la corriente eléctrica se realiza por transporte de electrones y además de que su resistencia al paso de la corriente eléctrica es una función creciente de la temperatura. Todos los conductores de primera clase también conocidos como metálicos o electrónicos a medida que se van calentando presentan una mayor resistencia eléctrica.

### 2.2.2. CONDUCTORES DE SEGUNDA CLASE O ELECTROLITICOS.

En éstos su característica principal es que la conducción de la corriente eléctrica se efectúa mediante transporte de materia y este transporte de materia corresponde a -- una migración de iones tanto positivos como negativos. A -- este tipo de conductores pertenecen todas las soluciones -- que contienen iones y también sales en el estado fundido. - En contraposición a los conductores electrónicos o de prime ra clase, los conductores de segunda clase o electrolíticos disminuyen su resistencia al paso de la corriente eléctrica a medida que la temperatura se eleva. Esta es la razón por la cual muchas de las soluciones en los procesos de refinado y beneficio electrolíticos se operan a temperaturas más altas que la del medio.

El cambio de la resistencia eléctrica de los conductores con la temperatura se expresa con la siguiente ecuación

$$R_t = R_{t_0} \left[ 1 + (dR/dt)(t - t_0) \right] \dots\dots\dots (2,5)$$

En esta ecuación el coeficiente de variación de la resistencia con respecto a la temperatura  $dR/dt$ , es positivo para los metales y aleaciones y negativo para el carbón --- amorfo, el grafito y los conductores de segunda clase.

El paso de la corriente eléctrica a través de un conductor electrolítico recibe el nombre de electrólisis, mientras que la solución que contiene la sal disuelta o la sal

fundida recibe el nombre de electrólito.

### 2.3. PRODUCTOS DE LA ELECTROLISIS.

Cuando unas láminas de platino unidas a los dos polos de una pila seca se sumergen en una solución acuosa de cloruro de cobre, no solamente el cobre se deposita sobre la pieza de platino unida al polo negativo de la celda, sino que también se nota el desprendimiento de burbujas de cloro en la otra pieza de platino. Las piezas de platino sumergidas en la solución, reciben el nombre de ánodo, el unido al polo positivo, mientras que el unido al polo negativo de la misma se le denomina cátodo.

Durante el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor electrolítico, los iones presentes en el electrólito se mueven a través de la solución y se depositan o liberan en los electrodos, como en el ejemplo de la electrólisis del cloruro de cobre. Esto sin embargo no siempre es evidente, debido al hecho de que las sustancias liberadas o depositadas en los electrodos algunas veces reaccionan -- con el solvente de la solución. Los productos de estas ---- reacciones pueden observarse en los electrodos. Los productos de muchos electrólitos tales como sales de metales alcalinos u oxiácidos y además hidróxidos alcalinos son simplemente hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

Inicialmente se supuso que la formación de estos gases

era un proceso secundario debido a la interacción del metal o radical ácido con el agua. Ahora se sabe, sin embargo, -- que la electrólisis de tales soluciones consiste en una descomposición primaria del agua excepto bajo condiciones muy especiales. Durante la electrólisis de dichas soluciones se observan cambios de concentración cerca de los electrodos; la solución que rodea al cátodo se vuelve alcalina y la --- correspondiente al ánodo ácida.

La tabla N° 2 indica los productos de la electrólisis de un número de soluciones electrolíticas procesadas entre electrodos de platino.

A menudo los elementos liberados durante el paso de la corriente eléctrica reaccionan con el material de los electrodos, es decir, cuando una solución de cloruro de sodio - se electroliza con un ánodo de plata y un cátodo metálico - recubierto con cloruro de plata, se forma plata metálica en el cátodo y cloruro de plata en el ánodo. Algunas veces los cambios que toman lugar en los electrodos dejan de ser tan simples; por ejemplo, se ha podido observar que cuando se - electrolizan soluciones de yoduro de potasio y yoduro de so- dio en dióxido de azufre ocurren reacciones muy complejas - en el cátodo. Es probable que el metal alcalino, primero se separe en este electrodo y entonces reaccione con el solven- te para formar un hidrosulfito que subsecuentemente se des- compone en tiosulfato y pirosulfito.

#### 2.4. LEYES DE LA ELECTROLISIS.

Ya que el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor electrolítico siempre está asociado con un transporte de materia y su separación en los electrodos, es natural preguntar qué relación existe entre la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución y la cantidad de materia que se separa en los electrodos.

Los brillantes experimentos del célebre científico inglés Michael Faraday, condujeron al descubrimiento de esta relación que él expresó en dos leyes perfectamente conocidas desde 1833. Estas leyes se conocen como primera y segunda ley de Faraday y expresan la relación fundamental existente entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución y las cantidades de las sustancias que son depositadas o liberadas en los electrodos.

La primera ley de Faraday establece que: "Las cantidades de sustancias liberadas o depositadas en los electrodos son directamente proporcionales a las cantidades de electricidad pasadas en el proceso".

La segunda ley de Faraday indica que: "Si la misma cantidad de electricidad se pasa a través de diferentes soluciones, las cantidades liberadas o depositadas en los electrodos son directamente proporcionales a los equivalentes químicos de las sustancias en solución".

La primera ley de Faraday se puede explicar fácilmente de la siguiente manera: La cantidad de plata depositada en el cátodo con el paso de 10 coulombs de electricidad a través de una solución de plata es el doble de aquella cantidad depositada cuando se pasan 5 coulombs a través de la solución. La segunda ley de Faraday se puede interpretar como sigue: Si se pasa la misma cantidad de electricidad a través de soluciones de cloruro de cobre, bromuro férrico, yoduro de zinc y ácido clorhídrico entonces se liberaran o depositaran cantidades de cobre, cloro, fierro, bromo, zinc, yodo e hidrógeno que son proporcionales a sus equivalentes químicos.

El número de gramos de un elemento o grupo de elementos que se deposita mediante el paso de un coulomb de electricidad a través de un conductor electrolítico recibe el nombre de equivalente electroquímico del elemento o grupo. De acuerdo con las leyes de Faraday los equivalentes electroquímicos son entonces proporcionales a los equivalentes químicos.

Es de gran interés el calcular la cantidad de electricidad requerida para liberar un equivalente de un elemento o grupo de elementos. Ya ha sido señalado que un coulomb de electricidad libera 1.1180 mg de plata de una solución que contiene una sal de plata. Si ahora se divide el peso equivalente, equivalente químico o equivalente gramo de la pla-

ta entre el equivalente electroquímico de la misma plata, - se encontrara que  $107.88/0.001118 = 96\ 494$  coulombs. Esta - cantidad recibe el nombre de Faraday y se representa con la letra F. De acuerdo con la segunda ley de Faraday, el paso de un Faraday de electricidad a través de un conductor electrolítico deberá liberar un equivalente químico de cualquier substancia en cada electrodo. Si se pasa un Faraday a través de una solución conteniendo varios electrolitos, la suma de las cantidades de los diferentes productos liberados o depositados en cada electrodo deberá ser la unidad -- cuando se expresa en equivalentes. La segunda ley de Faraday es una de las pocas generalizaciones científicas exactas. Aparentemente ésta no tiene excepciones. La ley es --- independiente de la concentración del electrolito; es vá--- lida para todas las temperaturas y para todos los solventes, así como para electrolitos de sales fundidas.

Para fines prácticos el valor del Faraday se ha redondeado a 96 500 coulombs para depositar o liberar un equivalente químico de cualquier substancia. A pesar de lo anterior, al aplicar la Electroquímica a la industria como es - el caso del electrorrefinado y electrobeneficio es más conveniente expresar el valor del Faraday en otras unidades diferentes a la que se ha mencionado anteriormente. Las unidades a que se hace referencia, son: amperes-minutos y ampere hora de tal forma que los valores del Faraday expresados en

estas unidades tienen los siguientes valores :

$$\begin{aligned} I F &= 96\ 500\ Gb \\ &= 96\ 500\ \text{amp-seg} \\ &= 1.608\ \text{amp-seg} \\ &= 26.81\ \text{amp-hr.} \end{aligned}$$

### 2.5. DENSIDAD DE CORRIENTE.

Este parámetro es de gran importancia en los procesos electrolíticos, puesto que para cada uno de ellos, la densidad de corriente óptima resulta de la discriminación de muchos factores, tales como: costo del fluido, gasto de fabricación, valor del material obtenido, etc. Cuando se trata de materiales tan valiosos, como el oro por ejemplo, sometido a electrorrefinado, se emplean grandes densidades de --- corriente, aunque den menor rendimiento, para acelerar el - proceso y disminuir intereses que cargan la explotación.

La densidad de corriente, para este trabajo, será de - suma importancia en el diseño de equipo que se vera más adelante.

La densidad de corriente se expresa en unidades como - amperes y unidades de superficie como el pie<sup>2</sup>, el dm<sup>2</sup> o el cm<sup>2</sup>. Los términos densidad de corriente anódica y densidad de corriente catódica significan la intensidad de la ----- corriente por unidad de área de ánodo o de cátodo respectivamente.

De esta forma la densidad de corriente, ya sea catódica o anódica, se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Den corr} = \frac{i \text{ (amp)}}{S \text{ (dm}^2\text{)}} \dots\dots\dots (2.6)$$

En la literatura norteamericana, las densidades de corriente indicadas anteriormente, se expresan en amp/ft<sup>2</sup>. Y considerando que 1 pie es igual a 3.05 cm; 1 pie<sup>2</sup> será igual a 9.3 dm<sup>2</sup>, por lo que la transformación de densidades de corriente en estas unidades a amp/dm<sup>2</sup>, es muy fácil ya que bastará con dividir la densidad en amp/ft<sup>2</sup> entre 10 para tener aproximadamente la densidad de corriente en amp/dm<sup>2</sup>.

## 2.6. EFICIENCIA DE CORRIENTE.

La eficiencia de corriente es la relación que existe entre la cantidad teórica de electricidad requerida para una reacción particular con respecto a la cantidad de electricidad que se lleva a cabo en el proceso efectuado. Parece ser que la ley de Faraday, no se mantiene para muchos procesos electroquímicos que son llevados a cabo en forma comercial. Esto es, porque en adición a los cambios electroquímicos deseados, algunos otros cambios también pueden tomar lugar o bien algo del producto depositado o liberado --

puede ser perdido mecánicamente o convertido por medio de cambios químicos secundarios, y además hay también algunas corrientes errantes que se pueden registrar en el amperímetro, pero que no pasan a través del electrolito y de los electrodos. Si toda la corriente es contabilizada, entonces se podrá observar que las leyes de Faraday siempre se mantienen. La eficiencia de corriente puede ser calculada de acuerdo con la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia de corriente} &= C.E = \frac{\text{cant teórica de electricidad requerida}}{\text{cant real de electricidad consumida}} \\ &= \frac{\text{cant real de producto formado} \dots\dots\dots(2.7)}{\text{cant teórica}} \end{aligned}$$

## 2.7. ARREGLO DE RESISTENCIAS.

En el electrorrefinado y en el electrobeneficio se emplean los dos tipos de conductores que han sido descritos en los incisos anteriores, es decir, conductores de primera clase o metálicos o conductores de segunda clase o electrolíticos. Los conductores metálicos serán utilizados para efectuar las conexiones eléctricas con los electrodos que van a ir sumergidos en los conductores de segunda clase. Los conductores de primera clase servirán entonces para transportar la corriente eléctrica necesaria para llevar a cabo al proceso electrolítico o cambio químico en el conductor de segunda clase en donde realmente se tiene el aprovechamiento de este fenómeno para los procesos electrolíticos

de refinado y obtención.

Tanto los conductores de primera clase como los de segunda clase tienen como propiedad fundamental, una resistencia al paso de la corriente eléctrica. Es por esto, que será absolutamente indispensable conocer las propiedades de sus diferentes arreglos para conectar resistencias con objeto de poder aplicar dicho conocimiento en el montaje y operación del laboratorio electrolítico.

### 2.7.I. ARREGLO DE RESISTENCIAS EN SERIE.

En este arreglo de resistencias se tiene como propiedad fundamental, la intensidad total que pasa por el circuito que deberá ser igual a la intensidad que pasa por cada una de las resistencias. En el caso de la diferencia de potencial, la caída de potencial total del circuito deberá ser igual a la suma de las caídas de potencial ocurridas en cada una de las resistencias del arreglo y finalmente, la resistencia total de un arreglo en serie deberá ser igual a la suma de las resistencias parciales que componen el circuito. Estas consideraciones se pueden expresar matemáticamente por las siguientes tres ecuaciones:

$$I_t = I_1 = I_2 = I_3 = \dots \quad (2.8)$$

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (2.9)$$

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (2.10)$$

### 2.7.2. ARREGLO DE RESISTENCIAS EN PARALELO.

Para un sistema donde las resistencias se conectan en paralelo se tiene que la propiedad fundamental, viene expresada por la circunstancia de que la intensidad total que -- pasa a través del circuito paralelo, deberá ser igual a la suma de las intensidades parciales que pasan a través de cada una de las resistencias conectadas. En el caso de la caída de potencial a través de un circuito conectado en paralelo se tiene que la caída de potencial total, deberá tener el mismo valor que para las caídas de potencial que se tienen en cada una de las resistencias conectadas en paralelo y finalmente el recíproco de la resistencia total del circuito en paralelo deberá ser igual a la suma de los recíprocos de las resistencias parciales que componen este arreglo en paralelo. Lo expresado en este inciso se puede representar matemáticamente por medio de las siguientes ecuaciones:

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (2.II)$$

$$E_t = E_1 = E_2 = E_3 = \dots \quad (2.I2)$$

$$\frac{I}{R_t} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2} + \frac{I}{R_3} + \dots \quad (2.I3)$$

Estas ecuaciones matemáticas son utilizadas para manejar resistencias eléctricas ya sea de conductores de primera o de segunda clase, tanto en circuitos sencillos de cada tipo, como en arreglos combinados de ellos.

## 2.8. RESISTENCIA TOTAL DE UN CONDUCTOR.

La resistencia total de un conductor de cualquier clase que se trate, es directamente proporcional a la longitud del conductor e inversamente proporcional a la sección del mismo. Para tener conocimiento del factor de proporcionalidad necesario y así poder calcular la resistencia total de un conductor es conveniente definir un nuevo parámetro y -- éste recibe el nombre de resistencia específica.

La resistencia específica es la resistencia de un centímetro cúbico de cualquier conductor, es decir, la resistencia específica es en realidad la resistencia que opone al paso de la corriente eléctrica un cubo de material que tiene un centímetro en cada una de sus tres dimensiones. La resistencia específica es una propiedad característica de cada uno de los conductores y tal como se indicó en el caso de la resistencia, esta resistencia específica será función de la temperatura, es decir, si se trata de un conductor de primera clase la resistencia específica aumentará al incrementarse la temperatura mientras que si se trata de un conductor de segunda clase esta resistencia específica disminuirá su valor a medida que se eleva la temperatura.

En los procesos de naturaleza electrolítica es más común que en lugar de trabajar con la resistencia específica se opere con el concepto de conductividad específica. Esta

significa el recíproco de la resistencia específica y por consiguiente sus unidades serán recíprocos de ella. Para comprender mejor lo expuesto en este inciso es conveniente indicar la ecuación de la resistencia total de un conductor (ec. 2.I4), en términos de su resistencia específica y de su longitud así como de la sección del conductor de que se trate.

$$R_t = \rho \frac{l}{S} \quad \dots\dots \quad (2.I4)$$

Las dimensiones de cada uno de los valores indicados en la ecuación son las siguientes:

- $R_t$  = Resistencia total (ohm).
- $\rho$  = Resistencia específica (ohm-cm).
- $l$  = Longitud del conductor (cm).
- $S$  = Sección transversal (cm<sup>2</sup>).

De esta ecuación se puede ver que: las unidades de la resistencia específica se miden en ohm-cm, por lo tanto las unidades de la conductividad específica deberán expresarse como: ohm<sup>-1</sup> - cm<sup>-1</sup>.

## \* 2.9. ORIGEN DEL POTENCIAL EN LA INTERFASE METAL-SOLUCION. \*

La comprensión del fenómeno electroquímico que va a ser empleado en los procesos de electrorrefinado y electrobeneficio, no quedaria completa, si antes no se expresan --

CURVA KINTIV  
SIG. GEN.

algunas ideas que sirven para explicar el origen del potencial eléctrico que se genera en la interfase metal-solución. Como ya se indicó anteriormente, en un proceso electrolítico se van a tener sumergidos dos tipos de electrodos: ánodos y cátodos, en los cuales se llevan a cabo diferentes tipos de cambios electroquímicos, a saber:

En el ánodo siempre se van a llevar a cabo reacciones electroquímicas de oxidación, es decir, el material de los ánodos casi siempre va a ser puesto en solución pasando el metal a la forma iónica, pasando a formar parte de la solución, de la cual, por medio de la reacción electroquímica catódica se obtendrá el depósito del metal en la pieza que sirve de cátodo. Las reacciones catódicas son reacciones electroquímicas de reducción, en donde los iones provenientes de la solución van a neutralizar su carga eléctrica y a depositarse como metales en la superficie de las piezas que sirven de cátodos. Cada metal electrodepositado en un proceso electrolítico se obtiene a partir de diferentes condiciones de operación que incluyen la constitución del electrolito, temperatura, densidad de corriente, clase de ánodos, voltaje de operación, alcalinidad o acidez de la solución, etc.

Para explicar el origen del potencial eléctrico generado en la interfase metal-solución, es conveniente mencionar a este respecto, por el investigador Nernst, que también

sirve para explicar por qué algunos metales son más difíciles de obtener en forma de depósito que otros. Cuando un metal se sumerge en agua o en un electrólito, existen las tendencias de los átomos del metal a transformarse en iones y los iones que se encuentran en solución a depositarse como elementos. A la tendencia del metal a pasar de la forma elemental a la forma iónica, Nernst le dió el nombre de presión de disolución mientras que a la tendencia de los iones que se encuentran en la solución a pasar a la forma elemental del metal, Nernst le dió el nombre de presión osmótica de depósito.

Ambas tendencias se encuentran presentes cuando un metal se introduce en una solución de sus propios iones. Si la presión de disolución es mayor que la presión osmótica de depósito, el metal pasa a la solución y se dice que el metal se corroe, disuelve u oxida. Si por el contrario, la presión de disolución es menor que la presión osmótica de depósito el metal tiende a permanecer en la forma metálica o elemental y en este caso se dice que el metal no se corroe o bien que es resistente a la corrosión. De acuerdo a lo anterior se puede ver fácilmente que aquellos metales tales como el zinc, cadmio, fierro, aluminio, magnesio, etc., son elementos fácilmente corroibles y por lo tanto tienen una presión de disolución mayor que su presión osmótica. Por el contrario los metales como plata, cobre, oro,

paladio, etc., son elementos en donde la presión de disolución es menor que la presión osmótica de depósito y por consiguiente se les da el nombre de metales nobles o no corroibles.

Dependiendo de cual de las dos tendencias que se han mencionado predomina sobre la otra se formará en la interfase metal-solución una doble capa eléctrica que tendrá los signos correspondientes a los esquemas de la figura N° I.

La doble capa eléctrica formada en la interfase metal-solución, da origen a la formación de un potencial eléctrico y éste depende de la concentración de la solución en la que está sumergida la barra metálica. Para poder establecer las comparaciones entre diferentes potenciales generados en la interfase metal-solución es conveniente escoger un estado tipo que permita hacer las evaluaciones correspondientes. Así por ejemplo si se sumergen las barras de los metales en solución a 25°C, que contengan una concentración unitaria, se generará un potencial al que se le da el nombre de potencial tipo, designado por  $E^0$ . Estos potenciales tipo son los que se presentan en la tabla N° 3, y reciben el nombre de potenciales tipo de electrodo a 25°C.

Al conjunto formado por el vaso, solución y barra metálica se le da el nombre de semielemento, media celda o media pila, de tal forma que un vaso conteniendo solución de sulfato de zinc y zinc metálico será un semielemento de ---

zinc mientras que otro vaso con solución de sulfato de cobre y cobre metálico constituye una media pila de cobre. La unión de dos medias celdas forman una pila o elemento voltáico, en la que se produce transformación de energía química en energía eléctrica, fluyendo los electrones del semielemento que tiene exceso de electrones -media pila de zinc- hacia el que tiene déficit de ellos -media pila de cobre-.

En la media pila que tiene exceso de electrones se producirá entonces una reacción de oxidación o anódica, mientras que en el semielemento con déficit de éstos se producirá una reacción de reducción o catódica y la diferencia ---algebraica de los potenciales tipo de los semielementos involucrados dará el voltaje indispensable para formar la pila o elemento voltáico cuya fuerza electromotriz se quiere medir. El equipo eléctrico que sirve para efectuar las mediciones de potencial recibe el nombre de potenciómetro.

El conocimiento de los potenciales tipo de electrodos es muy necesario para poder comprender, por qué algunos metales se pueden depositar a partir de soluciones conteniendo los iones necesarios y además un ácido, mientras que ---otros sólo son electrodepositados a partir de soluciones --alcalinas en donde hay baja concentración de iones hidrógeno que son los causantes de la acidez en las soluciones.

La misma tabla permite también explicar por qué, al --querer electrodepositar cobre sobre piezas de acero, no es

posible llevarlo a cabo a partir de soluciones ácidas de -- sulfato de cobre siendo necesario llevar a efecto el trabajo mediante el uso de soluciones alcalinas que contienen -- cianuros complejos de sodio o potasio y cobre. Esto se debe a que cualquier metal que se encuentra en la parte de arriba de la tabla de los potenciales tipo desaloja de sus soluciones al que se encuentra abajo, de tal forma que la introducción de una pieza de acero en una solución ácida de sulfato de cobre produce un depósito de cobre pulverulento que no requiere del uso de la corriente eléctrica para su depósito. En la misma forma una pieza de cobre, al ser introducida en una solución de iones plata produce la liberación de plata sin necesidad del paso de la corriente eléctrica.

El conocimiento del fenómeno de formación de una pila mediante la unión de dos semielementos es también importante, porque presenta el funcionamiento de un proceso espontáneo en que no interviene el hombre mientras que los procesos de electrorrefinado y electrobeneficio manifiestan el caso de un proceso no espontáneo en que para llevarlos a -- cabo requieren suministrar energía eléctrica desde el exterior.

## 2.10. POLARIZACION.

Durante el proceso de electrólisis en el refinado y en el beneficio de metales se llevan a cabo las reacciones ---

anódicas y catódicas que se han descrito, provocan un aumento en la concentración iónica en las zonas cercanas al ánodo y una disminución en la concentración iónica en las zonas cercanas al cátodo, ambas concentraciones comparadas con la concentración iónica del electrolito entre los electrodos. Es decir, el proceso electrolítico produce cambios de concentración que dan origen a la formación de pilas de concentración que generan un potencial con fuerza contraelectromotriz que se opone al potencial aplicado externamente, para que se lleve a cabo la electrólisis. A este potencial debido a la pila de concentración se le da el nombre de polarización y es por ello que en el refinado y beneficio electrolíticos se procura evitarla mediante una agitación constante del electrolito para uniformizar la concentración de éste, en todas las zonas de la celda, evitando los peligros que la polarización produce, tales como la obtención de depósitos pulverulentos o el incremento en el potencial requerido para el paso de una corriente eléctrica dada.

La agitación de las soluciones se lleva a cabo, tanto para el electrorrefinado como para el electrobeneficio, generalmente por circulación de las mismas, continuamente por medio de una bomba.

El fenómeno de la polarización, producto de los cambios de condiciones del electrolito en las proximidades

de los electrodos se vuelve más agudo mientras más rápido - se pretende hacer el depósito electrolítico, es decir, cuando se usan altas densidades de corriente en cuyo caso es -- indispensable tener en cuenta la necesidad de la agitación del electrólito para eliminar dicha polarización.

CAPITULO 3  
DISEÑO DEL LABORATORIO EXPERIMENTAL  
DE METALURGIA EXTRACTIVA V.

En la tabla N° 4 se muestran los datos operacionales -- utilizados en las industrias de electrorrefinado y electrobeneficio de metales respectivamente. Como se podrá ver más adelante, todos los cálculos se basan en esta tabla.

3.1. INTENSIDAD DE CORRIENTE RECOMENDABLE.

La cantidad electrodepositada de cualquier elemento -- químico se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$m \text{ gramos del electrodeposito} = \left( E_{\text{q quím}} \text{ g} \right) \left( \frac{\text{amp-hr aplicados}}{26.8 \text{ amp-hr}} \right) \quad (3.1)$$

Para conocer las diferentes cantidades electrodepositadas a diferentes intensidades de corriente para cada uno de los elementos químicos incluidos en la tabla N° 4, se realizarán tabulaciones de 0 a 100 amperes y construyendo con -- éstas una gráfica, se obtiene la figura N° 2, en la cual la abscisa son los amperes-hora aplicados y la ordenada son --

las cantidades electrodepositadas en gramos. Cada línea dentro de la figura representa a un elemento químico.

En esta gráfica se puede ver que con 100.0 amp-hr se pueden electrodepositar como máximo 402.38 g de plata y --- 64.665 g de cromo como mínimo al 100% de eficiencia catódica. Tales cantidades para un laboratorio son excesivas, por lo que se descarta esta intensidad de corriente.

A 45 amp-hr se pueden electrodepositar como máximo --- 181.07 g de plata y 29.09 g de cromo como mínimo, al 100% de eficiencia catódica. Evidentemente la cantidad máxima no puede ser tomada rigurosamente puesto que hay que ver que se trata del metal plata y su costo en estos momentos lo hacen no recomendable para un laboratorio como el que se quiere diseñar. Lo más lógico para obtener la intensidad de corriente óptima, es tomar de la figura N° 2 al grupo de metales más baratos como lo son el zinc, cobre, cobalto y níquel, por ejemplo y en la tabla N° 5 se dan las cantidades electrodepositadas teóricamente a varias intensidades de corriente.

Por lo anterior, la intensidad de corriente recomendable máxima es de 45 amperes que se ajusta a 50 amperes para fines de diseño.

### 3.2. CAIDA DE POTENCIAL RECOMENDABLE.

Recordando que la caída de potencial a través de un --

circuito conectado en paralelo se tiene que la caída de potencial total, deberá tener el mismo valor para las caídas de potencial que se tienen en cada una de las cubas electrolíticas conectadas en paralelo, es decir:

$$E_T = E_1 = E_2 = E_3 = \quad (2.12)$$

Por otro lado, la caída de potencial a través de un -- circuito conectado en serie se tiene que la caída de potencial total, deberá ser igual a la suma de las caídas de potencial ocurridas en cada una de las cubas electrolíticas, es decir:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + \quad (2.9)$$

Por lo expuesto anteriormente, el cálculo de la caída de potencial recomendable se hará para un número variable - de cubas de las que consistiera la casa electrolítica, ----- siempre y cuando esten conectadas en serie.

Nuevamente, tabulando para cada una de las caídas de - potencial indicadas en la tabla N<sup>o</sup> 4, con la siguiente ecuación:

$$E_T \frac{\text{volts}}{\text{casa}} = \left( \frac{\text{volts}}{\text{cuba}} \right) \left( \frac{N^o \text{ cubas}}{\text{casa}} \right) \quad (3.2)$$

Se obtiene el voltaje total de la planta para un ele-- mento químico en particular consistiendo de varias cubas --

electrolíticas.

La tabla N° 6 contiene dichas tabulaciones y en ella fácilmente se deduce que la caída de potencial recomendable es de 12 volts y para fines de diseño de 15 volts, para una casa electrolítica con 6 cubas como máximo, por una parte -- dicho número, como se verá al transcurso de la exposición, hace posible realizar arreglos versátiles en las celdas.

Sin embargo, hay algunos elementos, por ejemplo, el cobre con 0.26 volts por cuba que utilizaría 46 cubas para -- trabajar con 12 volts, o como la plata que emplearía 3 cubas y de 9 el oro, pero trabajar con estos dos últimos elementos requeriría un fuerte capital para adquirirlos, circunstancia que hace no pensar en ellos para diseñar el laboratorio.

La solución, a lo últimamente mencionado, es pedirle -- al fabricante del rectificador uno con regulación variable de voltaje, desde cero hasta 15 volts.

### 3.3. DIMENSIONES DE LAS CARAS ELECTRODICAS.

El cálculo de las caras anódicas y catódicas para cada uno de los metales incluidos en la tabla N° 4 está determinado por:

- Número de electrodos por cuba.
- Distribución de la intensidad de corriente.
- Areas para altas y bajas densidades de corriente.

### 3.3.1. NUMERO DE ELECTRODOS POR CUBA.

El número de ánodos por cuba está determinado por la relación de la longitud de la cuba electrolítica entre la separación de ánodos adyacentes centro a centro, es decir:

$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ ánodos}}{\text{cuba}} = \frac{\text{long} \frac{\text{cm}}{\text{cuba}}}{\text{long} \frac{\text{cm}}{\text{ánodo}}} = \frac{\text{long cm ánodo}}{\text{long cm cuba}} = \frac{\text{ánodos}}{\text{cuba}} \quad (3.3)$$

La longitud promedio de las separaciones anódicas indicadas en la tabla N<sup>o</sup> 4, es de 10.0 cm aproximadamente, sin tomar en cuenta la longitud para la plata y oro pues de antemano se fija un ánodo por cuba para cada uno.

Se piensa que una longitud de 30.0 cm para la cuba es la más recomendable.

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.3 resulta:

$$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ ánodos}}{\text{cuba}} = \frac{30 \frac{\text{cm}}{\text{cuba}}}{10 \frac{\text{cm}}{\text{ánodo}}} = \frac{30 \text{ cm ánodo}}{10 \text{ cm cuba}} = 3 \frac{\text{ánodos}}{\text{cuba}}$$

Teniendo este valor automáticamente se deduce la cantidad de cátodos por cuba; puesto que si n es el número de ánodos por cuba hay n + 1 ó n - 1 cátodos por cuba dependiendo del tipo de metal y proceso elegidos de la tabla N<sup>o</sup> 4, en la tabla N<sup>o</sup> 7 se presentan estas cantidades.

### 3.3.2. DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE.

La distribución de la corriente se hará con el sistema de conexión múltiple donde las celdas están conectadas en serie y los electrodos en paralelo y en el sistema de conexión en serie donde las celdas están conectadas en paralelo y los electrodos en serie, para el número de electrodos por cuba y el número de cubas por casa respectivamente a cada sistema de conexión indicados en la tabla N° 4.

Si las cubas están conectadas en serie, la intensidad de corriente que fluye en cada una de ellas está dada por la ecuación:

$$45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}} = I_T = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}} \dots (2.8)$$

esto indica que en el sistema en serie fluye igual intensidad de corriente en una cuba que en 10 cubas.

Como los electrodos están conectados en paralelo, las terminales conectoras de un mismo tipo de electrodo, ánodo o cátodo, estarán unidos a un conductor principal de corriente, positiva o negativa, respectivamente y recordando que un electrodo trabaja con dos caras exceptuando los colocados en los extremos de la celda que trabajan con una cara, la distribución de la intensidad de corriente está dada por la ecuación siguiente, suponiendo resistencias iguales:

$$45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}} = I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots \dots \dots (2.II)$$

lo que es lo mismo:

$$45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}} = I_T = i_{11} + i_{12} + i_{21} + i_{22} + i_{31} + i_{32} = 6i. \quad (3.4)$$

el primer índice indica el número del ánodo o cátodo de la cuba, el segundo indica la cara del ánodo o cátodo que trabaja, por ejemplo, para 3 ánodos y 4 cátodos por cuba.

Para obtener la intensidad de corriente que fluye por una cara anódica, se despeja a "i" de la ecuación 3.4:

$$i = \frac{45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}}}{6 \frac{\text{caras}}{\text{cuba}}} = \frac{45 \text{ cuba amp}}{6 \text{ cuba cara}} = 7.50 \frac{\text{amp}}{\text{cara anódica}}$$

y para los cátodos:

$$45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}} = I_T = i_{12} + i_{21} + i_{22} + i_{31} + i_{32} + i_{42} = 6i. \quad (3.5)$$

Para obtener la intensidad de corriente que fluye por una cara catódica, se despeja a "i" de la ecuación 3.5:

$$i = \frac{45 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}}}{6 \frac{\text{caras}}{\text{cuba}}} = \frac{45 \text{ cuba amp}}{6 \text{ cuba cara}} = 7.50 \frac{\text{amp}}{\text{cara catódica}}$$

Igual razonamiento se aplica para 3 ánodos y 2 cátodos por cuba resultando 11.25  $\frac{\text{amp}}{\text{cara}}$  y 22.50  $\frac{\text{amp}}{\text{cara}}$  para un ánodo y 2 cátodos por cuba, respectivamente, lo que en otras pala

bras indica que la densidad de corriente aumenta al disminuir el área electródica.

Por otro lado, si las cubas se encuentran colocadas en paralelo, la intensidad de corriente que fluye en cada una de ellas está dada por la ecuación:

$$45 \frac{\text{amp}}{\text{casa}} = I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 6i \quad (2.II)$$

despejando para  $6 \frac{\text{cubas}}{\text{casa}}$  resulta:

$$i = \frac{45 \frac{\text{amp}}{\text{casa}}}{6 \frac{\text{cubas}}{\text{casa}}} = \frac{45 \text{ casa amp}}{6 \text{ casa cuba}} = 7.50 \frac{\text{amp}}{\text{cuba}}$$

### 3.3.3. AREAS PARA ALTAS Y BAJAS DENSIDADES DE CORRIENTE.

Para poder calcular las dimensiones de las caras electródicas, lo primero a considerar son las densidades de corriente tanto anódica como catódica para cada uno de los elementos químicos indicados en la tabla N° 4, y lo segundo es la intensidad de corriente que fluye por la cara, la que está indicada en la tabla N° 7.

Puesto que la ecuación 2.6 indica:

$$dm^2 = \frac{i \frac{\text{amp}}{\text{cara}}}{\rho \frac{\text{amp}}{dm^2}} = \frac{i \text{ amp } dm^2}{\rho \text{ amp cara}} = \frac{i \text{ } dm^2}{\text{cara}} \dots \dots \dots (3.6)$$

Los resultados para altas y bajas densidades de ----- corriente no se creyo necesario incluirlas en el trabajo, - puesto que requieren de una tabla extensa.

#### 3.4. DIMENSIONES ELECTRODICAS OPTIMAS DE TRABAJO.

Las áreas electródicas obtenidas usando la menor densidad de corriente de cada uno de los elementos químicos incluidos en la tabla N° 4, son por un lado demasiado grandes y por otro desiguales, es por ello que se obtuvo una área - promedio de  $6.47 \text{ dm}^2$  la cual es aproximadamente el área de una hoja de papel tamaño carta, puesto que también es grande para este laboratorio, se dividió a la mitad para así obtener una área de  $3.23 \text{ dm}^2$  pero para fines de diseño se tomará un valor de  $3.0 \text{ dm}^2$ .

Se piensa que dicha área es la recomendable ya que recordando que la longitud de la cuba electrolítica es de 30 cm, se tendría un volumen aproximado de 9 litro por cuba.

Puesto que no es conveniente tener una gran variedad - de áreas, se intento obtener una área única para los elementos que utilicen igual tipo de electrodo, puesto que con -- ello se simplificara la operación de las celdas y se reducirá el costo.

En la tabla N° 7 se presentan los resultados obtenidos de la ecuación 2.6 para las áreas óptimas de los electrodos, así como la intensidad de corriente por cuba.

Puesto que esta última tabla presenta una variedad de intensidades de corrientes, la solución al problema es ---- pedirle nuevamente al fabricante del rectificador un equipo de regulación continua de intensidad desde cero a 50 amperes.

### 3.4.I. DIAFRAGMAS.

El diafragma no es más que una frontera que impide la adherencia en el cátodo de las impurezas que suelta el ---- ánodo durante la electrólisis.

Un buen diafragma ha de tener suficiente resistencia y rigidez mecánica para conservarse indeformable, ha de ser -- lo más inatacable posible por las soluciones o gases con -- los que entrará en contacto y además ha de oponer la menor resistencia eléctrica posible.

El material para diafragma elegido en este trabajo será de nylon, perteneciente a la familia de las poliamidas.

La mayor área catódica según la tabla N° 7 es de 15.0 cm por 20.0 cm, en base a ésta se diseñará la bolsa del diafragma.

Análizando en corte el conjunto cátodo-diafragma y junto con las consideraciones de diseño se obtendrá el tamaño de la bolsa.

Se dejarán 2.0 cm demás sobre la superficie del electrolito de la primera cara, más 20.0 cm de la profundidad --

del cátodo, más 1.0 cm de separación entre el diafragma y el centro del cátodo, la suma total da como resultado una longitud de 25.50 cm por cara, la que se multiplica por dos puesto que un electrodo consta de dos caras, obteniéndose así 51.0 cm siendo la longitud de nylon que envolvera al cátodo con una anchura de 18.50 cm incluyendo 0.5 cm por lado para la costura con las tapas o lados de la bolsa.

Los lados de la bolsa, es decir, el área del corte que se analiza será de 23.0 cm por 5.0 cm, más 0.5 cm para la costura, el área requerida es de 23.50 cm por 6.0 cm, se necesitan dos tapas por cátodo.

Por la tabla N° 7, el máximo número de bolsas es de 24 para 4 cátodos por cuba y 6 cubas por casa, es por esto que serán necesarios 24 tramos de nylon de 51.0 cm por 18.50 cm y 48 tramos de 23.50 cm por 6.0 cm.

Cada bolsa estará sujeta en las orejas del cátodo, no creyéndose necesario el soporte de madera el cual ocupa las aristas de la bolsa.

### 3.5. DISEÑO DE LA CUBA ELECTROLITICA.

La cuba o celda electrolítica es el recipiente en el cual se introducen los electrodos y solución para llevar a cabo los procesos de naturaleza electrolítica. La tabla N° 4 indica en uno de sus renglones el tipo de material de construcción de las cubas para cada uno de los diversos me-

tales incluidos. El material de construcción para las cubas seleccionado para este trabajo será de fibra de vidrio con resina poliéster ya que presenta una gran versatilidad por su resistencia química a muchos electrólitos. \*

### 3.5.1. DIMENSIONES INTERIORES.

El área de  $3.16 \text{ dm}^2$  es la mayor de las indicadas en la tabla N° 7, la cual da una sección cuadrada de 17.78 cm por 17.78 cm y una sección rectangular de 15.39 cm por 20.53 cm. se diseñará con ésta última.

La profundidad tendrá 4.0 cm más al largo del electrodo más otros 2.0 cm sobre la superficie del electrólito, -- con lo cual la profundidad total de la cuba será de :

$$\begin{aligned} \text{Profundidad} &= 23.53 \text{ cm} + 4.0 \text{ cm} + 2.0 \text{ cm} = 29.53 \text{ cm} = \\ &= 29.50 \text{ cm}. \end{aligned}$$

El ancho será 2.0 cm mayor que el electrodo, por lo -- tanto :

$$\text{Ancho} = 15.39 \text{ cm} + 2.0 \text{ cm} = 17.39 \text{ cm} = 17.50 \text{ cm}.$$

Como ya se dijo anteriormente la longitud de la cuba -- es de 30.0 cm.

El volumen de electrólito requerido será, sin tomar en cuenta, el volumen ocupado por los electrodos ;

Volumen de electrolito = 29.50 cm x 17.50 cm x 30.0 cm = 15 487.5 cm<sup>3</sup> = 15.49 lt = 15.0 lts para diseño.

En las paredes longitudinales se le dará un canto libre de 2.0 cm de ancho para descansar las barras conductoras y las orejas de los electrodos.

### \* 3.5.2. ALIMENTACION Y DESCARGA.

La alimentación de electrolito así como su descarga de la cuba será por medio de orificios de 2.54 cm de diámetro exterior localizados cada uno en los extremos opuestos, sobre las paredes transversales de la celda.

La carga y descarga se hará con la ayuda de tubería de polietileno, poliéster o de cloruro de polivinilo. ~~A~~

### 3.6. DISEÑO DE LA CASA ELECTROLITICA.

La elección del mejor diseño de la casa electrolítica - en el sistema de conexión múltiple estará basado en los siguientes puntos:

- Menor cantidad requerida de barra conductora principal.
- Mayor versatilidad en el diseño.
- Menor cantidad requerida de uniones en la barra conductora principal.
- Menor espacio requerido por el diseño.

El punto de partida para deducir el mejor arreglo de --

las cubas, es el arreglo representado en la figura 3(a), el cual se fraccionará hasta cumplir con la mayor parte de los puntos arriba mencionados.

El arreglo 3(a) es no versátil ya que en el caso en -- que se necesite sacar del circuito una o varias cubas, lo -- que se denomina "puentear", no es posible puesto que al --- hacerlo se clausuran todas.

Si al arreglo 3(a) se le fracciona en dos secciones, - cada una consistiendo de 3 cubas, resulta la figura 3(b), - siendo un poco más versátil, puesto que se pueden clausurar las cubas de tres en tres, requiriendo además mayor canti-- dad de barra conductora, uniones y de espacio.

Fraccionando en tres secciones al arreglo 3(a), consis-- tiendo cada sección de dos cubas, resulta el arreglo repre-- sentado por la figura 3(c), siendo más versátil que el arre-- glo 3(b) puesto que al eliminar del circuito las cubas se - hará de dos en dos, es decir, como mínimo se clausuraran -- dos cubas del sistema, requiriendo mayor cantidad de barra conductora, de uniones y de espacio.

Si se fracciona por último al arreglo 3(a) en seis --- secciones cada una consistiendo de una cuba, resulta el --- arreglo representado por la figura 3(d), siendo el más ver-- sátil de los anteriores, ya que se pueden clausurar del cir-- cuito a las cubas de una en una, es decir, se elimina como -- mínimo a una cuba, requiriéndose mayor cantidad de barra --

conductoras, uniones y espacio.

Se ha observado que cada vez que se fracciona al arreglo 3(a) aumenta la cantidad requerida de barra conductora principal, las uniones en ella y el espacio requerido por el arreglo, satisfaciéndose hasta el momento el aspecto de versátilidad, no así el mejor diseño.

Para solucionar lo mencionado últimamente, se gira el arreglo 3(d) el más versátil, resultando el arreglo representado en la figura 3(e), donde las cubas requieren de mucho más espacio, menos barra conductora y ninguna union en ella.

Para resolver el aspecto de espacio, al arreglo 3(e) se gira a su mitad resultando el arreglo representado en la figura 3(f), el cual requiere menor espacio, casi igual cantidad de barra conductora pero requiere de ocho uniones en ella.

Si al arreglo 3(e) se le gira en su tercera parte, resulta el arreglo representado en la figura 3(g), el cual requiere de menor espacio, menos barra conductora y sólo dos uniones en ella, siendo por todo esto el arreglo recomendable de la casa electrolítica.

Dicho arreglo 3(g) se puede montar en una mesa de 60.0 cm x 120.0 cm y una altura de 80.0 cm como mínimo, ya que el conjunto ocupa un espacio de 42.0 cm x 110.0 cm, dejando 10.0 cm entre cubas adyacentes.

En la parte inferior de la mesa, en el suelo, debe colocarse un tanque colector el cual servirá para coleccionar el electrolito que se desaloja de las celdas.

Este tanque debe ir conectado a una bomba con motor de 1/4 H.P. la cual llevara al electrolito en forma intermitente a un tanque de alimentación situado a 1.50 m de altura - como mínimo. Tanto éste como el tanque colector serán de fibra de vidrio con resina poliéster, de forma cilíndrica.

### 3.6.I. LINEAS COLECTORAS Y DISTRIBUIDORAS DE ELECTROLITO.

Por lo expuesto en el inciso 3.6, las líneas colectoras y distribuidoras de electrolito se diseñaran conforme al arreglo 3(g) de la casa electrolítica.

El electrolito comenzara a distribuirse a las cubas -- por medio de una manguera con longitud de 50.0 cm conectada a una válvula que regulara el flujo del electrolito situada en la parte inferior de la pared cilíndrica que consiste el tanque de alimentación, esta manguera se dividira en dos ramales de 15.0 cm de longitud, cada una alimentando a una cuba.

El electrolito saliente de la cuba alimentada por una de las ramales, alimentara a la adyacente por medio de un tramo de manguera de 10.0 cm de longitud, la solución descargada por esta segunda cuba alimentara a una tercera por otra manguera de 10.0 cm de longitud, sucediendo lo mismo -

con la solución distribuida por la otra ramal.

En esta forma la solución saliente por la tercera cuba de ambas ramales, se descargará por medio de dos tuberías - con longitud de 50.0 cm cada una al tanque colector.

La evacuación del tanque colector se hará conectando - una manguera de 30.0 cm de longitud a la entrada de la bomba y a la salida de ésta una manguera de 280.0 cm de longitud que enviara la solución a la parte superior del tanque de alimentación, iniciandose nuevamente el proceso.

Haciendo la suma de los tramos mencionados, resulta -- una longitud de 530.0 cm de tubería con un diámetro interior de 2.54 cm pudiendo ser la manguera de polietileno, -- poliéster o de cloruro de polivinilo, la elección estará basada en el costo.

En la tabla N° 4, se indican las formas de circulación de la solución para cada uno de los metales incluidos en -- los procesos de electrorrefinado y electrobeneficio.

Por tanto, el diseño antes descrito, satisface el requerimiento de circulación, ya que incluye la circulación - por gravedad y la circulación en cascada, a saber:

Es por gravedad, ya que el electrolito fluye libremente desde el tanque de alimentación hacia las cubas y es por cascada, puesto que la solución descargada por una cuba alimenta a la próxima y la descarga de ésta alimenta a la siguiente.

### 3.7. CALCULO DE LA BARRA CONDUCTORA PRINCIPAL.

En los transportes y en las distribuciones de energía eléctrica, deben tenerse en cuenta cuatro factores cuando se determina la sección del conductor:

1. Los conductores deben ser capaces de transportar la ---- corriente sin calentarse. Este aspecto tiene importancia especial en las instalaciones en interiores cuando exista peligro de incendio. Las tablas AWG "american wire -- gauge" proporcionan las intensidades de corriente admisibles y las secciones transversales de los conductores.
2. La caída de tensión en el extremo de la línea correspondiente al receptor debe mantenerse dentro de límites razonables.
3. Los conductores deben tener una resistencia mecánica suficiente.
4. Debe considerarse el aspecto económico del problema. Al aumentar la sección del conductor se aumenta el costo de instalación, pero se pierde menos energía en el transporte.

Debe elegirse el tipo de conductor para el cual resulte un mínimo la suma del importe de las pérdidas de energía más el interes del costo de la instalación. Las consideraciones establecidas en la capacidad de transporte, la tensión, la resistencia mecánica y el aspecto económico del -- conductor pueden modificar el resultado obtenido.

El procedimiento para la determinación de la sección transversal de la barra conductora principal consiste en ob

tener en primer lugar el número AWG que es capaz de transportar la intensidad de 50 amperes la cual es la máxima posible, esto se consigue en la primera tabla de la AWG, teniendo el número el segundo paso es consultar una segunda tabla en la cual se obtiene la sección del conductor correspondiente al número AWG.

Por lo anterior, el número AWG para la corriente a manejar es el AWG N° 7 correspondiendole una sección transversal de  $0.1060 \text{ cm}^2$ .

Dicha sección no cumple con el punto de resistencia mecánica anteriormente expuesto, por lo cual la elección se encuentra supeditada al punto del aspecto económico, la pérdida de energía será despreciable puesto que la barra estará sobrada, quedando sólo el aspecto económico al considerar la sección transversal, por tal motivo las consideraciones se expondrán en el capítulo 4 sólo aquí se dirá que la barra tendrá una sección transversal de 6.35 mm de espesor por 19.05 mm de ancho.

El arreglo para las cubas, elegido con anterioridad, requiere de: 4 tramos de 72.0 cm, 4 tramos de 32.0 cm y un tramo de 10.0 cm, sumando 4.26 m de conductor, por otro lado se requerirán 2 tramos de 24.50 cm que servirán para "puentear" con lo cual la longitud necesaria de conductor será de 4.75 m.

### 3.8. SUSPENSION DE LOS ELECTRODOS.

El tipo de arreglo diseñado para la casa electrolítica en el inciso 3.5, requiere de dos conexiones eléctricas para la entrada y salida de la energía eléctrica.

Una de ellas estará entre la barra conductora principal y uno de los lados de los ánodos, lado positivo de la cuba, por donde fluirá la corriente eléctrica hacia la cuba, los otros lados anódicos estarán en el lado opuesto de la cuba o lado negativo, apoyadas sobre trozos de madera, para que no hagan contacto eléctrico, en este mismo lado de la cuba se encontrará la otra unión eléctrica, por donde sale la corriente eléctrica de la cuba, entre uno de los extremos de los cátodos y la barra conductora principal, los otros extremos de los cátodos estarán apoyados sobre trozos de madera en el lado opuesto de la cuba o lado positivo.

Para este trabajo existen dos formas de poder efectuar estas uniones, la primera es por medio de dos laminas dobladas para formar las orejas sobre los vértices del lado superior del electrodo en forma integral.

La otra forma es por medio de barras conductoras de soporte sosteniendo trozos de hojas conductoras o secciones de la misma barra unidas al electrodo, siguiendo el mismo procedimiento arriba señalado para hacer las uniones con la barra conductora principal.

El ángulo estará formado por dos perfiles; uno que ---

estará apoyado sobre los lados de la cuba y tendrá la siguiente longitud.

$$l = \frac{(\text{ancho cuba}) - (\text{ancho electrodo})}{2} + (\text{ancho barra conductora principal}) + (\text{espesor electrodo}). \quad (3.7)$$

y otro perfil integrado al electrodo, con longitud

$$l = (\text{espacio electrolito parte superior cuba}) + (\text{espacio barra conductora principal}) \quad (3.8)$$

el espesor de las orejas será el del electrodo.

La longitud de la barra conductora de soporte tendrá la siguiente longitud:

$$l = (\text{ancho cuba}) + (2) (\text{ancho barra conductora principal}) \quad (3.9)$$

con diámetro de 2.0 mm.

En la tabla N° 8, se indican para cada uno de los elementos químicos la forma de suspensión, así como las dimensiones de los soportes.

### 3.9. CARACTERISTICAS DEL RECTIFICADOR.

\* La energía eléctrica es proporcionada en forma de corriente alterna producida por generadores instalados en centrales eléctricas y para poder ser usada en los procesos de naturaleza electrolítica, es necesario "rectificarla", \*

es decir, cambiarla a corriente continua. \*

Antes, para transformar la corriente alterna en continua se empleaban grupos convertidores que constaban de un motor de corriente alterna, al que se le acoplaba un generador de corriente continua. El motor se alimentaba de la red de corriente alterna y hacía girar el generador y éste generaba la corriente continua.

\* Ahora, los grupos convertidores se emplean raras veces utilizándose generalmente aparatos especiales que transforman la corriente alterna en continua y que se denominan --- rectificadores. \*

Por lo expuesto en el inciso 3.1, se llegó a la conclusión de que 45 amperes es la intensidad de corriente máxima recomendable, suponiendo una eficiencia en los procesos del 100%, lo cual en la práctica es una falacia, por tal motivo, para compensar las fugas de la corriente, resistencias del conductor, resistencias de las conexiones y del proceso electrolítico mismo, así como para la seguridad del rectificador se le pedirá al fabricante una característica de intensidad de corriente de 50 amperes.

La gran variedad de intensidades de corriente requeridas por cuba, presentadas en la tabla N° 7, impone la necesidad de un sistema de regulación continua tanto en intensidad como en voltaje.

En el inciso 3.2, se menciona que algunos elementos --

que requieren muy baja caída de tensión por cuba al ser trabajados a 12 volts se necesitaría de un gran número de cubas lo cual hace prohibitivo la construcción del laboratorio, la solución al problema es pedirle al fabricante el sistema de regulación continua de 0 a 15 volts y de 0 a 50 amperes.

La tercera característica para completar la placa del rectificador es la potencia eléctrica la cual es:

$$P = \text{watts} = i \text{ amperes} \times E \text{ volts} \quad (3.10)$$

sustituyendo valores:

$$P = 50 \text{ amperes} (15 \text{ volts}) = 750 \text{ watts} = 0.750 \text{ kw.}$$

Por lo tanto las características del rectificador son:

$$i = 50.0 \text{ amperes.}$$

$$E = 15.0 \text{ volts}$$

$$P = 0.750 \text{ kw.}$$

### 3.10. SISTEMA DE CALENTAMIENTO.

Las formas de poder suministrar calor al electrólito - pueden ser por medio de:

- Intercambiadores de calor.
- Serpientes en cualquiera de sus diseños.
- Calentadores de inmersión.

Las primeras desventajas en el uso de los dos primeros, para este trabajo son; poca superficie de transferencia con la que se cuenta y por ello económicamente no recomendables, por tal motivo se piensa que el calentador de inmersión es el más adecuado, puesto que la aplicación del calentamiento por resistencia eléctrica puede hacerse operar más fácilmente que la transferencia de calor por un fluido, particularmente en operaciones intermitentes.

Por otra parte, analizando las temperaturas indicadas en la tabla N° 4, se puede ver que las mayores son de 85°C para el hierro y de 70°C para el oro, como la máxima temperatura es muy baja y el poco volumen a calentar es por ello que no se calculara el tamaño del elemento de calentamiento puesto que implicaría mandarlo especialmente a construir lo que aumentaría el costo del laboratorio, por tal motivo se recomienda comprar el elemento de calentamiento de menor tamaño que se encuentre a la venta en el mercado.

### \* 3.II. CONSTITUCION DEL ELECTROLITO.

El metal a electrodepositarse desde un electrolito, es introducido como una sal del metal y es reemplazado por disolución anódica del metal, en el caso del electrorrefinado, o por solución con mayor concentración del metal, en el caso del electrobeneficio.

Las tres sales inorganicas simples más comunes son los

cloruros, sulfatos y nitratos, derivados respectivamente -- del ácido clorhídrico  $\text{HCl}$ , ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , y ácido -- nítrico  $\text{HNO}_3$ .

Los nitratos raramente se usan en los electrólitos ya que pueden reducirse anódicamente a amonio  $\text{NH}_4$ , los cloru-- ros tienen mayor conductividad que los sulfatos pero son -- más corrosivos para el equipo.

Las características más importantes de estas sales son: alta solubilidad, buena conductividad y alta concentración metal-ion como resultado de un alto grado de disociación en cationes metálicos y aniones no metálicos.

En la tabla N° 7, se presentan los volúmenes requeri-- dos de electrólitos así como su concentración y constitu-- ción.

Ante todo se recomienda no trabajar con materias pri-- mas grado químicamente puras, Q.P, ya que en la producción industrial, como es bien sabido, se labora con sustancias grado técnico, puesto que si se efectúan las prácticas de -- laboratorio con grado Q.P, éstas se alejarán de la realidad industrial.

## CAPITULO 4

### CONSIDERACIONES ECONOMICAS

El fin que se persigue con la construcción del laboratorio que se propone es totalmente desde el punto de vista experimental, para la enseñanza de la Metalurgia Extractiva V, por tal motivo, al considerar los aspectos económicos -- del mismo se descartaran los llamados costos de producción y sólo se trataran los costos de inversión.

Los costos de producción proporcionan la cantidad monetaria que cuesta producir o hacer un artículo determinado y los costos de inversión el costo de la adquisición de los medios por los cuales se producirá o hará ese artículo.

Por lo expuesto hasta el momento, interesa únicamente saber cuanto costara proporcionar los medios adecuados para llevar a cabo los procesos de electrorrefinado y electrobeneficio de los metales incluidos en la tabla N° 4, y no interesa saber cuanto costara producir determinada cantidad.

#### 4.I. GOSTOS DE INVERSION.

Los costos de inversión incluirán:

- Costos de equipo.
- Costos de materia prima.

Por "equipo" se entenderá:

- Rectificador de corriente alterna en corriente --- continua.
- Moto-bomba.
- Calentador de inmersión.
- Multímetro para medir intensidad de corriente, --- voltajes y resistencias.
- Cubas electrolíticas.
- Barra conductora principal y de soporte.
- Tubería para carga y descarga de las cubas.
- Tanques de alimentación y colector.
- Diafragmas.
- Termómetro.

Por "materia prima" se entenderá:

- Electrodos.
- Electrólitos.
- Tanques de almacenamiento.

#### 4.I.I. COSTOS DE EQUIPO.

##### 4.I.I.I. RECTIFICADOR DE C.A. EN C.D.

Se requiere un rectificador para 110 volts, con la siguiente placa de características:

$i = 50.0$  amperes.

$E = 15.0$  volts.

$P = 0.750$  kw.

Costo por unidad: \$ 8 000.00                      Costo total: \$ 8 000.00

#### 4.I.I.2. MOTO-BOMBA.

Una moto-bomba con un motor de 1/4 H.P, para 110 volts y una bomba con eje y rodete resistentes a los ácidos.

Costo por unidad: \$ 6 000.00                      Costo total: \$ 6 000.00

#### 4.I.I.3. CALENTADOR DE INMERSION.

Se requiere un calentador de inmersión para 110 volts, de cubierta de titanio y una longitud de inmersión de 15.0 cm como máximo, con capacidad de 1 000 kw.

Costo por unidad: \$ 2 000.00                      Costo total: \$ 2 000.00

#### 4.I.I.4. MULTIMETRO.

Un multímetro para mediciones de intensidad de corriente, caídas de tensión y resistencias.

Costo por unidad: \$ 600.00                      Costo total: \$ 600.00

#### 4.I.I.5. CUBAS ELECTROLITICAS.

Con dimensiones interiores siguientes;

- Profundidad: 29.50 cm.
- Ancho: 17.50 cm. •
- Longitud: 30.00 cm.

Costo por unidad: \$ 450.00                      Costo total: \$ 2 700.00

#### 4.I.I.6. BARRA CONDUCTORA PRINCIPAL Y DE SOPORTE.

Son necesarios 4.75 m de barra de cobre con sección -- transversal de 6.3 mm por 19.1 mm (1/4" x 3/4") que funcio- nara como barra conductora principal.

Costo por Kg de cobre: \$ 87.70                      Costo total: \$ 451.50

Análizando la tabla N<sup>o</sup> 7, se llegó a la conclusión de que cinco tramos de cobre con longitud de 21.50 cm y diáme- tro de 2.00mm, son los requeridos para el laboratorio.

Costo por unidad: \$ 5.00                      Costo total: \$ 25.00

#### 4.I.I.7. TUBERIA Y VALVULA.

En el inciso 6.I, del capítulo 3, se indicó que son ne cesarios 5.50 m de tubería de polivinilo con diámetro inte- rior de 2.54 cm.

Costo por metro : \$ 48.20                      Costo total: \$ 265.10

Se requiere además una válvula de polivinilo para regu- lar el flujo del electrolito, con diámetro interior de 2.54 cm.

Costo por unidad : \$ 60.00                      Costo total : \$ 60.00

4.I.I.8. TANQUES DE ALIMENTACION Y COLECTOR.

En el mercado existen estos tanques a base de polivinilo.

El tanque de alimentación tendrá una capacidad de 200 lts y un orificio con diámetro exterior de 2.54 cm.

Costo por unidad : \$ 886.00                      Costo total : \$ 886.00

El tanque colector tendrá una capacidad de 100 lts y un orificio con diámetro exterior de 2.54 cm.

Costo por unidad : \$ 590.00                      Costo total : \$ 590.00

4.I.I.9. MASAS PARA CUBAS Y TANQUE DE ALIMENTACION.

Se pidieron cotizaciones en los talleres de carpintería para la mesa donde se colocaran las cubas electrolíticas, cuyo costo en promedio es:

Costo por unidad : \$ 350.00                      Costo total : \$ 350.00

Y para la mesa donde se colocara el tanque de alimentación, la cotización promedio es:

Costo por unidad : \$ 150.00                      Costo total : \$ 150.00

4.I.I.IO. DIAFRAGMAS.

Son necesarios 2.46 m de nylon con una anchura de 1.20 m.

Costo por metro : \$ 21.00                      Costo total : \$ 51.66

4.I.I.II. TERMOMETRO.

Siendo la temperatura a que se realizan los procesos de naturaleza electrolítica, uno de los factores más influyentes en los resultados obtenidos en el electrodeposito, - resulta indispensable disponer de termómetros para medirla con precisión.

Por las bajas temperaturas indicadas en la tabla N° 4, el termómetro que se cree recomendable es del tipo con depósito de mercurio protegido, con gama de 0° a 100°C.

Costo por unidad : \$ 300.00                      Costo total : \$ 300.00

La tabla N° 8 resume todo lo anteriormente dicho, y en ella se observa que la inversión para el equipo es de : ----  
\$ 20,179.27

4.I.2. COSTOS DE MATERIA PRIMA.4.I.2.I. ELECTRODOS.

Para poder saber la inversión en los electrodos se procedio de la siguiente manera :

Se pidieron las cotizaciones en el mercado de las materias primas señaladas en la tabla N° 7, cuyos valores se -- indican en la tabla N° 9.

Se calcularon los volúmenes anódicos y catódicos incluyendo el volumen para las orejas de cada uno de los electrodos que las requerian, obteniéndose así el volumen total, el cual multiplicándose por la densidad del metal de que se trate, resulta el peso requerido.

Estos resultados se presentan en la tabla N° 10, ya sea como kilogramos por cuba o por casa, tanto para ánodos como para cátodos.

Finalmente multiplicando los pesos obtenidos por su cotización, se obtienen los costos ya sea por cuba o por casa, indicándose también en la tabla N° 10, y como en ella puede verse el costo de inversión; para ánodos por casa es de --- \$ 47,129.29, como también para cátodos por casa es de ----- \$ 30,382.92.

Resumiendo la inversión para los electrodos por casa -- es de \$ 77 512.21.

En vista del elevado costo de la materia prima se recomienda conseguirla a través de donativos a la Facultad de -- Química para que ésta no tenga que hacer erogaciones por -- este concepto.

En estas condiciones es recomendable iniciar las prácticas del laboratorio de Metalurgia Extractiva V, con los --

procesos de cobre y zinc dejando para más adelante y en forma progresiva a los otros procesos a fin de que la inversión inicial no sea demasiado alta.

Por lo anterior el costo de electrodos se reduce a:

- Costo de electrodos Electrobeneficio del Zn	\$ 5 908.60
- Costo de electrodos Electrorrefinado del Cu	\$ 514.10
- Costo de electrodos Electrobeneficio del Cu	\$ 547.26
Costo total de electrodos	\$ 6 969.96

#### 4.1.2.2. ELECTROLITOS.

En la tabla N° 7, se indican los constituyentes así -- como las composiciones de cada uno de los electrolitos, --- multiplicando estos pesos por su cotización, indicadas en -- la tabla N° 9, se obtiene la inversión por cuba y por casa, los resultados se presentan en la tabla N° 10, indicandose en ésta que la inversión en electrolitos es de \$ 130,510.70 por casa.

Este elevado costo se debe principalmente a las cantidades sugeridas para los procesos de oro y plata, por lo -- que es recomendable no iniciar al principio comprando éstos y en todo caso hacerlo a nivel de experimento de cátedra -- para poder controlar dichos materiales.

En estas condiciones el costo de las otras materias -- primas sólo asciende a la cantidad de \$ 28,252.01

4.1.2.3. TANQUES DE ALMACENAMIENTO.

En la misma tabla N° 10, se indican los costos de cada uno de los envases requeridos para el almacenamiento de los electrólitos, la inversión como se puede leer en la tabla - es de \$ 9,025.00.

4.1.2.4. COSTOS DE INSTALACION.

Tomando en cuenta los argumentos de los incisos anteriores, el costo de inversión de la planta sera:

- Costo de equipo	: \$ 20 179.27
- Costo de electrodos	: \$ 22 086.25
- Costo de electrólitos	: \$ 28 252.01
- Costo de tanques almacenamiento	: \$ 8 653.00
	<u>total: \$ 79 170.53</u>

CAPITULO 5  
CONCLUSIONES

Los costos de inversión obtenidos en el capítulo anterior conforman lo expuesto en el capítulo I, tocante a que la química experimental es más costosa que la química teórica.

Es por esto que hay que considerar la aportación de la iniciativa privada, o mejor dicho, de las fuentes de poder económico elevado, para que todos los aspectos relacionados con la química, sean de iniciativa privada auténtica, sean de participación estatal, organismos descentralizados o autónomos respecto al gobierno, incluso, diversas instituciones oficiales aparte de las dedicadas específicamente a la enseñanza, contribuyan al financiamiento para poder soportar el alto costo de la enseñanza experimental, si es que quieren de verdad ayudar al desarrollo nacional sobre bases técnicas auténticas.

A todas estas instituciones les interesa o les debe interesar, la formación de profesionales de calidad, y la única manera de obtenerlos es mediante una sólida prepara-

ción que sólo se consigue mediante la costosa y difícil -- enseñanza experimental. De aquí el valor que tiene un buen servicio de "extensión universitaria", algo que se aproxima a lo que hoy en ciertos círculos industriales se ha dado en llamar "relaciones públicas". Conviene mucho ligar la vida universitaria a la vida nacional en todos sus aspectos para beneficio mutuo; obtener buenos profesionales, obtener apoyo técnico en pro del desarrollo del país y, a su vez, que la enseñanza superior sea asistida en todos los aspectos -- por las fuentes de poder económico.

Mientras no se consiga lo anterior, se propone lo siguiente, para poner en funcionamiento parcial el laboratorio que se ha proyectado.

La primera inversión que se debe hacer es para obtener el equipo, ya que sin éste no se pueden llevar a la práctica los procesos electroquímicos de refinado y beneficio.

La segunda inversión que se efectúa es para obtener -- las materias primas del metal que se quiera trabajar, como se indica en la tabla N° 10.

Por ejemplo, para el electrobeneficio y el electrorrefinado del metal cobre y el electrobeneficio del metal zinc, la inversión total será:

- Costo del equipo	: \$	20 179.27
- Costo materia prima electrorrefinado Cu	: \$	2 393.55
- Costo materia prima electrobeneficio Cu	: \$	1 879.44
- Costo materia prima electrobeneficio Zn	: \$	6 677.92
Costo total	: \$	31 130.18

Invirtiendo progresivamente en las materias primas, -- para cada uno de los metales restantes incluidos en la tabla N° 10, hasta llegar a la inversión total de \$ 217,047.91 como anteriormente se señalo.

Los costos totales individuales de la tabla N° 10, varían considerablemente, por ejemplo, el electrorrefinado -- del metal oro, involucra el 59.28%, es decir, \$ 128,673.80 y para el metal plata el 13.54%, o sean \$29,382.85, ambos de la inversión total, por lo cual se piensa, que el proceso de electrorrefinado de estos metales no es recomendable efectuarlos a costa del presupuesto de la Facultad de ~~Química~~ Química, sino tratar de llevarlos a la práctica por los medios señalados al dar principio al presente capítulo.

El proyecto aquí presentado ha sido diseñado de tal -- forma que incluya el número mínimo de accesorios con los -- cuales se puedan llevar a cabo prácticas operacionales de -- Metalurgia Extractiva tanto para el electrorrefinado como -- para el electrobeneficio, por lo cual, la tabla N° 10 servirá de base para ir incrementando el laboratorio en forma --

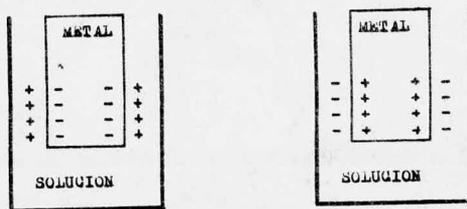
progresiva de acuerdo con los recursos de la Facultad de --  
Química.

Por otra parte, como se indicó a partir del capítulo -  
3, todos los cálculos y diseños realizados están basados en  
los datos operacionales utilizados por las grandes indus---  
trias de los procesos electrolíticos tratados, esto ha tenido  
como fin el de poder llevarlos a efecto práctico en el -  
laboratorio, emulando, hasta donde lo permita el equipo, a  
las plantas industriales, ya que uno de los objetivos en la  
construcción de este trabajo es, de que el alumno primero -  
imite y posteriormente domine cada una de las variables in-  
volucradas, pero ante todo, quedando con una preparación --  
electroquímica perfectamente cimentada, ya que cuando lle--  
gue el momento de incorporarse a la vida profesional, domi-  
ne y perfeccione los procesos, siendo estos los objetivos -  
finales.

### BIBLIOGRAFIA

- Beregovski, V, Metalurgia del cobre y del níquel, Moscu, ---  
Mir, 1972.
- Blum, William, Principles of electroplating and electro----  
forming, New York, McGraw-Hill, 1949.
- Chaussin, C, Metalurgia, España, Urmo, 1972.
- Dawes, Ch, L, Tratado de electricidad, España, Gustavo Gili,  
1970.
- Giral, Francisco, Enseñanza de la química experimental, ---  
Washington, D.C, OEA, 1969.
- Guerrero, F, Manuel, F, Electrodeposito de metales, México,  
1976.
- Mantell, C, L, Ingeniería electroquímica, México, Reverté,  
1962.

**FIGURA N° 1**  
**POTENCIAL EN LA INTERFASE METAL-SOLUCION**



La presión de disolución es mayor que la presión de depósito. El metal se carga negativamente y la solución positivamente, como por ejemplo; al sumergir Zn en una solución de  $ZnSO_4$ .

La presión osmótica de depósito es mayor que la presión de disolución. El metal se carga positivamente y la solución negativamente, como por ejemplo; al sumergir Cu en una solución de  $CuSO_4$ .

**FIGURA N° 2**  
**CANTIDAD DEPOSITADA VS AMP-HR APLICADOS**

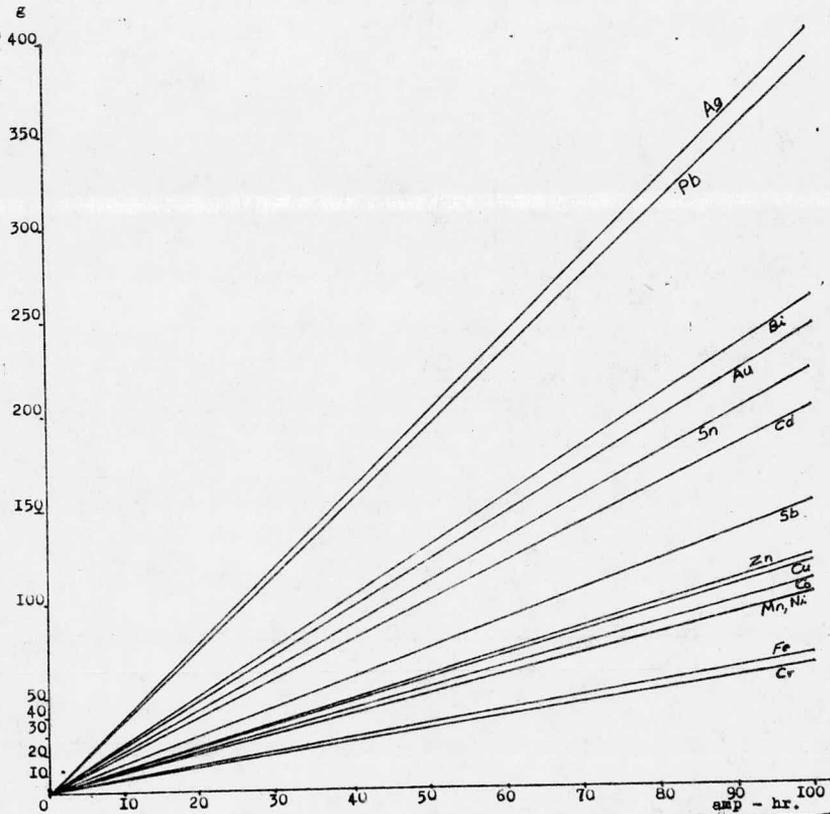
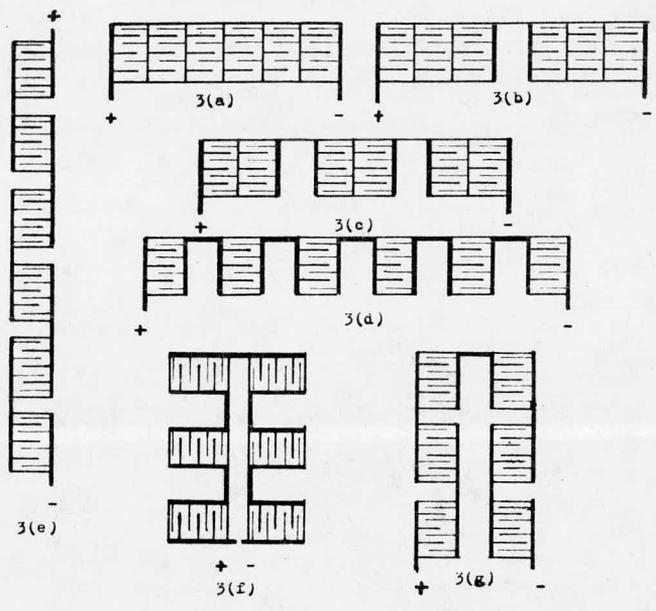


FIGURA Nº 3  
DIAGRAMAS DE CONEXION DE  
GRUPOS ELECTROLITICAS



**TABLA N° 1**  
**UNIDADES ELECTRICAS**

UNIDAD A D	RELACION			usm usee
	NOMBRE	UNIDAD PRACTICA		
		EQUIVALENCIA EN UNIDADES ABSOLUTAS EN SISTEMA CGS		
		eum	usee	
Resistencia	Ohm	$10^9$	$1/9 \times 10^{-11}$	$c^2$
Intensidad de corriente	Ampere	$10^{-1}$	$3 \times 10^9$	I/c
Potencial	Volt	$10^8$	$1/300$	c
Cantidad	Goulomb	$10^{-1}$	$3 \times 10^9$	I/c
Energia	Joule	$10^7$	ergs	
Potencia	Watt	$10^7$	ergs/seg	

**TABLA N° 2**  
**PRODUCTOS DE LA ELECTROLISIS**

ELECTROLITO	PRODUCTO CATODICO	PRODUCTO ANODICO
HCl conc.	$H_2$	$Cl_2$
$H_2SO_4$	$H_2$	$O_2$
NaOH, KOH	$H_2$	$O_2$
$NaNO_3$	$H_2$ y NaOH	$O_2$ y $HNO_3$
$K_2SO_4$	$H_2$ y KOH	$O_2$ y $H_2SO_4$
$CuSO_4$	Cu	$O_2$ y $H_2SO_4$
$NiSO_4$	Ni	$O_2$ y $H_2SO_4$
$CuCl$	Cu	$Cl_2$
$AgNO_3$	Ag	$O_2$ y $HNO_3$

**TABLA N° 3**  
**POTENCIALES TIPO DE ELECTRODO A 25°C**

PAR	REACCION	Eº volt
Mn(O)-Mn(II)	$Mn = Mn^{+2} + 2e^-$	1.05
Zn(O)-Zn(II)	$Zn = Zn^{+2} + 2e^-$	0.7620
Cr(O)-Cr(III)	$Cr = Cr^{+3} + 3e^-$	0.71
Cd(O)-Cd(II)	$Cd = Cd^{+2} + 2e^-$	0.402
In(O)-In(III)	$In = In^{+3} + 3e^-$	0.340
Co(O)-Co(II)	$Co = Co^{+2} + 2e^-$	0.277
Ni(O)-Ni(II)	$Ni = Ni^{+2} + 2e^-$	0.250
Sn(O)-Sn(II)	$Sn = Sn^{+2} + 2e^-$	0.136
Pb(O)-Pb(II)	$Pb = Pb^{+2} + 2e^-$	0.126
Fe(O)-Fe(II)	$Fe = Fe^{+2} + 2e^-$	0.036
H(O)-H(I)	$I/2H_2 = H^+ + e^-$	0.000
Sb(O)-Sb(III)	$Sb + H_2O = SbO^+ + 2H^+ + 3e^-$	-0.212
Bi(O)-Bi(III)	$Bi + H_2O = BiO^+ + 2H^+ + 3e^-$	-0.32
Cu(O)-Cu(II)	$Cu = Cu^{+2} + 2e^-$	-0.3448
Ag(O)-Ag(I)	$Ag = Ag^+ + e^-$	-0.7995
Au(O)-Au(III)	$Au = Au^{+3} + 3e^-$	-1.42

**TABLA Nº 4**  
**DAOS INDUSTRIALES DE OPERACION**  
**DE PROCESOS ELECTROLITICOS**

METAL	Cu	Sb	Sn	Co	Ni	Pb	Ag	Bi	Au	Cu	Zn	Cd	Sb	Co	Mn	Cr	Ag	Fe
proceso	ELECTROREFINADO									ELECTROBENEFICIO								
amp/dm <sup>2</sup> ánodo	2.43	1.20	1.17	1.48	1.70	5.70	2.0	11.80	1.50	3.62	0.44	3.55	5.0	8.6	7.0	46.0	9.50	
amp/dm <sup>2</sup> cátodo	2.00	1.00	1.10	1.50	1.78	4.20	6.0	17.57	1.58	3.25	0.46	2.71	2.50	4.0	7.6	93.0	10.80	
volts/cuba	0.26	0.40	0.30	---	12.50	0.40	4.00	1.20	1.28	2.00	3.55	2.70	2.50	4.0	5.2	4.2	2.0	4.20
electrolito	---	1.25	---	---	---	1.20	---	---	---	1.115	1.33	---	---	---	---	---	---	---
densidad	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
circulación	b o m b a mecánica									aire cascada gravedad								
gal/min	4.5	---	5.0	---	55.0	1.0	---	---	---	33	6.0	---	---	---	7.2	---	---	---
O <sub>2</sub> entrada	60.0	---	35.0	---	60.0	40.0	---	---	55.0	70.0	33	40	35	---	60	35	46	---
O <sub>2</sub> salida	55.0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Nº ánodos	n									n								
material	Cu	Sb	Sn	Co	Ni	Pb	doré	Bi	Au	Pb-Sb	Pb-Ag	Pb	Fe	Pb	Pb-Ag	grafito		
distancia, cm	10.0	---	14.0	---	15.0	4.5	16.42	---	6.41	10.00	9.09	11.0	6.30	---	---	---	---	---
Nº cátodos	n + 1	---	n - 1	---	n - 1	n + 1	n + 1	---	n + 1	n - 1	n + 1	n - 1	n + 1	---	n - 1	n + 1	---	---
material	Cu	Sn	inoxidable	Fe	inox	Bi	Au	Cu	aluminio	Fe	inoxidable	lacero						
cuba material	h o r m i g o n			h a v e g			porcelana			cemento			plástico					
forro	Pb-Sb	---	Pb	masilla	---	mastique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
diaphragma	---	---	---	si	---	---	si	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
conexión eléctrica	p a r a l e l o			s e r i e			paralelo			p a r a l e l o								

**TABLA Nº 5**  
**CANTIDAD DEPOSITADA DE METAL**

Amp-hr	10	20	30	40	45	50
g metal						
Bi	25.985	51.971	77.956	103.941	116.934	129.927
Pb	38.644	77.888	115.932	154.577	173.899	193.221
Au	24.943	48.987	73.480	97.973	110.220	122.467
Sb	15.139	30.277	45.416	60.555	68.124	75.693
Ag	40.239	80.477	116.692	160.955	181.074	201.194
Sn	22.137	44.275	66.412	88.549	99.618	110.686
Ud	20.964	41.928	62.893	83.857	94.339	104.821
Zn	12.193	24.386	36.580	48.773	54.869	60.966
Cu	11.850	23.700	35.550	47.400	53.325	59.250
Co	10.392	21.984	32.977	43.969	48.366	54.361
Ni	10.949	21.899	32.848	43.797	49.272	54.746
Fe	6.944	13.888	20.832	27.776	31.248	34.720
Mn	10.246	20.492	30.739	40.985	46.180	51.231
Cr	6.466	12.933	19.399	25.866	29.099	32.332

**TABLA Nº 6**  
**VOLTS POR CUBA**

Nº CUBAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
METAL									
Cu	0.26	0.52	0.78	1.05	1.30	1.56	1.82	2.08	2.34
Sn	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.70	3.00
Sb, Pb	0.40	0.80	1.20	1.60	2.00	2.40	2.80	3.20	3.60
Bi	1.20	2.40	3.60	4.80	6.00	7.80	8.40	9.60	10.80
Au	1.28	2.56	3.84	5.12	6.40	7.68	8.96	10.24	11.56
Cu	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00
Sb, Ni	2.50	5.00	7.20	10.00	12.50	15.00	17.50	20.00	22.50
Ud	2.70	5.40	8.10	10.80	13.50	16.20	18.90	21.60	24.30
Zn	3.55	7.10	10.65	14.20	17.75	21.30	24.85	28.40	31.95
Ar, Co	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00	28.00	32.00	36.00
Cr, Fe	4.20	8.40	12.60	16.80	21.00	25.20	29.40	33.60	37.80
Mn	5.20	10.40	15.60	20.80	26.00	31.20	36.40	41.60	46.80



Tabla No 8  
COSTOS DE EQUIPO

ACCESORIOS	ESPECIFICACIONES	MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO/UNIDAD	COSTO TOTAL
Rectificador de Ca. en CD.	M = 15.0 volts I = 50.0 amperes P = 0.75 kw		I	8 000.00	8 000.00	8 000.00
moto-bomba	MOTOR r = 1/4 H.P. V = 110 volts	BOMBA Resistente a los ácidos	I	6 000.00	6 000.00	6 000.00
multímetro			I	600.00	600.00	600.00
calentador de inmersión	long inmersión = 15.0 cm r = 1 000 kw V = 110 volts	forro de titanio	I	2 000.00	2 000.00	2 000.00
cubas electro-líticas	profundidad = 29.50 cm ancho = 17.50 cm largo = 30.00 cm	fibra de vidrio con resina políéster	6	450.00	450.00	450.00
barra conductora principal	Largo = 475.0 cm ancho = 6.31 mm espesor = 19.1 mm	cobre		451.51	451.51	451.51
barra conductora de soporte	Diámetro = 2.00 mm longitud = 21.50 cm		5	5.00	25.00	25.00
tubería	longitud = 5.50 m diámetro interior = 2.54 cm			48.20	265.10	265.10
válvula	diámetro interior = 2.54 cm		I	60.00	60.00	60.00
tanque de alimentación	capacidad: 200 lt orificio diámetro exterior = 2.54 cm capacidad 100 lt orificio diámetro exterior = 2.54 cm	polivinilo	I	886.00	886.00	886.00
tanque colector			I	590.00	590.00	590.00
mesa para cubas electro-líticas	ancho = 60.0 cm largo = 120.0 cm altura = 80.0 cm	madera recubierta con resina políéster	I	300.00	300.00	300.00
mesa para tanque alimentación	altura = 1.50 m		I	150.00	150.00	150.00
diafragmas	2.46 m con anchura del rollo de 120 cm	nylon	I	21.00	51.66	51.66
termómetro	con gama: 0 a 100°C	depósito de mercurio protegido	I	300.00	300.00	300.00
total =						20 179.27

Tabla No 9  
COSTO DE MATERIA PRIMA

SUBSTANCIA	COSTO EN EL MERCADO	SUBSTANCIA	COSTO EN EL MERCADO
Sn	176.29 \$/kg	BiSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	50.00 \$/kg
Bi	177.26 \$/kg	BiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	100.00 \$/kg
Sb	70.54 \$/kg	CO <sub>2</sub> .7H <sub>2</sub> O	360.00 \$/kg
Cu	31.52 \$/kg	CaSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	43.00 \$/kg
NI	86.77 \$/kg	CaSO <sub>4</sub> .8H <sub>2</sub> O	500.00 \$/kg
Co	160.00 \$/kg	CaSO <sub>4</sub>	142.80 \$/kg
Pb	16.20 \$/kg	MnSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O	90.00 \$/kg
Al	29.00 \$/kg	Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	65.00 \$/kg
Fe	15.00 \$/kg	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	32000.00 \$/kg
Pb-Sb	22.20 \$/kg	ANGL	68000.00 \$/kg
Pb-Ag	605.34 \$/kg	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	20.00 \$/kg
grafito	37.00 \$/kg	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60.00 \$/kg
acero	60.00 \$/kg	NaCl	50.00 \$/kg
Inoxidable	38.00 \$/kg	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25.00 \$/kg
As	36606.50 \$/kg	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30.00 \$/lt
Au	109580.00 \$/kg	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	30.00 \$/lt
SnSO <sub>4</sub>	510.50 \$/kg	NI	32.00 \$/lt
BiCl <sub>3</sub>	517.20 \$/kg	HNO <sub>3</sub>	40.00 \$/lt
tanque de 19 lbs	180.00 \$	tanque de 30 lbs	360.00 \$
tanque de 72 lbs	300.00 \$	tanque de 100 lbs	500.00 \$
tanque de 200 lbs	880.00 \$		

Tabla No 10  
COSTOS DE MATERIA PRIMA

MATERIA PRIMA	PRO-CESO	MATERIA PRIMA	ANODOS				CATEROS				MERCURIO	RESISTENTE	TOTAL LBS		
			Kgs	COSTO	Kgs	COSTO	Kgs	COSTO	Kgs	COSTO					
Sn	RR	Sn	2,5185	443.98	15,1109	2661.91	Sn	1,7673	311.55	10,6035	1869.20	2435.22	886.00	7894.43	3.62
Bi	RR	Bi	3,5913	636.40	21,5479	3813.58	Bi	0,7855	139.24	4,7132	835.47	839.62	886.00	6380.67	2.94
Cu		Cu	2,1184	85.66	16,3103	514.10	Cu					933.45	886.00	2393.22	1.10
Cu	RR	Pb-Sb	4,1086	91.21	24,6516	547.26						446.18	886.00	1879.48	0.87
NI	RR	NI	3,3249	285.15	19,3434	470.91	INOXIDABLE	0,9078	88.97	0,9078	88.97	1527.19	886.00	4273.07	1.97
Co		Co	3,3062	526.99	19,5713	2472.31	Fe	1,9078	28.58	17,4315	171.47	5293.14	886.00	9353.11	4.21
Sb		Pb	4,2472	70.42	26,0831	422.52	Al	0,3268	9.48	1,6341	47.39	1789.31	302.00	2513.66	1.16
Ca	RR	Pb	1,4597	17.40	6,9583	104.27	Fe	1,9078	28.58	17,4315	171.47	1724.43	886.00	2886.27	1.32
Zn							Al	0,1685	4.89	0,6740	19.55	590.00	590.00	12709.35	5.80
Gr							INOXIDABLE	0,3866	37.89	1,1598	113.66	179.32	302.00	6677.92	3.08
Mn		Pb-Ag	1,9457	1177.81	9,7285	5889.05					694.64	302.00	1110.30	0.21	
Ag	RR	Ag	0,2194	8031.72	0,2194	8031.72					32.60	166.00	29382.85	13.54	
Fe	RR	grafito	0,1034	9.82	0,3024	11.45	acero	0,1294	7.76	0,3882	23.29	164.92	302.00	501.69	0.22
Au	RR	Au	0,1842	20180.31	0,1842	20180.42	Au	0,2483	27213.82	0,2483	27213.82	81093.56	186.00	128873.80	59.28
TOTALS:			31563.09		47129.29			27842.18		30382.92		130510.70	9025.00	217047.91	

ESTA TESIS SE IMPRIMIO POR COMPUTADORA EN LOS  
TALLERES DE TESIS DE GUADALAJARA, S. A.  
FRENTE A LA FACULTAD DE MEDICINA  
MEDICINA # 25. CIUDAD UNIVERSITARIA.

TELEFONOS: 550-72-57

548-62-15

550-87-43

548-62-29

548-33-44

548-87-46