

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
MANUFACTURERA**

**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**“ACTUALIZACION DEL PROCESO DE  
ELECTROREFINACION DE LA REFINERIA DE COBRE DE  
SOUTHERN PERU PARA UTILIZAR ANODOS CON ALTO  
CONTENIDO DE PLOMO”**

**Tesis de Ingeniería**

**Para optar por el título profesional de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Presentado por**

***JESÚS ENRIQUE RIVERA CHUNGA***

***Bachiller en Ingeniería Química***

**LIMA – PERÚ**

**2001**

**ACTUALIZACION DEL PROCESO DE ELECTROREFINACION DE LA  
REFINERIA DE COBRE DE SOUTHERN PERU PARA UTILIZAR  
ÁNODOS CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO**

**ÍNDICE**

<b>I.-OBJETIVOS:</b>	<b>6</b>
<b>II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>6</b>
<b>III.-DESCRIPCIÓN DE LA REFINERÍA DE COBRE DE SOUTHERN PERÚ</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Planta de ánodos</b>	<b>7</b>
3.1.1 Descripción del proceso de Producción del Ánodo	7
<b>3.2 Planta electrolítica</b>	<b>11</b>
3.2.1 Sección laminas de arranque	11
3.2.2 Sección comercial de planta electrolítica	12
3.2.3 Sección de Purificación	14
<b>3.3 Planta de Metales Preciosos (PMP)</b>	<b>15</b>
<b>IV.-PRUEBAS DE ELECTROREFINACIÓN DE ÁNODOS CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Planeamiento del trabajo de Investigación</b>	<b>18</b>
4.1.1 Etapas del Estudio	18
4.1.2 Cronograma de evaluación de las pruebas	18
4.1.3 Procedimiento de las pruebas realizadas en la Refinería	20
<b>4.2 Controles realizados en las pruebas de electrorefinación</b>	<b>21</b>
4.2.1 Calidad Física del ánodo	21
4.2.2 Peso del ánodo	22
4.2.3 Espesor del ánodo	22
4.2.4 Verticalidad del Ánodo	22
4.2.5 Control de Calidad del ánodo	23
4.2.6 Apariencia del ánodo	23
4.2.7 Calidad Química del ánodo	24
4.2.8 Calidad física de la lamina de arranque	24
4.2.9 Control de Dimensiones	25
4.2.10 Propiedades mecánicas	25
4.2.11 Verticalidad de Laminas de arranque	25
4.2.12 Control de Calidad físico del electrolito	25
4.2.13 Control de Calidad químico del electrolito	26
4.2.14 Estructuración de la celda	28
<b>4.3 Operaciones efectuadas al lodo Anódico.</b>	<b>29</b>
4.3.1 Operaciones realizadas al lodo durante la cosecha de cátodos	29
4.3.2 las operaciones realizadas al lodo después de la cosecha de cátodos	30

4.3.2.1 Medición de la Velocidad de Sedimentación	31
4.3.2.2 Medición del nivel de lodo anódico en una celda	32
<b>4.4 Detalles Técnicos de las pruebas de electrorefinación.</b>	<b>33</b>
4.4.1 Equipos, materiales utilizados durante las pruebas	33
<b>V.-EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS DE ELECTROREFINACIÓN</b>	<b>36</b>
<b>5.1 Resultados de la Primera Etapa de la Investigación por contenido de plomo en el ánodo.</b>	<b>36</b>
5.1.1 Resultados con Ánodos con 100 ppm de plomo	36
5.1.2 Resultados con Ánodos con 200 ppm de plomo	37
5.1.3 Resultados con Ánodos con 400 ppm de plomo	38
5.1.4 Resultados con Ánodos con 800 ppm de plomo	39
5.1.5 Resultados con Ánodos con 1200 ppm de plomo	40
5.1.6 Resultados con Ánodos con 1400 ppm de plomo	41
<b>5.2 Pruebas y Resultados de la Segunda etapa de la Investigación por contenido de plomo en el ánodo.</b>	<b>42</b>
5.2.1 Resultados con Ánodos con 69 ppm de plomo	42
5.2.2 Resultados con Ánodos con 400 ppm de plomo	43
5.2.3 Resultados con Ánodos con 800 ppm de plomo	44
5.2.4 Resultados con Ánodos con 1200 ppm de plomo	45
5.2.5 Resultados con Ánodos con 1600 ppm de plomo	46
<b>5.3 Conclusiones de las pruebas de electrorefinación</b>	<b>47</b>
5.3.1 Resultado № 01: Eficiencia de corriente	47
5.3.2 Resultado № 02: Altura de lodo en celdas	48
5.3.3 Resultado № 03: Contenido de plomo en la parte inferior del cátodo	50
5.3.4 Resultado № 04: Peso de lodo en celdas.	51
5.3.5 Resultado № 06: Rechazo catódico.	52
5.3.6 Resultado № 07: Voltaje de celdas.	52
5.3.7 Resultado № 08: Cortocircuitos.	53
5.3.8 Resultado № 09: Estriación catódica.	53
5.3.9 Resultado № 10: ánodos corroídos.	54
5.3.10 Resultado № 12: Contenido de cobre en el lodo anódico.	55
<b>VI.- PROPUESTA TECNOLÓGICA DE LAS UNIDADES DE PROCESO DE ELECTROREFINACIÓN</b>	<b>56</b>
<b>6.1 Tratamientos de eliminación del plomo en el lodo anódico</b>	<b>58</b>
6.1.1 Proceso № 1 – “Eliminación del plomo como sulfato”	59
6.1.2 Proceso № 2 – “Eliminación del plomo como carbonato”	62
6.1.3 Ubicación de la etapa de decoperizado en el Proceso de Eliminación del plomo.	64
6.1.3.1 Etapa de Decoperizado Antes de la etapa de desplomado	64
6.1.3.2 Etapa de Decoperizado después de la etapa de desplomado	70
6.1.3.3 Comparación entre las etapas de decoperizado antes y después de la etapa de desplomado	70

6.1.4 Evaluación del proceso decoperizado-desplomado a nivel planta piloto	72
<b>6.2 Nuevo tratamiento al lodo anódico</b>	<b>76</b>
6.2.1 Equipos y costo Económico del Nuevo Proceso	78
a) Tanques de sedimentación:	78
b) Tanques de lixiviación:	78
c) Reactor de Carbonatación:	79
d) Reactor con HNO <sub>3</sub> :	79
e) Reactor con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :	80
6.2.2 Costo Económico del Proceso:	80
6.2.2.1 Consumo de reactivos	80
6.2.2.3 Costos de producción en Refinería:	82
<b>VII.-CONCLUSIONES</b>	<b>83</b>
<b>VIII.-BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>84</b>

# **ACTUALIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROREFINACIÓN DE LA REFINERÍA DE COBRE DE SOUTHERN PERÚ PARA UTILIZAR ÁNODOS CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO**

## **I.-OBJETIVOS:**

- El objetivo del presente trabajo, es Actualizar los procesos y operaciones actuales que se manejan en la Unidad de Proceso Planta electrolítica que fue diseñada para utilizar ánodos con bajo contenido de plomo (69 ppm) para Poder utilizar en su proceso de eletrorefinación ánodos con alto contenido de plomo (1000 ppm).
- Actualizar las unidades de proceso de Planta Electrolítica con el fin de que las otras unidades de proceso de Refinería no se vean afectados por el cambio de materia prima en Planta Electrolítica.

## **II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Southern Perú al emprender un plan de reducción de costos en todas sus instalaciones, ha iniciado una modernización de la fundición de cobre de ilo, parta producir cobre blister con calidad de ánodos, teniendo como objetivo la eliminación de la planta de ánodos que existe actualmente en la Refinería de cobre.

Al haber encontrado en sus minas nuevas vetas de cobre con alto plomo, sus concentradoras también producirán concentrados con alto contenido de plomo, estos concentrados serán procesados por fundición donde la nueva tecnología no es capaz de eliminar el exceso de plomo que hay en el cobre, debido ha ello producirá ánodos de cobre con alto plomo, creando un problema para la Refinería de cobre.

El problema consiste en que la Refinería de cobre encargada de refinar el cobre, sus procesos y operaciones fueron diseñados para utilizar ánodos de cobre con 69 ppm de plomo, pero al recibir ánodos con aprox. 1000 ppm de plomo tendrá problemas de saber hasta cuanto de concentración de plomo podrá trabajar refinería sin la planta de ánodos y su impacto de este en el aspecto económico.

### **III. DESCRIPCIÓN DE LA REFINERÍA DE COBRE DE SOUTHERN PERÚ**

La refinería de Cobre de Southern se encuentra ubicada en la ciudad de Ilo que esta en la costa sur del Perú, Departamento de Moquegua, Capital de la provincia de Ilo, Ubicada a 324 Km de la capital de Lima, Se ubica en una altitud de 0 m.s.n.m. geográficamente en las coordenadas 14°49' de latitud sur y 74°55' de longitud oeste.

La Refinería de Cobre consiste en una Planta de Ánodo, Planta Electrolítica, Planta de Metales Precios, un laboratorio analítico, talleres de mantenimiento y una planta del desalinización. Los productos de la Refinería de Ilo incluyen el cátodo de cobre de alta calidad, plata refinada, oro refinado, selenio y sulfato de níquel crudo.

#### **3.1 Planta de ánodos**

La Planta del Ánodo es el lugar donde se producen los ánodos, consiste en 2 hornos Maerz que se inclinan, un sistema DEMAG de vaciado de 26 moldes, y una prensa del ánodo. Se cargan cobre Blister y ánodos corroídos en cada uno de los hornos Maerz con 400 toneladas métricas (TM) el lote, fundido y refinado. El objetivo de planta de ánodos es transformar mediante un proceso de prerrefino al fuego el cobre ampoloso (99.4% Cu) en ánodos (99.7%), dándole las características físicas y químicas para ser refinados en Planta Electrolítica.

##### **3.1.1 Descripción del proceso de Producción del Ánodo**

Refinería recibe de Fundición el cobre Blister (cobre ampoloso) de 744 kg/cu con un contenido de cobre al 99.39 %, que es transportado por el ferrocarril S.P.C.C. hacia la Planta de Ánodos. Estos Blister son descargados con la grúa descargador de blister.

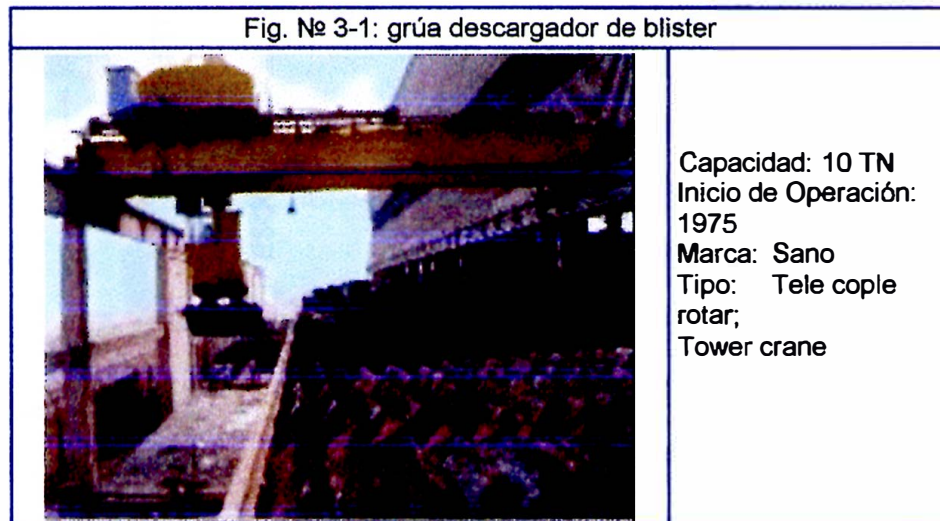


Tabla № 3-1: composición química del cobre ampoloso (Blister) recibido

Cu	Ag	Au	Se	Ni	Pb	Bi	As	Sb	Te	S	O <sub>2</sub>
%	Oz/Tc	oz/Tc	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
99,393	13,59	0,017	0,0129	0,0092	53	17	171	51	7	331	4181

La Planta de ánodos posee dos hornos maerz los cuales convierte el cobre ampoloso (blister) de 99.4% a cobre anódico de 99.7% en Cu, las etapas de Operación del horno maerz son:

- a. **Carguio.-** El blister llegado de la fundición de ilo después de pesarlo, descargarlo, hacer un muestreo es cargado en los hornos de fusión, junto con ánodos corroídos, desechos.

Fig. № 3-2: maquina cargadora de blister



Capacidad: 4.5 Tn  
Marca: DANGO &  
DINENTHAL  
SIEGEN CALEMAN  
Tipo: Operador  
Hidráulica  
Duración: 4 horas

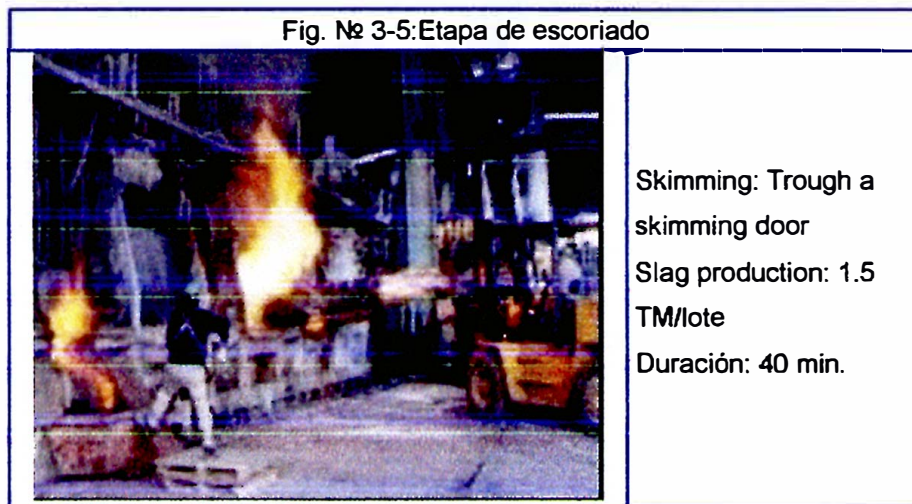
- b. **Fusión.-** Etapa en que la carga del horno pasa del estado sólido al estado líquido, alcanzando el horno una temperatura de 1200 a 1300 °C. Esta etapa dura un promedio de 4 horas.

Fig. № 3-3: Horno con balanceo para ánodos

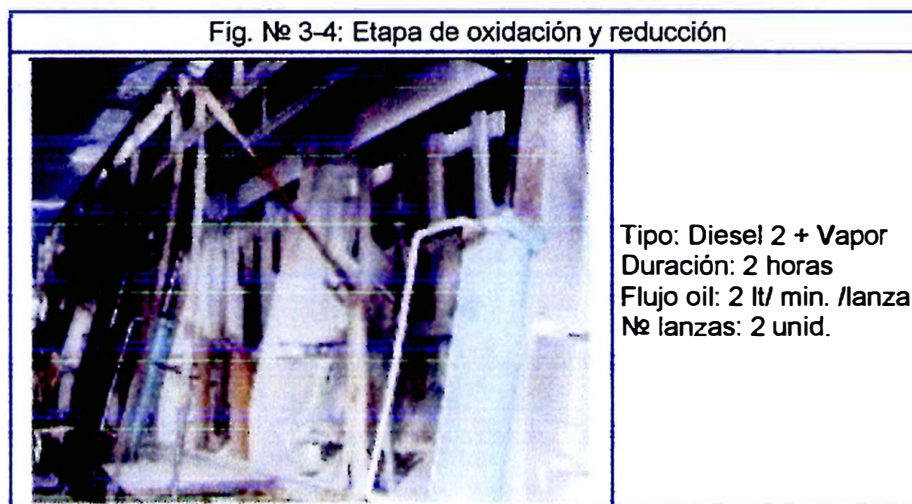


Capacidad: 440 Tn  
Año de Operación:  
1975  
Marca: Maerz  
combustión: fuel oil R-  
600 + Aire

- c. **Oxidación.-** Se insufla aire al baño, con la finalidad que las impurezas se oxiden, aprovechando la poca afinidad que existe entre el cobre y el oxígeno. La acción oxidante del óxido de cobre en el horno hace que algunas impurezas traten de formar escorias, otras volatilizar ( $\text{SO}_2$ ) y algunas se resisten a la acción del fuego son eliminadas en la electrolisis, esta etapa dura aprox. 2 horas.
- d. **Escoriado.-** Etapa se realiza de forma manual y es la que se evacua la escoria y, la que esta fundamentalmente formada por los óxidos: óxido férrico, óxido de calcio y bióxido de silicio y además contiene 20% de cobre oxidado. Esta etapa es de 40 min a 1 hora aprox.



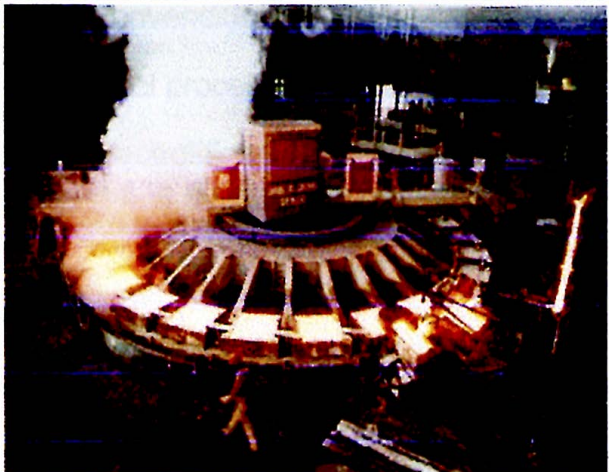
- e. **Reducción.-** consiste en la eliminación del oxígeno en exceso que hay en el baño, esto se hace mediante la adición de diesel y vapor, que mediante la combustión elimina el oxígeno y por arrastre, esta etapa es de 2 horas aprox.





- f. **Moldeo.**- Etapa final del proceso y consiste en moldear la carga de ánodos comerciales y ánodos stripper en un dispositivo completamente automático, como es la rueda de moldeo. El peso de cada ánodo es de 440 Kg, esta etapa dura 5 a 6 horas aprox.

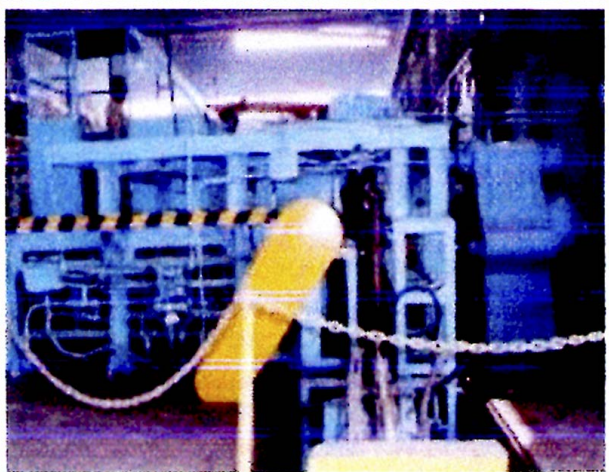
**Fig. № 3-6: Maquina automática de moldeo**



Capacidad: 70 TM/hora  
 Marca: Demag  
 Rueda Moldeo: WITELL  
 DEMAG  
 Sistema pesado:  
 OUTOKUMPU WENMEC  
 Moldes: 26  
 Tipo: Operado Automático

Después del moldeo los hornos son enfriados y llevados hacia la maquina prensadora de ánodos, con el fin de mejorar su verticalidad y luego son almacenados en el patio.

**Fig. № 3-7: Prensa de ánodos**



Capacity: 2 piezas/min.  
 Manufacturers:  
 FURUKAWA MITSUBISHI  
 CORP. KAWAZOE  
 MACHINE WORKS. LTD.

**Tabla № 4-1: la Composición del Ánodo Típica**

Cu	Ag	Au	Pb	Fe	As	Sb	Bi	Te	S	O <sub>2</sub>
99.6	11.9	0.07	69	39	405	36	15	17	33	1685

En ppm, excepto el Cu %, Ag y Au en TO/ton

## **3.2 Planta electrolítica**

La Planta Electrolítica es la encargada de producir cátodos, esta planta está localizada adyacente a la Planta de Ánodo, tiene una área operativa total de 5,300 m<sup>2</sup> y tiene una capacidad de 254,200 mtpy. Hay **926 celdas comerciales** y **52 celdas de purificación**. Cada celda contiene 52 ánodos y 53 cátodos. La Planta Electrolítica utiliza tecnología convencional con un sistema de contacto de Alambrita.

### Descripción del proceso de Producción del Cátodo

La Planta electrolítica es la encargada de refinar el cobre anódico en un cobre de alta pureza mediante un tratamiento electrolítico, donde su producto principal es el cátodo. Esta se divide en tres secciones:

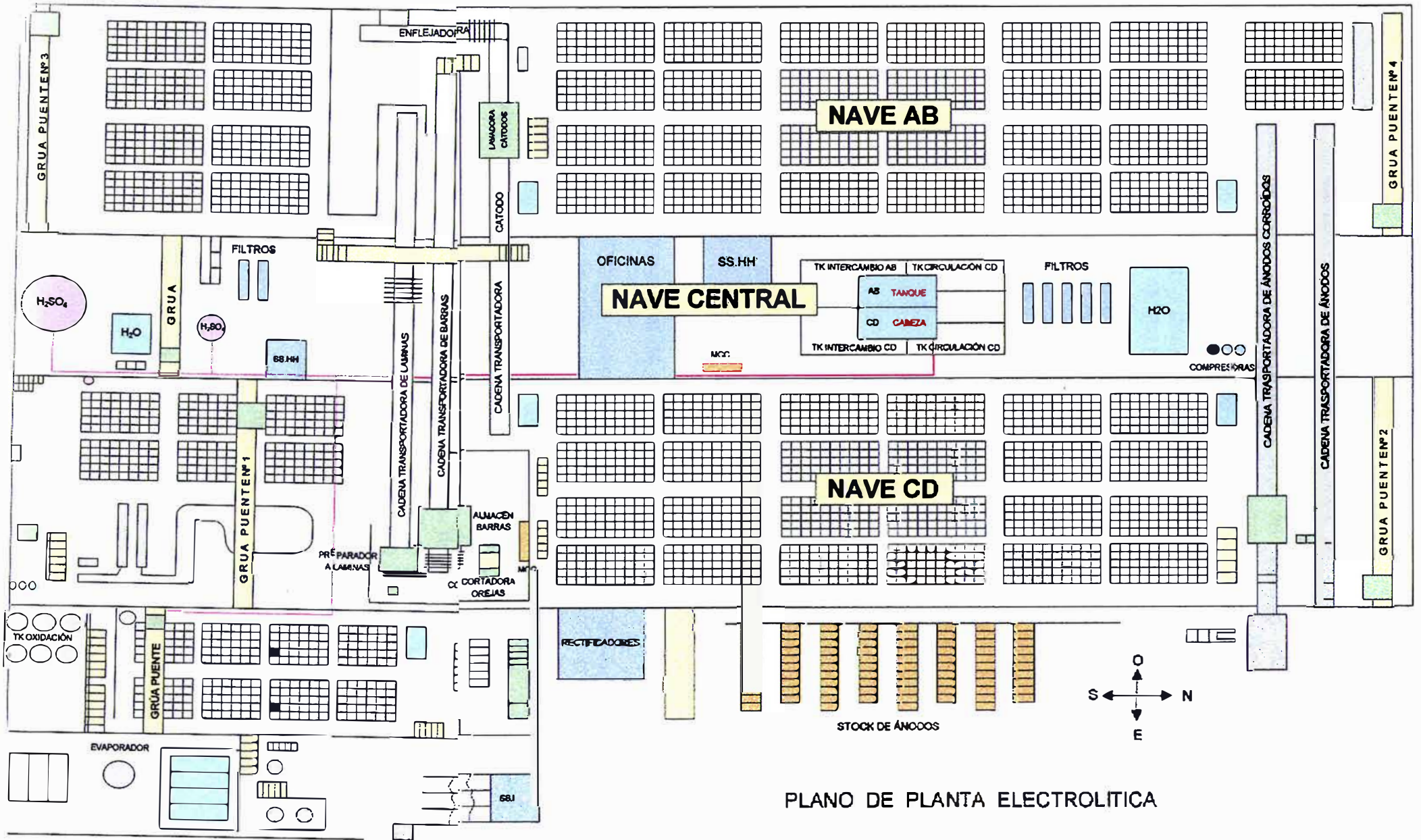
- Laminas de arranque (SST)
- Sección comercial
- Sección de Purificación

### **3.2.1 Sección laminas de arranque**

El objetivo principal de esta sección es de producir laminas de buena calidad (peso, verticalidad, calidad física y química). En la sección de laminas de arranque o también llamada SST, es la que se encarga de producir las hojas de inicio de cobre de alta pureza (laminas de arranque) que son utilizadas en la siembra de las celdas electrolíticas, en las cuales se deposita electrolíticamente el cobre de alta pureza para formar el cátodo.

Esta sección consta de 52 celdas cada una, con 54 ánodos stripper y 53 planchas madre, cada plancha madre produce 2 laminas de arranque.

Las planchas madres son sacadas de las celdas con la grúa puente, que las deposita en la máquina transportadora de laminas, esta máquina se encarga de lavar las laminas en agua caliente para eliminar el sulfato, y permiten la manipulación por parte de los operadores con el fin de sacar las laminas de cobre de ambas caras, los cuales a su vez realizan un control de calidad de las laminas de acuerdo a su depósito y a su peso (criterio del trabajador), donde las laminas de buena calidad se utilizan para hacer laminas de arranque y las que son de mala calidad se juntan para ser vendidas como cobre. El exceso de producción de laminas de arranque, se juntan en grupos que pesan 400 Kg, y se embalan para ser comercializados como cobre.



PLANO DE PLANTA ELECTROLITICA

Parte de las laminas son cortadas en forma rectangular para sacar orejas de ellas (asas de soporte de la lamina) y la otra parte es enviada hacia la maquina preparadora de laminas, donde son enderezadas y se le coloca las orejas con remache a las laminas y se encargan de darle el estampado característico de la lamina (dicho estampado con relieve permite la no-acumulación de lodo flotante en los bordes inferiores) y después se le coloca la barra de agarre de la lamina que es de cu de alta pureza.

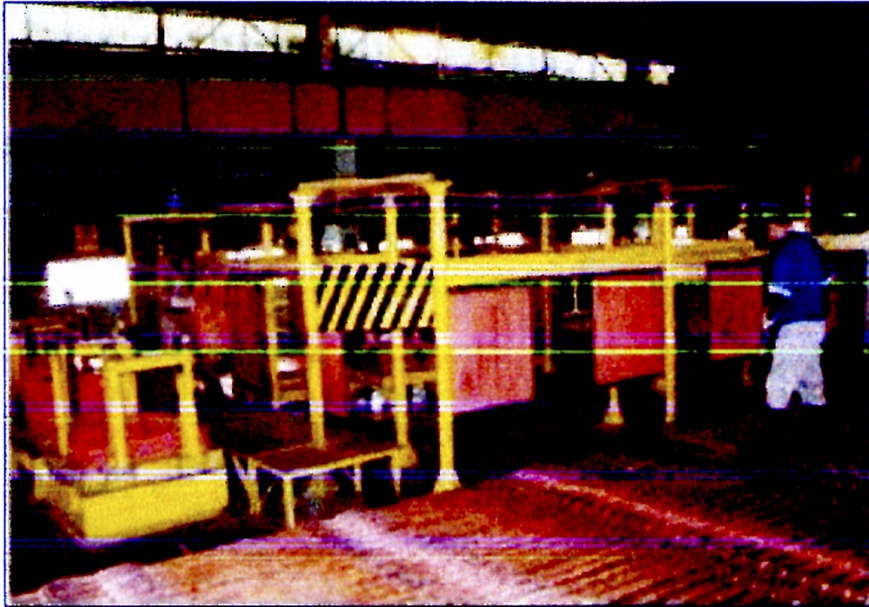


Fig. Nº 3-8: Sección Laminas de arranque

### 3.2.2 Sección comercial de planta electrolítica

La Planta Electrolítica se comprende de tres naves paralelas. Las dos naves del exterior se usan para la producción del cátodo y producción de laminas de arranque, y manejo de materiales, mientras la nave del centro se usa para la circulación del electrolito y almacenamiento. Los equipos que manejan materiales situadas dentro de la Planta Electrolítica son: para espaciado del ánodo, lavado de desechos del ánodo, separación de lámina de arranque, preparando y transporte, lavadora del cátodo, pesando y empaquetando:

- a. Nave AB (lado mar)
- b. Nave Central ( esta sección no produce cobre, ahí residen los equipos tales como poliblocks, filtros, tanques, etc.)
- c. Nave CD (lado cerro), las naves AB y CD son las encargadas de producir los cátodos.

La sección comercial consta de 926 celdas, con 52 ánodos y 53 cátodos de cobre, cada ánodo produce 2 cosechas, cada 14 días.



Fig. № 3-9: Sección Comercial de Planta Electrolítica

A planta electrolítica ingresan los ánodos de 99.7% en Cu. Los ánodos que se van a procesar son transportados con montacargas hacia la maquina espaciadora de ánodos, esta maquina se encarga de espaciar los ánodos para que puedan ser manipulados por la grúa puente (22 Tn de capacidad de 4 brazos de 5 ton / cu) que se encarga de transportarlos a las celdas que van ha sembrarse.

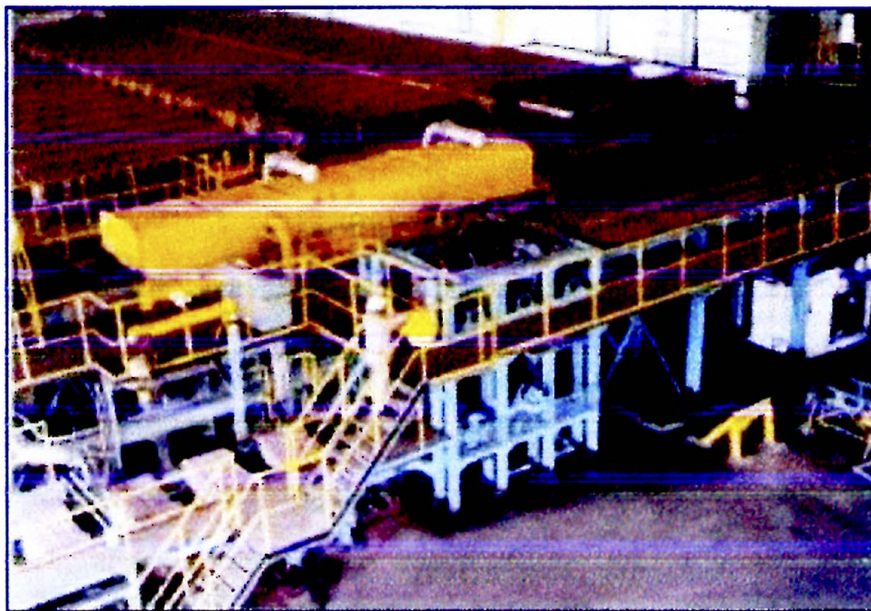


Fig.. № 3-10 : Maquina espaciadora de ánodos y maquina lavadora de ánodos corroídos

Una vez que los ánodos hallan sido espaciados adecuadamente, 52 ánodos con 53 laminas de arranque se transportan a la celda acondicionada la cual se cosecha después de 14 días.



Fig. № 3-11: Grúa puente utilizada en el acondicionado de una celda

Una vez cosechada los cátodos son contados, lavados, pesados y embalados para su embarque.



Fig. № 3-12: Inspección de los cátodos



Fig. № 3-13 balanza de cátodos

### 3.2.3 Sección de Purificación

Los principales objetivos de purificación son:

1. Purificar el electrolito, eliminando impurezas en segunda liberadora y evaporador según los requerimientos de comerciales.
2. Tratar el lodo anódico, obteniendo lodo con menos de 2% de cobre.

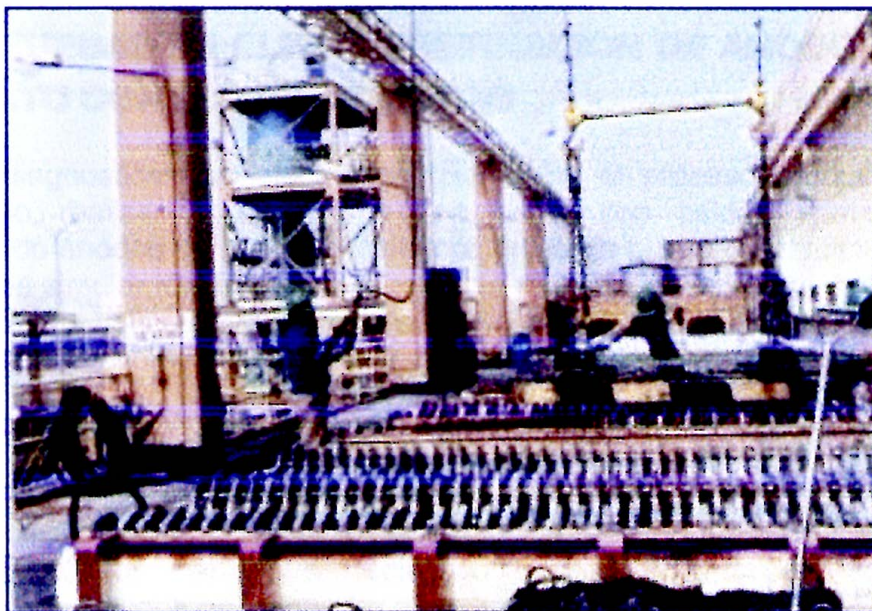


Fig. № 3-14: Planta de purificación de la refinería de Ilo

La sección de purificación se divide en 2:

1. **Primera Liberadora**, que consta de 4 secciones de 4 celdas cada una, cada celda esta conformada por 53 ánodos de plomo-antimonio de 150 kg y 52 laminas de arranque.
2. **Segunda Liberadora**, Consta de 4 secciones de 6 celdas cada una, el flujo de electrolito en cada celda de una sección es en cascada, elimina el cobre de 30 a 0.01 gr/lt.

Celdas 1,2 y 3: 53 ánodos Pb-Sb y 52 SST.

Celdas 4,5 y 6: 27 ánodos Pb-Sb y 26 ánodos corroídos.

A la segunda y ultima etapa liberadora le sigue la evaporación de la mayor parte del agua del electrolito. Esto causa que el sulfato de níquel precipite de la solución y junto con él, los sulfatos de hierro y cobalto. Por consiguiente, lo anterior da por resultado la eliminación de las ultimas impurezas dañinas. El sulfato de níquel, contaminado con Cu, As, Sb, Bi, Fe y Co, se purifica y se vende para deposito electrolítico y otros usos químicos.

### 3.3 Planta de Metales Preciosos (PMP)

La planta de metales preciosos trata todo el lodo generado en la Planta Electrolítica. Equipo de la planta consiste en un Reactor Wenmec de selenio, horno de Dore, celdas de THUM y hornos de inducción. La Planta de metales preciosos tiene la capacidad de producir 2,800,000 onzas Troy de plata por año y produce gránallas y "lingotes". La PMP también recupera 5,000 a 15,000 onzas Troy de oro refinado por año y un selenio de calidad comercial.

## **IV. PRUEBAS DE ELECTROREFINACIÓN DE ÁNODOS CON ALTO CONTENIDO DE PLOMO**

Para diagnosticar los efectos del plomo en el proceso productivo se planifico realizar pruebas a escala piloto con celdas comerciales, utilizando ánodos de cobre con alto contenido de plomo desarrollados con el fin de simular los ánodos que refinería recibiría en un futuro cercano, y se trabajo a las celdas a las mismas condiciones de una celda electrolítica de la sección comercial, pero antes debemos saber que es una refinación electrolítica.

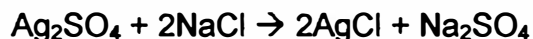
### **Fundamentos de la Refinación electrolítica del cobre**

La electrorefinación consiste en la disolución electroquímica del cobre de ánodos impuros y él deposita selectivo de este cobre disuelto en forma pura sobre cátodos de cobre. La electrorefinación tiene dos objetivos:

- a) Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre. La pureza del cobre electrorefinado es mayor del 99.9% de Cu, con menos de 0.004% de impurezas metálicas (incluyendo azufre) lo cual es apropiado para todos los usos industriales, incluyendo las aplicaciones de ingeniería eléctrica. Esta pureza no se obtiene mediante las técnicas de refinación térmica.
- b) La electrorefinación separa las impurezas valiosas del cobre. Estas pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

### **Comportamiento de las impurezas del ánodo**

- 1) **Ag, Au y metales del grupo del platino**, el oro y los metales del grupo del platino no se disuelven en el electrolito de sulfato y, por lo tanto, no pasan al electrolito ni se depositan en el cátodo. La plata contenida en el ánodo se disuelve hasta un cierto grado en la forma de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ , pero precipita a partir del electrolito con  $\text{AgCl}$  si se disuelve en el electrolito una pequeña cantidad de  $\text{NaCl}$ , hasta de  $0.05 \text{ kg/m}^3$  o  $\text{HCl}$ .



- 2) **S, Se y Te**, el azufre, selenio y telurio están presentes en los ánodos como compuestos con cobre, plata o con ambos; En formas como por ejemplo  $\text{Ag}_2\text{Se}$ ,  $\text{Cu}_2\text{Se}$ ,  $\text{Ag}_2\text{Te}_4$  o  $\text{Cu}_2\text{S}$ , no se disuelven electroquímicamente en el electrolito. Estos compuestos, por consiguiente, pasan principalmente a los residuos de ánodos (slimes o lodos) de una manera similar a los metales nobles. El  $\text{Cu}_2\text{O}$  se puede asignar a este grupo, el  $\text{Cu}_2\text{O}$  se disuelve parcialmente y parte pasa hacia el lodo por la reacción:





- 3) **Pb y Sn**, el plomo y el estaño forman sulfatos que son insolubles en el electrolito ( $\text{PbSO}_4$  y  $\text{Sn}(\text{OH})_2\text{SO}_4$ ) y, por lo tanto, estos no forman parte del electrolito en grado apreciable.
- 4) **As, Bi, Co, Fe, Ni y Sb**, todos los metales son menos nobles que el cobre y los que se encuentran en el ánodo tienden a disolverse electroquímicamente junto al cobre del ánodo. Y aun mejor que este metal. Tienden, por lo tanto, a aumentar paulatinamente dentro del electrolito durante la electrorefinación. Estas impurezas deben eliminarse del electrolito o, con el tiempo, contaminarán el cobre catódico.

En el electrolito el arsénico está presente en forma del anión  $\text{AsO}_4^{3-}$ . Cuando el electrolito no contiene antimonio y bismuto, el arsénico no tiene efectos en el proceso electrolítico, pero si el antimonio y el bismuto están presentes en la solución puede formar con ellos el compuesto insoluble de  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{As}_2\text{O}_5$  y  $\text{SbAsO}_4$ , que se separa del electrolito en forma de finas partículas, formando un "lodo flotante". Este lodo se adhiere al cátodo y lo contamina.

Para prevenir el depósito de antimonio, arsénico y bismuto en el cátodo es necesario mantener su contenido lo más bajo posible en el electrolito, mantener una alta concentración de ácido sulfúrico en el electrolito (la concentración del  $\text{Sb}^{3+}$  y  $\text{Bi}^{3+}$  disminuyen con el aumento de la concentración del  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y mantener una suficiente concentración del ion  $\text{Cl}^-$  en el electrolito (este ayuda al paso del arsénico y antimonio a pasar al lodo como resultado de la formación de bases pobremente solubles de cloruro de arsénico y oxiclóruo de antimonio). Siendo por ello necesario filtrar periódicamente al electrolito.

## El electrolito

El electrolito contiene de 40 a 50 Kg de Cu por  $\text{m}^3$ , de 180 a 200 Kg de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  libre por  $\text{m}^3$  e impurezas (principalmente Ni, As, Fe, y Sb). También contiene abrillantadores y suavizadores de superficie orgánicos. El electrolito se mantiene caliente por medio de vapor a una temperatura de  $65^\circ\text{C}$  (a la entrada de la celda) la cual cae hasta  $60^\circ\text{C}$  (a la salida de la celda) durante la circulación de las celdas. La circulación a través de las celdas es del orden de  $0.02 \text{ m}^3/\text{min}$  Lo cual significa que una celda cambia su electrolito una vez cada 5 o 6h. La circulación es esencial para transportar desde la celda las impurezas disueltas, para asegurar concentraciones uniformes del ión cobre en las superficies del electrodo y restituir los aditivos orgánicos.

**Aditivos orgánicos para el electrolito**, La adición de aditivos al electrolito tiene un efecto favorable en la estructura del depósito en el cátodo. En efecto, los depósitos en los cátodos obtenidos con un electrolito de sulfato de cobre y ácido sulfúrico sin aditivos orgánicos son planos y burdamente cristalinos o ondulares. En cambio si se agregan aditivos orgánicos al electrolito, el depósito que se obtiene sobre el cátodo durante la electrorefinación es brillante y de superficie suave.

## **4.1 Planeamiento del trabajo de Investigación**

Aquí se realiza la planificación de todo el programa de pruebas de electrorefinación utilizando ánodos de cobre con alto contenido de impurezas de plomo, en cuantas etapas se realizara el estudio y la duración de ellas, hasta con que cantidad de plomo en los ánodos se van ha realizar las pruebas y definir el procedimiento general par cada una de las pruebas experimentales.

### **4.1.1 Etapas del Estudio**

El programa de pruebas para evaluar el proceso de hacer la electrorefinación con ánodos con alto contenido de plomo se divide en dos etapas:

#### **a. Primera Etapa de la Investigación:**

El objetivo de esta primera etapa es adquirir experiencia operativa para hallar las variables tales como: eficiencia de corriente eléctrica, velocidad de sedimentación, altura de lodos, contaminación química del cátodo, en esta etapa se utilizaron ánodos con contenidos de desde 100, 200, 400, 800, 1200 y 1400 ppm, esta primera etapa tuvo una duración de 3 meses aprox.

#### **b. Segunda Etapa de la Investigación**

Una vez haber estudiado los parámetros que resultan modificados y de haber adquirido la experiencia necesaria en la operación de celdas con alto contenido de plomo, en esta etapa se evaluaron ánodos con plomo desde 400, 800, 1200 y 1600 ppm.

En esta etapa se hallaron los valores necesarios de los parámetros más importantes en el proceso de electrorefinación con ánodos de alto contenido de plomo a escala industrial.

### **4.1.2 Cronograma de evaluación de las pruebas**

#### **Primera Etapa de la Investigación**

A continuación se detalla el cronograma de la primera etapa de evaluación del proyecto: la electrorefinación de ánodos con 100, 200, 400, 800 y 1400 ppm de plomo.

Sección Nº	Celdas Nº	Test Nº	Plomo ppm	Fechas					
				28-Jun	12-Jul	26-Jul	09-Ago	10-Ago	21-Ago
80	14-15	1	100	Siembra	I COS	II COS			
80	12-13	1	200	Siembra	I COS	II COS			
70	14-15	2	400		Siembra	I COS	II COS		
70	12-13	2	800		Siembra	I COS	II COS		
80	14-15	3	1200			Siembra	I COS	II COS	
80	12-13	3	1400			Siembra	I COS	II COS	
<b>Informe</b>									<b>X</b>

### Segunda Etapa de la Investigación

La siguiente tabla detalla el cronograma para la segunda etapa de evaluación del proyecto: la electrorefinación de ánodos con 400, 800, 1200 y 1400 ppm de plomo.

sección Nº	Celda Nº	Plomo ppm	Fechas								
			06-Sep	20-Sep	04-Oct	18-Oct	01-Nov	15-Nov	29-Nov	13-Dic	14-Dic
70	8-9	400	Siemb.	I COS	II COS						
70	10-11	800	Siemb.	I COS	II COS						
80	8-9	400		Siemb.	I COS	II COS					
80	10-11	800		Siemb.	I COS	II COS					
70	8-9	400			Siemb.	I COS	II COS				
70	10-11	800			Siemb.	I COS	II COS				
80	8-9	1200				Siemb.	I COS	II COS			
80	10-11	1600				Siemb.	I COS	II COS			
70	8-9	1200					Siemb.	I COS	II COS		
70	10-11	1600					Siemb.	I COS	II COS		
80	8-9	1200						Siemb.	I COS	II COS	
80	10-11	1600						Siemb.	I COS	II COS	
<b>Informe</b>											<b>X</b>

- I COS: Primera cosecha de cátodos; II COS: segunda cosecha de cátodos

**Etapa 1**

**Etapa 2**



#### **4.1.3 Procedimiento de las pruebas realizadas en la Refinería**

- a. Se confecciona un programa de pruebas por triplicado de Ánodos de diferentes contenidos de plomo programados a partir del 6 de septiembre, finalizando el 28 de junio. (Según Programa de pruebas I Etapa)
- b. Inicialmente se hizo preparación de 02 celdas con ánodos conteniendo valores de plomo de 100,200,400,800,1200 y 1400 ppm de Plomo.
- c. Conforme avanza la investigación se utilizo las 4 celdas de una sección de modulo piloto, es decir 02 celdas con un mismo contenido de plomo en ppm y las otras 2 celdas con un mismo contenido de plomo en ppm, pero diferente a las dos primeras. Esto se hizo para la primera etapa del proyecto.
- d. Procesamiento en las celdas del módulo Piloto (S-70 y S-80), es decir se realiza la operación de carguio, acondicionado y revisión de la misma manera que en las demás celdas y condiciones operacionales iguales a la sección comercial. Circuito de circulación de electrolito abierto.
- e. Registro y control de las variables operacionales para cada sección en prueba: Voltajes, Temperatura y evaluación de curvas de sedimentación del lodo anódico, tomados a la misma temperatura de electrolito en celdas.
- f. Se realizan cortes de circulación de electrolito por 2 horas y cortes de corriente de 5 minutos, para cada cosecha; observando posteriormente el comportamiento del lodo flotante y Lodo en suspensión.
- g. Pesado de lodo anódico en celdas con ánodos con 400, 800 y 1400 ppm de Plomo.
- h. Registro del Rechazo Catódico, Lodo Flotante, Calidad física, Altura de lodos en celdas, Eficiencia de corriente, Estricción y Calidad Química.

Cabe recordar que el tiempo de duración de un ánodo es de 28 días y este a sus ves produce dos cosechas de cátodos cada una a 14 días de sembrada la lamina de arranque y que el lodo anódico se produce a los 28 días de sembrado el ánodo.

## 4.2 Controles realizados en las pruebas de electrorefinación

Control físico involucra:

- Control de las dimensiones y verticalidad de ánodos y laminas de arranque.
- Limpiando los contactos eléctricos antes de los nuevos electrodos se carguen a las celdas.
- El uso de luces en el fondo de celdas para la estructuración del electrodo inicial.
- Asegurando que los electrodos se alinean propiamente antes de llenarlas celdas con electrolito.
- Supervisión de celdas para el descubrimiento corto y la acción correctiva subsiguiente

Control del proceso involucra:

- Controlando el contenido de arsénico en el blister y en el ánodo de cobre ajustando relación molar de  $As/(Bi+Sb)$  a través de la adición de  $As_2O_3$  a los hornos del ánodo
- Sacando una muestra y analizando rutinariamente el cobre del ánodo para asegurar que cumple con los requisitos de la composición específicos
- Controlando componentes importantes en electrolito
- Inspecciones diarias al cátodo para determinar calidad de la superficie depositada
- Medida rutinaria de distribución de corriente de electrodo y voltajes de la celda
- Proporciones de adición estables de reactivos (ningún cambio arbitrario se produce)

### 4.2.1 Calidad Física del ánodo

Los ánodos, con un peso del promedio de 440 kg, son moldeados en una rueda de DEMAG de 26 moldes, una proporción media de moldeo de 70 TM/hora. Después de enfriar, los ánodos se sacan al tanque de enfriamiento y entonces se pasan al cargador frontal y llevado a la prensa. En la Refinería de cobre de Ilo, la prensa de ánodos constituye la magnitud completa de preparación del ánodo.

La calidad del ánodo empieza antes de la operación de moldeo, con un programa eficaz de mantenimiento del molde. Cada molde se nivela y se limpian antes de iniciar el moldeo. Dentro de los primeros 30 minutos de cada molde, un número especificado de ánodos se saca y sus dimensiones físicas se verifican.

#### 4.2.2 Peso del ánodo

El peso del ánodo promedio se registra y en caso de que una variación sea conocida, el recientemente instalado sistema Outokumpu que pesa puede ajustarse en consecuencia. De hecho, desde la instalación del nuevo sistema del peso, en 1997 de abril, > 95% de todos los ánodos producidos han estado dentro de  $\pm 1$  kg de los 440 kg el peso del ánodo designado.

#### 4.2.3 Espesor del ánodo

Temprano en cada moldeo, se saca una muestra del ánodo y se toma de cada molde y se verifica en varias direcciones para el espesor del cuerpo. Ninguna diferencia de más de 3mm se acepta entre las direcciones controladas. Si una variación grande es conocida, el molde es sacado de la rueda. Esto asegura que la producción de variaciones en ánodos se minimiza. Figura Nº4-1 muestras operación de verificar el peso del ánodo y dimensiones del ánodo.



Fig. Nº 4-1: operario midiendo el espesor de un ánodo de cobre.

#### 4.2.4 Verticalidad del Ánodo

La verticalidad del ánodo se verifica dos veces por semana. Un número especificado de ánodos prensados se cuelga en una estructura diseñada para simular condiciones reales en una celda electrolítica. Una línea de plomo se usa como una referencia paralela para el cuerpo del ánodo, y la distancia. Entre el cuerpo del ánodo y el cordel de plomo tomado en varias ubicaciones pre-determinadas. Una variación del máximo de 10 mm se permite.

La característica técnicas de calidad interior requiere que 85% de los ánodos caigan dentro de esta especificación.

Si la verticalidad está fuera de este rango, entonces se llevan a cabo acciones correctivos inmediatamente. Estas acciones pueden traer consigo reemplazo de moldes del ánodo y una inspección de mantenimiento completo de la prensa del ánodo. Fig. №4-2 ilustra medida de verticalidad de ánodo que se realiza.



Fig. № 4-2: medida de la verticalidad de un ánodo de cobre.

#### 4.2.5 Control de Calidad del ánodo

- Bajo las condiciones controladas, la distancia que lleve del fondo a la cima del puente debe ser 100–110 mm que cualquier variación encontrada es normalmente debido a la condición de la matriz usada para hacer nuevos moldes del ánodo. Si la distancia que lleve del puente es mayor que 110 mm, el nivel del electrolito en el tanque podría estar por encima del puente en el ánodo y podría causar la caída del ánodo después de un periodo de disolución.
- La cara de contacto que lleva el ánodo debe ser llano. Si hay cualquier deformación en la naturaleza que lleve, en términos de distorsión, o si hay una cara del contacto pobre, el ánodo se desecha.
- Se toman medidas para asegurar que esta distancia se mantiene de forma consistente, desde que esto asegura alineación apropiada en las celdas. Adicionalmente, cada ánodo lleva tiene una marca que se usa como un punto de la referencia para alinear de nuevo las laminas de arranque en las celdas.

#### 4.2.6 Apariencia del ánodo

Las Barbas (protuberancias) en los ánodos, como resultado del proceso del vaciado, se elimina antes de a enviarse a la Planta Electrolítica. Se inspeccionan las ocurrencias de grietas del puente, con un máximo límite aceptable de 1%. La superficie del ánodo también se inspecciona para los materiales exteriores como refractario, escoria, lavado del molde, marcas de pin, o aumento del polvo debido a fuera de las áreas del almacenamiento.

#### 4.2.7 Calidad Química del ánodo

En la actualidad, con una Densidad de Corriente (CD) de 241 Amp/m<sup>2</sup>, una proporción del molar As/(Bi+Sb) de 10 está usándose con éxito. El programa de la prueba también estableció que los resultados mejoraron cuando el As(+++) se agregó a los hornos del ánodo y no al electrolito. Actualmente se agrega As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polvo durante refina fase de fusión, con un nivel designado de 375±25 ppm en el cobre del ánodo. Esta capacidad del control mejoró el funcionamiento significativamente en la Planta Electrolítica, permitiendo aumentos en CD manteniendo CE alto. Tabla N° 4-1 muestra la composición del ánodo típica.

Tabla N° 4-1: la Composición del Ánodo Típica

Cu	Ag	Au	Ni	Pb	Fe	As	Sb	Bi	Te	Sn	S	O <sub>2</sub>
99.6	11.9	0.07	110	69	39	405	36	15	17	0.8	33	1685

En ppm, excepto el Cu %, Ag y Au en TO/ton

#### 4.2.8 Calidad física de la lamina de arranque

Se producen láminas del arranque en planchas madre de cobre, durante un período de 22 horas a una CD de 237 Amp/m<sup>2</sup>. Las hojas son 1010 x 1010 mm, y 0.75 mm en espesor. Las hojas pesan 7 Kg y no requieren que arreglen el borde antes de utilizarse. Las laminas de arranque son despojadas con la mano por operadores experimentados quienes tienen la responsabilidad para verificar las laminas para la apariencia física, peso y bordes libre de los defectos. Actualmente, la proporción de laminas de arranque en desecho es 5% de la producción de la laminas total.

Las laminas que se procesan seguidamente en las celdas comerciales son de la calidad más alta y contribuyen a una Eficiencia de Corriente (CE) alta en la Refinería de Ilo. Debido la naturaleza limpia de ánodos, la caída de los lodos resultante es 1 kg por la tonelada de cátodo. Como resultado, después de que las laminas de arranque se han ensamblado, un dibujo realzado se prensa en cada lamina. Una lamina de arranque realzada se muestra en Figura N° 4-3.



Fig. N° 4-3: estampado típico de una lamina de arranque



#### 4.2.9 Control de Dimensiones

Un número especificado de laminas de arranque juntas, seleccionadas al azar, se verifica dos veces por semana para asegurar la tolerancia dimensional requerida. Si cualquier pérdida temporal de control es hallada, un aumento de las juntas por bordes ocurre y suma al aumento el corto circuitos.

#### 4.2.10 Propiedades mecánicas

Las muestras sacadas de las laminas se verifican para dureza ( $\approx 60$  Rockwell B), y plasticidad. El valor de plasticidad internamente definido es una proporción de espesor de la hoja a la deformación. En el evento que estos parámetros están fuera del rango definido, se hacen ajustes pequeños al equilibrio del reactivo en la sección de la lamina de arranque

#### 4.2.11 Verticalidad de Laminas de arranque

La verticalidad de la lamina de arranque se verifica dos veces por semana. Se toman medidas a los puntos cada 10 cm a lo largo del cuerpo de la hoja del juez de salida en un marco que simula una celda. La desviación aceptable de la verdadero verticalidad de 5 mm. La Figura № 4-4 muestra el proceso de medidas de la verticalidad. Las características técnicas de calidad interiores requieren que  $>85\%$  de la caída de las laminas dentro de esta especificación. Mientras alguna pérdida de verticalidad puede ser corregida seguidamente por los operadores de intercambio de electrodo, cualquier problema



Fig.№ 4-4: medida de verticalidad de una lamina de arranque.

significante con verticalidad produciría una reparación general de mantenimiento de la prensa de laminas de arranque. Además de las medidas de la verticalidad, hay una diaria inspección visual de las laminas de arranque en planta por el personal técnico.

#### 4.2.12 Control de Calidad físico del electrolito

- El contenido de los sólidos se controla y debe estar menos de 5 ppm. Por otra parte, la formación del nódulo se observa en la superficie del cátodo. Dependiendo en los informes del

laboratorio, la operación de filtración se verifica si el contenido de los sólidos es alto.

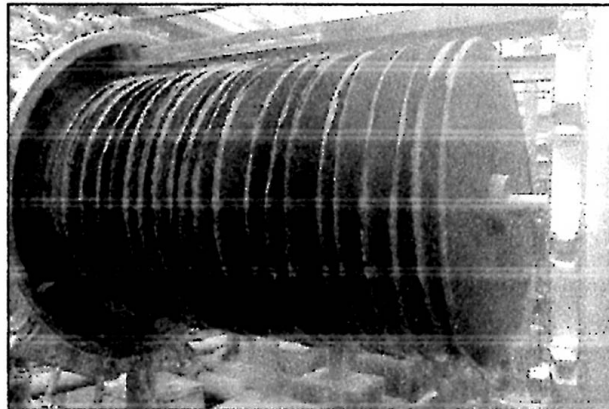


Fig. Nº: 4-5: Filtro de hojas verticales utilizado para limpiar el electrolito

- La densidad del electrolito es moderada y mantuvo a aproximadamente 1.2 gr/lt.
- Se controla aire disuelto estrechamente debido a su impacto en la conducta del lodo. Se controla temperatura en el rango de  $63.5 \pm 1$  °C. La experiencia muestra, las temperaturas sobre 68 °C destruyen la cola activa, y debajo de 62°C promueve depósito de cobre heterogéneo.
- La proporción de flujo se verifica y se mantiene en el rango de 23–25 l/min. Debido a la distancia corta entre los electrodos, las proporciones de flujo más altas no son beneficiosas.

#### 4.2.13 Control de Calidad químico del electrolito

- El rango de contenido de ácido sulfúrico es  $175 \pm 5$  gr/lt. La concentración ácida por encima de este rango afecta la actividad del reactivo y causa nódulos y los cortos circuitos altos. Asimismo incrementa la estriación del cátodo, permitiendo el entrapamiento de impurezas del electrolito.
- El contenido de cobre se mantiene en el rango de  $39 \pm 1$  gr/lt, mientras el contenido del cloro está en el rango de 25 a 30 ppm. El contenido As se mantiene a menos de 4 gr/lt, Contenido de Sb menos de 0.3 gr/lt, y Bi menos de 0.1 gr/lt. La proporción del molar de  $As/(Bi+Sb)$  en el electrolito se mantiene a 20, para un CD de  $239 \text{ Amp/m}^2$ .
- El aire disuelto se controla estrechamente, debido a su efecto de la oxidación en  $As^{3+}$ . La presencia de aumentos de lodos flotantes en celdas cuando el aire está en el sistema del electrolito.

- Ninguna descarga acuosa se permite desde la Refinería, resultando en el aumento persistente de impurezas en el electrolito. Las celdas de liberadora están en el lugar para eliminar As, Sb y Bi. La parte del electrolito se envía atrás al sistema comercial y la otra parte se alimenta al evaporador para quitar sulfatos en la forma de sulfato de níquel crudo. El evaporador se opera según el nivel de Ni, Fe, Ca, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etc., en el electrolito comercial.

Tabla № 4-2: los Ensaye Típicos de Refinería el electrolito Comercial

Ag	Cu	Pb	Fe	Bi	Zn	Ni	As	Sb	Se
g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l
0.2	38	0.01	1.8	0.08	0.07	8.7	4.1	0.2	0.003

Te	SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	Ca	Mg	Na	Al	Cl	Solids	Grease	Density
g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	ppm	ppm	ppm	kg/l
0.002	178	0.6	0.2	1.9	1.7	30	5	5	1.2

- La proporción de aditivos agregados es: El contenido de cola es de 38 gr/ton de cátodo, Thiourea es de 85 gr/ton de cátodo y el HCl es de 67 gr/ton de cátodo. Estos aditivos se controlan mediante el control de la polarización.

Tabla № 4-3: Descripción de una celda de polarización usada para controlar la cantidad de aditivos en una sección comercial.

Celdilla de polarización	
<b>Material</b>	PVC
<b>Dimensiones</b>	Según diagrama
<b>Ánodo</b>	Plomo
<b>Dimensiones</b>	114 x 72 x 4 mm
<b>Cátodo</b>	Cobre
<b>Dimensiones</b>	114 x 72 x 0.6 mm
<b>Fuente energía</b>	
<b>Rectificador</b>	Corriente Continua
<b>Corriente</b>	1 Amp.
<b>Voltaje</b>	4 volt.
<b>Conexiones</b>	
<b>Ánodo</b>	Positivo
<b>Cátodo</b>	Negativo
<b>Capilar</b>	Neutro
<b>Cable de Cobre</b>	No 14
<b>Medio</b>	
<b>Electrolito</b>	del proceso
<b>Flujo</b>	25 l/min.
<b>Temperatura</b>	64 °C

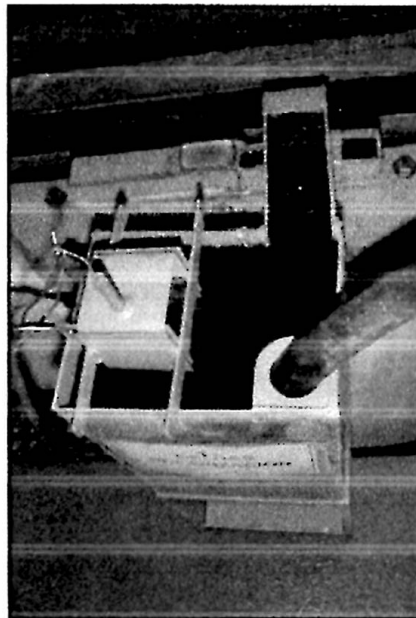


Fig. № 4-6: celdilla de polarización en la nave AB

Una vez que se han producido las laminas de arranque y ánodos, ellos son cargados en la sección comercial. En orden para lograr y mantener eficiencias de la planta altas, dos operaciones específicas están envueltos, a saber, arreglo de las celdas y inspección de la celda.

#### 4.2.14 Estructuración de la celda

Aunque los procedimientos operativos efectivos y los completos sistemas control han proporcionado un ánodo de calidad consistente y lamina de arranque, los procedimientos de instalación impropios pueden llevar a eficiencias de la planta bajas. En la Refinería, gran cuidado y atención a detalle se toma durante el proceso de intercambio de electrodo. Cuando un reemplazo de la celda completo se lleva a cabo, todos los cátodos y ánodos gastados están alejados. La celda se lava entonces del lodo restante. Los contactos del bus se lavan, por mano alambre-cepilló, y los nuevos ánodos están cargados en la celda. Para mantener visibilidad mejorada de los operadores, una lámpara se baja en cada extremo de las celdas. Las laminas de arranque se ponen entonces en la celda y usan las lámparas para iluminación mejorada.

Las lámparas proporcionan iluminación aumentada según Figura № 4-7, tal que los operadores pueden ver a lo largo de la longitud del cuerpo del ánodo, para confirmar espacio consistente, así como para asegurar verticalidad apropiado. Si es requerido, se usan trozos de cobre para corregir variaciones. Si cualquiera de las laminas de arranque no tiene la verticalidad

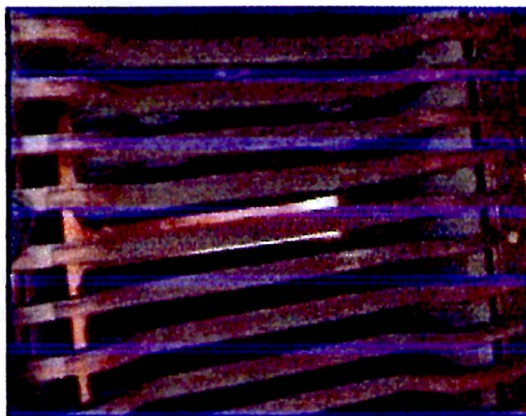


Fig. № 4-7: Iluminación del fondo de la celda electrolítica.

requerida, ellos o se enderezarán por mano o se reemplazarán. Una vez la celda se ha intercambiado, es llenado rápido con electrolito, usando una manguera de 6 cm de diámetro.

El proceso de llenado rápido toma 10–12 minutos para los requeridos 5800 litros de electrolito. El rápido llenado no perturba la alineación del electrodo, antes de que la celda se dé energía, los operadores acostumbran usar una 'regla' larga para alinear mediante golpes las curvas de las laminas de arranque.



Fig. № 4-8: estructuración de una celda

Hay 14 inspectores de la celda por turno, cada uno con 64 celdas para supervisar, tal como se observa en la Fig. № 4-8. En el primer día de depósito completo, los inspectores verifican todos los puntos de contacto del ánodo usando un voltímetro y gaussímetro para asegurar una CD uniforme.

En caso de una variación del normal funcionamiento, el electrodo se identifica y el problema se corrige. Esto involucraría alzando el cátodo probablemente fuera del electrolito verificar para la ondulación, crecimiento de la aguja o cualquier otra deformación de la superficie que podría estar causando un corto. Se informan resultados de descubrimiento de cortos continuamente.

El promedio la suma de cortos para 1998 era 0.7 cortos por celda. Sin embargo, de vez en cuando el promedio puede ser tan alto como 2 por celda. Después de que la acción correctiva se ha tomado, el cátodo se pone atrás en la celda. En una base diaria, técnico planta y personal operativo controlan visualmente 24 y 48 horas cátodos para un apropiado depósito y crecimiento. De esta manera, cualquier condición rara puede identificarse rápidamente y puede remediarse.

Durante 14 días del proceso de depósito en cátodos, los inspectores de la celda continúan con sus tareas fijadas. Además de verificar el desempeño eléctrico de cada celda, ellos examinan también a lo largo de la abertura entre el ánodo y el cátodo y debajo de la superficie del electrolito, asegurar el espacio efectivo y supervisar la nodulación.

### **4.3 Operaciones efectuadas al lodo Anódico.**

Durante la cosecha se realizaron una serie de operaciones para facilitar la manipulación del lodo anódico, con el fin de medir algunas propiedades y hallar el volumen que este ocupa en la celda y su respectivo peso.

#### **4.3.1 Operaciones realizadas al lodo durante la cosecha de cátodos**

Las operaciones que se efectúan son:

- Se corta la corriente de la sección a cosechar, en este caso S-70 y S-80.
- Se procede a cosechar los cátodos mediante la grúa puente ( 53 cátodos/ celda).
- Se procede a sacar los ánodos corroídos de las celdas (52 ánodos / celda).



Fig.. N° 4-9: la imagen muestra como se realiza la cosecha de cátodos en una celda mediante una grúa puente.

- Se quita el tapón de electrolito de la celda, con el fin de vaciar el contenido de electrolito y enviarlo al tanque de circulación (el lodo que queda en la celda tiene un alto contenido de electrolito)
- Se hace una inspección visual del nivel alcanzado por el lodo en la celda, y luego se agita todo el lodo de la celda con el fin de homogenizarla y se sacan varias medidas en recipientes para medir su velocidad de sedimentación a las condiciones de operación.
- Luego se procede a evacuar todo el lodo de la celda en recipientes, para lo cual realizamos la siguiente secuencia:
- Se hace sifón con el fin de eliminar el electrolito del lodo y tratar de recuperar el lodo en forma pura.
- Luego se procede a sacar el lodo hacia el sótano, donde previamente se han acondicionado recipientes para su almacenamiento y posterior manipulación.

#### **4.3.2 las operaciones realizadas al lodo después de la cosecha de cátodos**

- Evaluar la velocidad de sedimentación del lodo, para cada muestra tomada de la celda en prueba.
- Lavar el lodo con agua caliente unas 4 veces, con el fin de eliminar el contenido de electrolito en el lodo.
- Filtrar el lodo mediante un filtro que funciona a vacío.

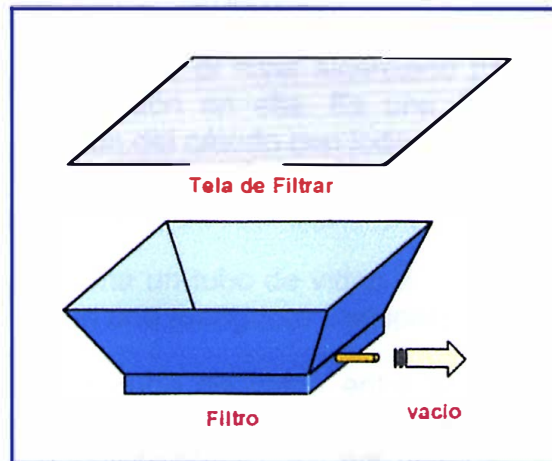


Fig. N° 4-10: el grafico muestra el equipo utilizado para filtrar el lodo.

- Medir la densidad del lodo
- Pesar todo el lodo húmedo y luego secar el lodo anódico, para lo cual se divide este en recipientes pequeños y se llevan a los hornos para su secado de 1 día; con esto se determina el % de humedad en el lodo anódico.

#### 4.3.2.1 Medición de la Velocidad de Sedimentación

la velocidad de sedimentación es la gradiente de sedimentación de los lodos en una unidad de tiempo, su importancia radica en conocer el tiempo que se toma la celda para sedimentar los lodos removidos por las operaciones de acondicionado, revisión e incluso flujo de electrolito mismo y no tener el lodo flotante originado que puede llegar a contaminar la calidad del cátodo (incrustación en los bordes)

Descripción de la operación:

- Se toma la muestra de lodo de la celda que se desea evaluar
- Se mueve la mezcla de lodo hasta homogenizarla
- se vacía la mezcla en una probeta previamente graduada
- Se toman lecturas de altura de lodo para un tiempo transcurrido.
- Sé grafica altura de lodo vs. el tiempo transcurrido; Se calcula la pendiente de la curva y esta nos indica la velocidad de sedimentación (m/seg).

#### 4.3.2.2 Medición del nivel de lodo anódico en una celda

El Objetivo es encontrar el nivel alcanzado por el lodo en la celda y observar su distribución en ella. Es una forma de saber si puede existir contaminación del cátodo con lodo anódico en su parte baja.

Descripción de la operación:

- Se acondiciona un tubo de vidrio de 120 cm de largo y diámetro de 1 cm, con una manguera transparente de 2m de largo.
- Se coloca el tubo de vidrio entre el ánodo y el cátodo en la celda, pero más pegado al cátodo (para no remover lodo) con la manguera apuntando al desagüe.
- se procede a hacer sifón y simultáneamente a insertar despacio el tubo hacia dentro del electrolito en dirección perpendicular
- Se observa en que momento empieza a salir lodo por la manguera (color negro en contraste con el color azul del electrolito), y se toma una medida en el tubo. Esta medida representa la altura de lodo en la celda.
- Se realiza esta medición tanto en la parte delantera y trasera de la celda (para ver como se distribuye el lodo), opcionalmente se hacen medidas en la zona central.

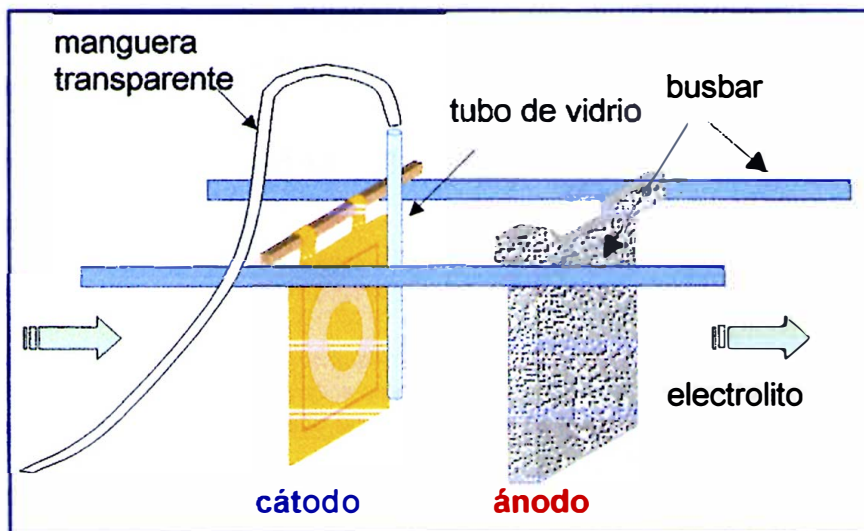


Fig. № 4-11: El grafico muestra como se ingresa el medidor de altura del lodo en una celda.

Cabe destacar que este control de altura de lodos se realizo en la primera parte del proyecto en forma diaria para saber como crece los lodos anódicos conforme transcurre el tiempo, y en la segunda parte del proyecto se evaluó principalmente la influencia del lodo anódico en la parte inferior del cátodo es decir en la calidad química del cátodo producido por refinería.



## 4.4 Detalles Técnicos de las pruebas de electrorefinación.

### 4.4.1 Equipos, materiales utilizados durante las pruebas

A continuación se presentan las condiciones de operación en las cuales se realizaron los experimentos, a su vez se indican la composición química de los materiales utilizados:

Tabla Nº4-4 : Composición química y características físicas del ánodo empleado en las pruebas de electrorrefinación

Ánodos	
Análisis Químico	
Cu %	99.693
Ag ppm	371
Au ppm	2.00
S ppm	33
Se ppm	158
Te ppm	17
As ppm	405
Sb ppm	36
Bi ppm	15
Pb ppm	69
Fe ppm	20
Ni ppm	106
O ppm	1685
Moldeo convencional o continuo	convencional
Control de peso automático	Sí
Maquina preparadora de Ánodos	Sí
<u>Características:</u>	
Pesado	No
enderezado	Sí
Ánodos, L x A x e, mm	1090 x 977 x 51
Masa, kg	440
vida, días	28
scrap, %	14

Tabla Nº 4-5: Composición química y características físicas del ánodo empleado en las pruebas de electrorefinación

	Ánodo	Cátodo
Largo, ancho, espesor, mm	1090 x 977 x 51	1010 x 1010 x 0,7
Material	Cu (99.7 %)	99.99%
Peso, kg	440	6.9 (IA), 196
Días de vida en la celda	28	14
Desechos, %	14	-

Tabla № 4-6: Características de las celdas de estudio

Celda electrolítica	valor
Celdas comerciales	926
Celdas de laminas de arranque	52
Celdas de Liberadora	40
Construcción de la celda	Concreto polimérico
Dimensiones interior, Largo x W x D, mm	5350 x 1203 x 1380
Ánodos / cátodos por celda	52/53
Espacio Ánodos, centro a centro, mm	100
Espaciamiento entre electrodos, cara del ánodo frente a la cara cátodo, mm:	
1 cosecha	24.00
2 cosecha	36.00
<u>Inspección de celdas</u>	
Gaussiméetro	Sí
Otro	
<u>Eléctricas</u>	
Amperaje por celda	25 600
Densidad de corriente cátodo , amps/m <sup>2</sup>	241
Voltaje por celda, mv	265
Eficiencia corriente catódica, %	98%
KWh/ton de cátodo, AC	238
Eficiencia de tiempo, %	98,2% (1998 average)

Tabla № 4-7: características fisicoquímicas de la solución electrolítica típica.

Parámetros	gr/litro
Cu	38
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> libre	178
As	4.1
Sb	0.20
Bi	0.08
Ni	8.7
Fe	1.9
Cl	0.03
Temperatura Ingreso celda, °C	64
Temperatura salida celda, °C	61
Circulación,. Litros/min	25
Filtrado de electrolito	Sí
Bomba de circulación	Bomba Centrifuga
Equipo de calentamiento	Poliblock de grafito
Método de purificación del electrolito	Electrowinning con ánodos de plomo
<u>Agentes adicionados</u>	
Cola g/tn de cátodo	38
Thiourea "	85
Avitone A "	
HCl, NaCl "	67

Tabla Nº4-8: dimensiones de las laminas de arranque de cobre, detalles técnicos de las laminas utilizadas, así como su composición química del cátodo producido

<b>Cátodos</b>	
Hoja de inicio de cátodos de Cu	Laminas de arranque de Cu
Laminas de arranque de cátodos	
L x W x T, mm	1010 x 1010 x 0,7
Masa, kg	6.9
Planchas Madres	Cu
Prensadora de Cátodos	No
Cátodos	
Vida, días	14
Masa de Cu al final, kg	196
Productividad de la Casa tanque, hora hombre por tn. Cátodo	1,4 (incluido sección laminas de arranque)
Método de lavado	sumergimiento y lavado
Maquina despojadora de Planchas madres por hora	
Características de la Maquina	
Lavado	Sí
Despojado	
Apilado	Sí
Hecho un muestreo	No
Pesado	Sí
Análisis Catódico	
Cu %	99.99
Ag ppm	11.6
S ppm	4
Se ppm	0.2
Te ppm	0.3
As ppm	0.3
Sb ppm	0.4
Bi ppm	0.1
Pb ppm	0.2
Fe ppm	0.3
Ni ppm	0.4

## V. EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS DE ELECTROREFINACIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante sus dos etapas de la investigación de Electrorefinar ánodos con diversos contenidos de plomo.

### 5.1 Resultados de la Primera Etapa de la Investigación por contenido de plomo en el ánodo.

#### 5.1.1 Resultados con Ánodos con 100 ppm de plomo

Tabla Nº 5-1: electrorefinación de ánodos con 100 ppm de plomo

Proceso	Sección-80	Sección-80	Promedio
Fecha de Ingreso	28-Jun-99	12-Jul-99	28-Jun-99
Fecha de Salida	12-Jul-99	26-Jul-99	26-Jul-99
Celdas	14 - 15	14 - 15	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25620	25620
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	241.5	241.52
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	328.58	328.25	328.42
Peso Cátodos (TM)	20.269	20.334	20.30
Eficiencia (%)	98.00	98.33	98.16
Voltaje Promedio	227	295	261
Corto Circuitos/Celda (Unidades)	3	1	2
Gradiente de temperatura (°C)	2.8	2.7	2.75
Estriación	194	212	203
Altura de lodo en celdas	1.6	4.8	4.8
<u>Corrosión</u>			
Corroidos caídos (Unidades)		0	0.0
Peso corroidos ( Kg/Pz)		55.4	55.4
Peso corroidos (TM)		11.53	11.526
Peso ánodos cargados (TM)		91.52	91.52
Contenido de Pb ( ppm)	100	100	100
Índice de corrosión (%)		12.59	12.59
<u>Calidad catódica</u>			
Deposito	suave	suave	suave
Estrías	superficiales	superficiales	superficiales
Nodulación	escasa	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>			
Lodo	1.0	0.0	1.0
Lodo Flotante	0.00	0.0	0.00
Nódulos	0.00	0.0	0.00
Rechazos (%)	0.00	0.00	0.65
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998	99.998	99.998
S	5.25	3.27	4.26
AS	0.43	0.45	0.44
Ag	9.12	10.13	9.625

### 5.1.2 Resultados con Ánodos con 200 ppm de plomo

Tabla № 5-2: electrorefinación de ánodos con un contenido de 200 ppm en plomo

Proceso	Sección 80	Sección 80	Promedio
Fecha de Ingreso	28-Jun-99	12-Jul-99	28-Jun-99
Fecha de Salida	12-Jul-99	26-Jul-99	26-Jul-99
Celdas	12 - 13	12 - 13	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25620	25620
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	241.5	241.5
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	328.58	328.25	328.4
Peso Cátodos (TM)	20.2672	20.338	20.3
Eficiencia (%)	97.99	98.35	98.17
Voltaje Promedio	224	290	257
Corto Circuitos / celda (Unidades)	1	0	1
Gradiente de temperatura (°C)	2.6	2.6	3
Estricción	200	200	200
Altura de lodo en celdas (cm)	2.10	5.60	5.60
<u>Corrosión</u>			
Corroídos caídos (Unidades)		0.00	0
Peso corroídos ( kg/pz)		55.8	56
Peso corroídos (TM)		11.61	12
Peso ánodos cargados (TM)		91.52	92
Contenido de Pb ( ppm)	200	200	200
Índice de corrosión (%)		12.69	12.69
<u>Calidad catódica</u>			
Deposito	suave	suave	suave
Estrías	superficiales	superficiales	superficiales
Nodulación	escasa	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>			
Lodo	1	0	1
Lodo Flotante	0	0	0.0
Nódulos	0	0	0.0
Rechazos (%)	0.94	0.00	0.74
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998	99.998	99.998
S	6.00	5.58	5.79
AS	0.61	0.57	0.59
Ag	9.05	10.7	9.88

### 5.1.3 Resultados con Ánodos con 400 ppm de plomo

Tabla № 5-3: electrorefinación de ánodos con un contenido de 400 ppm en plomo

Proceso	Sección 70	Sección 70	Promedio
Fecha de Ingreso	12-Jul-99	26-Jul-99	12-Jul-99
Fecha de Salida	26-Jul-99	09-Ago-99	09-Ago-99
Celdas	14 - 15	14-15	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25620	25620
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	241.5	241.52
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	328.25	330.83	329.54
Peso Cátodos (TM)	20.186	20.44	20.31
Eficiencia (%)	97.58	98.14	97.86
Voltaje Promedio	228	233	230.5
Corto Circuitos/ celda (Unidades)	3.0	1.5	2.25
Gradiente de temperatura (°C)	2.7	1.5	2.1
Estricción	200	200	200
Altura de lodo en celdas	2.9	5.7	5.7
Peso de lodo en celdas		99.5	100
<u>Corrosión</u>			
Corroídos caídos (Unidades)		0	0.0
Peso corroídos ( kg/pz)		57.3	57.3
Peso corroídos (TM)		11.93	11.93
Peso ánodos cargados (TM)		91.52	91.52
Contenido de Pb ( ppm)	400	400	400
Índice de corrosión (%)		13.03	13.03
<u>Calidad catódica</u>			
Deposito	suave	suave	suave
Estrías	superficiales	superficiales	superficiales
Nodulación	escasa	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>			
Lodo	0	0	0.00
Lodo Flotante	0	0	0.00
Nódulos	0	0	0.00
Rechazos (%)	0.00	0.00	0.00
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998	99.998	99.998
S	3.97	4.23	4.1
AS	0.37	0.69	0.53
Ag	14.24	14.18	14.21

### 5.1.4 Resultados con Ánodos con 800 ppm de plomo

Tabla № 5-4: electrorefinación de ánodos con un contenido de 800 ppm en plomo

Proceso	Sección 70	Sección 70	Promedio
Fecha de Ingreso	12-Jul-99	26-Jul-99	12-Jul-99
Fecha de Salida	26-Jul-99	09-Ago-99	09-Ago-99
Celdas	12 - 13	12 - 13	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25620	25620
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	241.5	241.52
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	328.25	330.83	329.54
Peso Cátodos (TM)	20.165	20.519	20.34
Eficiencia (%)	97.48	98.53	98.01
Voltaje Promedio	229	298	263.5
Corto Circuitos/ celda (Unidades)	7.0		7
Gradiente de temperatura (°C)	2.8	2.9	2.85
Estriación	262	250	256
Altura de lodo en celdas	3.2	6.0	6.0
Peso de lodo en celdas		105	105
<u>Corrosión</u>			
Corroidos caídos (Unidades)		0	0.0
Peso corroidos ( kg/pz)		55.4	55.4
Peso corroidos (TM)		11.53	11.526
Peso ánodos cargados (TM)		91.52	91.52
Contenido de Pb ( ppm)	800	800	800
Índice de corrosión (%)		12.59	12.59
<u>Calidad catódica</u>			
Deposito	suave	suave	suave
Estrías	superficiales	superficiales	superficiales
Nodulación	escasa	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>			
Lodo	0	0	0.00
Lodo Flotante	0	0	0.00
Nódulos	0	0	0.00
Rechazos (%)	0.00	0.00	0.00
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998	99.998	99.998
S	3.97	3.97	3.97
AS	0.37	0.37	0.37
Ag	14.24	14.24	14.24

### 5.1.5 Resultados con Ánodos con 1200 ppm de plomo

Tabla № 5-5: electrorefinación de ánodos con un contenido de 1200 ppm en plomo

Proceso 1200	I	II	Promedio
Fecha de Ingreso	26-Jul-99	09-Ago-99	26-Jul-99
Fecha de Salida	09-Ago-99	23-Ago-99	23-Ago-99
celdas	12 - 13	12 - 13	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25700	25660
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	242.3	241.89
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	330.83	325.68	328.26
Peso Cátodos (TM)	20.243	20.496	20.37
Eficiencia (%)	97.43	98.50	97.97
Voltaje Promedio	229	292	260.5
Corto Circuitos / celda (Unidades)	4.5	5.5	5
Gradiente de temperatura (°C)	2.5	2.7	2.6
Estricción	225	250	237.5
Altura de lodo en celdas	5	9.0	9.0
<u>Corrosión</u>			
Corroídos caídos (Unidades)		0	0.0
Peso corroídos ( kg/pz)		58.2	58.2
Peso corroídos (TM)		6.05	6.048
Peso ánodos cargados (TM)		45.76	45.76
Contenido de Pb ( ppm)	1200	1200	1200
Índice de corrosión (%)		13.22	13.22
<u>Calidad catódica</u>			
Deposito	suave	suave	suave
Estrías	superf	superficiales	superficiales
Nodulación	escasa	escasa	mínima
<u>Rechazos</u>			
Lodo	0	0	0.00
Lodo Flotante	0	0	0.00
Nódulos	0	2	1.00
Rechazos (%)	0.00	1.89	0.94
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998		99.998
S	4.95		4.95
AS	0.48		0.48
Ag	9.57		9.57



### 5.1.6 Resultados con Ánodos con 1400 ppm de plomo

Tabla № 5-6: electrorefinación de ánodos con un contenido de 1400 ppm en plomo

Proceso 1400	I	II	Promedio
Fecha de Ingreso	26-Jul-99	09-Ago-99	26-Jul-99
Fecha de Salida	09-Ago-99	23-Ago-99	23-Ago-99
Celdas	14 - 15	14 - 15	
Cosecha	I	II	
Días de operación	14	14	14
Cátodos	53	53	53
Ánodos	52	52	52
Corriente (Kamp)	25620	25620	25620
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	241.5	241.5	241.52
Peso ánodo (Kg)	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	330.83	325.68	328.26
Peso Cátodos (TM)	20.243	20.318	20.28
Eficiencia (%)	97.16	98.50	97.83
Voltaje Promedio	231	294	262.5
Corto Circuitos / celda (Unidades)	4.5	1.0	2.75
Gradiente de temperatura (°C)	2.9	2.8	2.85
Estriación	200	245	222.5
Altura de lodo en celdas	6.5	10.2	10.2
<u>corrosión</u>			
corroídos caídos (unidades)		0	0.0
peso corroídos ( kg/pz)		57.8	57.8
peso corroídos (TM)		6.01	6.01
peso ánodos cargados (TM)		45.76	45.76
contenido de Pb. ( ppm)	1400	1400	1400
índice de corrosión (%)		13.13	13.13
<u>calidad catódica</u>			
deposito	suave	suave	suave
Estrías	superficiales	superficiales	superficiales
nodulación	escasa	escasa	mínima
<u>rechazos</u>			
lodo	1	0	1
lodo flotante	0	0	0.00
Nódulos	0	0	0.00
rechazos (%)	0.94	0.00	0.94
<u>Composición (ppm)</u>			
Cu	99.998	99.998	99.998
S	4.61		4.61
AS	0.73		0.73
Ag	10.11		10.11

## 5.2 Pruebas y Resultados de la Segunda etapa de la Investigación por contenido de plomo en el ánodo.

### 5.2.1 Resultados con Ánodos con 69 ppm de plomo

Tabla № 5-7: Resultados de electrorefinación con ánodos normales en plomo (69 ppm) utilizado como referencia.

Secciones de referencia	1-I 70	1-II 70	2-I 80	2-II 80	3-I 70	3-II 70	Prom.
Fecha de Ingreso	6/Sep	20/Sep	20/Sep	4/Oct	18/Oct	18/Oct	
Fecha de Salida	20/Sep	4/Oct	4/Oct	18/Oct	1/Nov	1/Nov	
Celdas	7	7	7	7	7	7	
Cosecha	I	II	I	II	I	II	
Días de operación	14	14	14	14	14	14	14
Cátodos	53	53	53	53	53	53	53
Ánodos	52	52	52	52	52	52	52
Corriente (Kamp)	25700	25700	25700	25700	25700	25700	25700
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3
Peso ánodo (Kg)	440	440	440	440	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	330.0	327.6	327.6	328.5	328.5	312.2	325.7
Peso Cátodos (TM)	71.00	71.00	71.00	71.20	71.02	77.622	72.141
Eficiencia (%)	97.58	98.88	97.60	99.49	99.23	98.22	98.50
Voltaje Promedio	230	292	225	293	223	293	259
Corto circuitos/celda (unid.)	9.0	5.0	8.7	5.1	7.1	2.6	6.3
Grate de temperatura (°C)	3.0	2.7	2.7	1.9	2.2	1.8	2.4
Estricción	212	225	288	225	225	244	237
Altura de lodo en celdas	2.0	4.5	1.1	4.0	2.5	4.0	4.5
Peso de lodo anódico (Kg)	24	24.0					
<u>Corrosión</u>							
Corroídos caídos (Unid)	0		0		0.0	0.0	
Peso corroídos ( kg/pz)	56.3		57.3		66.0	59.8	
Peso corroídos (TM)	20.49		20.84		24.014	21.8	
Peso ánodos cargados (Tm.)	160.16		160.16		160.16	160.2	
Lodo en Corroído(mm)	2.5		2.5		2.3	2.4	
Índice de corrosión (%)	12.80		13.01		14.99	13.60	
<u>Calidad catódica</u>							
Deposito	suave	suave	suave	suave	suave	suave	suave
Estrías	Superf.	Superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.
Nodulación	escasa	escasa	escasa	mínima	mínima	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>							
Lodo	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.0
Lodo Flotante	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.0
Nódulos	0	4	0.00	0	0.00	0.00	0.7
Rechazos (%)	0.00	3.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
<u>Composición (ppm)</u>							
Cu	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998
S	5.02	3.93	6.11	5.45	5.45	4.97	5.16
AS	0.255	0.32	0.19	0.13	0.13	0.3	0.22
Ag	9.595	10.43	8.76	9.23	9.23	15.87	10.52

## 5.2.2 Resultados con Ánodos con 400 ppm de plomo

Tabla № 5-8: Electrorefinación utilizando ánodos con 400 ppm de contenido en plomo

Proceso 400 ppm de Plomo	1-I-70	1-II-70	2-I-80	2-II-80	3-I-70	3-II-70	Prom.
Fecha de Ingreso	6/Sep	20/Sep	20/Sep	4/Oct	4/Oct	18/Oct	
Fecha de Salida	20/Sep	4/Oct	4/Oct	18/Oct	18/Oct	1/Nov	
Celdas	2	2	2	2	2	2	
Cosecha	I	II	I	II	I	II	
Días de operación	14	14	14	14	14	14	14
Cátodos	53	53	53	53	53	53	53
Ánodos	52	52	52	52	52	52	52
Corriente (Kamp)	25700	25700	25700	25700	25700	25700	25700
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3
Peso ánodo (Kg)	440	440	440	440	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	330	327.62	327.62	328.5	328.5	312.18	325.7
Peso Cátodos (TM)	20.15	20.29	20.42	20.39	20.48	19.58	20.22
<b>Eficiencia (%)</b>	<b>96.89</b>	<b>98.32</b>	<b>98.25</b>	<b>98.15</b>	<b>98.64</b>	<b>98.37</b>	<b>98.10</b>
Voltaje Promedio	231	290	219	286	214	285	254
Corto circuitos/celda (unid.)	10.0	3.5	9.5	4.5	8	3.0	6.3
Gradte de temperatura (°C)	2.8	2.8	2.9	1.8	2.3	2.3	2.5
Estriación	238	230	225	238	225	225	230
Altura de lodo en celdas	2.1	6.2	1.1	4.7	2.5	4.7	6.2
Peso de lodo anódico (Kg)	34.4		37.3			37.3	
Corrosión							
Corroídos caídos (Unida)	0		0		0.0	0.0	
Peso corroídos ( kg/pz)	57.4		55.6		66.4	59.8	
Peso corroídos (TM)	5.97		5.78		6.91	6.2	
Peso ánodos cargados (TM)	45.76		45.76		45.76	45.8	
Lodo en Corroído (mm)	3.1		3.6		3.7	3.5	
Índice de corrosión (%)	13.04		12.63		15.10	13.59	
<u>Calidad catódica</u>							
Deposito	suave	suave	suave	suave	suave	suave	suave
Estrías	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.
Nodulación	escasa	escasa	escasa	mínima	mínima	mínima	mínima
<u>Rechazos</u>							
Lodo	0	0	0.00	0	0.00	4.00	0.7
Lodo Flotante	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.0
Nódulos	0	0	2.00	0	0.00	0.00	0.3
Rechazos (%)	0.00	0.00	1.89	0.00	0.00	3.77	0.94
<u>Composición (ppm)</u>							
Cu	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998
S	3.02	2.73	1.35	3.35	4.04	4.89	3.23
AS	0.17	0.15	0.01	0.4	0.32	0.49	0.26
Ag	14.16	12.98	9.28	14.85	10.4	10.65	12.05

### 5.2.3 Resultados con Ánodos con 800 ppm de plomo

Tabla № 5-9: Electrorefinación utilizando ánodos con 800 ppm de contenido en plomo

Proceso 800	1-I-70	1-II-70	2-I-80	2-II-80	3-I-70	3-II-70	Prom.
Fecha de Ingreso	6/Sep	20/Sep	20/Sep	4/Oct	4/Oct	18/Oct	
Fecha de Salida	20/Sep	4/Oct	4/Oct	18/Oct	18/Oct	1/Nov	
Celdas	2	2	2	2	2	2	
Cosecha	I	II	I	II	I	II	
Días de operación	14	14	14	14	14	14	14
Cátodos	53	53	53	53	53	53	53
Ánodos	52	52	52	52	52	52	52
Corriente (Kamp)	25700	25700	25700	25700	25700	25700	25700
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3	242.3
Peso ánodo (Kg)	440	440	440	440	440	440	440
Tiempo de Proceso (h)	330	327.62	327.62	328.5	328.5	312.2	325.7
Peso Cátodos (TM)	20.13	20.09	20.14	20.63	19.81	19.38	20.03
Eficiencia (%)	<b>96.80</b>	<b>98.30</b>	<b>97.53</b>	<b>99.37</b>	<b>98.27</b>	<b>98.04</b>	<b>98.05</b>
Voltaje Promedio	225	282	220	284	221	285	253
Corto circuitos/celda (unid.)	11.0	10.5	6.5	5.0	13	6.5	8.8
Gradte de temperatura (°C)	2.8	2.5	2.9	2	2.3	2.1	2.4
Estriación	262	230	213	262	212	216	233
Altura de lodo en celdas	2.6	7.2	1.6	6.0	3.5	8.5	7.2
Peso de lodo anódico (Kg)	<b>48.83</b>		<b>51.5</b>		<b>59.3</b>	<b>59.3</b>	
<u>Corrosión</u>							
Corroídos caídos (Unid)	0		0		0.0	0.0	
Peso corroídos ( kg/pz)	59.5		57.5		67.9	61.6	
Peso corroídos (TM)	6.19		5.98		7.066	6.4	
Peso ánodos cargados (TM)	45.76		45.76		45.76	45.8	
Lodo en Corroído (mm)	4.1		4.8		4.6	4.5	
Índice de corrosión (%)	13.52		13.07		15.44	14.01	
<u>Calidad catódica</u>							
Deposito	suave	suave	suave	suave	suave	suave	suave
Estrias	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.
Nodulación	escasa	escasa	escasa	mínimo	mínimo	mínimo	mínima
<u>Rechazos</u>							
Lodo	0	4	0.00	0	0.00	5.00	1.5
Lodo Flotante	0	0	0.00	0	0.00	0.00	0.0
Nódulos	0	0	1.00	0	0.00	0.00	0.2
Rechazos (%)	0.00	3.77	0.94	0.00	0.00	4.72	1.57
<u>Composición (ppm)</u>							
Cu	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998
S	3.93	2.6	1.05	3.04	4.45	5.54	3.44
AS	0.19	0.06	.0.01	0.01	0.27	0.55	0.22
Ag	10.43	12.82	13.26	14.3	9.09	9.19	11.52

### 5.2.4 Resultados con Ánodos con 1200 ppm de plomo

Tabla № 5-10: Electrorefinación utilizando ánodos con 1200 ppm de contenido en plomo

Proceso 1200	1-I-80	1-II-80	2-I-70	2-II-70	1-I-80	1-II-80	Prom.
Fecha de Ingreso	18/Oct	1/Nov	1/Nov	15/Nov	15/Nov	29/Nov	
Fecha de Salida	1/Nov	15/Nov	15/Nov	29/Nov	29/Nov	13/Dic	
Celdas	2	2	2	2	2		
Cosecha	I	II	I	II	I		
Días de operación	14	14	14	14	14		14
Cátodos	53	53	53	53	53		53
Ánodos	50	50	50	50	50		50
Corriente (Kamp)	25700	25700	25700	25700	25700		25700
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	252.0	252.0	252.0	252.0	252.0		252.0
Peso ánodo (Kg)	445	445	445	445	445		445
Tiempo de Proceso (h)	312.2	331.5	331.5	328.25	328.25		326.3
Peso Cátodos (TM)	19.21	20.439	19.84	20.316	20.331		20.03
Eficiencia (%)	97.15	98.38	97.22	98.23	98.05		97.81
Voltaje Promedio	238	299	242	304	230		263
Corto circuitos/celda (unid.)	3.0	4	14	4.0	4		5.7
Gradte de temperatura (°C)	1.8	2	2.5	1.7	2		2.0
Estricción	300	275	263	238	200		255
Altura de lodo en celdas	3.3	9.4	4.4	9.3	1.0		9.4
Peso de lodo anódico (Kg)	63.282		80.7			72.0	
<u>Corrosión</u>							
Corroídos caídos (Unid)	0					0.0	
Peso corroídos ( kg/pz)	46.3					46.3	
Peso corroídos (TM)	4.82					4.8	
Peso ánodos cargados (TM)	44.50					44.5	
Lodo en Corroído (mm)	3.5					3.5	
Índice de corrosión (%)	10.83					10.83	
<u>Calidad catódica</u>							
Deposito	suave	suave	suave	suave	suave	suave	
Estrías	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.	superf.
Nodulación	escasa	escasa	escasa	regular	escasa	mínima	
<u>Rechazos</u>							
Lodo	0	3	0.00	12	0.00		3.0
Lodo Flotante	0	0	0.00	0	0.00		0.0
Nódulos	0	1	0.00	0	0.00		0.2
Rechazos (%)	0.00	3.77	0.00	11.32	0.00		3.02
<u>Composición (ppm)</u>							
Cu	99.998						99.998
S	3.04						3.04
AS	0.01						0.01
Ag	14.3						14.30

### 5.2.5 Resultados con Ánodos con 1600 ppm de plomo

Tabla № 5-11: Electrorefinación utilizando ánodos con 1600 ppm de contenido en plomo

Proceso 1600	1-I-80	1-II-80	2-I-70	2-II-70	1-I-80	Prom.
Fecha de Ingreso	18/Oct	1/Nov	1/Nov	15/Nov	15/Nov	
Fecha de Salida	1/Nov	15/Nov	15/Nov	29/Nov	29/Nov	
Celdas	2	2	2	2	2	
Cosecha	I	II	I	II	I	
Días de operación	14	14	14	14	14	14
Cátodos	51	51	51	51	51	51
Ánodos	50	50	50	50	50	50
Corriente (Kamp)	25700	25700	25700	25700	25700	25700
D.C. (Amp/m <sup>2</sup> )	252.0	252.0	252.0	252.0	252.0	252.0
Peso ánodo (Kg)	443	443	443	443	443	443
Tiempo de Proceso (h)	312.2	331.5	331.5	328.25	328.25	326.3
Peso Cátodos (TM)	19.29	20.582	19.84	20.378	20.328	20.08
<b>Eficiencia (%)</b>	<b>97.58</b>	<b>98.55</b>	<b>97.13</b>	<b>98.29</b>	<b>98.04</b>	<b>97.92</b>
Voltaje Promedio	235	301	246	306	225	263
Corto circuitos/celda (unid.)	4.5	4	14	2.0	5.5	6.0
Gradte de temperatura (°C)	2	1.5	2.6	1.7	2	2.0
Estriación	300	265	275	250	250	268
Altura de lodo en celdas	2.8	12.4	3.0	7.3	1.1	12.4
<b>Peso de lodo anódico (Kg)</b>		<b>75.58</b>		<b>81.13</b>		<b>78.4</b>
<u>Corrosión</u>						
Corroidos caídos (Unidades)		0		0		0.0
Peso corroidos ( kg/pz)		50.5		58.7		54.6
Peso corroidos (TM)		5.25		6.10		5.7
Peso ánodos cargados (TM)		44.50		44.50		44.5
Lodo en Corroído (mm)		3.1		3.1		3.1
Índice de corrosión (%)		11.80		13.71		12.75
<u>Calidad catódica</u>						
Deposito	suave	suave	suave	suave	suave	Suave
Estrías	superfic.	anchas	anchas	superfic.	superfic.	superfic.
Nodulación	escasa	mínima	regular	escasa	escasa	mínima
<u>Rechazos</u>						
Lodo	0	2	3	2	4	2.2
Lodo Flotante	0	0	0	0	0	0.0
Nódulos	0	1	0	0	0	0.2
Rechazos (%)	0.00	2.83	2.83	1.89	3.77	2.26
<u>Composición (ppm)</u>						
Cu	99.998					99.998
S	3.47					3.47
AS	0.06					0.06
Ag	12.33					12.33

### 5.3 Conclusiones de las pruebas de electrorefinación

A continuación se muestra el cuadro resumen de todas las pruebas realizadas en el trabajo de investigación, de donde se han obtenido los resultados que a continuación se analizan:

Tabla Nº 5-12: esta tabla muestra los resultados experimentales obtenidos al realizar la electrorefinación con ánodos con diversos contenidos de plomo.

Parámetros	Unidad	69	100	200	400	800	1200	1400	1600
Altura	cm	4,2	4.8	5,6	6.2	8.5	9.4	10.2	12.4
Peso de lodo seco	kg/celda	24.0	25.4	29.4	35.8	51.2	72.0	77.0	78.4
Densidad aparente	kg/cm <sup>3</sup>	0.165	0.170	0.172	0.171	0.189	0.192	0.195	0.165
<u>Composición de lodo</u>									
Pb	%	4.48	5.65	8.85	13.95	19.97	28.3	30.72	31.27
Cu	%	32.7	31.9	29.5	25.3	22.0	19.7	17.1	16.8
<u>Calidad catódica</u>									
S	ppm	5,16	5,25	6,00	3,23	3,44	3,04	4,61	3,47
Ag	ppm	10,52	9,12	9,05	12,05	11,52	14,3	10,11	12,33
Pb	ppm	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,7	0,01
Parte inferior Pb.	ppm	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,14
<u>Operacionales</u>									
Efic. De corriente	%	98.30	98.16	98.17	97.98	98.03	97.89	97.83	97.92
Rechazo catódico	%	0.63	0.65	0.74	0.94	1.57	1.98	2.10	2.20
Cortocircuitos	cc/celda	4.48	2.00	0.50	4.29	7.88	5.35	2.75	6.00
Voltaje	mv	261	261	257	242	258	262	263	263
Gradiente de temperatura	°C	2.6	2.8	2.6	2.3	2.6	2.3	2.9	2.0
Índice de corrosión	%	13.19	12.59	12.69	13.31	13.41	13.22	13.13	12.75
Estricción		243	203	200	215	244	246	223	268

#### 5.3.1 Resultado Nº 01: Eficiencia de corriente

La razón entre el peso real de cobre obtenido en el cátodo y el peso teórico de un cátodo de cobre es la eficiencia de corriente; las eficiencias de corriente se mantuvieron superiores al 97.76. La eficiencia de corriente esta relacionada con la siguiente formula:

$$CE = \frac{W_{real} * 100 * 10^6}{I * t * 1.186 * n}$$

CE	Eficiencia de corriente %
W <sub>real</sub>	la cantidad de cobre obtenida en el cátodo
I	la corriente A
t	el tiempo operativo de las series h.
n	Numero de celdas en las series
1.1864	el equivalente electroquímico gr/Ah

Del gráfico Nº 24 de eficiencia de corriente vs. contenido de plomo en el ánodo, se puede obtener una eficiencia de 97.92% a una

concentración de 1600 ppm de plomo, pudiéndose también optar la eficiencia de 97.83% a una concentración de 1400 ppm de plomo, mas adelante elegiremos la más recomendable.

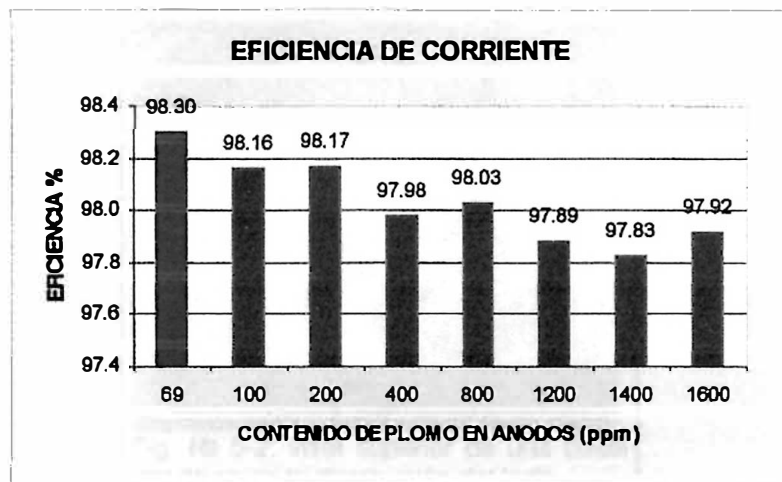


Fig. Nº 5-1: se observa la disminución de la eficiencia de corriente cuando existe un aumento en el contenido de plomo en los ánodos

En cuanto a la disminución de la eficiencia de corriente eléctrica, esta cae dentro de las eficiencias de corriente de las modernas refineries de cobre que son de 90 a 96%. Esta disminución nos indica un aumento en los costos de producción, pero es un precio muy bajo por dejar fuera a planta de ánodos cuyo costo representa el 35,5% de los costos totales de Refinería y el 67,0% de los costos de Planta electrolítica. La mejor forma de conseguir elevar la eficiencia de corriente es invertir en el mejoramiento del sistema de control de cortos circuitos, ya sea dotando de mejores equipos tales como: gaussímetros más sensibles, cámaras de mano Infra Rojo (IR) y voltímetros, así como la implementación de scanner IR en las grúas puente. Este sensor detecta los cátodos que están mas caliente de lo normal, es decir los cátodos que están acarreado corriente extra debido a un corto circuito ánodo / cátodo.

### 5.3.2 Resultado Nº 02: Altura de lodo en celdas

La altura del lodo en una celda nos indica la probabilidad de que ocurra contaminación en la parte inferior del cátodo con lodo, corriéndose el riesgo de obtener un pésimo producto (cátodo de cobre) y así originar un rechazo catódico.

El lodo en las celdas con ánodos normales (69 ppm de Pb) alcanza una altura de 4.2 cm, incrementándose a una altura máxima de 12.4





cm para una concentración de 1600 ppm de plomo y siendo de 10.2 cm para una concentración de 1400 ppm de plomo.

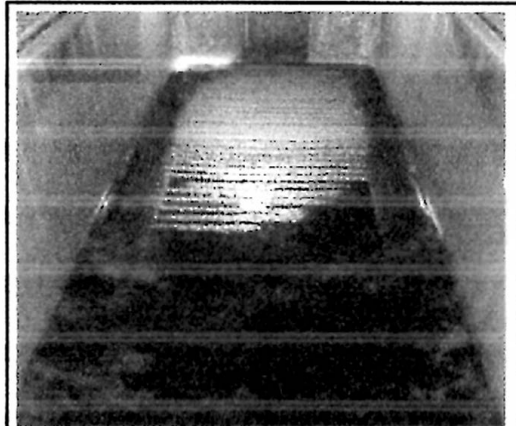


Fig. Nº 5-2: vista superior de una celda donde se ve la distribución del lodo.

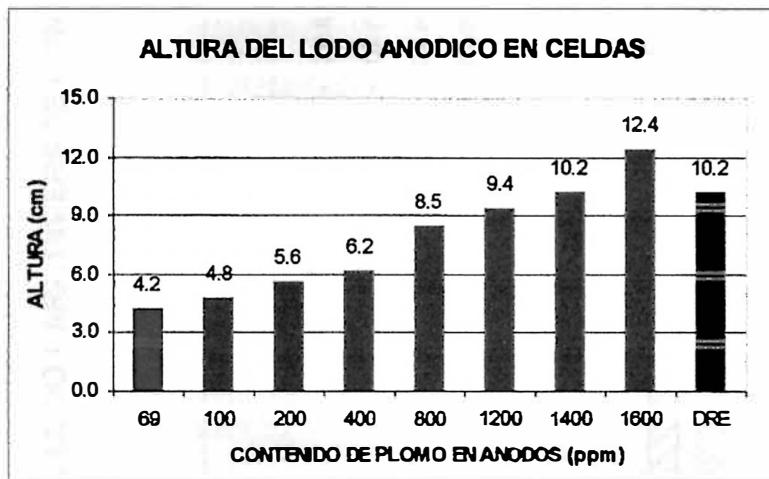


Fig. Nº 5-3: se observa el aumento de la altura del lodo cuando existe un aumento de plomo en el ánodo

La altura del lodo depositado en el fondo de una celda electrolítica depende del contenido de plomo en el ánodo, ya que la única impureza que aumenta en el ánodo es el plomo y este forma el  $PbSO_4$  de mayor volumen que el  $CuSO_4$  desplazado y al aumentar el contenido de plomo en el ánodo el volumen del lodo aumenta, tal como demuestran los experimentos.

La altura del lodo de ánodos de 1600 ppm de plomo (12.4) sobrepasa el nivel del drenaje del electrolito en celdas (10.2 cm), existiendo un gran riesgo que el lodo drene conjuntamente con el electrolito.

Para este problema existen 2 posibles soluciones:

- Solución №1: Levantar el nivel del cátodo en la celda, trayendo esto como consecuencia una disminución en la producción de cátodos de cobre.
- Solución №2: Levantar la altura del canal de drenaje del electrolito en la celda e instalando un filtro de membrana adecuado, siendo esta la mejor solución.

### 5.3.3 Resultado № 03: Contenido de plomo en la parte inferior del cátodo

Del gráfico se observa que para un ánodo con una concentración de 1600 ppm de Pb se tiene una concentración de 0.14ppm en el cátodo, afectando la calidad del producto final, y con 1400 ppm de Pb se tiene una concentración de 0.01 ppm de plomo en el cátodo estando dentro de los parámetros normales de calidad del cátodo.

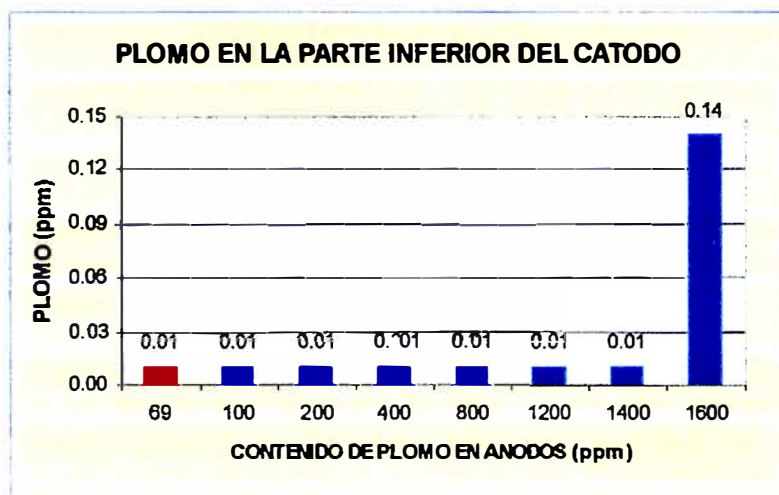


Fig. № 5-4: se observa contenido de plomo en la parte inferior del cátodo cuando existe un aumento de plomo en el ánodo

La mejor solución para este problema está en refinar solo ánodos que contengan hasta unos 1400 ppm de plomo, pero para refinar ánodos con 1600 ppm de plomo se tendría que levantar el nivel superior de la celda por lo menos unos 5 cm, así se evita la contaminación de la parte inferior del cátodo.

### 5.3.4 Resultado № 04: **Peso de lodo en celdas.**

El peso de lodo tiene una relación directa sobre el volumen del lodo que se encuentra en una celda electrolítica. Del gráfico № 29 se observa que el peso del lodo seco de ánodos con 1600 ppm de plomo es de 78.4 kg y de ánodos con 1400 ppm de plomo es de 77.0 kg, en general el peso del lodo anódico aumenta conforme aumenta el contenido de plomo en el ánodo.

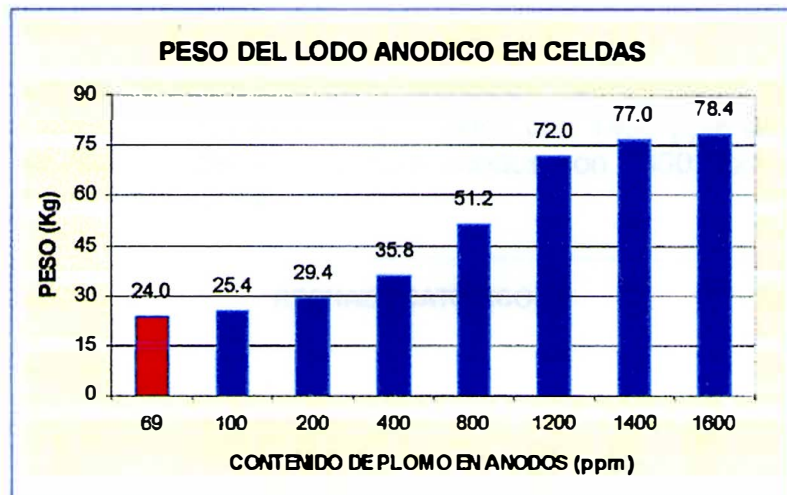


Fig. № 5-5: se observa como se incrementa el peso del lodo conforme aumenta el contenido de plomo en el ánodo

Este parámetro depende del contenido de plomo en el ánodo y se utiliza para determinar la capacidad de lodos que debe procesar planta de purificación.

Al aumentar el contenido de plomo en los ánodos, también se aumenta el peso y la altura de su lodo anódico producido, trayendo como consecuencias directas en el aumento del volumen de los lodos recepcionados en Purificación y por ende el volumen de lodos anódico enviado a Planta de Metales Preciosos, el problema radica en que el plomo es un elemento perjudicial para la purificación de los metales preciosos por ser solubles con el oro y la plata, incrementando los consumos de reactivos y requiriendo mas volumen en sus reactores.

Para solucionar este problema que se presenta con ánodos de 100 ppm hasta ánodos de 1600 ppm de plomo esta en diseñar un proceso de eliminación del exceso de plomo en el lodo anódico con el fin de entregar nuestro lodo de acuerdo a las especificaciones de planta de metales preciosos en cuanto al plomo, y esta planta no tenga que rediseñar todo sus procesos, es por ello que se estudia todos los posibles procesos de eliminar plomo y se evalúa sus resultados.

### 5.3.5 Resultado № 06: Rechazo catódico.

El rechazo catódico indica el porcentaje de ánodos rechazados del total de cátodos de una celda cosechada ( 53 cátodos). Las causas principales de los rechazos se debieron principalmente a la contaminación del cátodo por lodo en la parte inferior y por su apariencia (nódulos grandes), este parámetro se relaciona con el proceso (Cortes de circulación, y de Corriente), como se observa los rechazos catódicos aumenta conforme aumenta el contenido de plomo en el ánodo.

Se obtuvieron mínimos rechazos catódicos, semejante a los valores actuales que opera la planta, para ánodos con 1400 ppm de plomo se obtuvo un rechazo del 2.1% y para ánodos con 1600 ppm de Plomo cuyo rechazo fue de 2.2%.

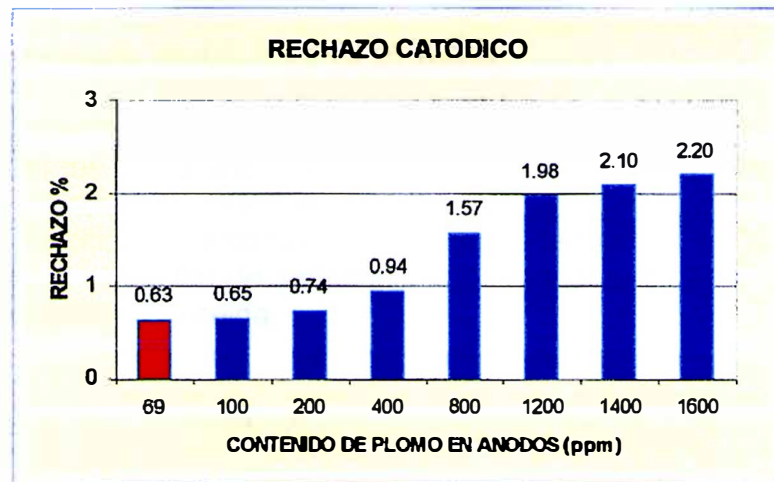


Fig. № 5-6: se observa el aumento del rechazo

### 5.3.6 Resultado № 07: Voltaje de celdas.

Los voltajes indican el consumo de energía para las celdas en pruebas y se utilizan para encontrar celdas con cortos circuitos. Los voltajes se encontraron dentro de los valores normales. Esto nos indica que la electrorefinación no se ve afectado por el incremento del contenido de plomo en los ánodos y que se puede realizar con los generadores de corriente que se posee actualmente.

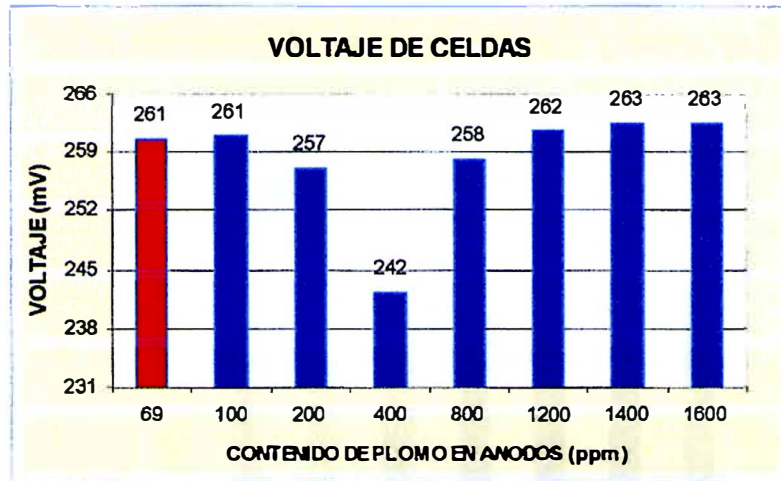


Fig. Nº 5-7: se observa la variación del voltaje de las celdas

### 5.3.7 Resultado Nº 08: Cortocircuitos.

Los cortocircuitos registrados se mantuvieron dentro de lo normal, a excepción los registrados con ánodos de 800 ppm de plomo, que se registraron altos ( 8.8 C. Circuitos / celda); Los demás son similares a los de referencia. Los cortos circuitos son una medida de la calidad de los ánodos, velocidad de sedimentación del lodo y facilidad de realizar operaciones en una celda.

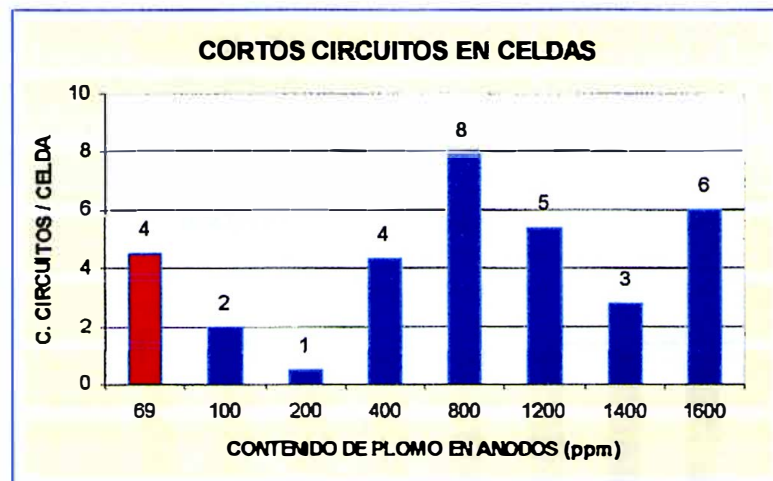


Fig. Nº 5-8: se observa la variación de cortos circuitos cuando existe un aumento de plomo en el ánodo

### 5.3.8 Resultado Nº 09: Estriación catódica.

La estriación catódica es una medida del tipo de depósito que existe en el cátodo, esta mide la apariencia física del depósito. La mayoría de los depósitos tienen una estriación menor a 250 y similares al de

referencia, indicando un tipo de deposito aceptable. Este parámetro depende de la densidad de corriente utilizada y de la velocidad del electrolito.

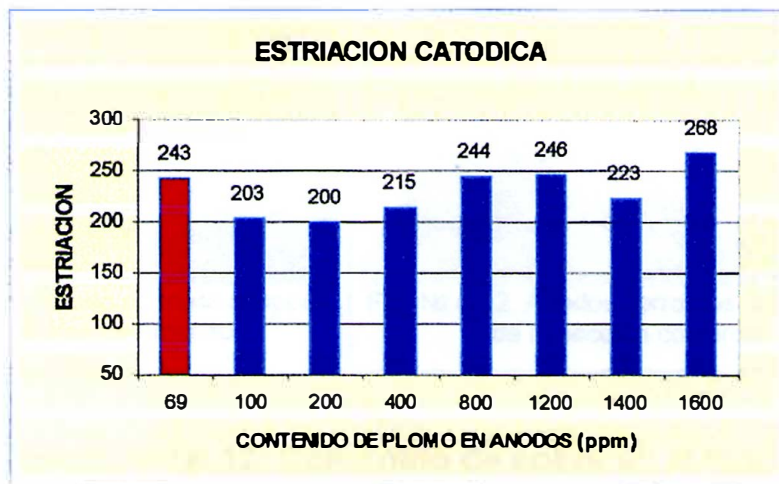


Fig. № 5-9: se observa la variación de la estriación cuando existe un aumento de plomo en el ánodo

### 5.3.9 Resultado № 10: ánodos corroídos.

El índice de corrosión es la relación entre el peso del ánodo sin disolver y el peso del ánodo nuevo. El índice de corrosión se mantuvo dentro de los rangos (12.6 – 13.4 %). El lodo anódico adherido a los desechos se le observa directamente más esponjoso en ánodos con mayor contenido de plomo. No se registraron ánodos caídos en celdas.

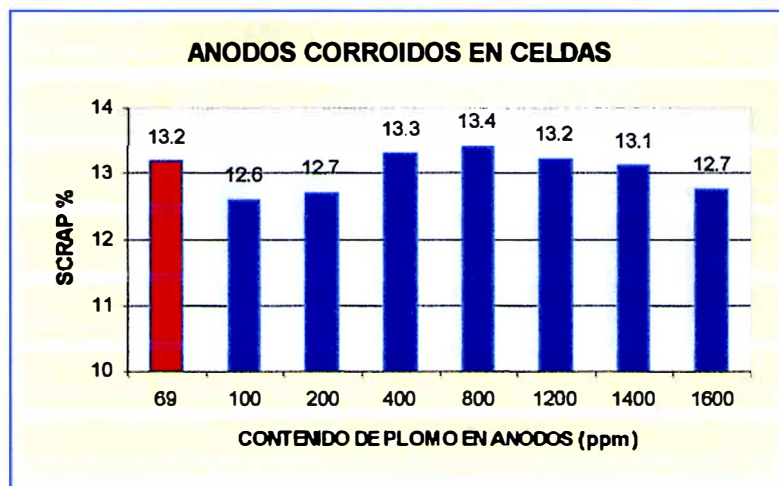
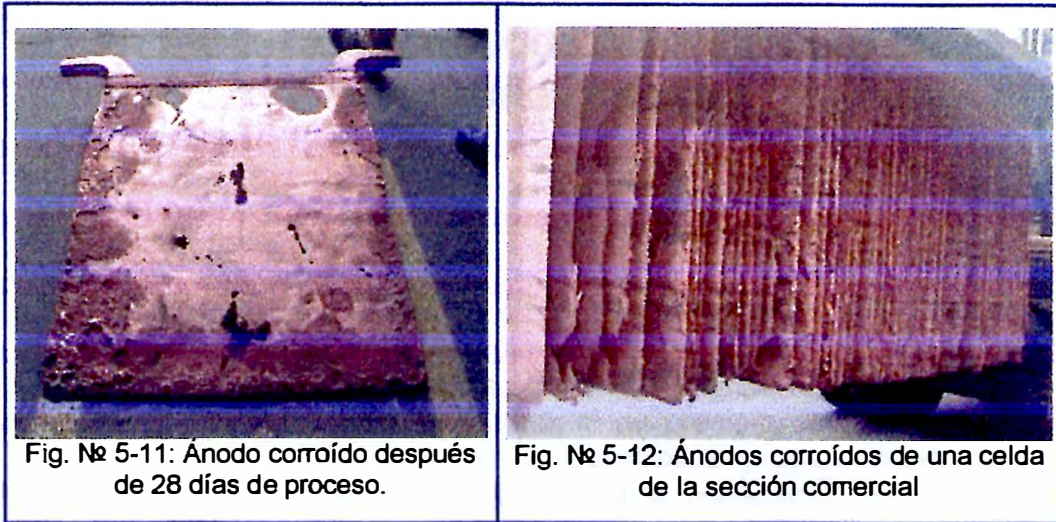


Fig. № 5-10: se observa la variación del % de ánodos corroídos cuando existe un aumento de plomo en el ánodo



### 5.3.10 Resultado № 12: Contenido de cobre en el lodo anódico.

Este parámetro nos indica el tipo de lixiviación que se debe aplicar al lodo anódico con el fin de recuperar el cobre. De la grafica se observa que el contenido de cobre en el lodo disminuye conforme aumenta el contenido de plomo en el lodo, es decir que para ánodos con 1400 ppm de plomo el lodo producido tiene 17.1% en cobre y para ánodos con 1600 ppm de plomo el lodo tiene 16.8% en cobre.

Esta disminución del cobre en el lodo facilita la posterior lixiviación que se le hará al lodo para solubilizar el cobre en él, disminuyendo el consumo de ácido sulfúrico.

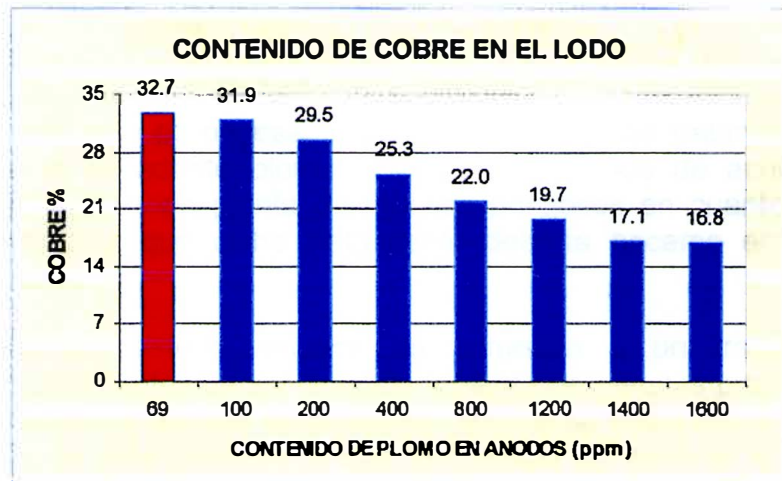


Fig. № 5-13: se observa la variación del cobre en el lodo cuando existe un aumento de plomo en el ánodo



## VI.- PROPUESTA TECNOLÓGICA DE LAS UNIDADES DE PROCESO DE ELECTROREFINACIÓN

### Antecedentes

El plomo por tener diferente electronegatividad que el cobre y otros metales y por darles las condiciones específicas para que ocurra la deposición del cobre (voltaje, amperaje, temperatura) el plomo no logra depositarse sobre el cátodo; si no precipita formando los lodos anódicos, junto con otros metales preciosos y otras impurezas. El plomo es un elemento perjudicial para la purificación de los metales preciosos por ser solubles con el oro y la plata; es por esto importante eliminarlo cuanto antes del proceso.

Actualmente al plomo en el lodo anódico por su bajo contenido, no se logra recuperar y es eliminado en la escoria de los hornos de fusión en planta de metales preciosos (el lodo tiene un contenido promedio de 4 ppm de Pb).

Tabla N° 6-1: contenido de plomo en los diversos productos de cobre que intervienen en la electrorefinación

Producto	Contenido de plomo
Cu. Blister:	45 ppm
ánodos:	69 ppm
Cátodos:	0.13 ppm
Lodo anódico:	4.48 ppm
Lodo deselenizado	2.013%
Escoria de fusión	4.665%
Doré:	0.0048 %

Es por ello que es necesario buscar la manera de tratar el lodo para eliminar el excedente plomo y así enviar el lodo de acuerdo a las especificaciones de planta de metales preciosos en cuanto al plomo, cabe destacar que dicho tratamiento debería hacerse en planta de purificación.

Actualmente el lodo anódico es sometido a un tratamiento de decoperizado antes de ser enviado a planta de metales preciosos, pero para eliminar el exceso de plomo en el lodo se debe incluir una etapa después de este tratamiento con la finalidad de eliminar el excedente de plomo en el lodo que es enviado a metales preciosos, ya que un mayor contenido de plomo en el lodo originaría problemas de tipo operativos en dicha planta.

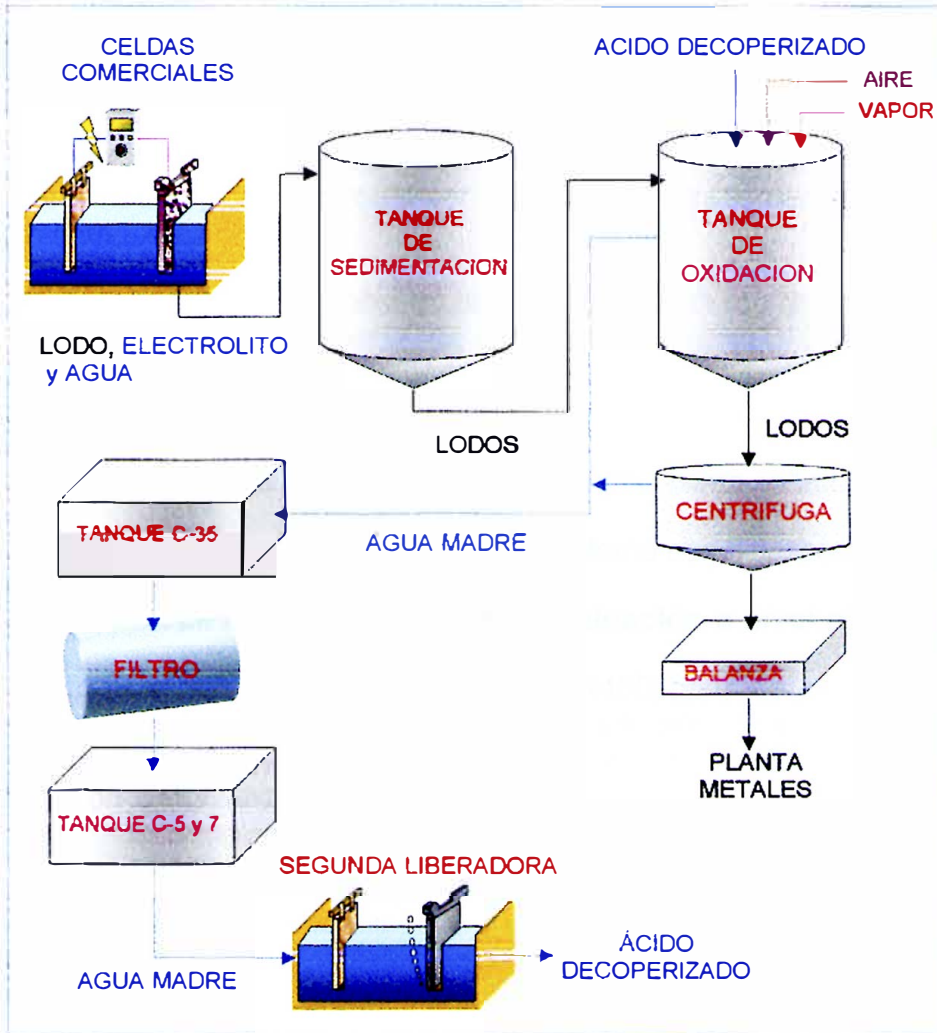


Fig. Nº 6-1: tratamiento actual del lodo anódico en la Refinería de cobre.

El lodo anódico producido en las celdas del modulo piloto es recepcionado en recipientes cilindricos y no se llegan a juntar con los lodos de celdas comerciales; los cuales son tratados en la planta de purificación. Esto nos permite estudiar las características físicas y químicas del lodo y experimentar con varios tratamientos de desplomado.

El lodo con alto plomo, descargado de las celdas de modulo piloto en prueba fueron filtrados al vacio; luego de haberles hecho un lavado con agua caliente para eliminar cualquier resto de electrolito ( 2 a 3 lavadas); la humedad promedio en los lodos fue de 65%. El lodo anódico posee una serie de elementos tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla Nº 6-2: Análisis de compuestos en los lodos de una celda (%)

Cu	Ag	Au	S	Se	Te	As	Sb	Bi	Pb	Fe	Ni
32,69	17,62	0,05		9,72	2,53	2,73	0,07	0,2	4,48	0,06	0,12

## 6.1 Tratamientos de eliminación del plomo en el lodo anódico

El plomo se encuentra en el lodo en forma de sulfato de plomo (sólido). La solución para eliminar el plomo es mediante un proceso hidro metalurgico en el cual se separaría el plomo del lodo mediante un compuesto soluble.

Se estudiaron varios procesos para eliminar al plomo del lodo anódico, de las cuales en la etapa de laboratorio surgieron 2 procesos de tratamiento para la eliminación del plomo en el lodo anódico, los que se evaluarán a continuación:

- **Proceso № 1** – “Eliminación del plomo como sulfato”
- **Proceso № 2** – “Eliminación del plomo como carbonato”

### Obtención de las muestras para la evaluación a nivel piloto:

Se trabajó con un lodo anódico con 1400 ppm de plomo, que se obtuvo de la celda 15, sección 70 de modulo piloto, para lo cual todo el lodo producido en 2da cosecha se extrajo en cilindros, de la cual se sacaron 2 muestras: 1 para Proceso № 1 y otra para el Proceso № 2.

Tabla № 6-3: en esta tabla se muestra el lodo extraído de celda 15 de la sección 70 de MP, y el procedimiento seguido para determinar su densidad aparente y su densidad real, con el fin de estimar el peso del lodo en diferentes celdas procesadas

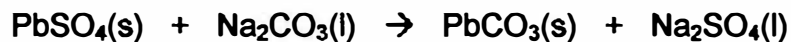
Elemento	Cantidad	Unid	Observaciones
Peso de lodo total de celda	205,9	Kg	Peso de lodo total de celda 55% H2O
Peso de lodo total de celda (seco)	89,231	Kg	Dato proporcionado por modulo piloto
Recipientes con lodo de celda 15			
Tk 1 diámetro 53 h 41 (cm)	90454	ml	Volumen total de pulpa decantada
Tk 2 diámetro 53 h 42 (cm)	92660	ml	
Tk 3 diámetro 55 h 42 (cm)	99785	ml	
Vol. De lodo decantado con electrolito	282899	ml	
Volumen de muestra total	26000	ml	Lodo húmedo sin lavar
Vol. Pulpa sin lavar decantada (1hr)	690	ml	La prueba se hizo en probeta de
Vol. pulpa lavada decantada (1hr)	605	ml	1000ml, durante 1h de sedimentación
Vol. Total pulpa lavada, decantada (18hr)	13600	ml	El lavado se realizo con agua caliente
Peso de pulpa antes de filtrar	16366	gr.	La filtración se realiza a vacío-
Vol. Lodo en probeta (1lt)	875	ml	y con tela
Peso lodo en probeta (1lt)	1,041	Kg	
Densidad de lodo	1,189	g/ml	
Peso húmedo lodo inicial	10004	gr	
muestra para desplomar (húmedo)	5000	gr	% humedad 61.20%
muestra para decoperizado (húmedo)	4504	gr	

### 6.1.1 Proceso № 1 – “Eliminación del plomo como sulfato”

El lodo almacenado en cilindros, es dejado reposar por espacio de 2 horas luego del cual es sometido a lavado con agua caliente con el fin de eliminar los remanentes de electrolito.

**El primer paso** sería el de carbonatar al plomo con carbonato de sodio hasta llegar a un pH básico (pH = 9). Esto se realiza calentando hasta aproximadamente 90 °C y con agitación constante de la pulpa. Se debe de agregar el carbonato de sodio con un exceso para asegurarnos que todo el plomo contenido en el lodo haya sido carbonatado. El carbonato de sodio se agrega en estado sólido al 98% de pureza; pero previamente se le añade una cierta cantidad de agua para formar una pulpa con el lodo y además de asegurar que el carbonato de sodio sea disuelto.

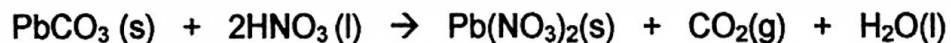
El exceso de carbonato agregado se puede determinar; neutralizando una muestra de peso conocido del soluble del carbonato de plomo (solución filtrada) con ácido sulfúrico. La reacción sería la siguiente:



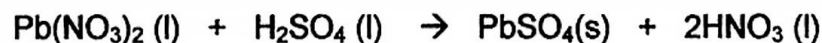
Luego de haber llegado al pH indicado; se procederá a filtrar la pulpa; quedándonos con el cake para el siguiente paso.

**El segundo paso** es lixiviar al carbonato de plomo que se encuentra en estado sólido como lodo, se le lixivia con ácido nítrico hasta llegar a un pH 2. Es importante no excederse del pH indicado; debido a que si llegamos a un pH más ácido en este medio se podría disolver parte del cobre; siendo consumidoras del ácido nítrico.

Al agregar el ácido nítrico produce formación de espuma, agitar constantemente la pulpa; la no presencia de espuma es indicativo que hemos llegado al pH indicado. Se produce durante la reacción burbujas que ascienden a la superficie; por la presencia del CO<sub>2</sub>; además de los gases nitrosos característicos (gases de color amarillentos). La reacción es la siguiente:



Luego que hemos lixiviado al plomo como nitrato y que se encuentra en solución; Procedemos a precipitarlo agregándole ácido sulfúrico 1:1; de esta manera el plomo precipita como sulfato de plomo. Además se logra recuperar el ácido nítrico como lo indica la reacción siguiente:



Los efluentes líquidos que se producen (filtrados) contienen pequeñas trazas de elementos contaminantes.

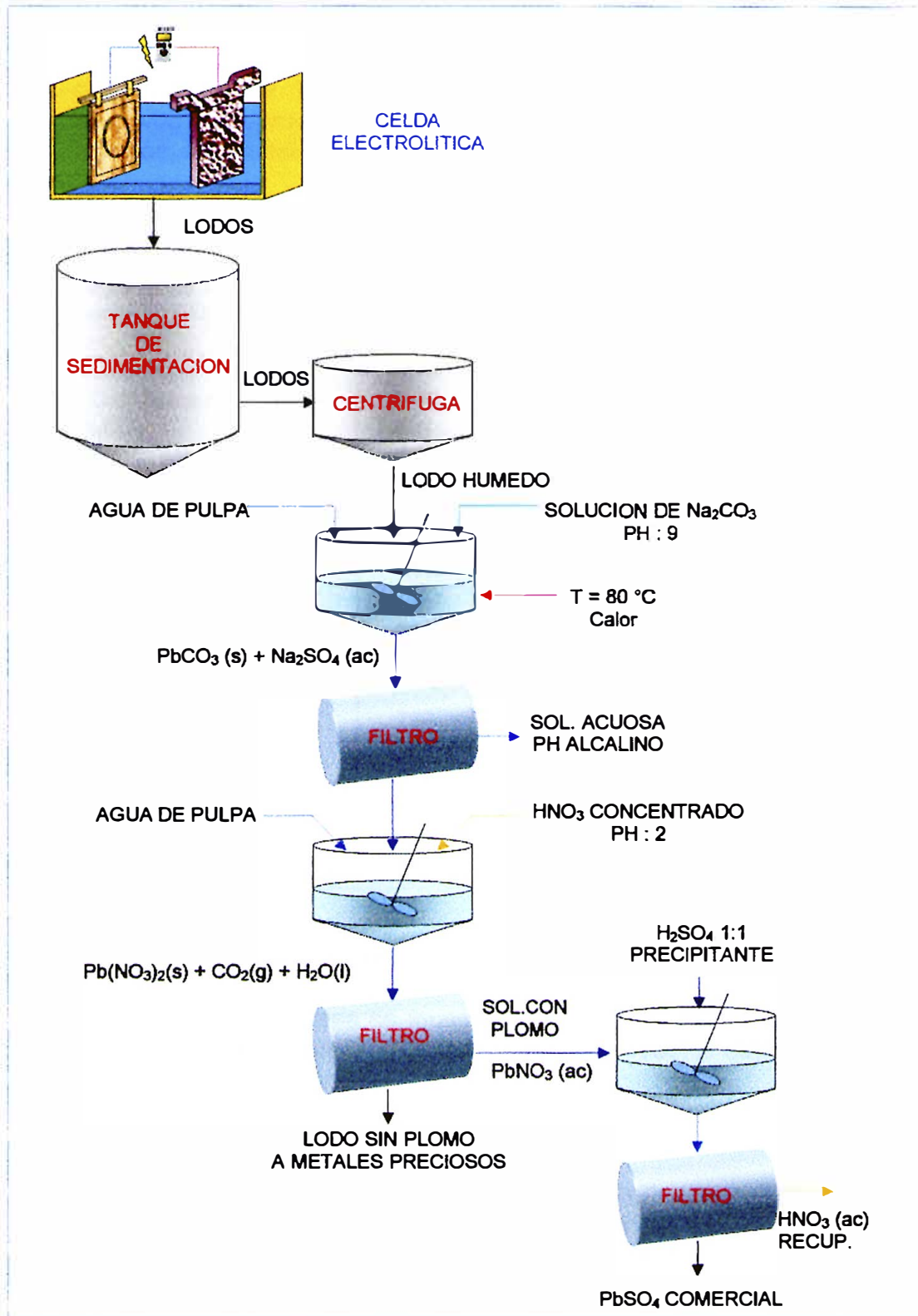


Fig. Nº 6-2: Diagrama de flujo del Proceso Nº 1 para la eliminación del plomo al lodo de una celda electrolítica.

**a.-Consumos de materiales y reactivos del Proceso N° 1**

Aquí se explica en forma de tabla lo que indica el diagrama de flujo del "Proceso N° 1", donde además se señalan las cantidades de reactivos y subproductos que se obtienen en cada etapa del proceso; además, se muestra un cuadro de observaciones.

Tabla N° 6-4: en esta se muestra el procedimiento seguido paso a paso conforme el diagrama de flujo para tratar la muestra de lodo anódico, indicando cantidades de reactivos utilizados y productos obtenidos.

Ítem	Cantidad	Unid	Observaciones
Peso de lodo seco	1940	gr	Muestra inicial, Pb a recuperar:
H <sub>2</sub> O de pulpa o de dilución	5000	ml	Utilizado para llevar a solución el lodo
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	691	gr	se agregó 110 gr de exceso
Volumen soluble (PbCO <sub>3</sub> )	5209,2	ml	pH de la solución 10
HNO <sub>3</sub> conc	550	ml	Se agrego en forma diluida 1:1
H <sub>2</sub> O pulpa	4000	ml	
Cake húmedo sin Pb.	3381	gr	
Lodo seco sin Pb.	1185,37	gr	
Soluble de Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4860	ml	132 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc. = 521gr PbSO <sub>4</sub>
H <sub>2</sub> O lavado	2000	ml	29 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc. = 218 gr PbSO <sub>4</sub>
2da. H <sub>2</sub> O de lavado	6492	ml	26 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc
Agua madre	2000	ml	
PbSO <sub>4</sub> recuperado (húmedo)	739	gr	
PbSO <sub>4</sub> recuperado (filtro)	521	gr	
PbSO <sub>4</sub> recuperado (lavado)	218	gr	
PbSO <sub>4</sub> total seco	556	gr	
Lodo residual sin Pb	1498	gr	% humedad 62.86% se hallo 2 veces
Muestra s/Pb para humedad	251	gr	% humedad 64.94%

**b.-Recuperación de Plomo en el Proceso N° 1**

En las tablas siguientes se muestra un resumen total del tratamiento, así como análisis químico respectivo de los productos obtenidos en el proceso de "Desplomado":

Tabla N° 6-5: resultados del tratamiento al lodo anódico del "Proceso N° 1"

	Cantidad	Unid	Ag(%)	Au(%)	Cu(%)
Lodo 1400 normal	1940	gr	10,124	0,057	17,09
Lodo 1400 sin Pb	526	gr	15,831	0,06	25,496
PbSO <sub>4</sub> 1400	556	gr	-	-	0,004
Volumen soluble Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5209,2	ml	0.004g/l	-	-
Volumen de H <sub>2</sub> O madre	2000	ml	0.004g/l	-	-
Volum de H <sub>2</sub> O lavado PbSO <sub>4</sub>	6492	ml	ND	-	-

	Se(%)	Pb(%)	Sb(%)	Plomo(gr)	% Recup.
Lodo 1400 normal	5,539	30,72	-	595,97	0,65
Lodo 1400 sin Pb	83,375	11,291	-	59,39	
PbSO <sub>4</sub> 1400	0,044	-	0,021	379,69	
Volumen soluble Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.013g/l	0.056g/l	0.136g/l	0.2917g/l	
Volumen de H <sub>2</sub> O madre	0.005g/l	3.928g/l	0.011g/l	7.856g/l	
Volum de H <sub>2</sub> O lavado PbSO <sub>4</sub>	0.004g/l	0.013g/l	0.125g/l	0.0844g/l	

Tabla № 6-6: aquí se muestra la cantidad de muestra utilizada y de reactivos usados, así como los productos principales.

	Cantidad	Unidad
Lodo seco	1940	gr
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	691	gr
HNO <sub>3</sub> conc.	550	ml
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	187	gr
PbSO <sub>4</sub> seco	556	gr
Lodo final seco	526	gr

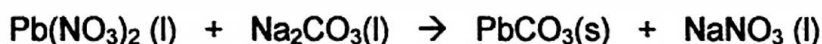
Tabla № 6-7: aquí se muestra la eficiencia de utilizar la "Proceso № 1" para eliminar el plomo del lodo anódico.

	Cantidad	Unidad
Peso de lodo seco	1940	gr
Plomo a recuperar	595,97	gr
Plomo recuperado	379,69	gr
Eficiencia de proceso	63,7%	%

### 6.1.2 Proceso № 2 – "Eliminación del plomo como carbonato"

Las reacciones de carbonatación y lixiviación son similares que la del Proceso anterior; la única diferencia sería la de utilizar otro reactivo precipitante; en este caso sería el carbonato de sodio.

Reacción:



El carbonato de plomo que se obtiene como producto del desplomado es un producto con mayor facilidad para la comercialización; pero el precio del carbonato de sodio como reactivo precipitante es muy costoso y en este Proceso se utiliza gran cantidad de carbonato de sodio; por esto descartamos esta Proceso. Cabe señalar que se hicieron las pruebas a nivel laboratorio para este proceso.

Para el desplomado del lodo anódico se busco alternativas de tratamiento al lodo anódico con reactivos que la empresa usara en otros procesos o que pudiera adquirir fácilmente, es por el alto costo del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y que su uso solo sería para el proceso № 1, es decir si tuviera aplicación en otro proceso su volumen de compra sería mayor abaratando los costos del Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, lo que nos lleva a descartar esta alternativa.

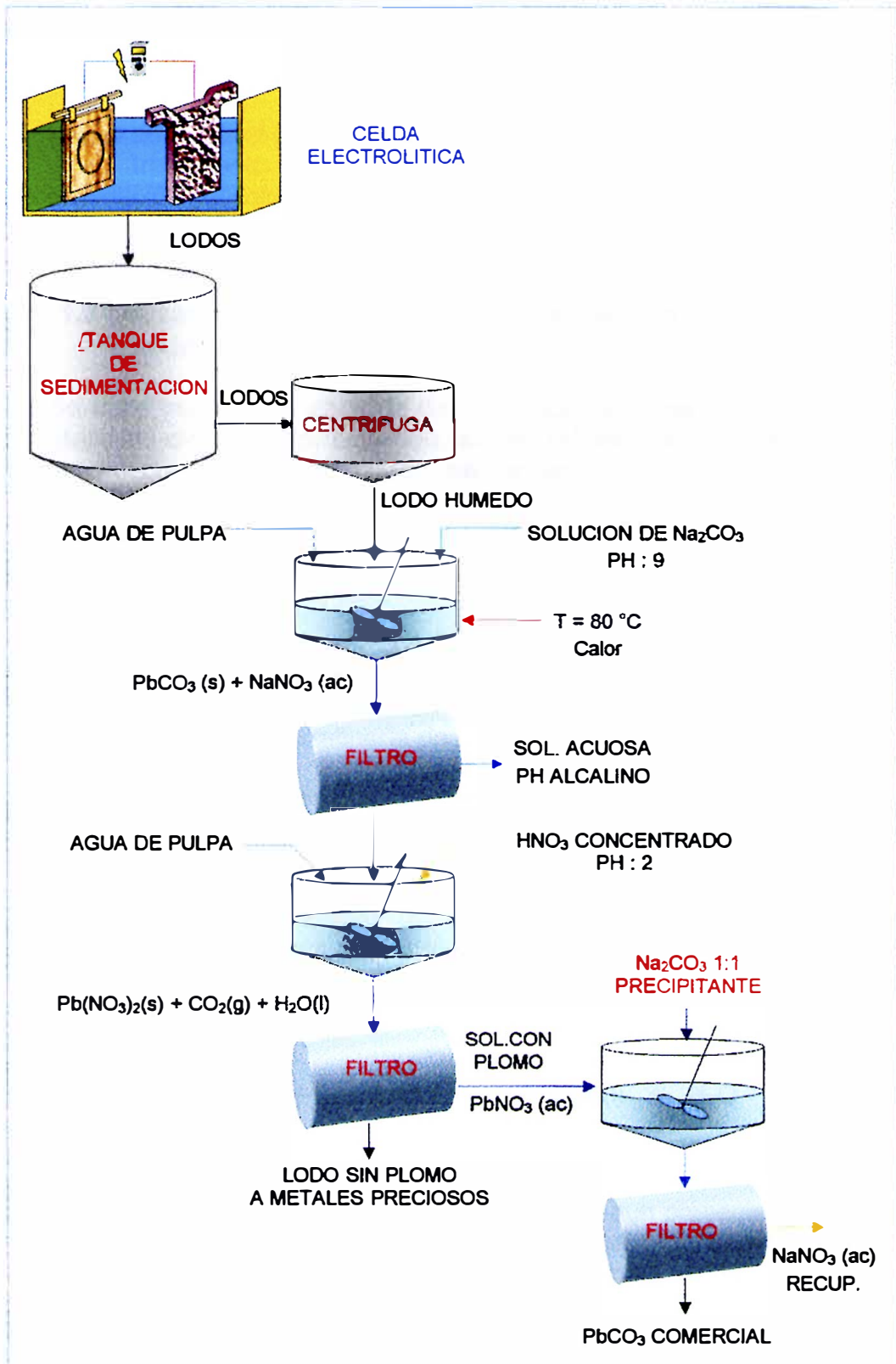


Fig. Nº 6-3: diagrama de flujo del Proceso Nº 2 para la eliminación del plomo al lodo de una celda electrolítica.



Entre los dos procesos propuestos, se selecciona el proceso N°1 debido al menor costo en reactivos, ya que el proceso N°2 consume  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (0.35\$/kg) reactivo precipitante siendo este mas caro que el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.14\$/kg) reactivo precipitante del proceso N°1.

Luego de elegir el proceso más recomendable, ahora se debe saber si dicho tratamiento se aplicara antes o después de la etapa de eliminación del cobre de los lodos (decoperizado).

### **6.1.3 Ubicación de la etapa de decoperizado en el Proceso de Eliminación del plomo.**

Se debe saber si la etapa de decoperizado va antes o después de la etapa de desplomado, sabiendo que en refinería el producto principal es el cobre y debe existir un proceso de recuperación de este

#### **6.1.3.1 Etapa de Decoperizado Antes de la etapa de desplomado**

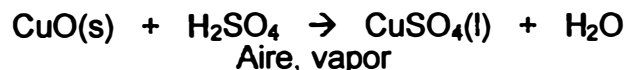
##### **a.-Etapa de decoperizado**

Actualmente a los lodos anódicos antes de enviarlos a planta de metales preciosos son sometidos a una etapa de decoperizado con el fin de recuperar los remanentes de cobre que hay en el lodo que es el producto principal de refinería de llo.

El propósito de plantear un decoperizado previo al proceso de desplomado es ver si este proceso se beneficiaba al aplicar dicha etapa de decoperizado antes de la etapa de desplomado.

El decoperizado consiste en lixiviar al lodo con ácido sulfúrico inyectándoles además aire y vapor, para eliminar el resto de cobre aun presente en los lodos; que son consumidoras

Reacciones:



El lodo anódico contiene cerca de 30% de Cu aun presente es por eso importante reducir el contenido de este haciéndoles un decoperizado(lixiviación) inyectándoles aire para oxidar al cobre y vapor (temperatura) para que se pueda producir la lixiviación. Para producir el decoperizado u oxidación del lodo se calienta el lodo hasta alcanzar una temperatura de 80°C y se deja asentar para drenar toda la solución unas ves realizado esto al lodo que esta en el tanque de oxidación se le adiciona ácido decoperizado, se le insufla vapor hasta

alcanzar una temperatura de 80°C, también se le inyecta aire con la finalidad de oxidar el cobre y mover el lodo.

Luego de 12 horas de oxidación, cortamos la oxidación con la finalidad de renovar la solución o el ácido decoperizado y reiniciar nuevamente la oxidación con ácido decoperizado fresco, luego de 24 horas procedemos a sacar una muestra que se envía a laboratorio para su análisis de cobre. La muestra de lodo anódico debe tener menos del 2% de cobre en el lodo, siendo así procedemos a cortar la oxidación cerrando las válvulas de aire y vapor dejando asentar el lodo para luego drenar la solución que es enviada al tanque C-35 1 y 2, y de ahí a través del filtro del tanque C-5, esta solución que también se llama "agua madre" es alimentada a las celdas de segunda liberadora.

El lodo que ya esta listo para centrifugar se baja al pozo C-30 y de ahí se bombea a las centrifuga hidráulicas. Una vez terminado el decoperizado (aprox. 24h) el contenido de cobre en los lodos es menor a 2%, renovando el ácido decoperizado; luego de haber lixiviado por 10 horas aprox.

La lixiviación se realiza con ácido sulfúrico decoperizado, que es obtenido en planta de purificación al concentrar o evaporar la solución electrolítica.

Tabla № 6-8: composición química del electrolito utilizado en refinería.

Compuesto	gr/lt
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	900, 57
Cu	0.01

Una vez listo el lodo decoperizado se procederá a desplomarlo al igual que el Proceso № 1.

#### **b.-. Etapa de desplomado**

El lodo almacenado en cilindros, es dejado reposar por espacio de 2 horas luego del cual es sometido a lavado con agua caliente con el fin de eliminar los remanentes de electrolito.

El primer paso seria el de carbonatar al plomo con carbonato de sodio hasta llegar a un pH básico (pH = 9). Esto se realiza calentando hasta 90°C y con agitación constante de la pulpa. Se debe de agregar el carbonato de sodio con un exceso para asegurarnos que todo el plomo contenido en el lodo haya sido carbonatado. El carbonato de sodio se agrega en estado sólido al 98% de pureza; pero previamente se le añade una cierta cantidad de agua para formar una pulpa con el lodo y además de asegurar que el carbonato de sodio sea disuelto.

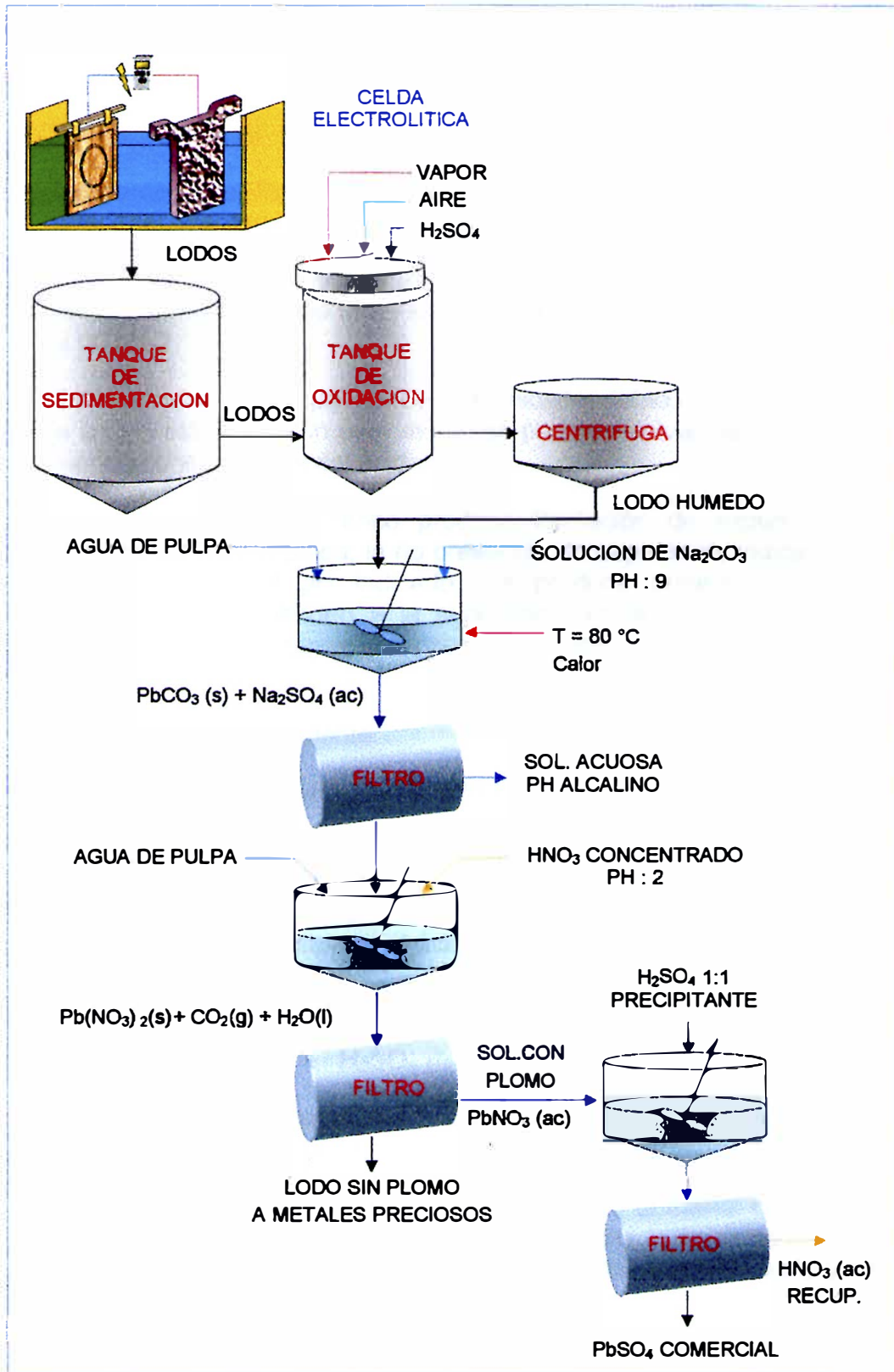


Fig. N° 6-4: diagrama de flujo del Proceso N°1 aplicando una etapa previa de decoperizado del lodo y luego la etapa de eliminación del plomo del lodo de una celda electrolítica.

La reacción sería la siguiente:



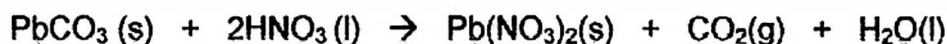
Luego de haber llegado al pH indicado; se procederá a filtrar la pulpa; quedándonos con el cake para el siguiente paso.

El segundo paso es lixiviar al carbonato de plomo que se encuentra en estado sólido como lodo, se le lixivia con ácido nítrico hasta llegar a un pH 2.

Es importante no excederse del pH indicado; debido a que si llegamos a un pH más ácido en este medio se podría disolver parte del cobre; siendo consumidoras del ácido nítrico.

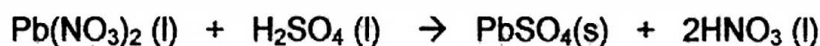
Al agregar el ácido nítrico produce formación de espuma, agitar constantemente la pulpa; la no presencia de espuma es indicativo que hemos llegado al pH indicado. Se produce durante la reacción burbujas que ascienden a la superficie; por la presencia del CO<sub>2</sub>; Además de los gases nitrosos característicos (gases de color amarillentos).

La reacción es la siguiente:



Luego que hemos lixiviado al plomo como nitrato y que se encuentra en solución; Procedemos a precipitarlo agregándole ácido sulfúrico 1:1; de esta manera el plomo precipita como sulfato de plomo. Además se logra recuperar el ácido nítrico como lo indica la reacción.

La reacción es la siguiente:



Los efluentes líquidos que se producen (filtrados) contienen pequeñas trazas de elementos contaminantes.

Este Proceso sería el más conveniente debido al menor consumo de reactivos ( ya que el cobre en el lodo es una buen consumidor de ácidos); y por obtener mayor extracción del plomo en forma de sulfato de plomo.

Tabla N° 6-9: Análisis químico del sulfato de plomo producido.

	Ag(%)	Au(%)	Cu(%)	Se(%)	Pb(%)	Te(%)
PbSO <sub>4</sub>	0.013	ND	0.082	0.042	66.8	0.010

ND : No Detecto.

### c.-Evaluación de proceso

En las tablas siguientes se muestra el consumo de reactivos y subproductos obtenidos en las etapas de decoperizado y desplomado, estos están enumerados conforme intervienen en el proceso.

Tabla № 6-10: en esta se muestra el procedimiento seguido paso a paso para tratar la muestra de lodo anódico mediante un "proceso de decoperizado.

Etapa Decoperizado	Cantidad	Unid.	Observaciones
Lodo seco	1747	gr	Muestra a tratar
<u>Primer decoperizado</u>			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> decoperizado	6398	gr	Dens. 1.13gr/ml T: 97 °C, inyección de aire
Soluc. decoperizada	8341,7	ml	Solución rica en cobre
Peso de lodo húmedo	2490	gr	
<u>Segundo decoperizado</u>			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> decoperizado	11058	gr	exceso de 4702 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> luego de evaporarse H <sub>2</sub> O
Soluc. decoperizada	6983	ml	Cementación de selenio, con calentamiento T<100C
Se cementado	2	gr	
Peso de lodo húmedo	2325	gr	
<u>Tercer decoperizado</u>			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> decoperizado	9640	ml	mantener la misma acidez al decoperizar el lodo
Soluc. Decoperizada	9002	ml	Cementación de selenio,
Se cementado	3	gr	Agregando una plancha de Cu.
Peso de lodo húmedo	1800	gr	H:33% los 88 gr salen del proceso
Lodo seco a desplomar	1112	gr	hacia la etapa de desplomado

Tabla № 6-11: se muestra cantidades de reactivos utilizados y productos obtenidos.

Proceso desplomado	Cantidad	Unid	Observaciones
Muestra de lodo	1112	gr	Muestra sin cobre
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	500	gr	Se agrego un exceso de 50 gr
H <sub>2</sub> O de pulpa	2800	ml	Agua de dilución
Peso de pulpa	3912	gr	Solución diluida
Soluble PbCO <sub>3</sub>	2500	ml	
Cake húmedo	1638	gr	Lodo filtrado
HNO <sub>3</sub> conc.	390	ml	Se agrego en forma diluida 1:1
Soluble PbNO <sub>3</sub>	3300	ml	211 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 840 gr PbSO <sub>4</sub>
H <sub>2</sub> O de lavado	3148	ml	10 ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = Form. de cristales
H <sub>2</sub> O madre	2000	ml	12 gr H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = Form. de cristales
PbSO <sub>4</sub> húmedo	840	gr	% H: 23.21
Densidad aparente (min.)	1,45	gr/ml	
Densidad aparent.(máx.)	1,82	gr/ml	
Peso lodo S/Cu - Pb	713	gr	%H: 45.72

Tabla № 6-12: Cantidad de muestra y de reactivos usados, así como los productos principales.

	Cantidad	Unidad
Lodo seco	1112	gr
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	500	gr
HNO <sub>3</sub> conc.	390	ml
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	248	gr
PbSO <sub>4</sub> seco	645	gr
Lodo final seco	387	Gr

**d.-Productos Obtenidos:** En las siguientes tablas se muestran los productos obtenidos así como su respectivo análisis químico para determinar el grado de pureza del lodo obtenido y del PbSO<sub>4</sub>.

Tabla № 6-13: cantidades y análisis químico de los subproductos y productos obtenidos al aplicar el Proceso decoperizado-desplomado.

	Cantidad	Unidad	Ag(%)	Cu(%)	Se(%)
Solución CO <sub>3</sub>	2500	ml	0.004g/l	-	0.013g/l
Solución H <sub>2</sub> O madre	2000	ml	0.004g/l	-	0.005g/l
H <sub>2</sub> O de lavado PbSO <sub>4</sub>	700	ml	ND	-	0.004g/l
Lodo sin Cu	1112	gr	13,893	2,857	7,404
Lodo sin Cu – Pb	387	gr	41,667	8,246	18,952
PbSO <sub>4</sub>	645	gr	-	0,007	0,124

	Pb(%)	Peso de Pb(gr)	% Recuperación
Solución CO <sub>3</sub>	0.056g/l	0,14	97,61%
Solución H <sub>2</sub> O madre	3.928g/l	7,856	
H <sub>2</sub> O de lavado PbSO <sub>4</sub>	0.013g/l	0,0091	
Lodo sin Cu	40,555	450,97	
Lodo sin Cu – Pb	2,75	10,64	
PbSO <sub>4</sub>	-	440,2	

Tabla № 6-14: aquí se muestra la eficiencia del proceso de decoperizado, donde se ve los contenidos de cobre en cada etapa de decoperizado.

Ítem	cantidad	Unid	% Cu	Peso Cu	% recup.
Solución 1er Decoperizado	8341,7	ml	-	-	58,0
Solución 2do Decoperizado	6983	ml	15.962g/l	111,46	
Solución 3er Decoperizado	9002	ml	6.859g/l	61,74	
Lodo normal (seco)	1747	gr	17,09	298,56	
Lodo sin Cu (seco)	1112	gr	2,857	31,77	
<b>PbSO<sub>4</sub></b>	<b>645</b>	<b>gr</b>	<b>0,007</b>	<b>0,04515</b>	

Tabla № 6-15: aquí se muestra la eficiencia

Proceso	Cantidad	Unidad
Peso de lodo seco	1747	Gr
Plomo a recuperar	536,68	Gr
Plomo recuperado	440,2	Gr
<b>Eficiencia de proceso</b>	<b>82,0%</b>	<b>%</b>

### 6.1.3.2 Etapa de Decoperizado después de la etapa de desplomado

Al lodo sometido al proceso N°1, se le someterá al proceso de decoperizado, para poder determinar los contenidos en cuanto al cobre y al plomo en el lodo final, los cuales se pondrán en el cuadro de comparación entre las etapas.

### 6.1.3.3 Comparación entre las etapas de decoperizado antes y después de la etapa de desplomado

#### a.-Eficiencia del proceso y calidad del producto obtenido.

Se consideran las cantidades de muestras, eficiencias obtenidas lo que indica la cantidad de plomo eliminado del lodo; además, el consumo de reactivos de ambos procesos en la etapa de desplomado, ya que la etapa de decoperizado se somete al lodo anódico obligatoriamente con el objetivo de recuperar el cobre.

Tabla N° 6-16: esta tabla compara los consumos de reactivos los Procesos N° 1 con decoperizado antes y después de la etapa de desplomado, así como la eficiencia.

Etapa de decoperizado después de la etapa de desplomado		Etapa de decoperizado antes de la etapa de desplomado	
Sección	70	Sección	70
Celda	15	Celda	15
Contenido de Pb (ánodos)	1400 ppm	Contenido de Pb (ánodos)	1400 ppm
Lodo total de celda (seco)	89.231 Kg	Lodo total de celda (seco)	89.231 Kg
Cantidad de plomo	32.32 Kg	Cantidad de plomo	32.32 Kg
Sulfato de plomo a producir	47.29 Kg	Sulfato de plomo a producir	47.29 Kg
Muestra de lodo anódico	1940 gr	Muestra de lodo anódico	1850 gr
		Decoperizado	
		Muestra de lodo a decoperizar	1850 gr
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> decoperizado	20 lt
Muestra de lodo a desplomar	1940 gr	Muestra de lodo a desplomar	1747 gr
Sulfato de plomo a producir	1027 gr	Sulfato de plomo a producir	785.6 gr
Sulfato de plomo producido	556 gr	Sulfato de plomo producido	645 gr
Eficiencia	63.74%	Eficiencia	82.11%
Desplomado		Desplomado	
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> agregados	581 gr	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> agregados	500 gr
Exceso de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	178 gr	Exceso de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	50 gr
HNO <sub>3</sub> Conc.	0.77 Kg	HNO <sub>3</sub> Conc.	0.546 Kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Conc.	187 gr	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Conc.	211 gr
PbSO <sub>4</sub> (seco)	556 gr	PbSO <sub>4</sub> (seco)	645 gr

<b>Lodo residuo final (seco)</b>	<b>1185 gr</b>	<b>Lodo residuo final (seco)</b>	<b>713 gr</b>
<b>Decoperizado</b>			
<b>Lodo a decoperizar</b>	<b>1185 gr</b>		
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> decoperizado</b>	<b>18.5 lt</b>		

De la tabla anterior se deduce que el proceso mas optimo para eliminar el plomo del lodo anódico es el proceso N°1 con la etapa de decoperizado antes de la etapa de desplomado por ser el de mejor eficiencia (70,26%) y por tener un menor consumo de reactivos en su etapa de desplomado.

### b.-Análisis de Laboratorio.

Aquí se compara la calidad química obtenida del lodo anódico después de someterse el lodo anódico al proceso N° 1 de desplomado con un decoperizado antes o después, además se indica el contenido de plomo y cobre en cada una de las etapas de ambos procesos.

Tabla N° 6-17: aquí se indica el contenido de plomo y cobre en las muestras de lodo anódico y en el lodo desplomado.

Desplomado - Decoperizado			Decoperizado - Desplomado		
Muestra	Cu (%)	Pb(%)	Muestra	Cu(%)	Pb(%)
Lodo sin procesar	17,09	30,72	Lodo sin procesar	17,09	30,72
Lodo desplomado	25,496	11,291	Lodo decoperizado	2,857	40,555
Lodo decoperizado	3%	11	Lodo desplomado	8,246	2,75

Aquí se observa que el lodo desplomado del Proceso decoperizado-desplomado contiene menor % de Pb incluso que el lodo sin procesar, lo cual nos dice si se envía este lodo a metales preciosos su procesamiento seria mas efectivo ya que el volumen del lodo seria menor.

### c.-Evaluación de costos

Para la evaluación de costos solo se considerara la etapa de desplomado y el consumo de reactivos únicamente para ambos procesos, ya que el ácido sulfúrico decoperizado utilizado en la etapa de lixiviación lo produce la misma refinaria.

Tabla N° 6-18: Precio de reactivos.

Reactivo	Costo
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.35 \$/kg
HNO <sub>3</sub>	0.42 \$/kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.14 \$/Kg



Tabla № 6-19: evaluación económica de ambos Procesos, evaluando el consumo de reactivos utilizados

Reactivos	Desplomado-decoperizado		Decoperizado-desplomado	
	Consumo	Costo \$	Consumo	Costo \$
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.581 Kg	0.203 \$	0.500 Kg	0.175 \$
HNO <sub>3</sub>	0.770 Kg	0.323 \$	0.546 Kg	0.229 \$
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.187 Kg	0.026 \$	0.211 Kg	0.030 \$
	<b>Total</b>	<b>0.553</b>	<b>Total</b>	<b>0.434 \$</b>

Para esta evaluación de costos no se ha considerado los costos de vapor, ni de agua, así como costos de aire (todos ellos de la etapa de decoperizado). Según la eficiencia y costos el Proceso más rentable es aquel proceso que primero se le aplique un decoperizado y luego un desplomado.

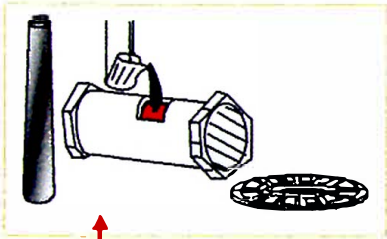
#### 6.1.4 Evaluación del proceso decoperizado-desplomado a nivel planta piloto

Ahora se procede hacer las pruebas para este tratamiento a nivel piloto, para lo cual se realizaron una serie de pruebas con lodos anódicos con distinto contenido de plomo, con el fin de determinar la variación de la eficiencia y demás parámetros del tratamiento a diferentes contenidos en ppm de plomo.

Tabla № 6-20: aplicación del proceso decoperizado-desplomado para la eliminación del plomo, aplicado a lodo anódico con diferentes contenidos en plomo

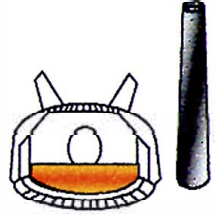
Lodo con plomo	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
<b>Sécción</b>	70	80	80
<b>Celda</b>	10	9	12
<b>Cantidad de plomo (Kg)</b>	18,74	27,7	36,94
<b>Cantidad de PbSO<sub>4</sub> a recuperar (Kg)</b>	27,078	40,62	54,15
<b>Volumen de lodo filtrado (lt)</b>	127,89	119,13	144,51
<b>Peso de lodo húmedo (Kg)</b>	179,2	177,4	209,35
<b>Porcentaje de humedad (%)</b>	65,95%	64,93%	61,19%
<b>Peso de lodo seco (Kg)</b>	61,017	64,4	81,25
<b>Pérdida de Pb en ánodos corroídos (Kg)</b>	3.04	4.56	6.08
<b>PbSO<sub>4</sub> a recuperar del lodo (Kg)</b>	24.03	36.06	48.07
<b>Primer decoperizado</b>			
<b>Volumen de lodo sedimentado (lt)</b>	81,57	85,6	99,28
<b>Volumen de solución drenada (et)</b>	96,2	105,23	91,55
<b>Segundo decoperizado</b>			
<b>Volumen de lodo sedimentado (lt)</b>	57,25	62,66	81,63
<b>Volumen de solución drenada (lt)</b>	96,2	121,34	109,2
<b>Tercer decoperizado</b>			
<b>Volumen de lodo sedimentado (lt)</b>	45,8	43,02	48,54

### FUNDICIÓN SOUTHERN



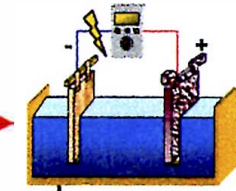
BLISTER

### PLANTA ÁNODOS



ÁNODOS

### PLANTA ELECTROLÍTICA



LODO ANÓDICO



CÁTODOS GRADO "A"

ESCORIA ÁNODOS

TK LIXIVIACIÓN

PURIFICACIÓN ELECTROLITO

SELENIO COMERCIAL



REACTOR Se

SOLUCIÓN ÁCIDA A LIXIVIACIÓN

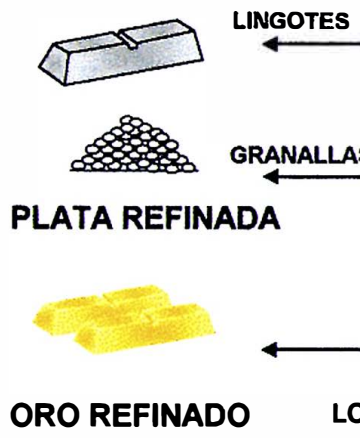
LODO DESELENIZADO

LODO DE 2DA LIBERADORA

EVAPORADOR



SULFATO DE NÍQUEL



LINGOTES

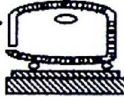
GRANALLAS

PLATA REFINADA

ORO REFINADO

THUM CELLS

DORE



HORNO DORE

ESCORIA DORE A HORNO MAERZ

LODO PLATA

(Pt, Pd)

### PLANTA METALES PRECIOSOS

Volúmen de solución drenada (lt)	96	147,81	142,29
Volúmen cake decoperizado Filtrado (lt)	25	24	34
Peso de lodo decoper. Húmedo (Kg)	54,8	58,5	76
Porcentaje de humedad (%)	37,99%	32,38%	31,26%
Peso de lodo decoper. Seco (Kg)	33,98	39,56	52,24
<b>Desplomado</b>			
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (Kg)	10,3	12,31	15
HNO <sub>3</sub> conc.(lt)	8,432	11	13,5
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.(lt)	3,15	6	7,5
Volúmen de Lodo desplomado (lt)	18,3	20	20,8
Lodo seco sin plomo (Kg)	24,06	22,88	23,52
PbSO <sub>4</sub> producidos (Kg)	8,607	18,55	26,94
Eficiencia desplomado	35.4%	51.4%	55.7%

### a.-Volúmenes de lodo anódico

#### Volúmen del lodo anódico durante el proceso de desplomado

Tabla Nº 6-21: aquí se muestra el volúmen del lodo anódico en cada etapa del tratamiento del proceso decoperizado - desplomado, indicando su % de disminución de volúmen.

Etapas del proceso	Contenido de plomo en ánodos		
	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
volúmen (litros)	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
lodo de celda	127,89	119,13	144,51
1ra. Lixivia.	81,57	85,6	99,28
2da. lixivia.	57,25	62,66	81,63
3ra. Lixivia.	45,80	43,02	48,54
lodo decoperizado	25,00	24	34
lodo sin plomo	18,30	20	20,8
<b>% de reducción de volúmen</b>	<b>0,8569</b>	<b>0,8321</b>	<b>0,8561</b>

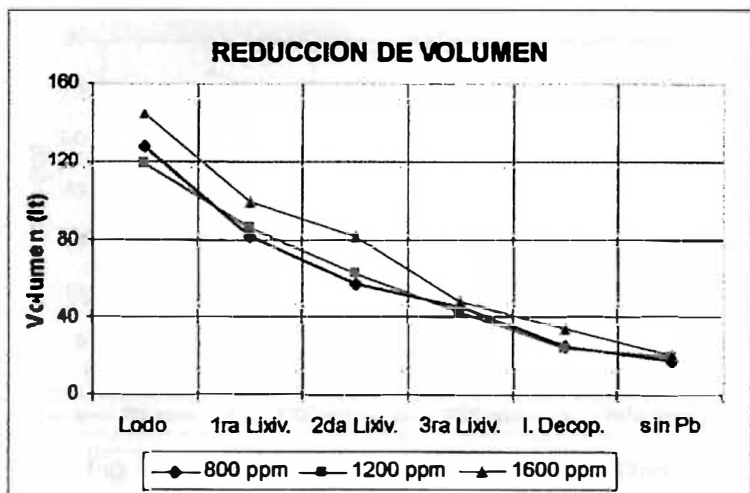


Fig. Nº 6-5: En la grafica se puede observar una disminución significativa del volúmen del lodo anódico después de sufrir una decoperización y posteriormente un desplomado.

Tabla Nº 6-22: se muestra la reducción en volumen por proceso para diversos tipos de lodo anódico.

Proceso	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
Decoperizado	80,5%	79,9%	76,5%
Desplomado	85,7%	83,2%	85,6%

El % de reducción de volumen es sobre la base del volumen de lodo en celda

Por lo tanto como resultado final al aplicar la eliminación de plomo al lodo anódico tiene como resultado directo: **la disminución del volumen de lodos en un 85%.**

**b.-Pesos de lodo anódico:**

Tabla Nº 6-23: aquí se indica el porcentaje de reducción en peso que sufre el lodo en cada etapa del proceso (Decoperizado-Desplomado)

Lodo con contenido de plomo	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
Peso de lodo húmedo antes de decoperizar (kg)	179,2	177,4	209,35
Porcentaje de humedad (%)	65,95	64,33	61,19
Peso de lodo seco a decoperizar (kg)	59,92	63,28	81,25
Peso lodo decoperizado húmedo (kg)	54,3	58,3	76
Porcentaje de humedad (%)	37,99	32,38	31,26
Peso de lodo seco a desplomar (kg)	33,67	39,56	52,24
Peso de lodo desplomado húmedo (kg)	40,4	37,1	41
Porcentaje de humedad (%)	41,32	38,53	42,61
Peso de lodo seco sin plomo (kg)	23,71	22,81	23,52
Sulfato de plomo obtenido húmedo (kg)	10,74	23,16	33,63
Porcentaje de humedad (%)	19,9		
Sulfato de plomo seco extraído (kg)	8,61	18,55	26,94
<b>Porcentaje de reducción de peso</b>	<b>60,43</b>	<b>63,95</b>	<b>71,05</b>

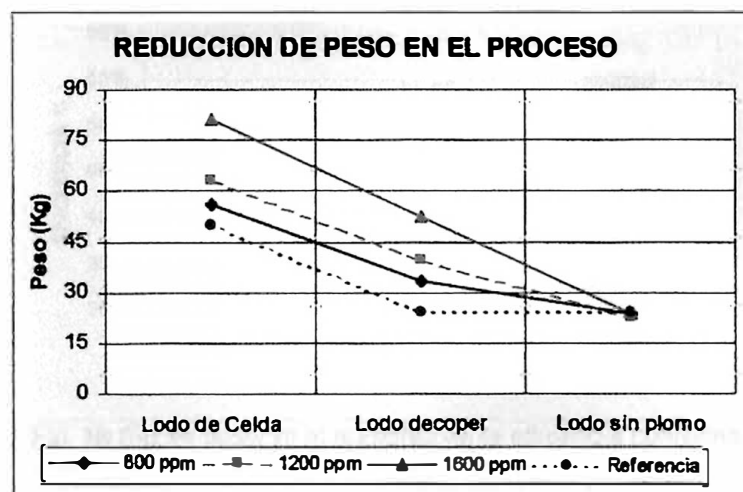


Fig. Nº 6-6: Peso del lodo anódico en cada etapa.

En la siguiente tabla se muestra la reducción en peso que sufre el lodo después de ser sometido a proceso.

Tabla № 6-24: Reducción en peso del lodo anódico en cada etapa

Proceso	800 ppm	1200 ppm	1600 ppm
Decoperizado	43,8%	37,5%	35,7%
Desplomado	60,4%	64,0%	71,1%

El % de reducción de peso es sobre la base del peso de lodo seco en celda

**c.-Consumo de Reactivos en la etapa de desplomado.**

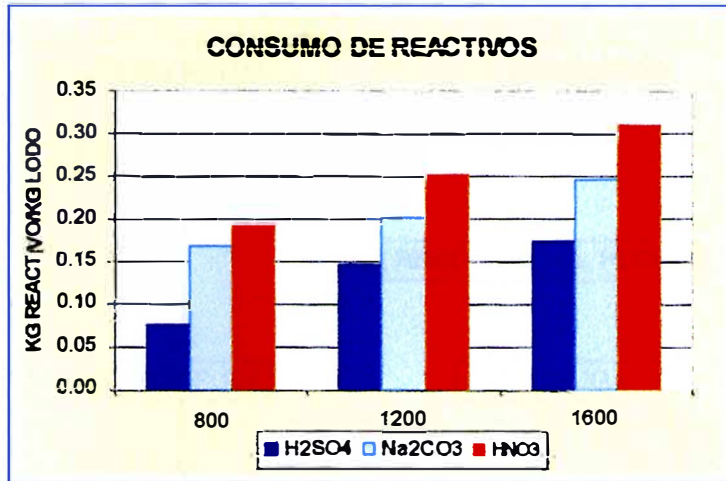


Fig. № 6-7: se observa el aumento en el consumo de reactivos cuando existe un aumento de plomo en el ánodo

**d.-Eficiencias del proceso Decoperizado-Desplomado**

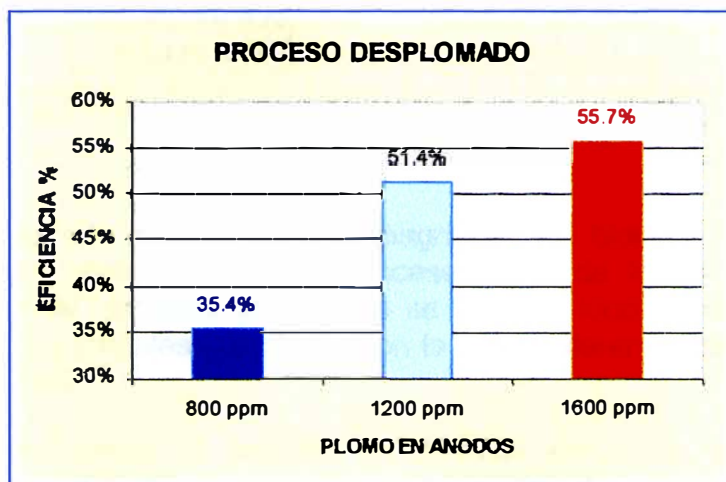


Fig. № 6-8: se observa el aumento de la eficiencia conforme varía el plomo en el ánodo

**Observación:** De estos gráficos se observa que a mayor contenido de plomo en el lodo el consumo de reactivos para el proceso de desplomado aumenta, a sus ves se obtendrá mayor cantidad de sulfato de plomo ( $PbSO_4$ ). Y la eficiencia del proceso aumenta, indicando que conviene trabajar con lodos con alto contenido de plomo.

## 6.2 Nuevo tratamiento al lodo anódico

De las pruebas a nivel piloto se concluye que se debe hacer una pequeña modificación al procesamiento actual de los lodos anódicos, es decir se debe incluir una nueva etapa llamada “Remoción del Plomo” entre las etapas de “Lodo Decoperizado” y “Centrifuga” tal como se muestra a continuación:

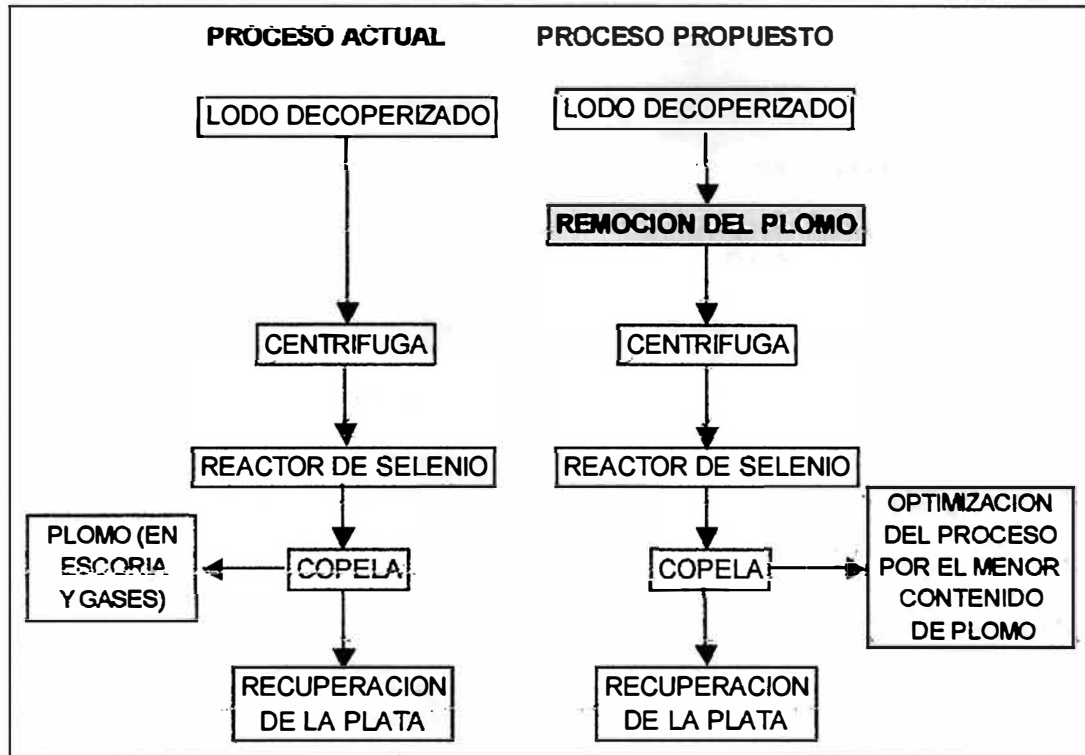


Fig. N° 6-9: Cuadro comparativo entre las diversas etapas que existen entre el proceso actual y el nuevo de tratamiento de lodos.

Tal como se muestra en el diagrama de bloques el “Proceso propuesto” como sistema de procesamiento de lodos anódicos es semejante al “proceso actual” que se le da al lodo anódico antes de enviársele a metales preciosos, con la única diferencia en la etapa de “desplomado”.

Esta modificación al proceso de metales preciosos tendría como consecuencia la disminución de las emisiones de plomo por el menor contenido de estos en el horno de copela y también traería consigo un aumento en la capacidad de tratamiento de lodos anódicos, ya que al contener menos plomo el lodo su volumen disminuye permitiendo el ingreso de mayor cantidad de lodo decoperizado en el reactor de selenio.

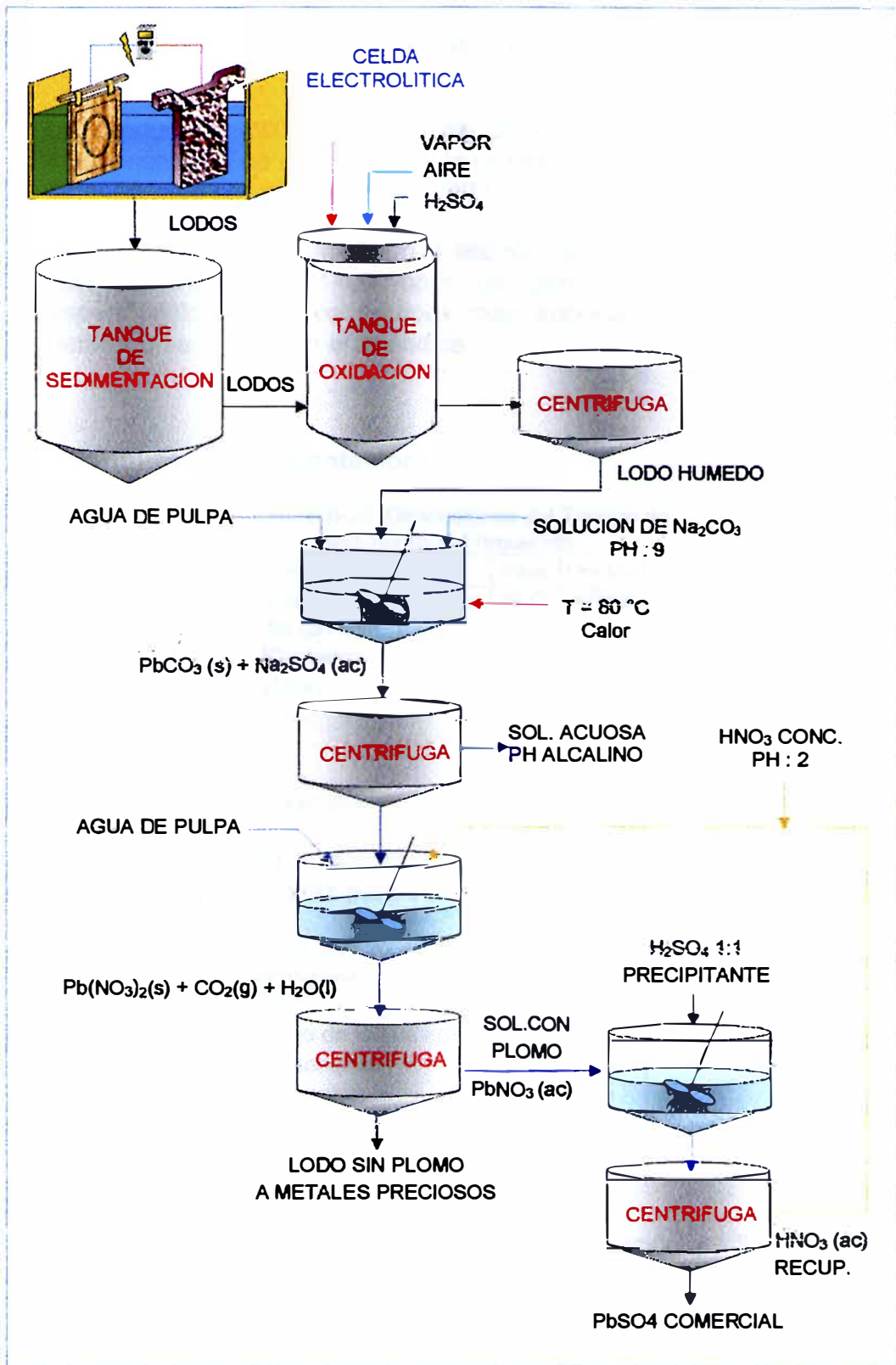


Fig. Nº 6-10: diagrama de flujo optimizado del Proceso propuesto para la eliminación del plomo al lodo de una celda electrolítica, como se observa este proceso se obtiene optimizando el proceso Nº 1.

## 6.2.1 Equipos y costo Económico del Nuevo Proceso

La producción de lodo seco de ánodos con 69 ppm de plomo actualmente es de 1.09 tn/día, y la producción de lodo seco de ánodos de 1400 ppm con plomo es de 2.46 tn/día.

Los equipos se han diseñado y especificado para un lodo producido por un ánodo de 1400 ppm de plomo, aquí se indican las especificaciones de los equipos más importantes, un análisis mas detallado se incluye en el apéndice.

### a) Tanques de sedimentación:

Tabla № 6-25: Dimensiones del Tanque de sedimentación requerido.

Ítem	Valor	Unidad
Flujo de lodo a tratar:	39.56	m <sup>3</sup> /día
Nº tanques:	3	Ud.
Diámetro:	1.97	m
Altura:	4.33	m

### b) Tanques de lixiviación:

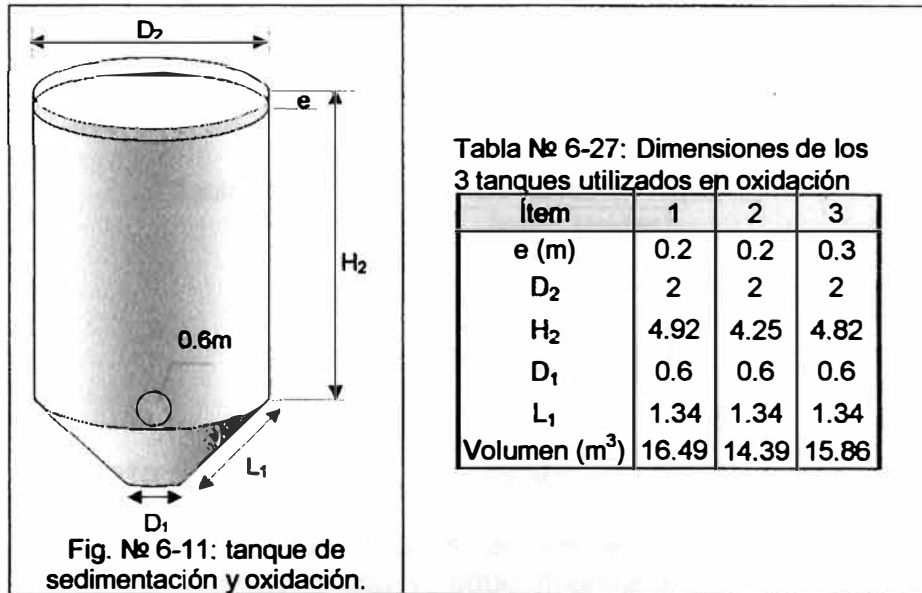
Como se puede observar dichos tanques cumplen con las dimensiones requeridas para tratar el nuevo lodo.

Tabla № 6-26: Dimensiones del Tanque de lixiviación requerido.

Ítem	Valor	unidad
Flujo de lodo a tratar:	38.82	m <sup>3</sup> /día
Nº tanques:	3	Ud.
Diámetro:	1.96	m
Altura:	4.30	m

Refinería cuenta con 3 tanques de sedimentación y 3 tanques de oxidación, cuyas dimensiones y modelo son:





Entre los servicios del tanque de lixiviación están:

- Bomba Hidráulica de 40 HP para bombear los lodos anódicos al tanque de oxidación.
- Bomba del tanque de oxidación hacia la centrífuga de 3 HP.

**c) Reactor de Carbonatación:**



Tabla № 6-28: Dimensiones del reactor.

Ítem	Valor	Unidad
Flujo a tratar	2.28	m <sup>3</sup> /turno
Volumen reactor	2.85	m <sup>3</sup>
№ tanques:	1	
Diámetro:	1.22	m.
Altura:	2.44	m.

**d) Reactor con HNO<sub>3</sub>:**

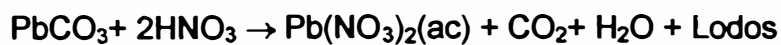


Tabla № 6-29: Dimensiones del reactor requerido

Ítem	Valor	Unidad
Solución a tratar:	1.183	m <sup>3</sup> /turno
№ tanques:	1	
Diámetro:	0.91	m.
Altura:	1.82	m.

**e) Reactor con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:**

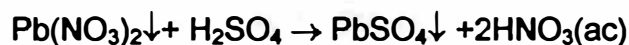


Tabla № 6-30: Dimensiones del reactor requerido

Ítem	Valor	Unidad
Solución a tratar:	2.26	m <sup>3</sup> /turno
Nº tanques:	1	
Diámetro:	1.13	m
Altura:	2.26	m

**6.2.2 Costo Económico del Proceso:**

Una vez realizado los diseños de los equipos y sus respectivos balances de energía, masa y requerimientos para su funcionamiento se determinan los costos que implican estos, los cuales se resumen a continuación:

El consumo de reactivos y servicios se hicieron para tratar un lodo anódico proveniente de ánodos con 1400 ppm de plomo.

**6.2.2.1 Consumo de reactivos**

Al hacer estos costos se considera lo siguiente:

- El ácido nítrico se regenera en el reactor con ácido sulfúrico y se vuelve a utilizar en el proceso, haciendo una disminución en su consumo, el % de regeneración para los costos se toma 50%.
- El ácido sulfúrico se ha indicado su consumo pero no se considera en los costos ya que se utiliza ácido decoperizado que se produce en la sección de segunda liberadora dentro de Refinería.

Tabla № 6-31: Costo Unitario de tratamiento por Kilo de lodo anódico producido por ánodo con un contenido de plomo de 1400.

Rendimiento: 1.205tn/turno	Und.	PU	Cantidad	Parcial
<b>I. Materiales</b>				
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kg	0.35	0.208	0.073
HNO <sub>3</sub>	Kg	0.42	0.138	0.058
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kg	0.14	0.132	0.019
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en lixivia.	Kg	0.00	7.652	0.000
Vapor	Kg	0.0070	1.393	0.010
Agua	Kg	0.0024	1.270	0.003
Aire	Kg	0.0034	0.244	0.001
				<b>0.163</b>
<b>II. Mano de obra</b>				
Ingeniero	0.125	HH	3.57	0.00081
Operarios	2.0	HH	1.79	0.01299
				<b>0.0261</b>
<b>III. Equipos</b>				
Centrifuga	3.0	HM	3.67	0.0195
Electro bomba	3.0	HM	0.91	0.0195
Agitadores	3.0	HM	0.72	0.0195
Desgaste h.		%	5.00	0.0261
				<b>0.1045</b>
				<b>0.2933</b>

El costo del ácido sulfúrico no se considera por que se utiliza ácido decoperizado producido por refinaria

Lodo tratado: 2.464 TM /día

Costo diario por tratar el lodo anódico: \$722.8

**Costo anual por tratar el lodo anódico: \$263,822**

Producción anual de cátodos: 271702 st

Costo anual por tratar el lodo anódico: 0.971 \$/st de cátodo

### 6.2.2.3 Costos de producción en Refinería:

Tabla № 6-32: Resumen de los costos en refinería, por cada planta en US\$.

Ítem	US\$
Costo de Planta de ánodos	7,763,821
Costo de Planta Electrolítica	11,595,039
Costos Generales	1,530,065
Costo de Planta de Metales Preciosos	1,010,590
Costo Total de Refinería:	21,899,514

Al construirse la nueva fundición, esta proveerá con ánodos de cobre de 99.7% en Cu a refinería, pero con un contenido de 1400 ppm en plomo; Esto quiere decir que Planta de Ánodos dejara de funcionar en Refinería, y a su vez se creara un nuevo problema con el aumento del plomo en el lodo, para lo cual se debe implantar el tratamiento de los lodos anódicos y este sera un nuevo costo que sé incluirea al cobre catodico.

Tabla № 6-33: Resumen de los costos en refinería por cada planta en US\$, al funcionar la nueva Fundición e incluir el desplomado de lodos anódicos.

Ítem	US\$
Costo de Planta Electrolítica	11,595,039
Costos Generales	1,530,065
Tratamiento de lodos Anódicos	263,822
Costo de Planta de Metales Preciosos	1,010,590
Costo Total de Refinería:	14,399,516

Tabla № 6-34: producción de cátodos de refinería y los costos de producción de refinería antes y después de la implementación de la nueva Fundición.

Ítem	Valor	Unidad
Producción de Cátodos:	271,702.3	ST de cátodo
Costo producción actual:	80.60	US\$/ST cátodo
Nuevo costo de producción	52.99	US\$/ST cátodo

Por lo tanto se determina que al crearse la nueva Fundición y realizarse el tratamiento de lodos, el precio del cátodo disminuye de **80.60 US\$/ST cátodo a 52.99 US\$/ST cátodo**, significando una disminución en los costos de producción en 33.42%.

## VII. CONCLUSIONES

- La electrorefinación de ánodos con un contenido de plomo de hasta 1400 ppm se puede realizar sin riesgos con las celdas electrolíticas actuales no requiriendo hacer alguna modificación en cuanto al proceso y a las operaciones actualmente realizadas.
- El principal problema de adaptar los equipos al nuevo proceso esta en lo concerniente a la manipulación y tratamiento del lodo producido de ánodos de cobre con alto contenido de plomo, los cuales de no ser tratados como se sugiere presentarían problemas serios para la recuperación de los metales preciosos, por el incremento significativo en el volumen del lodo anódico sobrepasando la capacidad de esta planta y por intervención en el proceso de purificación del oro y la plata.
- El proceso mas optimo para la eliminación del plomo en el lodo anódico es el tratamiento N° 1, el cual consiste en hacer un previo decoperizado con el fin de recuperar el cobre del lodo y luego una final precipitación del plomo como sulfato, requiriendo para su implementación una inversión de **US\$ 263,822** dólares al año.
- Para la Refinería de cobre el recibir nuevos ánodos de cobre producidos por fundición le es más rentable ya que no tendrá que asumir con los costos de producción de planta de ánodos. Los únicos costos que tendrá que realizar son en tratamiento de lodos anódicos, el cual es mucho menor que planta de ánodos significando que **el costo del cátodo disminuye de 80.60 US\$/ST cátodo a 52.99 US\$/ST cátodo,** significando una **disminución en los costos de producción de 33.42%.**
- Además de la ventaja económica que significa el cambio de tecnología de la producción de ánodos por refinería a recibir ánodos de fundición, una de las principales ventajas esta en el aspecto ambiental ya que se dejara de contaminar el ambiente con SO<sub>2</sub> (aproximadamente 44,2 kg SO<sub>2</sub>/día) principal generador de lluvia ácida, que afecta principalmente a los campos de cultivo de la ciudad de Ilo, haciéndolo un valle casi sin agricultura.

## VIII-BIBLIOGRAFÍA

1. Biswas R. *Metalurgia del cobre*.-Editorial Davenport, England 1975, segunda edición
2. Hecker C. *Ingeniería Electroquímica*, Curso Panamericano, Concepción Chile, 1981
3. Isakov, V. T. *The Electrolitic Refining of Copper*, publicado por "Metallurgiya", Moscow ( traducción en Ingles publicada por Technicopy limited, Stonehouse, Glos., England 1973, segunda Edición.
4. Nomborg M.I. *Electrolitic Refining of Copper*, Publicado por Metaollurgizdat, 1957 primera edición.
5. Perry Jhon H. *Manual del ingeniero Químico*, sec. 19 McGraw-Hill, Nueva York, 1995, 5ta Edición
6. Perry R. H. y Chilton C. H. *The Chemical Engineers Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York, 1973 5ta Edición.
7. Suthern Peru (1999), *Maintaining High Efficiencies while Increasing Current Densities*, In Copper Metallurgical, William Davenport, editors A.I.M.E., New York, pp. 497-534.
8. Ulrich D. Gael, *Diseño y Economía de los procesos de Ingeniería Química*, Editorial McGraw-Hill, pp. 228-250, 301-349, 1984 última edición, 1993
9. UNAS *Resumen (Primer Congreso Nacional de Estudiantes de Ing. Metalúrgica)*, 1998
10. Yoplac C. Edwilde, *Mecanismo de Reducción catódica de cobre en medio  $H_2SO_4 - CuSO_4$* , Laboratorio Metalúrgico, Banco Minero del Perú, 1970.