

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



**Producción de Selenio Comercial y
Destilado en la Refinería
de Cobre de Ilo**

TESIS

**Para optar el Título Profesional de
INGENIERO METALURGISTA**

Edgar Santiago Cornejo Flores

Lima - Perú

1992

A mi esposa e hijos:

Miriam - Renan - Diego

**Por nuestra eterna unidad
familiar.**

A mis padres:

Adalberto y Alina,

todo esfuerzo y mérito

solo fué de ellos.

INDICE DE CUADROS

- Cuadro 1.- Características de los lodos de Refinerías en el mundo.
- Cuadro 2.- Reserva de Selenio en el mundo.
- Cuadro 3.- Producción de Selenio Refinado de 1970 a 1989.
- Cuadro 4.- Análisis típicos de materiales de Planta de Anodos.
- Cuadro 5.- Análisis típicos de materiales de Planta Electrolítica.
- Cuadro 6.- Análisis típicos de materiales de Planta de Lodos Anódicos.
- Cuadro 7.- Balance metalúrgico característico actual.
- Cuadro 8.- Balance metalúrgico de las pruebas de tostación oxidante Grupo "A".
- Cuadro 9.- Balance metalúrgico de las pruebas de tostación oxidante Grupo "B".
- Cuadro 10.- Análisis Químicos de los principales productos de la prueba de tostación oxidante.
- Cuadro 11.- Balance metalúrgico total de prueba representativa de tostación oxidante de lodo anódico.
- Cuadro 12.- Cuadro de los resultados de las pruebas de tostación en atmósfera oxidante.
- Cuadro 13.- Cuadro de los resultados de las pruebas de tostación en atmósferas de aire y SO₂.

- Cuadro 14.- Cuadro de los resultados de las pruebas de tostación Sulfa-Oxidante con aire SO_2 y Oxígeno.
- Cuadro 15.- Balance metalúrgico del selenio de pruebas de tostación con Carbonato de Sodio.
- Cuadro 16.- Ecuaciones de reacción y constantes de equilibrio entre el Selenio elemental y Selenuros con H_2SO_4 .
- Cuadro 17.- Resultado de las pruebas de lavado de Selenio.
- Cuadro 18.- Ensayos del agua de lavado en pruebas de lavado de Selenio.
- Cuadro 19.- Ensayos Químicos de las pruebas de lixiviación con agua caliente del lodo de Selenio, directamente del tanque de circulación.
- Cuadro 20.- Resultado de Análisis de 80 Batch de tostación sulfatizante a nivel industrial.
- Cuadro 21.- Balance Metalúrgico característico-Sistema mejorado por análisis.
- Cuadro 22.- Balance Metalúrgico de las pruebas de destilación de Selenio crudo.
- Cuadro 23.- Balance Metalúrgico de las pruebas de destilación de Selenio comercial.
- Cuadro 24.- Balance Metalúrgico de selenio en proyecto de selenio comercial.

INDICE DE ESQUEMAS Y FIGURAS

- Esquema 1.- Tratamiento de lodo anódico en Shen Yan China.
- Esquema 2.- Tratamiento de lodo anódico en una Refinería típica de la U.R.S.S.
- Esquema 3.- Tratamiento de residuos anódicos en Centromín Perú.
- Esquema 4.- Tratamiento de lodos anódicos en Niihama Japón.
- Esquema 5.- Diagrama típico de producción de Selenio comercial por el método de hidróxido.
- Esquema 6.- Diagrama de flujo de Planta de Anodos.
- Esquema 7.- Diagrama de flujo de Planta Electrolítica.
- Esquema 8.- Diagrama de flujo de Planta de Lodos Anódicos.
- Esquema 9.- Diagrama de flujo del tratamiento del lodo anódico descobrizado de la RCu.
- Esquema 10.- Diagrama de flujo de producción de Selenio actual.
- Esquema 11.- Disposición del equipo de pruebas de tostación oxidante a nivel experimental.
- Esquema 12.- Disposición del equipo de pruebas de tostación sulfatizante con oxígeno y SO₂ a nivel experimental.

- Esquema 13.- Curvas de volatilidad del Selenio versus temperatura en pruebas de tostación sulfatizante por adición de oxígeno, aire y SO₂.
- Esquema 14.- Efecto de la temperatura sobre el grado de sulfatización.
- Esquema 15.- Equipo piloto para destilación de Selenio crudo.
- Esquema 16.- Diagrama de Flujo cualitativo de producción de selenio comercial.
- Esquema 17.- Flow Sheet cuantitativo de producción de selenio comercial.

**PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL Y DESTILADO EN LA REFINERIA
DE COBRE DE ILO**

CAPITULO I:

GENERALIDADES

I.1	<u>EXPOSICION DE MOTIVOS</u>	13
I.2	<u>ANTECEDENTES</u>	17
I.3	<u>METODOS DE PRODUCCION DE SELENIO A NIVEL INDUSTRIAL</u>	19
I.3.1	<u>METODO DEL SULFATO</u>	19
I.3.2	<u>METODO DE LA SODA</u>	22
I.3.3	<u>METODO DE FUSION DIRECTA Y ESCORIFICACION</u>	26
I.3.4	<u>METODO DE LA TOSTACION OXIDANTE</u>	30
I.3.5	<u>METODO DEL HIDROXIDO</u>	36
I.4	<u>DATOS ESTADISTICOS</u>	37
I.4.1	<u>EL SELENIO EN EL PERU</u>	38
I.4.2	<u>RESERVAS DE SELENIO EN EL MUNDO</u>	40
I.4.3	<u>PRODUCCION DE SELENIO EN EL MUNDO</u>	42

CAPITULO II

TECNOLOGIA GENERAL

II.1	<u>ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA</u>	46
II.2	<u>ESTUDIO DEL PRODUCTO (SELENIO)</u>	47

II.2.1	<u>PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS</u> <u>DEL SELENIO</u>	47
II.2.2	<u>USOS Y APLICACIONES DEL SELENIO</u>	49
II.2.3	<u>HISTORIA Y GEOLOGIA DEL SELENIO</u>	51
II.2.4	<u>EL SELENIO A TRAVES DE LOS</u> <u>PROCESOS METALURGICOS</u>	53
II.2.5	<u>TOXICIDAD DEL SELENIO Y</u> <u>SELENIUROS</u>	56
II.3	<u>PROCEDIMIENTO INDUSTRIAL DE RECUPERACION DE</u> <u>SELENIO</u>	59
II.3.1	<u>REFINERIA DE COBRE DE ILO</u>	59
II.3.2	<u>PRODUCCION DE SELENIO CRUDO EN LA</u> <u>REFINERIA DE ILO A NIVEL</u> <u>INDUSTRIAL</u>	90
II.3.3	<u>PRUEBAS METALURGICAS</u>	98
II.4	<u>PROYECTO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL</u> <u>EN LA REFINERIA DE ILO</u>	120
II.4.1	<u>TECNOLOGIA DE PRODUCCION DE</u> <u>SELENIO COMERCIAL POR EL METODO</u> <u>DE SULFATO</u>	119
II.4.2	<u>PRUEBAS DE LIXIVIACION CON AGUA</u> <u>CALIENTE DE LODO DE SELENIO</u> <u>(REQUERIMIENTOS PARA PRODUCIR</u> <u>SELENIO COMERCIAL)</u>	128
II.4.3	<u>ANALISIS DEL PROCESO DE</u> <u>RECUPERACION DE SELENIO POR EL</u> <u>METODO DE DIGESTION CON ACIDO</u>	

	<u>SULFURICO Y VOLATILIZACION A</u>	
	<u>NIVEL INDUSTRIAL</u>	135
II.4.4	<u>BALANCE METALURGICO DEL PROYECTO</u>	
	<u>DE PRODUCCION DE SELENIO</u>	
	<u>COMERCIAL</u>	139
II.5	<u>PROYECTO DE PRODUCCION DE SELENIO DESTILADO</u>	
	<u>EN LA REFINERIA DE ILO</u>	142
II.5.1	<u>TECNOLOGIA PARA LA PRODUCCION DE</u>	
	<u>SELENIO DESTILADO</u>	142
II.5.2	<u>PRUEBAS METALURGICAS DE</u>	
	<u>DESTILACION</u>	147

CAPITULO III

INGENIERIA GENERAL

III.1	<u>CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO . . .</u>	159
III.1.1	<u>GENERALIDADES</u>	159
III.1.2	<u>DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES</u>	
	<u>UNITARIAS</u>	161
III.1.3	<u>FLOW SHEET CUALITATIVO</u>	168
III.1.4	<u>FLOW SHEET CUANTITATIVO</u>	169
III.2	<u>UBICACION DE LA PLANTA DE RECUPERACION DE</u>	
	<u>SELENIO</u>	173
III.3	<u>DIMENCIONAMIENTO Y SELECCION DE EQUIPO Y</u>	
	<u>MAQUINARIA</u>	174
III.4	<u>EQUIPO AUXILIAR Y SERVICIOS</u>	182
III.5	<u>AREA REQUERIDA EN RELACION DEL EQUIPO</u>	

		10
	<u>BASICO</u>	187
III.6	<u>ESTIMACION DE LOS CONSUMOS UNITARIOS</u> . .	187

CAPITULO IV

ECONOMIA

IV.1	<u>ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN - PROYECTO SELENIO COMERCIAL</u>	192
IV.1.1	<u>CAPITAL FIJO</u>	192
IV.1.2	<u>CAPITAL DE TRABAJO</u>	194
IV.1.3	<u>CUADRO GENERAL DE INVERSIONES</u> .	196
IV.2	<u>ESTIMACION DEL COSTO DE PRODUCCION DEL PROYECTO SELENIO COMERCIAL</u>	197
IV.3	<u>BALANCE ECONOMICO</u>	197
IV.4	<u>INDICE DE EVALUACION ECONOMICA PROYECTO SELENIO COMERCIAL</u>	200
IV.4.1	<u>VALOR ACTUAL NETO (VAN)</u>	200
IV.4.2	<u>TASA INTERNA DE RETORNO</u>	201
IV.4.3	<u>COEFICIENTE BENEFICIO COSTO</u> . .	203
IV.4.4	<u>PERIODO DE RECUPERACION</u>	204
IV.4.5	<u>PUNTO DE EQUILIBRIO</u>	204
IV.5	<u>PERFIL ECONOMICO DEL PROYECTO DE SELENIO DESTILADO</u>	205
IV.5.1	<u>ESTIMACION DE LA INVERSION</u> . .	205
IV.5.2	<u>CAPITAL DE TRABAJO</u>	206
IV.5.3	<u>ESTIMACION DEL COSTO DE PRODUCCION DEL PROYECTO DE</u>	

	11
<u>SELENIO REFINADO</u>	208
IV.5.4 <u>INDICES DE EVALUACION ECONOMICA</u>	208
IV.6 <u>CONCLUSIONES FINALES</u>	211

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I:

GENERALIDADES

I.1 EXPOSICION DE MOTIVOS.-

El presente trabajo tiene por finalidad mostrar la factibilidad de comercializar toda la producción de Selenio de la Refinería de Cobre de Ilo, en el estado comercial, aplicando la destilación de Selenio y tratando adecuadamente el material. Tomo este tema debido a que el contenido de Selenio en la corteza terrestre es cerca de 8×10^{-5} a la menos 5 por ciento, lo que significa que es bastante escaso, motivo por el cual no se encuentra mucha información de los comportamientos físico-químicos y desarrollos industriales como el caso de metales comunes.

Los minerales que contienen Selenio están asociados en la naturaleza principalmente con metales no ferrosos y preciosos, como es nuestro caso y toma presencia como Selenuros de Cobre, Plata, Plomo y otros donde inicialmente no se percibe hasta llegar a ser muy significativo en el lodo anódico de refinación electrolítica de Cobre.

En primer término, defino al Selenio, sus propiedades físicas, químicas y sus usos. Se menciona la forma como se beneficia, y como va concentrándose de acuerdo a los procesos metalúrgicos y transformaciones que va siendo aplicado. El ítem I.3 desarrolla los cinco procesos industriales más comunes, con un ejemplo real para cada uno, pienso que es muy

importante la descripción de plantas de otras partes del mundo y poder compararlas para tener mejor idea del comportamiento del Selenio.

Se entrega datos estadísticos sobre el Selenio en el Perú, reservas y producción de Selenio en el mundo, que nos indica los bajos tonelajes ofertados al Mercado Internacional.

El Capítulo II explica la Tecnología General, donde se realiza el estudio de la materia prima, que es el lodo anódico, el producto que es el selenio comercial, mostrando sus propiedades físicas y químicas, usos y otros. El ítem II.3 explica las diferentes operaciones en las instalaciones en la Refinería de Cobre de Ilo, con motivo de definir el punto en el cual el subproducto del lodo anódico descobrizado con 24% de selenio aproximadamente, es tratado para extraer el selenio crudo de baja ley; terminando con una variedad de pruebas metalúrgicas realizadas en los últimos años como intento para analizar el método óptimo de extracción.

En el ítem sobre "Proyecto de Producción de Selenio Comercial en la Refinería de Ilo" se explica la Termodinámica que ocurre en la volatilización del selenio por el método de sulfato, las pruebas de lixiviación con agua caliente que fue la que mejor resultado tuvo, comparado con todas las pruebas

metalúrgicas realizadas; debido a la simplicidad de la operación, bajo costo y altas bondades como la posibilidad de elevar la ley de selenio y poder catalogarlo como comercial en el mercado internacional.

Se realiza un análisis estadístico a nivel industrial para observar la presión óptima con la cual el reactor de selenio debe trabajar para aumentar su recuperación y terminar con un balance metalúrgico con el proceso mejorado.

El ítem II.5 explica la Tecnología de la destilación de selenio entregando pruebas metalúrgicas a escala piloto a partir de selenio comercial y selenio impuro, observando el aumento de calidad del producto.

El Capítulo III dedicado a la Ingeniería General, explica los diseños que deben de realizarse y las consideraciones Técnicas por cumplir para producir a nivel Industrial selenio comercial.

Se presentan las operaciones del proceso de Tostación sulfatizante del lodo anódico y los planos principales de los equipos diseñados para tal efecto en la Refinería de Cobre de Ilo, se da un mayor alcance a los nuevos diseños y los parámetros operativos con sus costos respectivos; finalmente

luego de la descripción de ubicación de planta, equipo auxiliar y servicios, se entrega los consumos unitarios de energía, agua y de reactivos.

El Capítulo IV se refiere el análisis económico del proyecto donde se estima la inversión, capital fijo, capital de trabajo, estimación de costos de producción y el balance económico; para terminar se presenta los indicadores económicos como V.A.N., T.I.R. coeficiente beneficio costo, observando la bondad del proyecto.

La reflexión final está enmarcada a presentar un documento que sirva de base para que más adelante cualquier metalurgista investigue, desarrolle y pueda transformar al selenio para aumentar el precio de venta final y pueda explotarlo de una manera más terminada, donde por la escasez de este producto pueda convertirse en uno de los elementos estratégicos del mundo.

Finalmente quisiera advertir que el selenio y sus compuestos son altamente tóxicos y el ítem II.5 explico cuan venenosos son y sus efectos en el organismo, por lo que se deben tener las precauciones del caso.

I.2 ANTECEDENTES.-

La Refinería de Cobre de Ilo, con una capacidad instalada de refinación de 150,000 TM anuales de cobre catódico y actualmente se amplió a 175,000 TM anuales tiene un promedio de 150 TM húmedas de lodos anódicos, caracterizado por su elevado contenido de Plata, Oro, Selenio.

En Julio de 1977 se inició la recopilación de información básica, de lo que vendría a ser el trabajo de investigación tecnológica acerca del tratamiento del subproducto de los lodos anódicos. En marzo de 1977 el Selenio alcanzó un precio de 16.4 dólares de libra, precio alto y tentador, que justificó la elaboración de un plan de trabajo que abarca la recuperación del Selenio, se encontró que el método más adecuado para el tratamiento de los lodos anódicos de la refinería era el de TOSTACION OXIDANTE CON CARBONATO DE SODIO.

El costo unitario de producción de Selenio era de 10.7 dólares de libra, valor inferior al precio del selenio en el mercado mundial, que por entonces era de 16.4 dólares la libra. Es decir se trataba de un proyecto rentable. El precio del Selenio en el mercado mundial de metales experimentó una caída dramática, a octubre de 1981 a 3.70 dólares la libra, motivo por el cual, el contrato de venta de lodos a

Centromín Perú que por entonces se tenía vigente, no consideraba el pago por Selenio.

Con la nueva situación se realizaron una serie de pruebas a escala de laboratorio y piloto, para definir el método más adecuado para tratar los lodos anódicos de la Refinería, de manera tal, que se garantice una eficiente recuperación de Plata y Oro, además de la recuperación del Selenio a menor costo de Producción posible.

Este trabajo de investigación tecnológica, terminó con la puesta en marcha de la planta de tratamiento de Lodos Anódicos, que fue inaugurada en noviembre de 1984. Se construyó para tal efecto un Reactor con objeto de recuperar el Selenio por el método de digestión con ácido sulfúrico y volatilización. El Selenio recuperado se obtenía en estado muy impuro y se almacenaba en espera de mejores precios en el mercado, para que haga rentable el tratamiento adicional de destilación para obtener selenio de alta pureza.

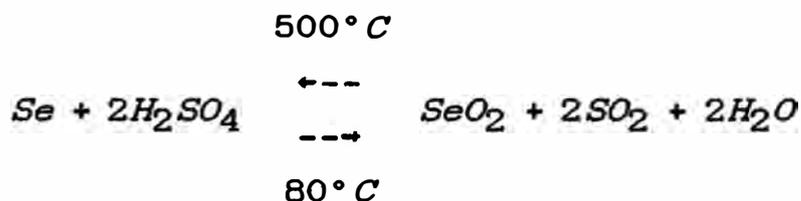
El presente año (1991) se están realizando los estudios, para exportar el Selenio y que nos de un ingreso por concepto de la venta de este producto en grado comercial o destilado.

I.3 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE SELENIO A NIVEL INDUSTRIAL

I.3.1 MÉTODO DEL SULFATO

En muchas industrias es aplicado este método a partir de los LODOS ANODICOS, cada cual con diferentes variables de acuerdo a cada tipo de lodo a tratar.

La reacción química principal que gobierna a este proceso es:



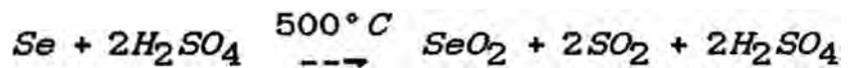
Explicaremos este proceso con el ejemplo del tratamiento del Lodo Anódico en SHEN YAN - China, tal como se muestra en el esquema 1, donde se encuentra su respectivo diagrama de flujo. El Lodo Anódico tiene una composición química de 1.4% de Selenio, 0.14% de Teluro, 11.5% de Cobre, 5% de Níquel, 3% de Arsénico y 10% de Antimonio, este material es enviado a un sulfatizador donde se le adiciona H₂SO₄ concentrado, para luego cargarlo en un horno de tostación realizándose la tostación sulfatizante.

Los metales pesados, tal como cobre, níquel

y otros, reaccionan con ácido sulfúrico fuerte sobre 150 - 300 °C y forman sulfatos solubles en agua de acuerdo a:



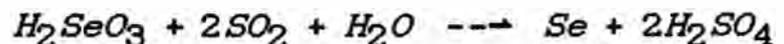
El producto sulfatado es cargado al horno de tostación y donde el SO₂ es volatilizado, de acuerdo a:



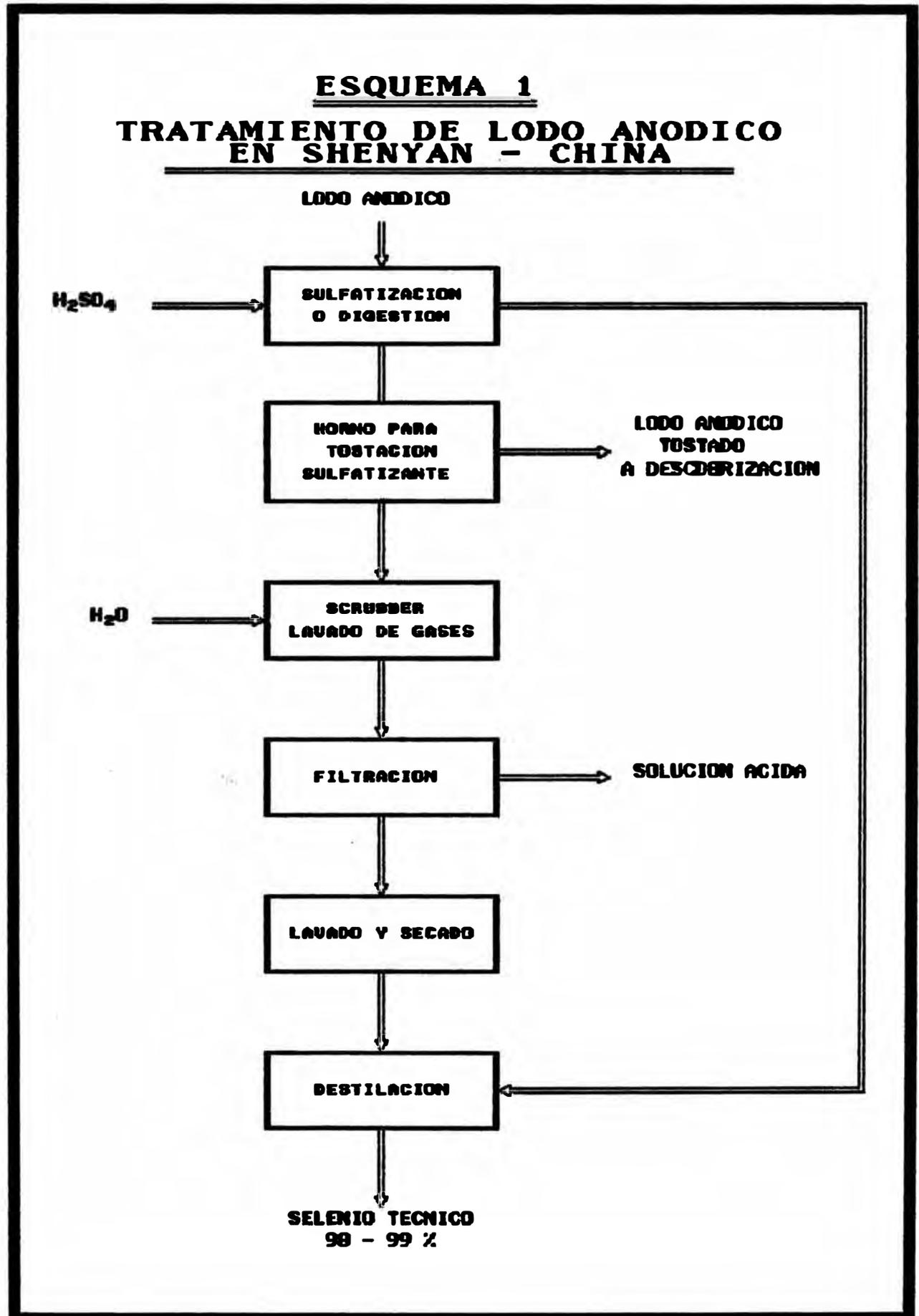
Los gases son pasados a través de una serie de torres de Scrubber llenas de agua, donde el SeO₂ disuelto en agua, forma ácido selenioso de acuerdo a:



El gas SO₂ producto de la tostación reduce el selenio acorde con la reacción:



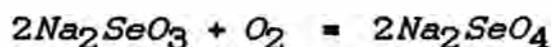
El Lodo Anódico tostado es enviado a descabrización y el Selenio reducido es filtrado, lavado, secado y enviado a



destilación; el agua ácida del filtrado es enviado a desagüe y el residuo de destilación con 95% de Selenio, retornado al sulfatizador. El Selenio destilado producido tiene una ley de 98 a 99% de Selenio.

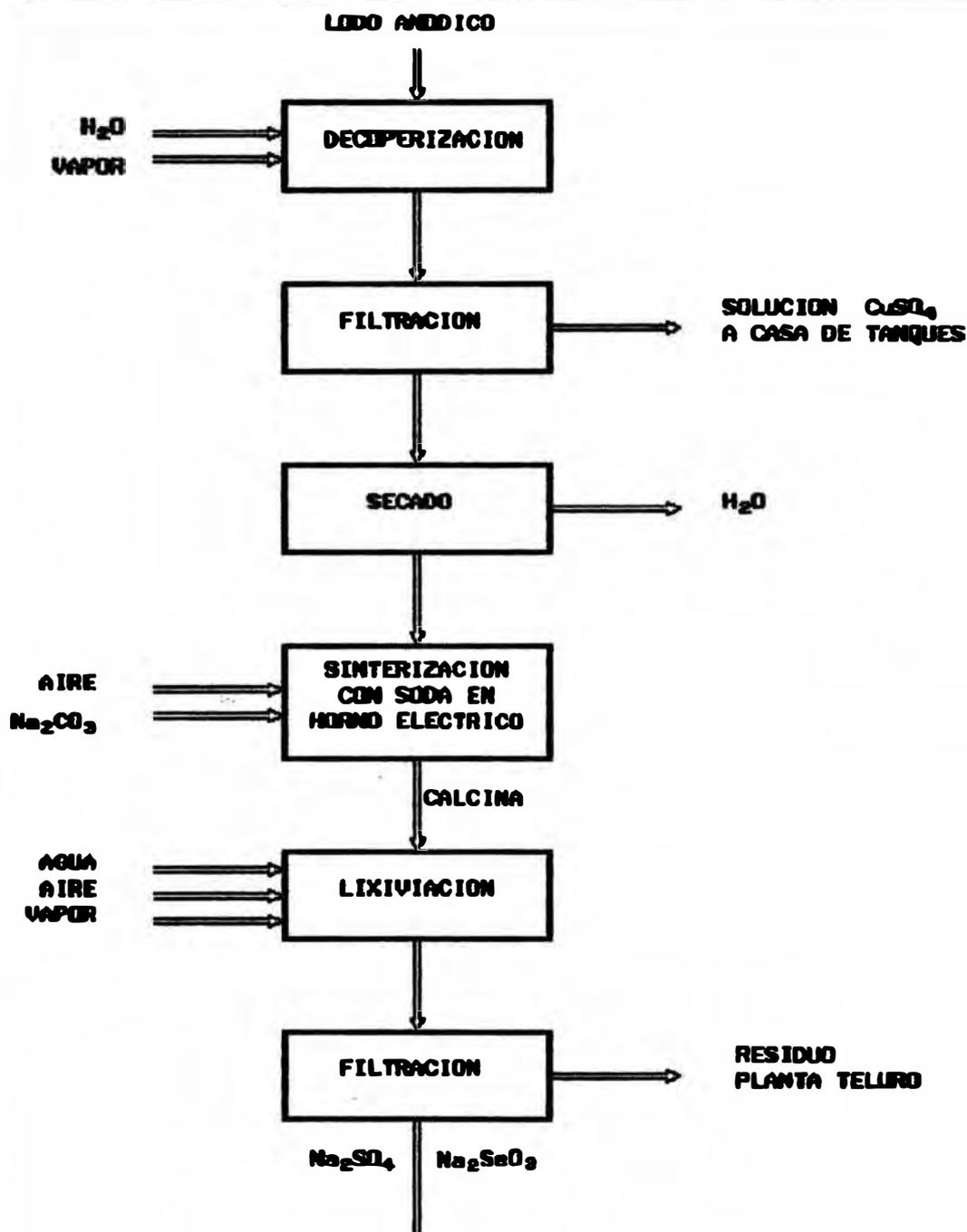
I.3.2 METODO DE LA SODA

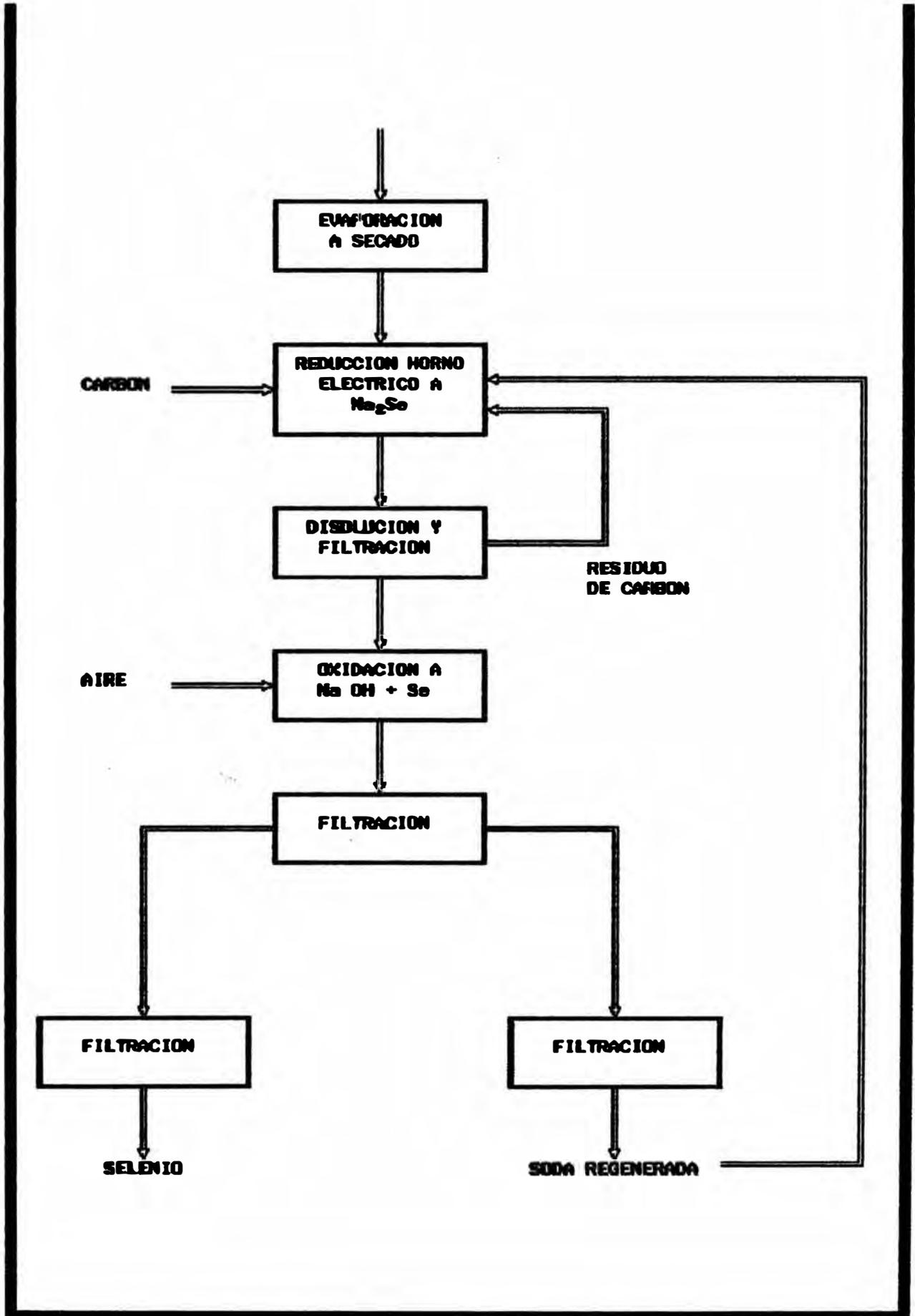
Para explicar este método analizamos el Esquema 2, que nos muestra el diagrama de flujo del tratamiento de Lodo Anódico en una Refinería Típica de la U.R.S.S. El primer proceso por lo cual pasa el material, es una lixiviación con H_2SO_4 diluido y a temperatura de 85 - 90°C con objetivo de decoperizar el lodo, luego es filtrado y la solución rica en $CuSO_4$ es enviada a Casa de Tanques, el sólido es secado y mezclado con Soda, donde es enviado a un horno eléctrico a 450 - 500°C. Las principales reacciones de descomposición de selenuros son:



La calcina es granulada, lixiviada con H_2O sobre 80 - 90°C y agitada con aire

ESQUEMA 2
TRATAMIENTO DE LODO ANODICO EN UNA
REFINERIA TIPICA DE LA U. R. S. S.





comprimido. Es filtrado y el residuo es enviado a fusión para producir el doré, y la escoria de fusión con teluro, pasa por su respectivo proceso y beneficia el teluro.

La solución filtrada conteniendo Na_2SeO_3 y Na_2SeO_4 es evaporado a sequedad y el residuo seco consistente en Selenatos y Selenitos es reducido con carbón, en un horno eléctrico de 600 a 625°C convirtiéndose a Selenitos acorde con la reacción:



El Selenito de Sodio producido por reducción es disuelto en agua. La solución es soplada con aire y Selenio elemental es liberado de acuerdo con la reacción.



Luego es filtrado para separar el Selenio, donde la solución es evaporada, cristalizada y la Soda regenerada, es retornada al horno eléctrico, para convertir el Selenito a Na_2Se .

El Selenio filtrado es lavado, secado y embalado para su venta.

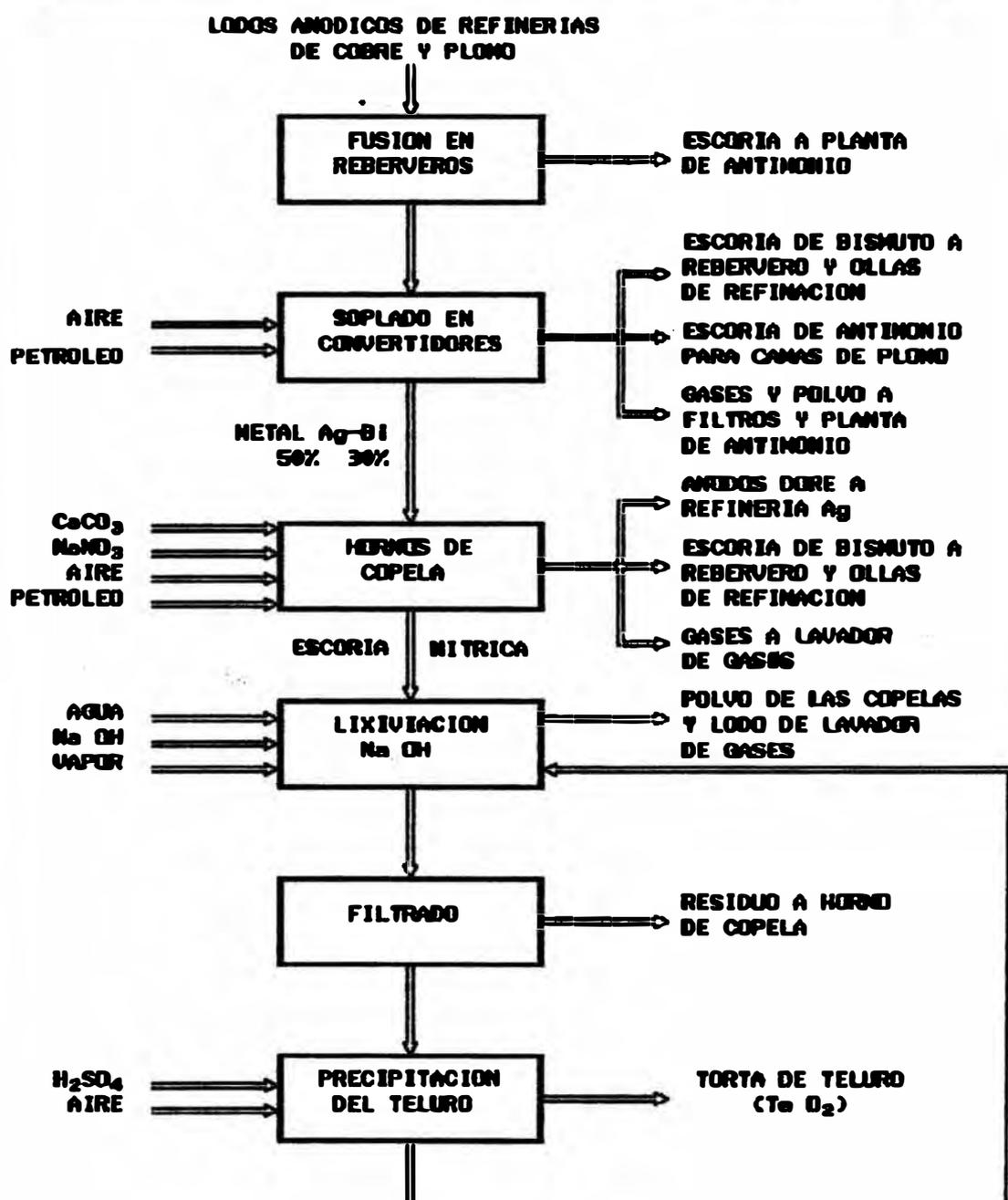
I.3.3 METODO DE FUSION DIRECTA Y ESCORIFICACION

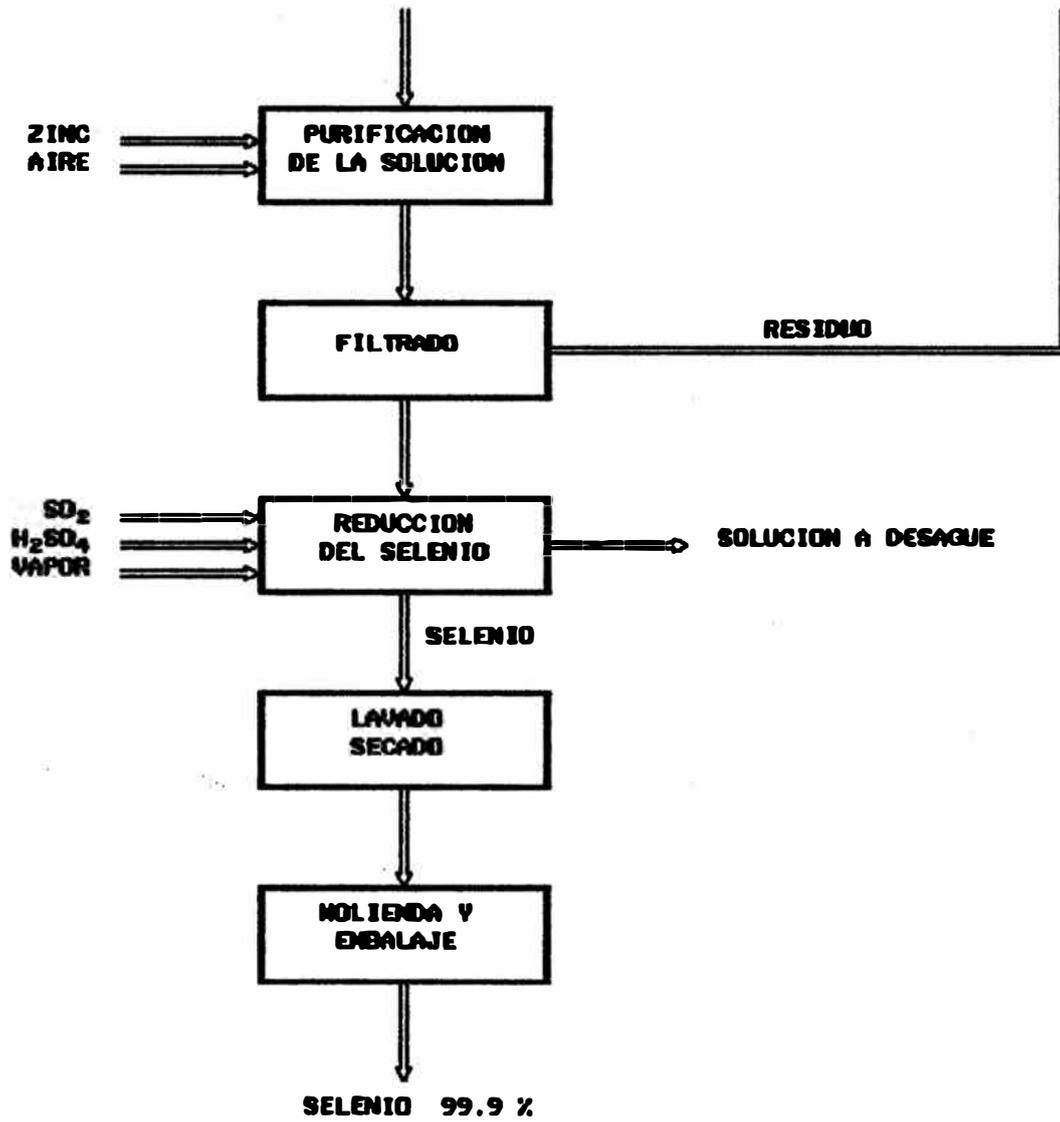
Es el método que tiene Centromín Perú, el cual está representado su diagrama de flujo en el Esquema 3. Los lodos que procesan son los provenientes de las refinerías de Cobre y Plomo; siendo el lodo de ánodo de Plomo 6 veces mayor a la cantidad de lodo de ánodo de Cobre, el Selenio contenido en el lodo de Plomo es el 0.07% y el cobre el 3.1%. Los metales de mayor importancia en estos lodos la Plata, el Oro, Bismuto, Antimonio, Teluro y Arsénico. Todo este material con polvos recuperados de su sistema de filtrado, es cargado a reverberos para su respectiva fundición.

Fundida la carga se sangra una escoria rica en antimonio que es enviada a la Planta de Antimonio y el metal de reverbero es pasado a los convertidores para el soplado respectivo, donde la primera escoria es rica en antimonio y arsénico, este material es enviado a los circuitos de cobre o plomo. La segunda escoria es rica en bismuto y se envía a un reverbero donde se reduce con

ESQUEMA 3

TRATAMIENTO DE RESIDUOS ANODICOS EN CENTROMIN PERU





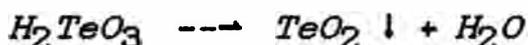
carbón y luego es enviada a las ollas de refinación.

El material remanente en los convertidores contiene 50% de Plata y 30% de Bismuto el cual es enviado a los hornos de Copela, donde la primera escoria tiene un alto contenido de Bismuto que es retornado a reverberos y luego a ollas de refinación. Con el aditivo químico NaNO_3 y aire, es removido el resto de impurezas, incluyendo el selenio y telurio que sale en la escoria denominada nítrica.

Los gases son enviados a lavadores y al precipitador electrostático, para luego ser transferidos a la Planta de Selenio y Telurio.

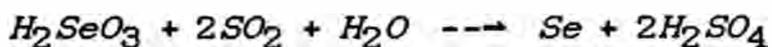
La escoria nítrica con 1% de selenio, el polvo de copela con 8.3% de Selenio y el lodo de lavador de gases con 60% de Selenio, son lixiviados con NaOH donde el Selenio y Telurio por la acción de la temperatura (70-80°C) se solubilizan, como compuestos alcalinos mayormente como Selenitos y Teluritos y en menor proporción como Selenatos y Teluratos.

Luego es filtrado y el residuo retornado al horno de copela, la solución es ajustada a un PH = 6.0 - 6.2 con H₂SO₄ para precipitar el dióxido de Teluro, el cual es tratado para producir Teluro electrolítico. La solución es ajustada a PH = 9.9 con adición de H₂SO₄ y se agrega polvos de Zinc para cementar impurezas como Plomo, Teluro y Sílice, de acuerdo con:



Siendo M₁ = Arsénico, Antimonio, Cobre, Plomo, etc.

La solución es filtrada y el residuo retornado a lixiviación con NaOH, a la solución purificada se añade H₂SO₄ para bajar el PH y es atacada con SO₂ para reducir el Selenio, donde la reacción que ocurre es:



El Selenio precipitado es lavado, secado, molido a malla 20 y embalado en cilindros de acero para su despacho. El Selenio producido tiene una ley de 99.9%.

I.3.4 METODO DE LA TOSTACION OXIDANTE

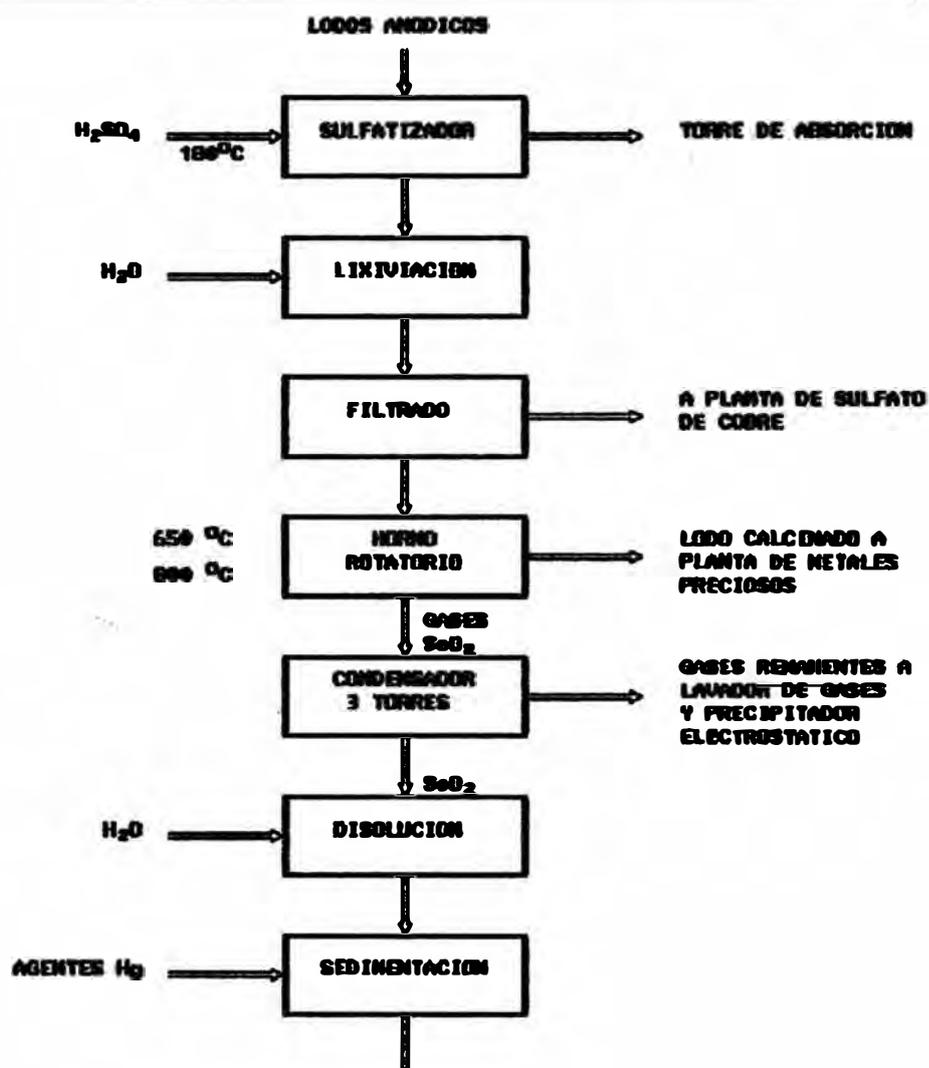
Este método lo aplican en la ciudad de Nii Hama, Japón, en la Refinería de Cobre de Sumitomo Metal Mining Company Limit. El esquema 4, presenta el diagrama de flujo de sus Lodos Anódicos, los cuales en Primera Instancia son cargados a un sulfatizador continuo, con objetivo de extraer el 95% de cobre y níquel contenido en el Lodo con H_2SO_4 concentrado y a una temperatura de $180^\circ C$, que luego de 40 minutos es descargado y enviado a un tanque de lixiviación con agua, debido a que el Cobre y Níquel han sido sulfatizados, son disueltos y enviados a la Planta de Sulfato de Cobre.

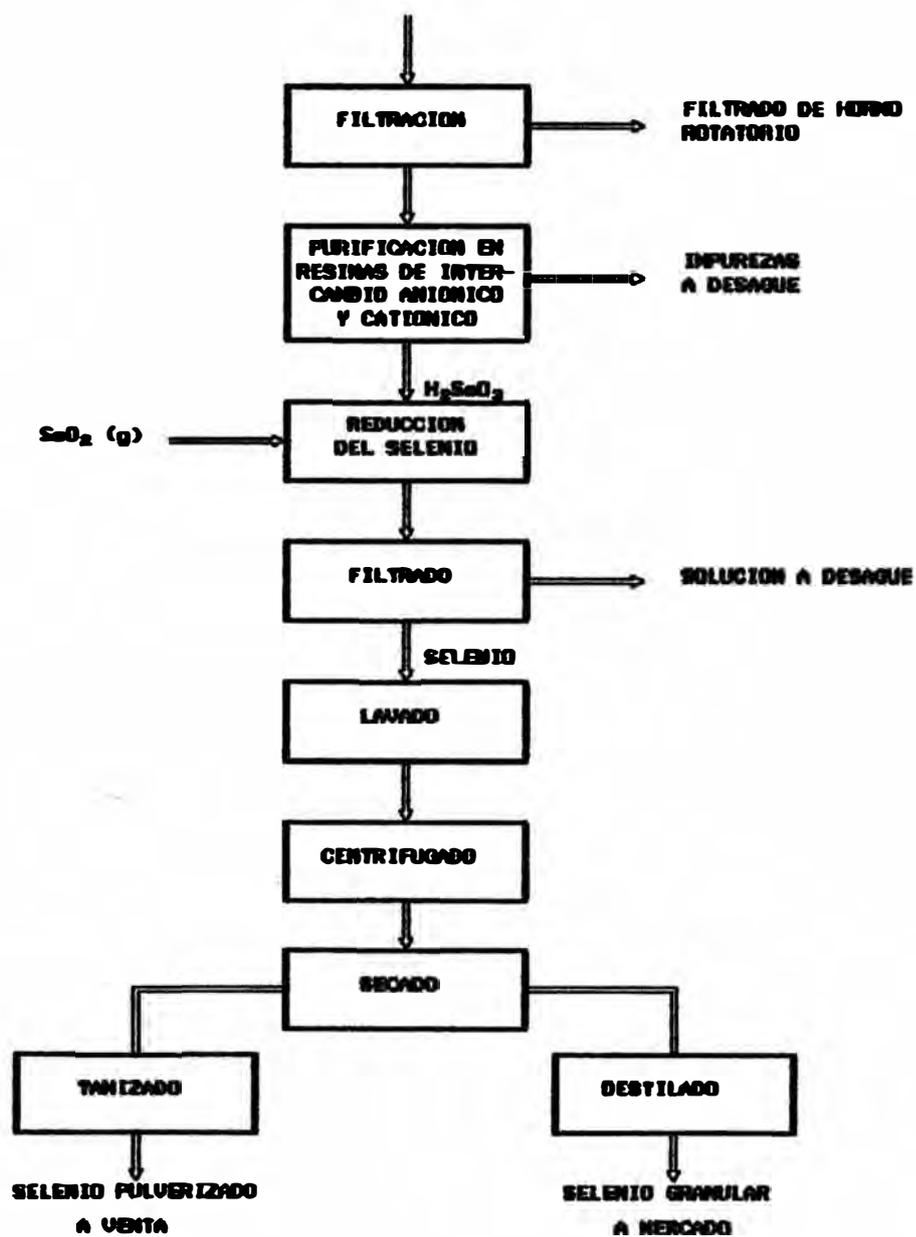
Las reacciones que ocurren son:



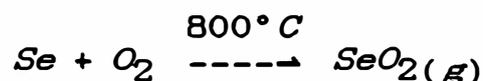
ESQUEMA 4
TRATAMIENTO DE LODOS ANODICOS EN
NIIHAMA - JAPON

Ref. Cu. SUMIMOTO METAL MINING COMPANY LTDA.



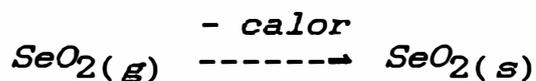


El SO₂ Generado en las reacciones es tratado en una torre de Neutralización. El lodo lixiviado es secado hasta una humedad de 3 a 5% y cargado a un horno rotatorio que son calentados entre 650 a 800°C, dependiendo de la naturaleza del lodo, complementado con la adición de aire, para la oxidación del Selenio. La calcina es descargada del horno y se mantiene bajo del 1% de Selenio, esta calcina es enviada a la Planta de metales preciosos. La reacción en el horno es:



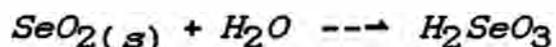
El Selenio contenido en los gases del horno es recolectado en condensadores consistentes en una serie de 3 torres, el pequeño remanente de Selenio en el gas, es completamente recuperado en el lavado a chorro y en el precipitador electrostático húmedo.

La transformación del gas de Selenio en los condensadores sería:



El dióxido de Selenio sólido es disuelto en H₂O para hacer una solución de ácido selenioso con 35 gr/lt de Selenio, el cual es filtrado y el residuo retornado al horno rotatorio.

La disolución del dióxido de Selenio viene dada por:



El ácido selenioso es purificado con resinas aniónicas y catiónicas representadas en las siguientes reacciones químicas:

Reacción Anódica:



Me^- = Mercurio y Antimonio Hidrolizado

Reacción Catódica:



Me^+ = Teluro, Cobre y Fierro principalmente

Ambas resinas son regeneradas con HCl 3N.

El ácido Selenioso purificado es reducido con SO₂ de acuerdo a la reacción:



Finalmente el Selenio reducido es filtrado, lavado, centrifugado, secado, tamizado y embalado para su venta, con una ley final de 99.998%.

I.3.5 METODO DEL HIDROXIDO

Este proceso esta basado en la reacción del metal con el hidróxido a Selenitos y Selenatos. En uno de los métodos usados se funde el alcali con el metal. La reacción se da en un amplio rango de temperatura, pero preferentemente sobre los 600°C.

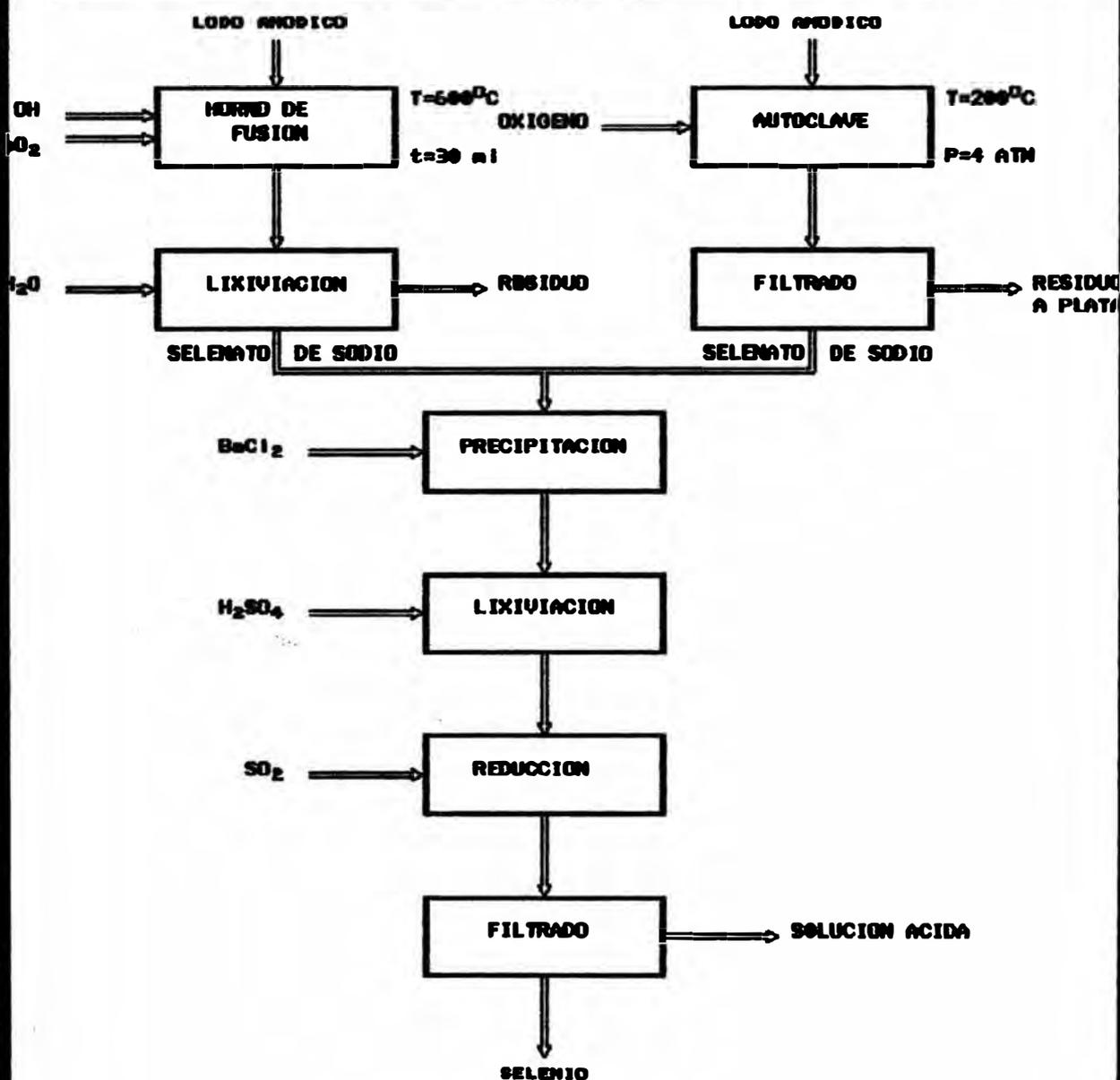
Los oxidantes son PbO_2 , ClO_4^- , MnO_4^- , BrO_3^- y otros que se usan para acelerar la formación de Selenato. El tiempo de contacto del alcali fundido con los lodos con trazas de Selenio es cerca de 30 minutos.

El Selenato alcalino fundido es lixiviado con agua y es disuelto.

Otro método se usa en la reacción, de lodos con trazas de Selenio, con soluciones alcalinas sobre 200°C en autoclaves bajo presión de oxígeno de 4 atmósferas, bajo

ESQUEMA 5

DIAGRAMA TIPICO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL POR EL METODO DEL HIPOXIDO



estas condiciones siempre el Selenio es completamente extraído en solución. El lodo es filtrado y la solución conteniendo Selenatos, es tratado con cloruro de Bario insoluble. Por último es reducido a Selenito por tratamiento con H_2SO_4 , KCl ó mezcla de ambos. El resultado final del tratamiento es solución de ácido Selenioso, del cual el Selenio es precipitado con SO_2 .

El Esquema 5 grafica estas dos posibilidades del proceso con $NaOH$.

I.4 DATOS ESTADISTICOS.-

I.4.1 EL SELENIO EN EL PERU

En el Perú se comenzó a conocer la existencia de este elemento, en algunos minerales y concentrados que se trataban en la Fundición de la Oroya, desde que se obtuvo el primer queque de Cobre Ampoloso en 1922, recién a fines de 1953 se instaló una planta semi-industrial para la extracción de este metal. En 1954 se logró la primera producción a escala comercial que fue de 1840 kilogramos refinados.

En Centromín Perú el Selenio se encuentra asociado a los minerales de plomo y en menor grado en los minerales de cobre, se le

encuentra principalmente en los concentrados de Plomo de Casapalca, encontrándose aquí el 10% del Selenio que ingresa a la Fundición Refinería de la Oroya.

En la Cordillera Occidental (Junín, Pasco) el Selenio también se presenta en los Yacimientos de las Asfaltitas Vanadíferas. Se ha encontrado Selenio en algunas muestras de azufre volcánico del Sur (Arequipa) con leyes entre 0.01 y 0.05% de Selenio.

En el Sur del País las concentradoras de Southern Perú Cooper Corporation en sus unidades de Cuajone y Toquepala presentan Selenio en sus concentrados, y una parte del Cobre Blíster es tratado en la Refinería de Cobre de Ilo.

Desde Febrero de 1954 el único productor de Selenio Comercial era Centromín Perú, con un promedio aproximado de 8 a 10 TM por año, hasta la aparición del presente estudio donde se aumenta la producción nacional 13 TM/año, con perspectivas incluso de superar este valor.

Es importante recalcar que la ley actual de Centromín Perú es de 99.8% de Selenio, el de

Minero Perú de 99.5 - 99.8% de Selenio y el destilado a 99.95% de Selenio de mayor grado comercial.

I.4.2 RESERVAS DE SELENIO EN EL MUNDO

En 1985 la edición de "MINERAL FACTS AND PROBLEMS", de publicación de U.S.B.M. evaluó las reservas y recursos del selenio en el mundo. La U.S.B.M. se basa en estimados de reserva del cobre, la recuperación de selenio se basa en el factor 0.64 kg/Ton. de cobre en Canadá y 0.215 kg/Ton de cobre del resto del metal que se aplica. El cuadro #2 muestra las reservas calculadas usando datos reportados en 1983, la reserva base de selenio se estima utilizando además de las reservas del cobre, recursos potenciales de reservas económicas y marginalmente económicas.

La explotación de reservas del selenio, estrictamente depende de la demanda del cobre y si el consumo continúa con los mismos niveles existen reservas para cuarenta años, los países de U.S.A., Canadá y Chile son los que tienen el grueso de las reservas del selenio llegando al 50% del total.

CUADRO #2
RESERVA DE SELENIO EN EL MUNDO

PAIS	RESERVAS	RESERVA BASE
América de Norte		
U.S.A.	12	19
Canadá	11	15
Otros	4	8
TOTAL	27	42
Sur América		
Chile	17	21
Perú	3	7
Otros	1	3
TOTAL	21	31
Europa	11	15
Africa		
Zaire	6	6
Zambia	7	7
Otros	1	2
TOTAL	14	15
Asia		
Filipinas	3	4
Otros	3	4
TOTAL	6	8
Oceanía		
Australia	2	3
Papua Nueva Guinea	1	3
Otros	1	1
TOTAL	4	7
TOTAL MUNDO	80	120

I.4.3 PRODUCCION DE SELENIO EN EL MUNDO

El cuadro #3 explica la producción de selenio refinado de 1970 a 1989, en esta estadística no está incluida la producción de Alemania del Oeste, Rusia y China que aproximadamente produjeron 300 ton en 1989, por lo cual la producción en este año llegaría a 1900 ton. Los 4 países que dominan la producción de Selenio refinado son: Japón, Canadá, Bélgica y U.S.A., el cual se estima en 80% de acuerdo a los aportes de 1989; las Empresas que lo producen son:

PAIS	EMPRESA	CANT. TON/AÑO
JAPON	1) Mitsubishi Metal Corp.	250
	2) Mitsui Mining & Smelting Co.Ltda.	100
	3) Nippon Mining Co.Ltda.	120
	4) Sumitomo Metal Mining Co.Ltda.	70
CANADA	5) Noranda Inc.	400
BELGICA	6) Metallurgic Hoboken-Overpelt S.A.	360
U.S.A.	7) Asarco Inc.	
	8) Kennecott Cooper Corp.	
	9) Phelps Dodge Refining Corp.	400

FUENTES

- 1) U.S.B.M. Minerals Year Books
- 2) Roskill Estimates
- 3) U.S.B.M. Mineral Commodity Summaries
- 4) U.S.B.M. Mineral Industry Surveys
- 5) British Geological Survey World Mineral
Statistics

CUADRO # 3
PRODUCCION DE SELENIO REFINADO DE 1970 A 1989
(TONELADAS)

ANO	BELGICA	CANADA	JAPON	USA	OTROS	TOTAL
1970	31	388	212	456	93	1180
1971	55	402	238	298	89	1082
1972	61	327	335	336	96	1155
1973	30	264	358	361	179	1192
1974	70	334	334	292	180	1210
1975	66	343	418	162	196	1185
1976	50	227	460	182	195	1114
1977	155	411	456	227	238	1487
1978	140	393	481	231	287	1532
1979	150	512	510	266	279	1717
1980	108	377	471	141	231	1328
1981	110	350	428	252	200	1340
1982	103	222	410	243	198	1176
1983	145	266	433	354	226	1424
1984	180	354	465	254	308	1561
1985	230	361	497	195	300	1583
1986	250	345	427	161	306	1489
1987	230	300	481	227	296	1534
1988	250	321	471	286	271	1599
1989	275	363	471	253	271	1633

CAPITULO II

TECNOLOGIA GENERAL

II.1 ESTUDIO DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima es el Lodo Anódico decoperizado proveniente de la lixiviación ácida del barro anódico de las celdas de electro-refinación del ánodo comercial. Los ánodos de cobre contienen impurezas del metal base, en algunas ocasiones aleadas con plata y con cobre.

Teóricamente y dada la baja tensión del refinado, los metales más nobles y más electropositivos que el cobre, se posarán como barro en el fondo del tanque, en tanto que los más electronegativos o menos nobles se disolverán y ensuciarán el electrólito. Algunas impurezas pueden alearse con el cobre o con la plata y pasarán al barro ya formado, en calidad de tal y también porque algunas de las impurezas solubles se precipitarán total o parcialmente debido a la acción de algunos de los componentes del electrólito.

El selenio y el telurio se combinan en los ánodos en primer término con la plata y pasarán al barro como seleniuro y telururo de plata. Todo exceso de selenio y de telurio se combina con el cobre y aumentará el contenido normal de este en el barro introduciendo en el seleniuro y telururo de cobre. El plomo se disuelve en el ánodo y se precipitará rápidamente en forma completa como $PbSO_4$. El arsénico pasa al ánodo como ácido arsénico para producir un arseniato

básico antimonioso que forma un precipitado llamado barro flotante. El azufre que existe en el ánodo pasará al barro en forma de sulfuro de cobre.

El barro anódico formado en el fondo de la celda, es evacuado cada 28 días hacia unos tanques de lixiviación ácida con aire y vapor que lo mantiene la temperatura de lixiviación a 80°C con objeto de disolver el cobre y bajar a menos de 2%. Un análisis químico promedio de los lodos anódicos decoperizados muestra:

Se = 27.5%	Ag = 46.1%	Cu = 2.4%
Sb = 0.5%	SiO ₂ = 5.7%	Al ₂ O ₃ = 6.0%
Pb = 2.6%	Te = 0.4%	As = 0.1%

II.2 ESTUDIO DEL PRODUCTO (SELENIO)

II.2.1 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SELENIO

Forma parte de la sub-familia VI A, con el oxígeno teniendo las siguientes propiedades:

Símbolo	Se
Número Atómico	34
Peso Atómico	78.96
Densidad 20°C	4.79 gr/cc
Punto de Fusión	217 °C
Punto de Ebullición	685 °C
Calor Latente de Fusión	16.5 cal/gr
Calor Latente de Vaporización	79.6 cal/gr
Calor Específico 20°C	0.081 cal/gr

Isótopos	En 1956 se registraban ya 14 con pesos entre 70 y 84
Volumen Atómico	16.4 cc/at-gr
Coefficiente Lineal de Dilatación Térmica 20°C	37 μ pulg/°C

- Semi-conductor para la electrónica moderna

- Formas Alotrópicas:

a) Selenio Alfa (Selenio Amorfo).- Polvo rojo amorfo por reducción de una solución de ácido selenioso. Esta forma tiene una densidad de 2.46 a 20°C. Todas las formas de Selenio Amorfo son solubles en disulfuro de Carbono.

b) Selenio Beta (Selenio Rojo Cristalizado).- En formas monocíclicas cuando una solución saturada de Selenio en disulfuro de Carbono, es lentamente evaporada y tiene una densidad de 4.46.

c) Selenio Gama (Selenio metálico cristalino).- Es obtenido calentando el Selenio Rojo amorfo vidrioso o si el Selenio fundido es enfriado a 80°C y mantenido a esta temperatura por un

buen tiempo, es negro cristalino exagonal romboédricamente, tiene una densidad de 4.8 a 20°C y es insoluble en disulfuro de carbono.

- Soluble en HNO₃ y H₂SO₄ concentrado
- Insoluble en ácido hidroclicóric
- Ligeramente atacado por soluciones acuosas concentradas en hidróxidos alcalinos
- Los compuestos de Selenio mayormente tienen valencia de más 4 y más 6 (Los más estables más 4)
- Se combina directamente con el Hidrógeno, Oxígeno, Haluros y Azufre, también con la mayor parte de metales
- El Selenio cristalizado es buen conductor y su grado de conductividad aumenta con la intensidad de la luz que recibe.

II.2.2 USOS Y APLICACIONES DEL SELENIO

Los principales usos del Selenio son en la industria electrónica, en la Cerámica e Industria de pigmentos y la Siderúrgica.

El Selenio es usado en la industria

electrónica para producir rectificadores, planchas xerográficas, células fotoeléctricas, baterías solares y cámaras de televisión.

El Selenio se usa hace años en la fabricación del vidrio, como decorador y combinado con el Cadmio para obtener vidrio rojo rubí; en la industria de pigmentos en la Cerámica, pinturas, plásticos en colores desde el amarillo ligero a un marrón oscuro.

En la Siderúrgica se le usa al Selenio como un aditivo, para mejorar la laborabilidad de aceros al carbono y aceros inoxidable.

Además se usa en la Química en reacciones catalíticas como ingrediente de explosivos, agente en el vulcanizado del caucho y como aditivo en la industria de síntesis orgánico.

De una manera general más del 50% del Selenio producido se emplea en las industrias eléctricas y electrónicas, un 33% en la industria química y cerca del 20% en la Siderúrgica.

El consumo nacional es alrededor de 1 TM en forma de producto refinado. El Selenio es

usado principalmente el 74% en la industria del vidrio, 11% en productos de fundición, 5% en la industria química, 4% en la industria pecuaria, 3% en la fabricación de pinturas y 3% en la industria electrónica.

II.2.3 HISTORIA Y GEOLOGIA DEL SELENIO

En 1817 Juan Jacobo Berzelius, hombre de ciencia sueco, estudiaba con J.C. Gahn en un método para la fabricación de ácido reveló un fuerte y desagradable olor, que previamente había sido identificado por Kloploth como indicador de Telurio, en la esperanza de encontrar una nueva fuente de Telurio, Berzelius obtuvo grandes cantidades de este residuo, pero los resultados fueron negativos, no había Telurio, en cambio se identificó una nueva sustancia de propiedades similares a las del Telurio, a la que Berzelius llamó Selenio (de Selene, luna), asociándola a la sustancia Telurio (del latín Tellus, Tierra). Este descubrimiento en 1817 permaneció como una curiosidad de laboratorio, hasta 1873 en que W. Smith descubrió la propiedad de fotoconductividad, donde su conductibilidad varía con la luz y en la actualidad se usa esta propiedad en las células fotoeléctricas

de televisión, ojos eléctricos, etc.

Se pueden citar las siguientes especies minerales:

Berzelianita	Cu_2Se
(dedicada a Berzelius)	
Clausthalita	$PbSe$
Guanajuatita	Bi_2Se_3
Neumannita	Ag_2Se
Eucairita	$AgCuSe$
Selenolita	SeO_2
Tiemannita	Hg_8Se_5
Aguilarita	$Ag_2(SSe)$
Lerbachita	$(PbAg_2) Se$
	$(PbCu_2Ag_2) Se$
Zorgita	$Cu_{15}Tl_2AgSe_8$

Los minerales de Selenio no forman Yacimientos explotables, los Selenuros se encuentran combinados con metales sulfurados y en casi todas las menas no ferrosas de cobre, cobre níquel y menas multimetálicas. Durante el tratamiento de estas menas el Selenio es acumulado en los productos metalúrgicos intermedios.

Durante el intemperismo el Selenio y el Azufre tienden a separarse debido en parte a que el Selenio se mezcla en Seleniatos

férricos básicos insolubles volviéndose menos móvil que el azufre.

Solamente en un ambiente oxidante alcalino el Selenio es oxidado para formar seleniato soluble.

Lutitas con alto contenido orgánico pueden contener hasta 1,500 PPM de Selenio, las Fosforitas hasta 300 PPM. Altas concentraciones de Selenio ocurren en los depósitos de Uranio, en Arenisca como Selenio puro o como Seleniuros.

II.2.4 EL SELENIO A TRAVES DE LOS PROCESOS METALURGICOS

En la tostación oxidante de concentrados de sulfuro de plomo, cobre, zinc y níquel, que contiene selenio, la conversión de matas soplado de fundido de plomo y cobre, una parte del selenio es volatilizado acumulado en polvos y sublimados. Otra parte de Selenio pasa al fundido crudo de metales. En la refinación electrolítica de cobre y níquel, el selenio queda en el lodo anódico.

Actualmente en la industria, la principal fuente de recuperación de Selenio son los Lodos Anódicos de Cobre y Níquel. En segundo

término son los lodos de equipos lavadores de Gases Sulfúricos y de Industrias de Pulpa y papel.

El comportamiento del Selenio y su distribución entre los varios productos de procesos metalúrgicos tienen el siguiente desarrollo.

En el concentrado de Cobre el contenido de Selenio llega entre 0.0093-0.011% y el concentrado de níquel en 0.0038-0.0059%. En la fusión de concentrados de cobre, sobre el 97% del selenio es concentrado en el 35% de mata.

Cuando concentrados de Cobre son tostados en un horno de hogar múltiple de 20-30% de Selenio es volatilizado y concentrado en finos polvos. Cuando los gases de tostación son usados en la producción de H_2SO_4 , el Selenio se concentra en el lodo de scrubber. La calcina contiene de 70-75% de selenio original.

En la fusión de la calcina en Reverbero el 60% al 80% del Selenio encuentra en la mata y alcanza una concentración de 100 gr/TM durante la conversión entre el 60-90% del

selenio de la mata es colectado en el cobre blíster. Así la recuperación del selenio en el blíster varía entre 25-50% del contenido inicial de la calcina tostada. Durante la refinación electrolítica de cobre el Selenio completamente queda en los lodos anódicos.

El cuadro 1 nos muestra análisis químicos.

II.2.5 TOXICIDAD DEL SELENIO Y SELENIUROS

El Selenio y sus compuestos son sustancias venenosas y ellos actúan sobre varios órganos y depende de la concentración de la sustancia para causar leve o seria intoxicación.

Cuando el Selenio ingresa al organismo un olor desagradable aparece en el cuerpo. Aún pequeñas cantidades de Selenio y sus derivados causan irritación en el tracto respiratorio, ligero enfriamiento en la cabeza y dolor de cabeza.

Compuestos de Selenio en particular los haluros causan inflamación y ronchas sobre la piel.

El Selenio elemental en sus variadas modificaciones es menos tóxico que sus compuestos. No obstante la acción tóxica de

los compuestos no es uniforme. Los más venenosos son los seleniuros de hidrógeno, dióxido de selenio SeO_2 , haluros de selenio y los compuestos de los elementos pesados.

Cuando ingresa al organismo, el ácido selenioso y sus sales causan vómitos, diarrea y convulsiones. Al mismo tiempo la presión de la sangre disminuye, es posible la paralización del sistema nervioso.

Como una regla, bajo condiciones de trabajo normales y observando las reglas de seguridad industrial el envenenamiento puede ser evitado. En la preparación y trabajo con seleniuros de arsénico, zinc, mercurio y plomo y al templar o endurecer las aleaciones con telurio, fiebre, transpiración y dilatación de los riñones pueden ser observados.

En casos de envenenamiento por dióxido de selenio, encogimiento de los dedos y al mismo tiempo convulsiones se observan. Aguda intoxicación con selenio puede adquirirse cuando su concentración en el aire es de varios cientos de miligramos por litro. La concentración permisible de selenio dióxido en el aire no debe exceder de 0.0003 mg/lt.

CUADRO No.1

CARACTERISTICAS DE LOS LODOS DE REFINERIAS EN EL MUNDO

LUGAR	C O N T E N I D O %													LODO PRODUCIDO POR PESO DE ANODOS (%)
	Cu	Ag g/t	Au g/t	Se	Te	As	Sb	Bi	Pb	Fe	S	Si O ₂	Al ₂ O ₃	
BOLIDEN	40.0	93,555	12,750	21.0	1.0	0.8	1.50	0.000	10.0	0.04	3.5	0.30	—	1.40
MONTREAL ORIENTAL CANADA	37.2	153,990	10,830	20.5	3.0	0.6	0.48	—	—	0.61	—	—	—	0.95
MIRANDA CANADA	45.8	105,335	19,760	20.4	3.0	0.3	0.81	—	—	0.40	—	—	—	0.65
FUERTO KEIBLA, AUSTRALIA	13.0	62,852	16,358	3.0	2.6	4.0	0.34	0.020	23.0	0.35	7.8	0.72	0.7	1.00
MONTE LYELL, AUSTRALIA	66.2	9,412	1,729	3.3	Tr.	0.7	0.05	0.001	1.0	—	9.9	1.40	—	0.78
QUTUBAMPU FINLANDIA	11.0	73,300	4,353	4.3	—	0.7	0.04	—	2.6	0.60	2.2	2.30	Tr.	0.35
RODESIA, AFRICA	43.6	51,455	300	12.6	1.1	0.3	0.06	0.400	0.9	1.42	6.6	6.90	1.0	0.14
JAPON	29.3	10,700	9,275	5.6	2.5	1.4	5.54	0.900	23.4	0.94	—	3.20	1.5	0.79
RCu-ILD PERU	43.3	187,900	266	10.5	0.9	1.7	0.10	0.010	1.2	0.02	5.5	4.10	3.2	0.20

En envenenamientos crónicos con selenio y con el dióxido, inflamación de las articulaciones, coloración amarillenta de la piel, afecciones a la nariz y anemia se producen.

Selenio que ingresa al organismo, se distribuye entre numerosos órganos. Apreciable cantidad de selenio se encuentra en el hígado, riñones y bazo. El selenio ha sido detectado en el corazón, páncreas, pulmones, cabellos, sangre, músculos y huesos. Selenio es eliminado del organismo principalmente a través de los riñones. Hay datos que el selenio es eliminado del organismo principalmente a través de los riñones. Hay datos que el selenio es eliminado con variada rapidez de dos semanas a dos meses.

En envenenamiento con selenio y sus derivados, el daño debe ser tratado mediante la administración externa de trió-sulfato de sodio.

El más tóxico de los compuestos de selenio es el seleniuro de hidrógeno. Irrita el tracto superior respiratorio, ojos y piel.

Los síntomas observados por envenenamiento por selenio son la irritación de las membranas de la mucosa respiratoria y ojos, tos, frío, malestar, sensación de calor en la nariz. En algunos casos, debilidad general y pueden ocurrir convulsiones.

El aliento tiene un olor a ajo. El límite permisible de concentración de selenio de hidrógeno es 0.0001 mg/lt.

II.3 PROCEDIMIENTO INDUSTRIAL DE RECUPERACION DE SELENIO

II.3.1 REFINERIA DE COBRE DE ILO

La Refinería de Cobre de Ilo, esta ubicada en el Departamento de Moquegua (actual Región José Carlos Mariátegui) ciudad de Ilo, sobre la Costa Sur del Perú, inicia sus operaciones en 1975, con una capacidad de diseño de 150,000 TM/año de cátodos de Cobre de alta pureza.

La Planta de Anodos procesa cobre blister, en la modalidad de contrato Toll. Para este propósito cuenta con 2 hornos reverbero basculantes fabricados por Maerz Ofendau, de 330 TM de capacidad cada uno; los cuales funden blister para producir ánodos adecuados para la Planta Electrolítica.

La Planta Electrolítica, construida por el grupo Japonés Mitsui-Furukuwa, consta de 768 celdas comerciales, 44 celdas liberadoras para la regulación de electrólito. Adicionalmente, existen instalaciones para la remoción del níquel, lixiviación de lodos anódicos y producción de selenio.

La Planta de metales preciosos fue inaugurada en noviembre de 1984, fue diseñada para producir anualmente 1'250,000 onzas - troy de plata y 2,500 onzas - troy de oro.

Desde el punto de vista nacional, la puesta en marcha de la Refinería, ha causado un gran impacto económico en la Región Sur del País, brindando más y mejores puestos de trabajo, ampliando significativamente la frontera tecnológica y acercando a la Minería Peruana al rol que realmente le corresponde como promotora del desarrollo nacional.

Luego de la experiencia de 14 años de operaciones y los logros alcanzados; los técnicos peruanos realizaron el proyecto de la ampliación de Casa de Tanques desde agosto de 1989, incrementando su producción

en 24,000 TM/año de cátodos de alta pureza.

a) PLANTA DE ANODOS

La Planta de Anodos tiene como objetivo, efectuar la pre-refinación térmica del cobre ampolloso blíster (99.2% Cu), para obtener un producto Anodo (99.7% Cobre) que reúna las características físicas y químicas, además de tamaño, forma y superficie lisa, para ser tratados posteriormente en Planta Electrolítica.

En esta planta se definen 2 secciones:

- a) Sección de Hornos
- b) Sección de Moldeo

a.1 Sección Hornos

En la Sección Hornos, cuenta con dos hornos tipo basculante Maerz de 330 TM de capacidad con profundidad del bano de 850 mm y superficie de 59.5m².

Los dos hornos están contruidos con planchas de acero, revestidos interiormente con diferentes tipos de ladrillos refractarios según la naturaleza de su función, tienen 02 puertas de alimentación, una puerta

para introducir los troncos de eucalipto y una puerta de escorificación con su canal respectivo.

Todas las puertas con sus marcos tienen refrigeración por agua. Cada horno tiene 2 quemadores de petróleo, atomizado por aire suministrado por un ventilador cada uno y colocado en la parte superior del horno.

El petróleo y aire es regulado por un instrumento de control automático y manual, pudiendo además regularse el combustible a través de válvulas manuales ubicadas en la red respectiva de distribución.

La temperatura inferior y presión del horno son medidas y registradas por instrumentos de control automático.

Para descargar el blister se tiene un equipo denominado GRUA TELESCOPICA de capacidad de 10 TM, se desplaza a lo largo de la zona de recepción con una rotación hasta 180° C consta de mandíbulas especiales que pueden

tomar y levantar hasta 13 planchas.

La operación de carguío a los hornos se realiza con 3 máquinas: La máquina de cargar (Dango o Autocargadora) que tiene una horquilla receptora de material y evacua a través de una chapa de empuje por accionamiento totalmente hidráulico con una capacidad neta de carguío de 1,600 kg.; un montacargas Toyota de 4,000 kg. de capacidad; y cuando se trate de material pesado (moldes) el montacargas de 10,000 kg. de capacidad.

a.2 Sección Moldeo

En la Sección Moldeo se encuentra la máquina de moldear horizontal tipo carrusel de la firma DEMAG de 80 Ton/hr de rendimiento, conteniendo 26 moldes en la rueda y moldea simultáneamente 2 ánodos en 34 seg. Diez secciones de moldes están destinados para la refrigeración por agua por la parte superior a partir del tercer molde respecto a la cuchara de moldeo.

El moldeo consiste en bascular el horno, accionando los mandos desde la cabina de la Rueda de Moldeo, de modo que el cobre líquido salga del horno por la piquera o agujero de colada y a través de los canales, llegue a las cucharas de moldeo, desde las cuales el cobre será vaciado sobre los moldes para darle la forma de ánodos.

El basculamiento del horno tiene su límite en 25° , punto en el cual el horno debe quedar con 10 TM de remanente, el equipo adicional usado consta de un sistema de vaciado automático OUTOKUMPO, sistema de moldeo, de refrigeración y rociado de solución desmoldante.

En la sección moldeo se ubica la prensa de ánodos, donde enderezan el cuerpo y las orejas del ánodo, dándole una buena verticalidad y no produzca cortos circuitos en Planta Electrolítica. La grúa Puente transporta y carga elementos pesados como matriz, moldes, material recirculante, etc.

a.3 Proceso General de la Planta

El cobre blister en la planta de Anodos, al cargarse a los hornos Maerz pasa por el proceso de afinado igneo consistente en la fusión, oxidación, reducción y escorificación para luego ser moldeado y prensado.

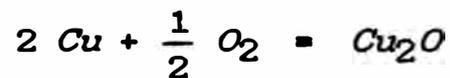
La etapa de carguío se realiza en 3 ó 4 etapas, donde el tiempo total es aproximadamente de 7 hrs. Terminado el primer carguío pasa a una fusión parcial para luego realizar el segundo carguío debido a que el volumen ocupado por el blister sólido se desocupa al fundirse; del mismo modo se procede en los siguientes carguíos.

La etapa de fusión total del cobre dura aproximadamente 4 horas, donde el tiempo acumulado entre carguío y fin de fusión suma aproximadamente 11 horas. La fusión se realiza con llama oxidante y con exceso de 10% de aire.

La etapa de oxidación se realiza con objetivo de formar la escoria, por lo cual se sopla aire a través de 4

tubos de acero de 1" dentro del baño a una presión de 2 a 2.5 kg/cm² el período de soplado dura aproximadamente 3 horas.

Las reacciones que se producen dentro de esta etapa del soplado oxidante son:



La etapa de escorificado, trata de evacuar la escoria formada por puertas para escorificar, esta escoria es bastante viscosa y en oportunidades se puede utilizar calcita para su fluidificación. Para escorificar hay que volcar el horno hacia el lado de la puerta de escorificar y jalar la escoria con cucharas de fierro especiales, debido

a su viscosidad.

La escoria está compuesta de óxidos básicos como FeO, SiO₂, Fe₂O₃, CaO.

En la etapa de reducción, se realiza en 2 etapas, la primera utilizando una lanza de petróleo-vapor y luego utilizando palos de eucalipto, introduciéndose mediante un elevador de palos. El objetivo de este proceso es bajar la cantidad de oxígeno del baño a rango de 1,500 ppm permisible en el ánodo.

En esta etapa se producen las reacciones siguientes:



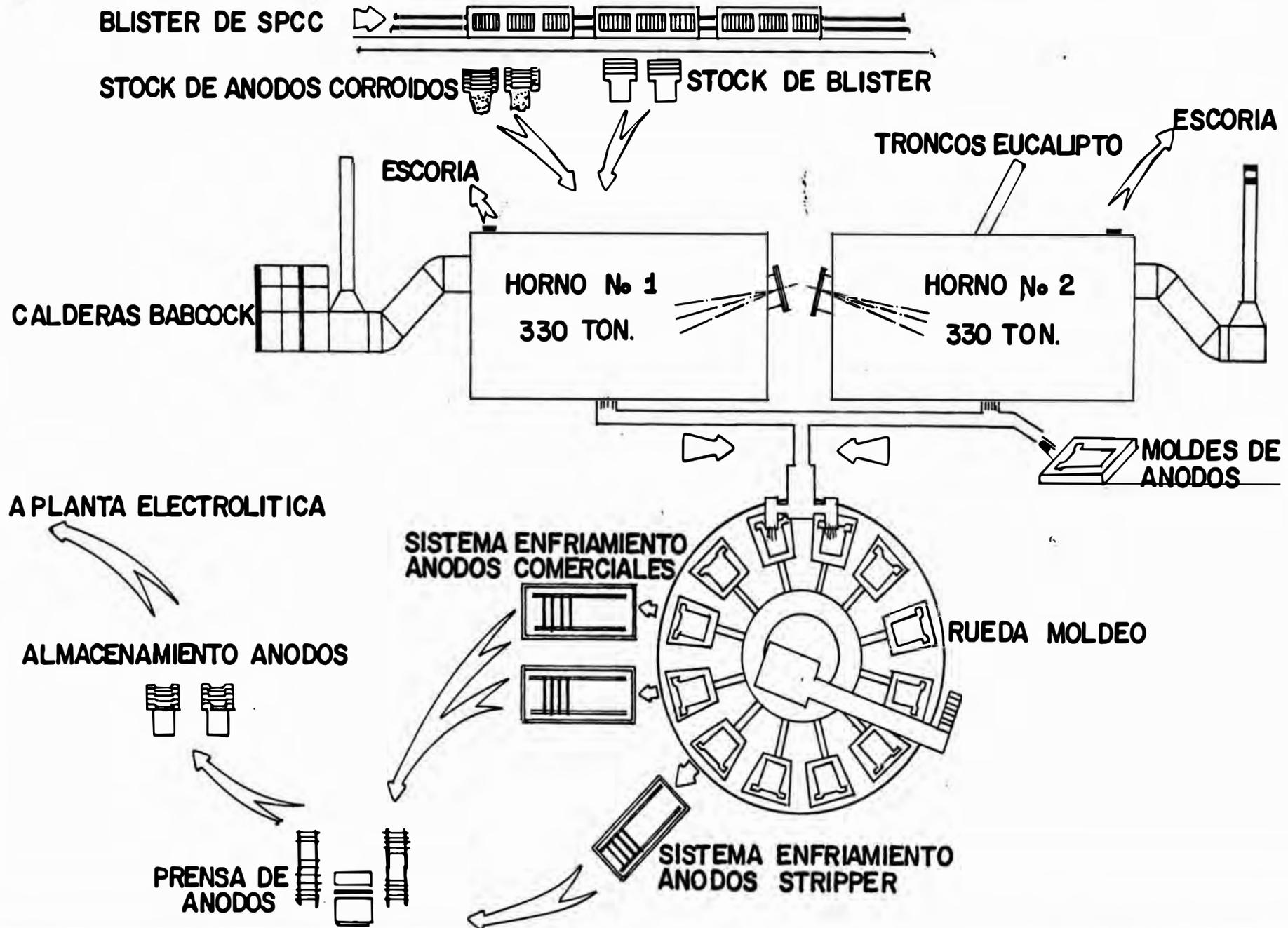
Al final de esta etapa el baño de cobre debe estar con las condiciones químicas para el moldeo, por lo cual se envía una muestra al laboratorio e inmediatamente reporta los resultados para proceder al moldeo.

CUADRO No. 4
ANALISIS TIPICOS DE MATERIALES
DE PLANTA DE ANODOS

	BLISTER	ANODO DE COBRE
Cu %	99.01	99.73
O ₂ ppm	4800	1500
S ppm	230	24
Se ppm	110	130
Ni ppm	90	80
As ppm	70	200
Sb ppm	35	60
Fe ppm	30	8
Pb ppm	12	20
Bi ppm	2	2
Te ppm	< 1	2
Zn ppm	< 1	< 1
Ag ppm	300	310

	ESCORIA
Cu %	25.20
O ₂ %	N.A.
S %	2.0
Se %	0.3
Ni %	0.15
As %	0.03
Sb %	0.5
Fe %	7.0
Pb %	4.0
Bi %	0.2
Te %	0.2
Zn %	0.01
Ag %	3.5

ESQUEMA N°6 DIAGRAMA DE FLUJO DE PLANTA DE ANODOS



La etapa de moldeo consiste en bascular el horno, accionando mandos desde la cabina de la rueda de moldeo, de modo que el cobre líquido, salga del horno por la piquera o agujero de colada y a través de los canales, llegue a las cucharas de moldeo, desde los cuales el cobre será vaciado sobre los moldes para darle la forma de ánodos. La operación de la colada finaliza con una inclinación del horno de 23 a 24°, debido comúnmente a que el flujo de la carga remanente determinará ánodos defectuosos por la irregular alimentación.

b. Planta Electrolítica

La Planta Electrolítica tiene como objetivo producir el cátodo de cobre comercial de alta pureza, a partir de los ánodos producidos en Planta de Anodos, por medio de celdas de electrodeposición, haciendo circular corriente eléctrica.

Esta Planta esta dividida en tres secciones:

a) Sección Comercial

b) Sección láminas de arranque

c) Sección purificación

b.1 Sección Celdas Comerciales

Se tiene 2 naves con 896 celdas agrupadas en 56 secciones.

Estas 56 secciones están divididas en 28 blocks y cada block se divide en dos secciones, en las mencionadas celdas se produce cobre electrolítico.

La Sección Comercial consta de 3 naves, naves, Nave AB (al oeste) Nave CD (al este) y la Nave Central. En la Nave Central se encuentran tanques de circulación de electrólito, que son tanques de paso de los cuales por intermedio de bombas se envían a los tanques de cabeza ubicados a mayor nivel, donde por gravedad el electrólito fluye a todas las celdas de la casa tanques a un flujo de 25 lts/ min, el electrólito al recorrer la celda rebosa por la parte posterior y por gravedad cae al tanque de circulación, cerrándose así el circuito. Entre las bombas de los

tanques de circulación y cabeza existen 4 intercambiadores de calor de grafito, las cuales por acción del vapor calientan para mantener la temperatura del electrólito en celdas a 63 C. El condensado es enviado a tanques de almacenamiento y mediante un sistema planteado, se utiliza como agua de reposición y demás usos en Planta.

Se tiene una batería de 6 filtros de discos de alta presión los cuales tienen la función de filtrar y purificar el electrólito de partículas sólidas.

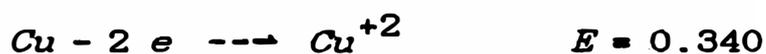
En la refinación electrolítica del cobre se utiliza como electrólito una solución de ácido sulfúrico y sulfato de cobre. La electrólisis se efectúa por el paso de corriente continua, como ánodo se utiliza la plancha de cobre producida en Planta de Anodos y como cátodo una delgada lámina de cobre pero de 99.99% llamada lámina de arranque.

La unidad básica del equipo de

electrorefinación es la celda comercial de concreto reforzado y revestido con PVC rígido de 3 mm, con dimensiones de 4.83 mt. de largo, 1.23 mt. y 1.40 mt., la separación de ánodos de centro a centro es 100 mm. y se tiene 46 ánodos por celda y 47 cátodos por celda.

En la celda electrolítica por efecto de la corriente continua ocurre la electrólisis del cobre donde se producen dos tipos de reacciones básicas:

Reacción Anódica:



Esta reacción absorbe energía, donde se produce la disolución del ánodo y el ión cobre entra en la solución. El medio acuoso transporta este ión sobre el cátodo.

Reacción Catódica:



Esta reacción produce energía que la absorbe la reacción anódica y precipita el cobre sobre el cátodo aumentándolo de peso.

Las impurezas del ánodo pueden ser divididas en 3 grupos.

El primer grupo son metales más electronegativos que el cobre y entran en solución completamente. En este grupo esta Ni, Zn y Fe, estos no se depositan en el cátodo y se acumulan en el electrólito, pero en algunas oportunidades pequeñas cantidades de Fe y Ni (0.001-0.005%) aparecen en el cátodo dividido a que sulfatos de estos elementos son ocluidos en cavidades inter cristalinas por lavado deficiente de cátodos.

Cuando se tiene exceso de estos sulfatos en el electrólito, la solubilidad del CuSO_4 decrece, pudiendo sobresaturarse con un ligero enfriamiento.

La eficiencia de corriente disminuirá

consecuentemente y la calidad del depósito catódico se deteriorará; por otro lado con la presencia de sales de Ni, Fe y Zn se incrementa la resistencia óhmica y el consumo de electricidad.

En el grupo II lo constituyen metales mas electropositivos y son la Ag, Au, Se, Te, no se disuelven en H₂SO₄ y compuestos de cobre ligeramente activos como Cu₂Te, Cu₂Se, Cu₂S, Cu₂O.

El cobre pasa al lodo de acuerdo:



El tercer grupo de impurezas, las potenciales electroquímicas son similares al del cobre, tal como As, Sb, Bi. Estas son las impurezas más dañinas debido a que pasan rápidamente a la solución cuando se disuelve en el ánodo y puede depositarse con el cátodo junto con el cobre, bajo ciertas condiciones (alta concentración de estos

elementos, bajas concentraciones de cobre a altas densidades de corriente).

La presencia de As, Sb, Bi aún en pequeñas cantidades en el cátodo, reducen principalmente sus principales cualidades.

La maquinaria utilizada en Sección Comerciales consta de una máquina cargadora y espaciadora de ánodos, el cual carga y ordena los ánodos sobre una cadena, 4 grúas puente de 22.5 Ton de capacidad que transportan cargas pesadas como ánodos a celdas comerciales, ánodos corroídos a la cadena de la máquina lavadora y descargado de desechos de ánodos; este equipo evacua residuos de cobre para por intermedio de montacargas retornarlo a la Planta de Anodos previo pesado.

La grúa Puente ubicada sobre rieles en la parte superior de la Planta, transporta los cátodos producidos hacia la cadena transportadora de la máquina lavadora y descargadora de

cátodos, que por intermedio de presión de chorros de agua los cátodos se someten a limpieza, para luego empaquetarlos y dejarlos en un transportador de rodillos; estos rodillos envían a la balanza de pesado y al equipo de enflejado para finalmente por medio de un montacargas transportar el paquete de cátodos comerciales al patio de almacenamiento para su exportación.

b.2 Sección Láminas de Arranque

La Sección Láminas de Arranque tiene un sistema de circulación de electrólito semejante a la sección comercial, su objetivo es producir la lámina inicial para ser utilizado como cátodo, utilizado para la producción del cobre electrolítico. La celda electrolítica es de semejante construcción con diferencia de tener una profundidad de 1.35mt - 1.5mt.

Los electrodos utilizados son ánodos de cobre de mayor dimensión y peso y como cátodo se tiene planchas de

cobre laminado en frío (planchas madre) de 4mm de espesor y 50kg. de peso aproximadamente, antes de ser introducidos al proceso se realiza un tratamiento de la superficie con una solución jabonosa y/o aceite. De otro modo, las láminas depositadas no pueden ser separadas.

La electrólisis para obtener las láminas de arranque en la celda dura aproximadamente 24 horas. Después de la electrólisis las planchas madre son extraídas de los tanques y las hojas de cobre depositadas sobre ellos son separados. Se tiene en la Refinería una máquina transportadora de Planchas Madre que permite la continua separación de la lámina de cobre de la Plancha Madre.

La lámina de arranque tiene 2 orejas de cobre remachadas, como sujetadores de las hojas y una barra para mantener en suspensión sobre la celda comercial.

Para este caso se tiene una máquina preparadora de láminas de arranque,

máquina estampadora y transportadora de láminas de arranque y una cadena transportadora de barras de suspensión (cross-bar) que termina en un almacén automático de barras.

De esta forma el cátodo inicial producido sale de buena verticalidad para que no origine un corto circuito al paso de la corriente directa.

En esta sección se tiene las celdas de primera liberadora cuya función es bajar el contenido de cobre por electrowining del electrólito, debido a que la tendencia del cobre en el electrólito tiende a aumentar, por motivo que el ánodo se disuelve parcialmente debido a reacciones químicas. Estas celdas tienen el objetivo de mantener una concentración de 45 gr/lt de cobre en el electrólito y utiliza como ánodo una plancha de plomo aleado con 6% de antimonio.

La densidad de corriente es la mitad de la densidad para el depósito de cobre comercial.

b.3 Sección de Purificación

La sección de purificación capta parte del electrólito y lo separa del sistema, como electrólito gastado, para prevenir la acumulación de impurezas en el electrólito y mantener su contenido constante como valor específico o menor. Por ello cuenta con celdas de segunda liberación donde Cu, As y Antimonio, son removidos por electrólisis en un circuito de electrowining semejante a las celdas de primera liberación.

La solución decoperizada es concentrada para remover Ni, Fe, Zn, Ca como lodo de Ni. La solución sobrante de la evaporación contiene alta concentración de ácido sulfúrico el cual regresa a casa de Tanques.

Las celdas de Segunda Liberación tienen un rectificador exclusivo con capacidad de corriente máxima de 12,000 amperios el electrólito suministrado a esta instalación, viene del primer tanque de liberación donde el contenido de cobre es

reducido a cerca de 20 gr/lt.

Existen 24 celdas divididas en 4 blocks, teniendo cada uno 6 celdas, el electrólito es circulado, a través de una unidad de un block (6 celdas), para estas celdas se usan ánodos de Plomo-Antimonio de 1m² de área.

El evaporador utilizado para remover las impurezas disueltas en el electrólito gastado del tanque de segunda liberación recupera ácido sulfúrico al ser separado por decantación y filtración, el cual es utilizado en la Casa de Tanques.

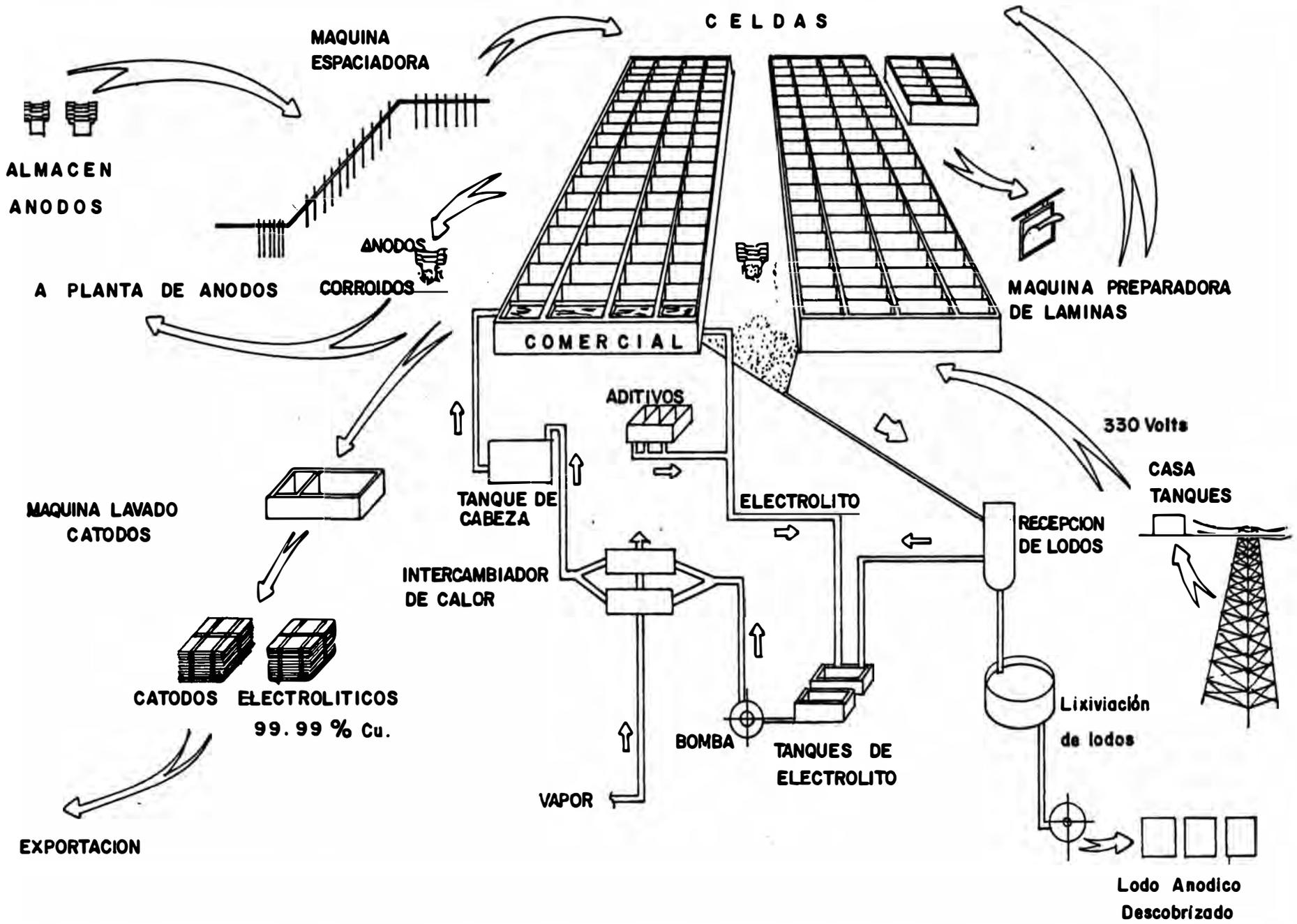
Los lodos anódicos que son evacuados de las celdas, son enviados a purificación sobre los tanques de aireación, donde, con electrólito o ácido sulfúrico adicionando a temperatura de 80°C y con agitación de aire se lixivia el cobre contenido en el lodo, hasta que el contenido de cobre baje de 23% a menos de 1% en el lodo anódico.

CUADRO No. 5
ANALISIS TIPICOS DE MATERIALES
DE PLANTA ELECTROLITICA

	CATODO DE COBRE ppm
Cu%	99.993%
O2	15
S	5
Se	< 0.1
Ni	< 1
As	< 1
Sb	< 1
Fe	<1
Pb	< 1
Bi	< 1
Te	< 1
Ag	400

	LODO DE LIBER ADORA %	LODO ANODICO DESCO- BRIZADO %	LODO DE NIQUEL %
Cu	45.0	2.0	0.9
S	4.8	4.1	21.0
Se	0.6	26.0	0.05
Ni	2.1	N.A.	13.0
As	4.5	0.03	0.03
Sb	2.0	0.5	0.02
Fe	0.15	3.0	5.0
Pb	10	0.3	0.1
Te	0.3	0.2	0.01
Zn	0.003	N.A.	0.2
Ag	0.05	41	N.A.
H2 SO4	0	5	12

	ELECTRO LITO COMER- CIAL gr/lt
Cu	40.0
Ni	7.0
Fe	1.1
As	0.7
Sb	0.2
Zn	0.05
Se	0.01
Pb	0.01
Te	0.01
Bi	0.01
Cl	0.02
H2 SO4	180.0



ESQUEMA N°7 DIAGRAMA DE FLUJO DE PLANTA ELECTROLITICA

c. Planta de Lodos Anódicos

La función de esta planta es producir Plata y Oro a partir de los lodos anódicos calcinados que contienen aproximadamente Selenio de 8-10%.

Esta Planta tiene 3 secciones definidas:

- a) Sección de Copelación
- b) Sección de Electrorefinación de Plata
- c) Sección de Producción de Oro

c.1 Sección de Copelación.- Tiene el objeto de producir el Doré de Plata a partir de la Calcina con contenidos de 42% de Plata. Este material es homogenizado en fundentes tales como Na_2CO_3 (15%) y Bórax (10%), en oportunidades se adiciona Calcita para fluidificar la escoria o tierra diatomea para mejorar la fusión.

Esta mezcla es cargada por etapas a un horno de Copela con capacidad de proceso 2-5 TM de Calcina. El proceso de producción de Doré de Plata consta de tres etapas. La primera etapa tiene como fin fundir una carga de calcina de aproximadamente 2 Ton. donde por etapas se procede a un

carguío-fusión-escorificación, para luego cargar mayor cantidad de Calcina y nuevamente se repite el carguío-fusión-escorificación.

De este modo se producen 3 ó 4 etapas hasta tratar todo el material, en esta etapa se requieren 48 horas.

La segunda etapa se realiza el soplado de aire con el objeto de oxidar, algunas otras impurezas (tal como el Selenio) y purificar el baño fundido de plata. En el transcurso de esta etapa se va formando una capa de escoria, la cual se remueve constantemente, el tiempo de soplado es de 30 horas aproximadamente.

La tercera etapa comienza una vez que se observa que no hay formación de escoria, procediéndose a la adicción de mezclas oxidantes (NaNO_3), para remover las últimas impurezas y evacuar la escoria nítrica hasta obtener un Doré de 98% de ley de Plata. Finalmente vierte en moldes de 11 1/2 por 14" por 1' para obtener ánodos de un peso de 25 kg cada uno.

El horno de Copela tiene una estructura de acero de 3/8" y con material refractario de Cromo, magnesita. La temperatura de fusión alcanza los 1,200 a 1,250°C y de copelación 1,000 a 1,100 grados centígrados. A continuación del horno se tiene dos cámaras de escoria en serie para que salgan los gases por acción de un extractor que los dirige hacia un scrubber de acero inoxidable para el lavado de los mismos. Finalmente los gases lavados se evacúan por la chimenea al medio ambiente.

c.2 Sección de Electrorefinación de Plata

Se realiza el proceso mediante el cual se procede al afino de plata, por el paso de corriente eléctrica donde se deposita la plata en el cátodo, en forma de cristales y quedando como lodo anódico otros metales nobles e impurezas.

Los ánodos de plata son colocados en las celdas THUM, y se proceden a electrolizarlos a una densidad de

corriente catódica de 2.95 amp/dm² y 3.5 vol/celda. Obtenidos los cristales de plata se rastrilla y se extraen a unos tanques de lavado. Luego de lavados y secados se procede a fundir en horno de crisol donde se debe agregar NaNO₃, para extraer todas las impurezas residuales como son: Cu, Se, Pb, etc, y así se moldea obteniéndose barras de plata pura.

El equipo utilizado son las celdas electrolíticas de dimensiones 134 cm. por 73 cm. por 24 cm. y dentro de estas celdas se tiene la Canasta Anodera de 80 cm. por 19 cm. por 67 cm. Todo esto está en una estructura metálica, sostén de las celdas.

El Cátodo usado es de grafito de 1 pulg. de espesor, el cual está en la parte del fondo de la celda, el electrólito es una solución de AgNO₃ y CuNO₃ el cual bajo la acción de corriente continua de un rectificador de 400 amperios y 24 voltios, comienza la precipitación de plata fina.

c.3 Sección de Producción de Oro

Es un proceso mediante el cual, se recupera la plata residual del lodo anódico de plata y se elimina las otras impurezas quedando únicamente otros metales nobles como: Au, Pt, Os, etc. Los lodos anódicos que están en la canasta anodera se lavan y son llevados al proceso de lixiviación con HNO₃ diluido, con objetivo de disolver la plata, luego de una lixiviación con HNO₃ concentrado, las soluciones de ambas disoluciones son enviadas a un tanque para la cementación de la plata con láminas de cobre.

El precipitado filtrado lixivía con agua regia y se lleva a 95°C para disolver el Oro, luego se enfría, se filtra y el residuo es recirculado al Horno Copela. La solución que contiene oro es filtrada y reducida con SO₂ o Thiourea.

El precipitado de oro es fundido en un horno eléctrico para ser moldeado en barras de oro para su

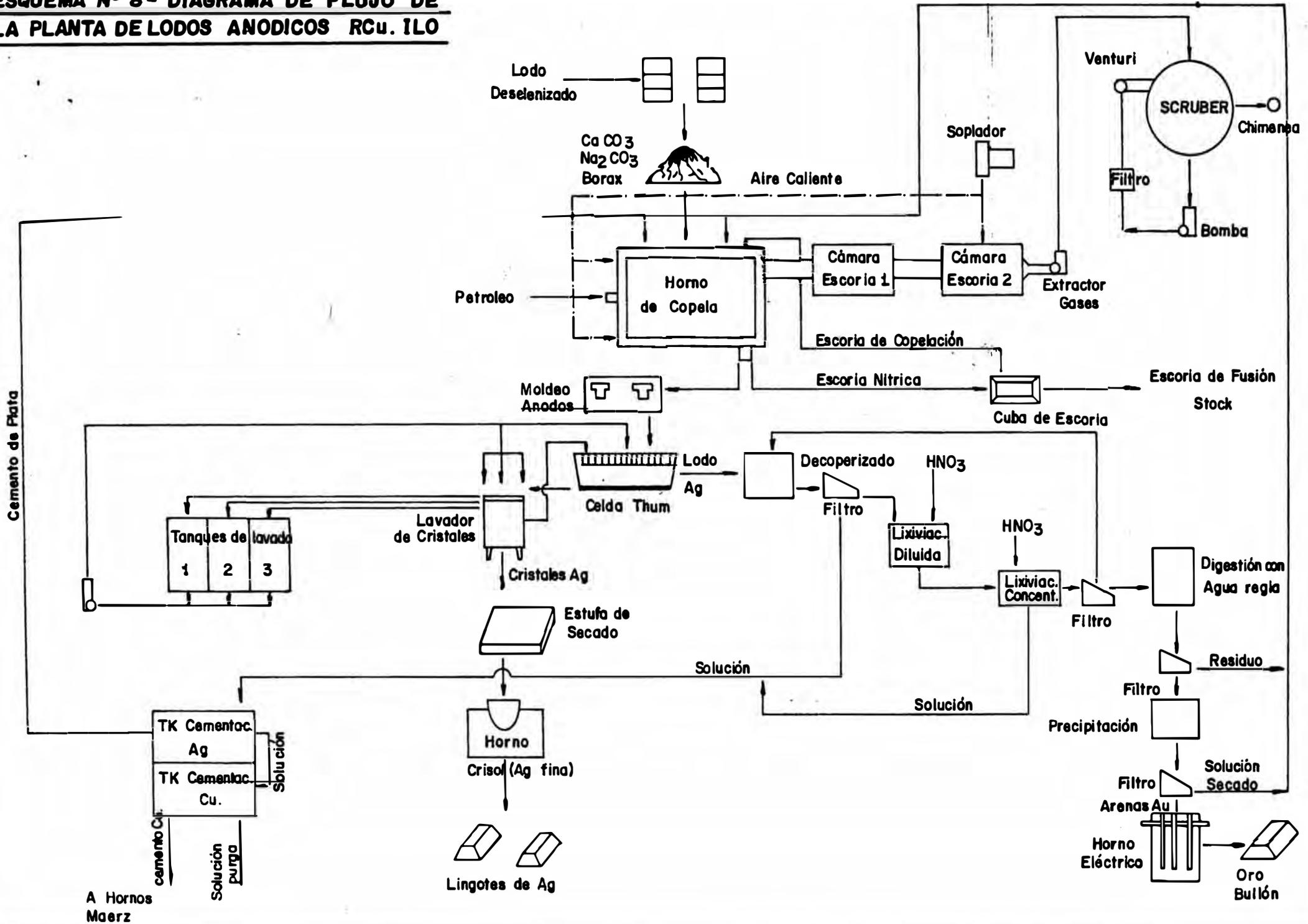
CUADRO No 6
ANALISIS TÍPICOS DE MATERIALES DE PLANTA
DE LODOS ANODICOS

	Ag %	Au %	Se %	Cu %	Fe %	Pb %	S %	Te %	Bi %	Ni %	Ca %
LODO DESELENIZADO	46	0.08	9.0	2.5	2.5	2.0	4.0	0.2	0.08	0.07	0.02
ESCORIA DE FUSION	3.5	0.002	0.4	5.0	7.0	4.0	2.0	0.2	0.2	0.2	2.0

	Ag gr/lt	Cu gr/lt	HNO3 gr/lt	PH gr/lt	Pb gr/lt	Ca gr/lt	As gr/lt	Se gr/lt
ELECTROLITO DE PLATA	50.0	25.0	0.3	3.0	100	30	6	3

	Ag %	Au %	Se %	Cu %
DORE DE PLATA	98.5	0.17	0.01	0.5
LINGOTE DE PLATA	99.994	---	N.D.	N.D.
LINGOTE DE ORO	0.05	99.9	---	---

ESQUEMA N° 8 - DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE LODOS ANODICOS RCu. ILO



comercialización. La solución se lleva a secado y es recirculado al horno de Copela.

II.3.2 PRODUCCION DE SELENIO CRUDO EN LA REFINERIA DE ILO A NIVEL INDUSTRIAL

En la sección de Purificación de Planta Electrolítica se reciben los Lodos Anódicos de las Celdas Comerciales en tanques de aireación; son lixiviados con electrólito o con ácido sulfúrico a temperatura de 80°C y con agitación de aire. El proceso dura 25 horas, donde arroja un valor final de menos del 2% de Cobre en el lodo anódico, material con el cual se inicia el proceso de Deselenización y obtención del Selenio.

a. Descripción del Proceso

El lodo anódico lixiviado es centrifugado y cargado en bandejas a los hornos de secado a 110°C, luego de 24 horas el lodo es descargado y pulverizado en un molino de martillos, a continuación es tamizado y cargado al tanque de digestión, aproximadamente se utiliza 400 kg. de lodo anódico seco para mezclarlo con el ácido sulfúrico concentrado en relación 1:1. La mezcla del lodo con ácido es

cargado en bandejas de tostación de 4 cm. de cama y luego son cargados al horno eléctrico cilíndrico vertical denominado Reactor de Selenio.

El horno es calentado por encima de la temperatura de reacción donde convierte el Selenio cualquiera sea su ocurrencia a la forma de SeO_2 , el mismo que es volatilizado y captado por una corriente de agua acidulada en donde se transforma en ácido Selenioso (H_2SeO_3).

Este ácido selenioso luego es reducido por el dióxido de azufre SO_2 a Selenio elemental, regenerándose el ácido sulfúrico. La reacción se da en la tubería vertical de bajada y tanque de asentamiento, en pocos segundos la precipitación es completa.

Al final de la tostación se usa aire como agente oxidante.

El eyector es el mecanismo usado para evacuar por vacío los gases del Reactor de Selenio, al pasar el agua acidulada por medio de su difusor. La temperatura de esta solución de absorción se mantiene

entre 80°C- 90°C, sobre esta temperatura el Selenio es precipitado como un polvo negro cristalino fácil de filtrar.

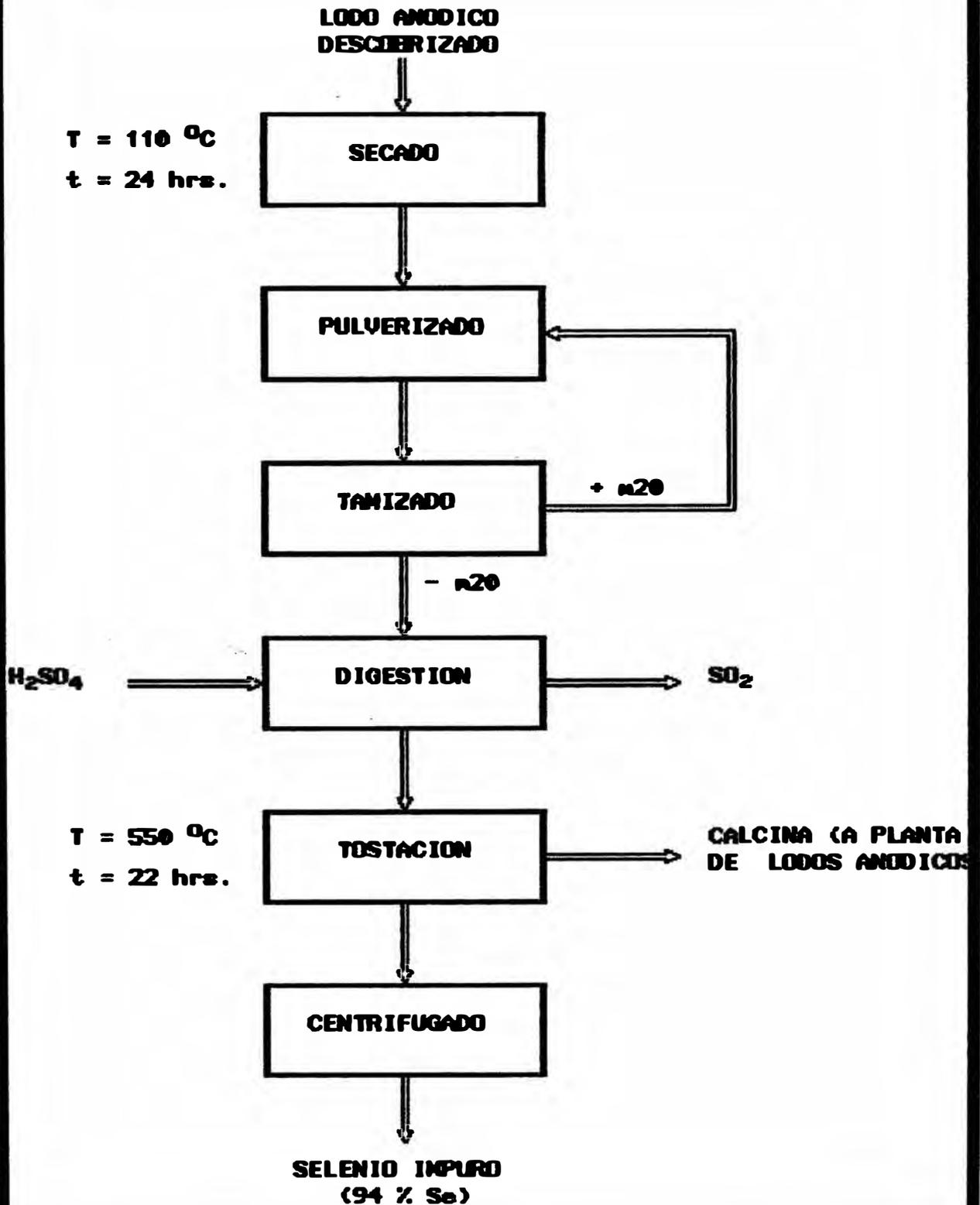
Este Selenio se asienta en el tanque de circulación el cual es evacuado en forma quincenal y bombeado a unos tanques de espera, para luego por medio de una centrífuga separar el líquido y el Selenio húmedo es embolsado y enviado al almacén con una ley del 94% de Selenio aproximadamente.

Los esquemas 9 y 10 muestran el detalle del proceso actual.

b. Balance Metalúrgico Actual

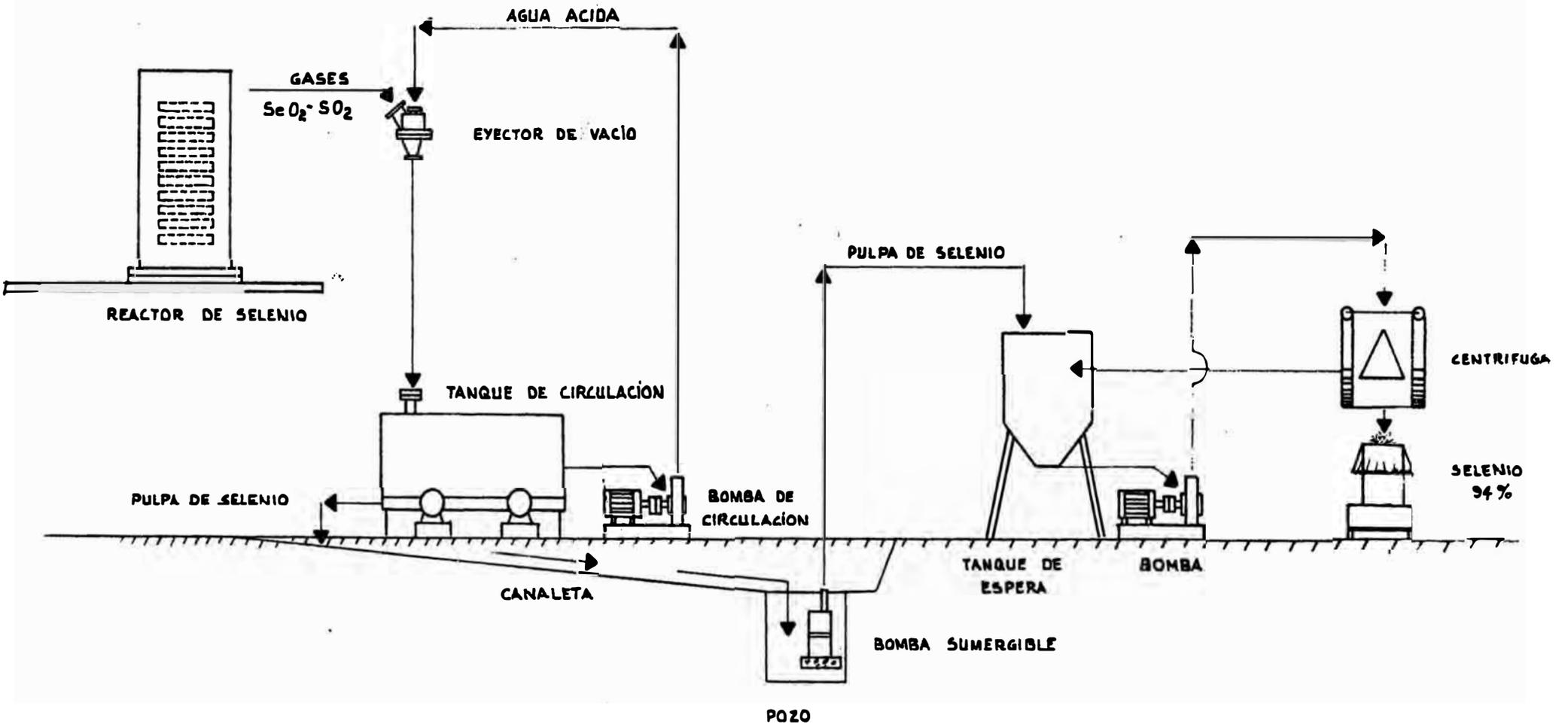
El Balance Metalúrgico típico que se presenta se refiere a una carga normal de una batea de tostación sulfatizante, normalmente se carga 400 kg. y se mezcla con ácido sulfúrico, luego de 22 horas de proceso se descarga en el Reactor de Selenio y se desbandeja, dando una calcina con aproximadamente 9% de Selenio y 350 kg. de peso, en cada Batch se produce un promedio de 53.2 kg. de lodo de Selenio crudo (impuro), calculado a partir de valores estadísticos.

ESQUEMA 9
DIAGRAMA DE FLUJO DEL
LODO ANODICO DESCOBRIZADO



ESQUEMA N° 10

DIAGRAMA DE FLUJO DE PRODUCCION DE SELENIO ACTUAL



CUADRO No. 7
BALANCE METALURGICO CARACTERISTICO
- ACTUAL -

	PESO SECO (Kg)	ENSAYES (%)			CONTENIDOS (%)			DISTRIBUCION (%)		
		Se	Ag	Cu	Se	Ag	Cu	Se	Ag	Cu
LODO ANODICO	400	24	40.3	1.8	96	161.2	7.2	100	100	100
CALCINA	390	9.0	41.3	1.8	35.1	161.2	7.2	36.6	100	100
LODO DE SELENIO	49.4	94	—	—	46.4	—	—	48.3	—	—
OTROS (tks-C7)	—	—	—	—	14.5	—	—	15.1	—	—

Este proceso tiene la particularidad de por razones de operación, evacuar una cantidad de solución a un tanque denominado C-7, para garantizar limpieza de compartimientos inferiores del tanque de circulación y originaría deficiencia en el proceso.

Cabe indicar que esta cantidad de Selenio es constantemente recirculada debido a que se envía a los tanques de oxidación, que lixivian al lodo anódico de cobre.

II.3.3 PRUEBAS METALURGICAS

Se realizan una serie de pruebas con el lodo de la Refinería de Cobre de Ilo, a diferentes niveles de evaluación como laboratorio piloto e industrial, por diferentes métodos de extracción del selenio. Las pruebas que se han realizado son:

1. Tostación oxidante de Lodo Anódico descubrizado por adición del aire (nivel experimental).
2. Tostación sulfatizante con oxígeno y dióxido de azufre (nivel experimental).

3. Tostación con carbonato de sodio (nivel piloto).
4. Tostación sulfatizante con H_2SO_4 concentrado.

a. PRUEBAS METALÚRGICAS DE TOSTACIÓN OXIDANTE POR ADICIÓN DE AIRE

Se realizan una serie de 12 pruebas para evaluar la incidencia de la temperatura de tostación del lodo anódico descubrizado. Se utiliza un horno eléctrico de dimensiones:

Altura 47 cm.

Largo 47 cm.

Ancho 48 cm.

Con una estructura de acero y cubierta con ladrillo refractario REPSA tipo K-20, el cual tiene incorporado una termocupla conectado a un controlador de temperatura, donde se programaba la temperatura de trabajo y mediante un trabajo automático trabaja con los calentadores del horno y mantiene la temperatura fijada. En forma paralela es ubicado un registrador de temperatura con chart incorporado, el cual nos indica la variación de temperatura a lo largo de

las pruebas.

Dentro del horno se ubica la retorta de acero inoxidable sellado herméticamente con un tubo de $1/4''\phi$ para el ingreso del aire y un tubo de $1''\phi$ para evacuar los gases de tostación, los cuales pasaban por una tubería de 6 mts. de largo y luego los gases son evacuados al exterior. Al pasar los gases de tostación por el tubo, es enfriado y cristalizado como SeO_2 casi totalmente y luego es limpiado y pesado.

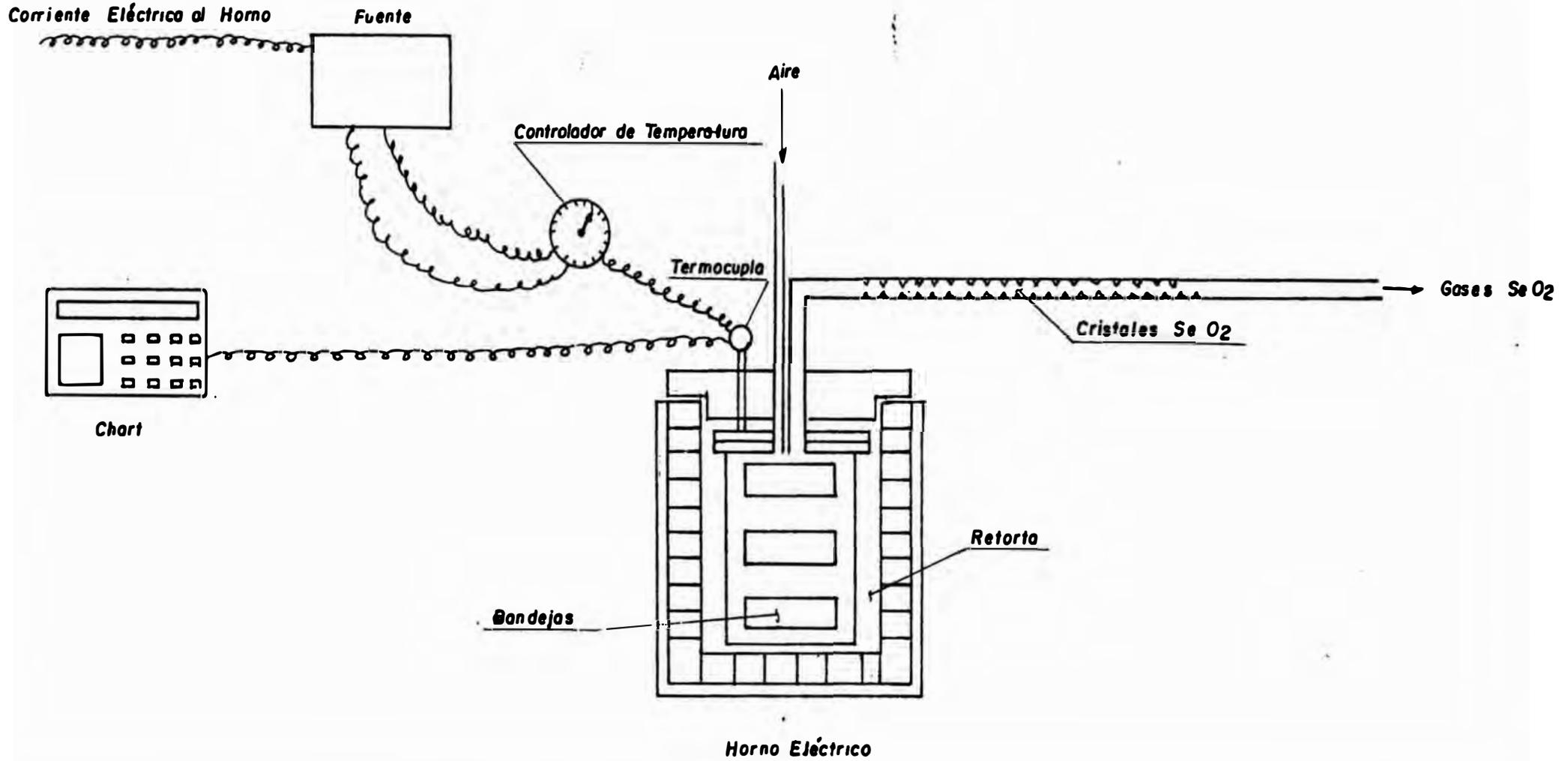
Dentro de la retorta se ubican 3 bandejas inoxidables pequeñas, donde se ubica el lodo anódico descobrizado. El esquema 1.1 explica la disposición del equipo de pruebas.

La secuencia de la investigación fue:

1. Secado de lodo anódico y mezclado con diatomea.
2. Carguío al horno eléctrico y condiciones de las pruebas.
3. Balance metalúrgico de las pruebas para establecer la mayor eficiencia de volatilización del selenio.

ESQUEMA N°11

DISPOCISION DEL EQUIPO DE PRUEBAS DE TOSTACION OXIDANTE A NIVEL EXPERIMENTAL



4. Balance metalúrgico total, incluido la recuperación de selenio comercial de prueba final representativa de la tostación oxidante.

a.1 Secado de Lodo Anódico y mezclado con Diatomea

Temperatura de secado	= 110°C
Tiempo de Secado	= 24 Hrs.
PRIMERA CARGA A SECADO:	
Peso lodo húmedo #1	= 13.5 kg.
Humedad	= 13.7 %
Ensaye lodo seco #1	= 27.7% Selenio
Peso lodo seco #1	= 11.650 kg. (Para 5 pruebas)
SEGUNDA CARGA DE SECADO:	
Peso lodo húmedo #2	= 18.0 kg.
Humedad	= 12.32 %
Peso lodo seco #2	= 15.783 kg. (para 7 pruebas)
Ensaye lodo seco #2	= 24.6% Selenio
Cantidad de diatomea en lodo seco # 0	= 1.264kg.
Contenido de diatomea en lodo seco # 1	= 10.85%
Cantidad de diatomea en lodo seco # 2	= 1.820kg.
Contenido de diatomea en lodo seco # 2	= 11.53 %
Homogenización lodo - diatomea	= Manual

a.2 Carguío al Horno Eléctrico y Condiciones de las Pruebas

Flujo de aire	=	10 lts/min
Tiempo total del proceso	=	20 hrs.
Tiempo con temperatura final	=	10 hrs.
Tipo de tostación	=	En cama estática
Altura de cama	=	3 cms.
Granulometría	=	Malla - 20

Se realizaron 2 grupos de pruebas:

- a) Pruebas iniciales variando cada 100°C la temperatura de la tostación final.
- b) Pruebas finales variando 10°C la temperatura de tostación final.

a.2.a GRUPO DE PRUEBAS VARIANDO
100°C LA TEMPERATURA DE
TOSTACION FINAL

Peso de material homogenizado	=	2,582.8 gr/prueba
- Diatomea	=	252.8 gr (10.85%)
- Lodo Anódico	=	2,330 gr

Temperatura Final :

Prueba A-1	=	300°C
Prueba A-2	=	400°C
Prueba A-3	=	500°C
Prueba A-4	=	600°C
Prueba A-5	=	700°C

a.2.b GRUPO DE PRUEBAS VARIANDO
10°C LA TEMPERATURA DE
TOSTACION FINAL

Peso de material homogeneiz.	= 2,590 gr/prueba
- Diatomea	= 260 gr (11.53%)
- Lodo Anódico	= 2,330 gr.

La prueba B-7 solo se cargó
1,803 gr de lodo anódico con
11.53% de diatomea.

Prueba B-1	= 650°C
Prueba B-2	= 660°C
Prueba B-3	= 670°C
Prueba B-4	= 680°C
Prueba B-5	= 690°C
Prueba B-6	= 700°C
Prueba B-7	= 710°C

a.3 BALANCE METALURGICO DE LAS PRUEBAS
PARA ESTABLECER LA MAYOR EFICIENCIA
DE VOLATILIZACION DEL SELENIO

Se explica en el cuadro 8 y cuadro 9.

a.4 BALANCE METALURGICO TOTAL INCLUIDO LA
RECUPERACION DE SELENIO COMERCIAL DE
PRUEBA FINAL REPRESENTATIVA DE LA
TOSTACION OXIDANTE

CUADRO No. 8BALANCE METALURGICO DE LAS PRUEBAS
DE TOSTACION OXIDANTE GRUPO "A"

PRU EBA	°C TEMP	PESOS (gr)		ENSAYE DE Se (%)		CONTEN. DE Se (gr)		DISTRIB. Se (%)		VO- LAT. Se (%)
		LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	
A-1	300	2330	2397.7	27.7	19.2	645.4	460.4	100	71.3	28.2
A-2	400	2330	2287.4	27.7	15.3	645.4	350.0	100	54.2	45.8
A-3	500	2330	2219.2	27.7	12.7	645.4	281.8	100	43.7	56.3
A-4	600	2330	2196.6	27.7	11.8	645.4	259.2	100	40.2	58.9
A-5	700	2330	1960.9	27.7	1.2	645.4	23.5	100	3.6	96.4

CUADRO No. 9BALANCE METALURGICO DE LAS PRUEBAS
DE TOSTACION OXIDANTE GRUPO "B"

PRU EBA	°C TEMP	PESOS (gr)		ENSAYE DE Se (%)		CONTEN. DE Se (gr)		DISTRIB. Se (%)		VO- LAT. Se (%)
		LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	LODO	CALCINA	
B-1	650	2330	2136.4	24.6	5.6	573.2	119.6	100	20.9	79.1
B-2	660	2330	2122.9	24.6	5.0	573.2	106.1	100	18.5	81.5
B-3	670	2330	2111.8	24.6	4.5	573.2	95.0	100	16.6	83.4
B-4	680	2330	2092.1	24.6	3.6	573.2	75.3	100	13.1	86.9
B-5	690	2330	2062.2	24.6	2.2	573.2	45.4	100	7.9	92.1
B-6	700	2330	2049.6	24.6	1.6	573.2	32.8	100	5.7	94.3
B-7	710	1803	1584.8	24.6	1.1	573.2	17.4	100	3.0	97.0

Se analiza la prueba B-6 el cual volatiliza el 94.3% de selenio, dando una calcina con 1.6% de selenio. La temperatura del gas de tostación fue entre 500 y 600°C, que al ser pasados por una tubería de 1" ϕ y 6 metros de largo, en donde el gas de SeO_2 se enfría y solidifica en la parte interna del tubo. Estos cristales de SeO_2 se evacuaron y al ser pesados reportados 820.4 gramos con una ley de 64.2% de selenio, los cuales fueron disueltos en 1.5 lts. de agua destilada a temperatura ambiente y con agitación mecánica para disolver el cristal a solución de H_2SeO_3 , la parte que no se disuelve en agua se denomina insoluble, compuesto por selenio reducido, SiO_2 , Al_2O_3 y fierro mayormente, este residuo arroja 103 gr. de peso con una ley de 76.3% de selenio.

La solución de lixiviación enriquecida con selenio, alcanzó el volumen de 1,639 cc. con una concentración de 433.9 gr/lt selenio, el cual fue precipitado a 80°C y con

adición de gas SeO_2 , reducido el selenio en forma de polvo negro.

El selenio es lavado con agua destilada, filtrado, secado y pesado, resultando 434.9 gr de selenio comercial con una pureza de 99.6%. La solución arrojó un volumen de 1,750 cc. con 0.02 gr/lt de selenio, el cual es descartado.

En esta prueba se tuvo 5% de pérdidas metalúrgicas y una recuperación del 75.6% del selenio, obteniendo un material secundario con 13.7% del total del selenio. El cuadro 10 presenta los análisis químicos principales de los productos obtenidos y el cuadro 11 el balance metalúrgico integral de la prueba típica de tostación oxidante con aire.

CUADRO No. 10

ANALISIS QUIMICOS DE LOS PRINCIPALES PRODUCTOS DE LA
PRUEBA DE TOSTACION OXIDANTE CON AIRE

DESCRIPCION	Se %	As %	Cu %	Fe %	Pb %	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Lodo Anódico	24.6	39.2	2.5	0.06	4.1	5.7	6.0
Calcina	1.6	44.6	2.8	1.5	4.7	25.2	10.9
Cristales SeO ₂	62.4	---	0.007	1.3	0.004	0.6	0.6
Insoluble	76.3	---	0.007	10.3	---	4.8	4.8
* Sol.enriq.	264.3	---	0.002	0.03	0.002	---	---
* Sol.desc.	0.02	---	0.002	0.03	0.002	---	---
Selenio Comerc. * gr/lt.	99.6	0.012	0.001	0.002	0.12	0.05	N.D.

b. PRUEBAS METALURGICAS DE TOSTACION SULFATIZANTE POR ADICION DE AIRE- OXIGENO Y DIOXIDO DE AZUFRE

Para este tipo de prueba se utilizó un horno eléctrico horizontal- tubular con controlador de temperatura con rango de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Como reactor se utiliza un tubo de sílica, donde internamente es ubicada una navecilla de alúmina para obtener una región uniforme de temperatura con la

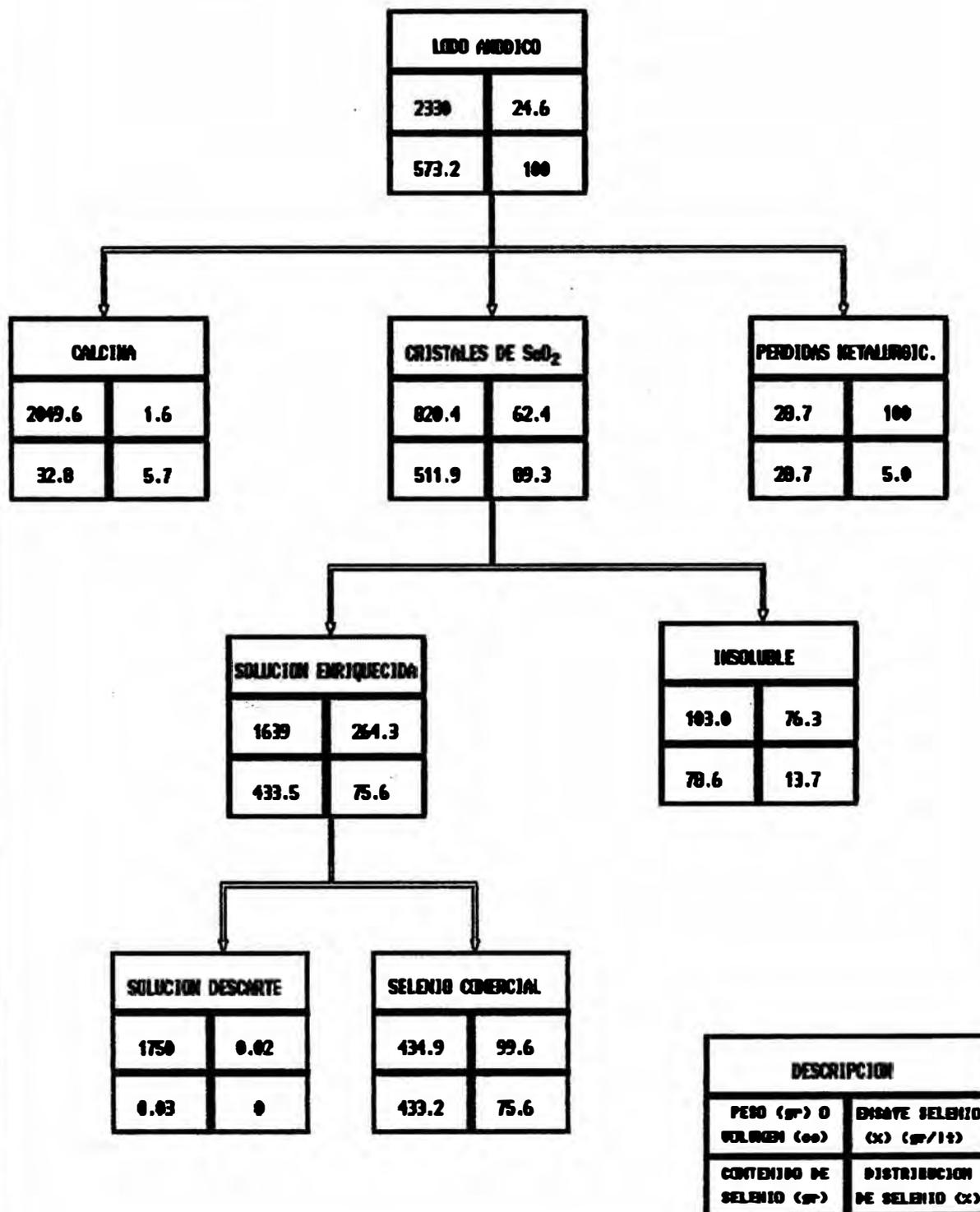
muestra Lodo Anódico. Cerca a la navecilla se ubica una termocupla (Pt-Pt/13% Rh).

Como insumos de las pruebas se utilizan los gases de nitrógeno, oxígeno y dióxido de azufre, los cuales están conectados con flujómetros capilares de calibración precisa y unidos mediante un mezclador de gases, adicionándose al reactor de arcilla con la muestra de lodo anódico, los gases de tostación son evacuados. La disposición del equipo de pruebas lo explica el esquema 12.

Para cada prueba se utilizó 2.5 gr. de lodo anódico decoperizado, el cual es ubicado en la navecilla de alúmina y en un tiempo de tostación de 1 hora. El análisis químico de los lodos luego de secado y homogeneizado muestra:

Ag	46.14%
Se	27.5%
Pb	2.57%
Cu	2.36%
Sb	0.52%
Te	0.397%
As	0.092%

**CUADRO No.11 BALANCE METALURGICO TOTAL DE PRUEBA REPRESENTATIVA
DE YASTACION OXIDANTE DE LODO MEDICO CON AIRE**



La secuencia de la investigación fue:

1. Tostación oxidante con atmósfera de aire y oxígeno
2. Tostación sulfatizante con atmósfera de aire y SO₂
3. Tostación sulfatoxidante con aire-SO₂ y oxígeno

En cada uno de estos grupos de pruebas se presentan cuadros con los resultados, donde explica la relación en peso (aire-oxígeno) del gas adicionando, la temperatura de tostación y la volatilización de los metales expresado por:

$$VOLATIZACION = \frac{N_s - N_e}{N_s}$$

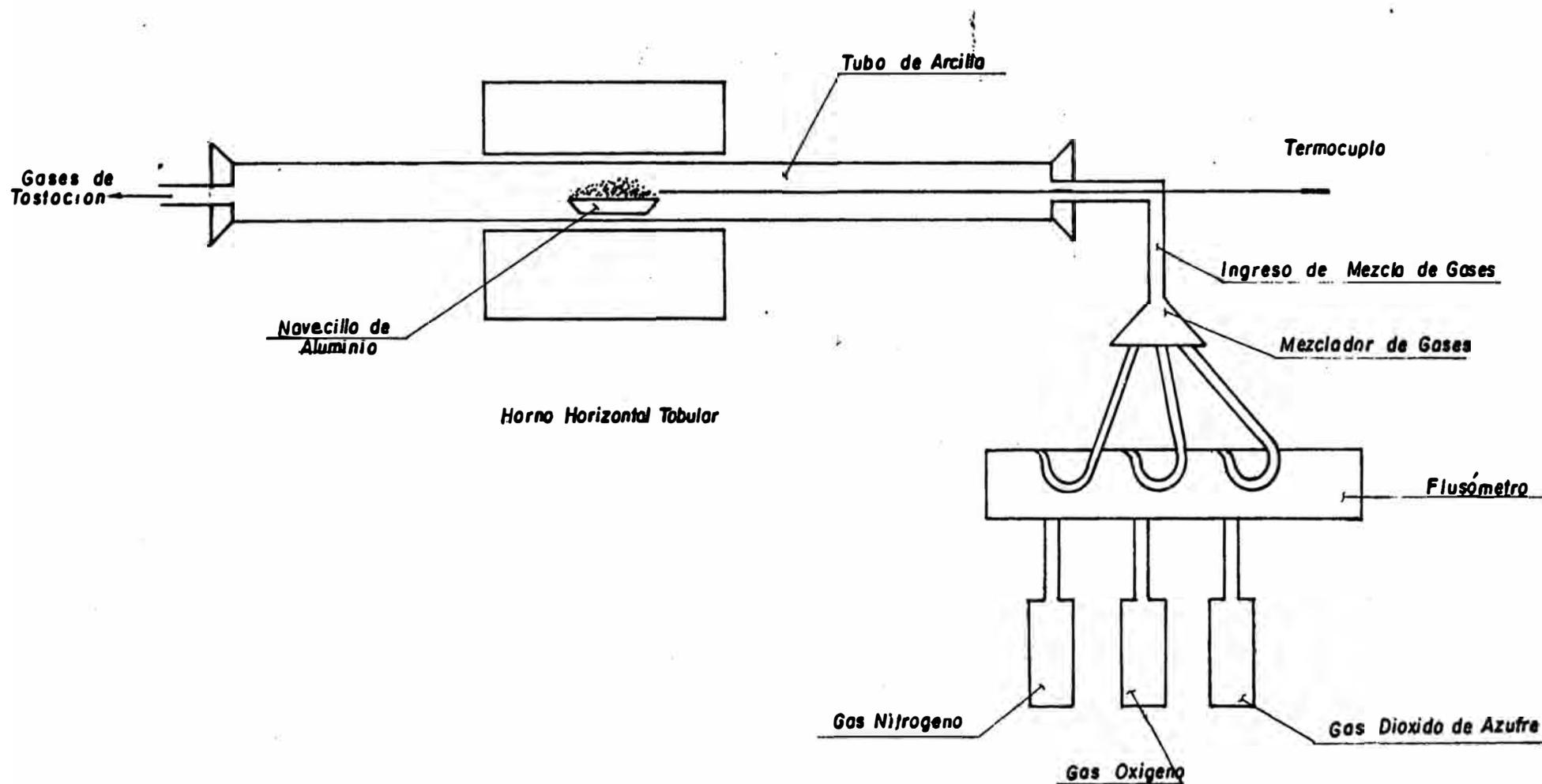
Siendo:

N_s = el # de átomos gramo antes de la tostación

N_e = el # de átomos gramo después de la tostación.

ESQUEMA N°12

DISPOSICION DE EQUIPO DE PRUEBAS DE TOSTACION SULFATIZANTE CON OXIGENO Y DIOXIDO DE AZUFRE A NIVEL EXPERIMENTAL



CUADRO No.12

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TOSTACION
EN ATMOSFERA OXIDANTE

PRUEBA	COMPOSICION DEL GAS (%) AIRE: OXIGENO	TEMPE RATURA (°C)	VOLATILIZACION			
			Se	As	Sb	Te, Cu Pb, Ag
1	100:0	500	0.47	0.07	0.00	0
2		600	0.75	0.20	0.02	0
3		700	1.00	0.23	0.13	0
4	95:05	500	0.47	0.15	0.00	0
5		600	0.67	0.21	0.07	0
6		650	0.88	0.24	0.13	0
7	80:20	500	0.46	0.24	0.05	0
8		600	0.62	0.30	0.15	0
9		650	0.85	0.33	0.21	0
10	0:100	500	0.43	0.43	0.09	0
11		600	0.51	0.51	0.15	0
12		700	0.88	0.88	0.25	0

CUADRO No.13 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TOSTACION
EN ATMOSFERAS DE AIRE Y SO₂

PRUEBA	COMPOSICION DEL GAS (%) AIRE:SO ₂	TEMPE RATURA (°C)	VOLATILIZACION			
			Se	As	Sb	Te, Cu Pb, Ag
1	95:05	500	0.96	0.12	0.03	0
2		600	1.00	0.20	0.09	0
3		650	1.00	0.22	0.12	0
4	90:10	500	0.96	0.20	0.03	0
5		600	1.00	0.29	0.13	0
6		680	1.00	0.37	0.19	0
7	80:20	500	0.94	0.26	0.06	0
8		600	1.00	0.36	0.16	0
9		650	1.00	0.40	0.21	0

CUADRO No.14

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE TOSTACION SULFA-OXIDANTE
CON AIRE, SO₂ Y OXIGENO

PRUEBA	COMPOSICION DEL GAS (%) AIRE:SO ₂ :O	TEMPE RATURA (°C)	VOLATILIZACION			
			Se	As	Sb	Te, Cu Pb, Ag
1	90:10:00	500	0.89	0.09	0.00	0
2		600	1.00	0.14	0.02	0
3		680	1.00	0.22	0.07	0
4	80:10:10	500	0.93		0.00	0
5		600	0.99	0.16	0.04	0
6		680	1.00	0.25	0.10	0
7	70:10:20	500	0.92	0.13	0.00	0
8		600	0.98	0.19	0.06	0
9		680	1.00	0.30	0.12	0

El gráfico No.13 esquematiza las curvas de volatilidad del Selenio Vs. la temperatura en pruebas de tostación sulfatizante por adición de oxígeno y dióxido de azufre.

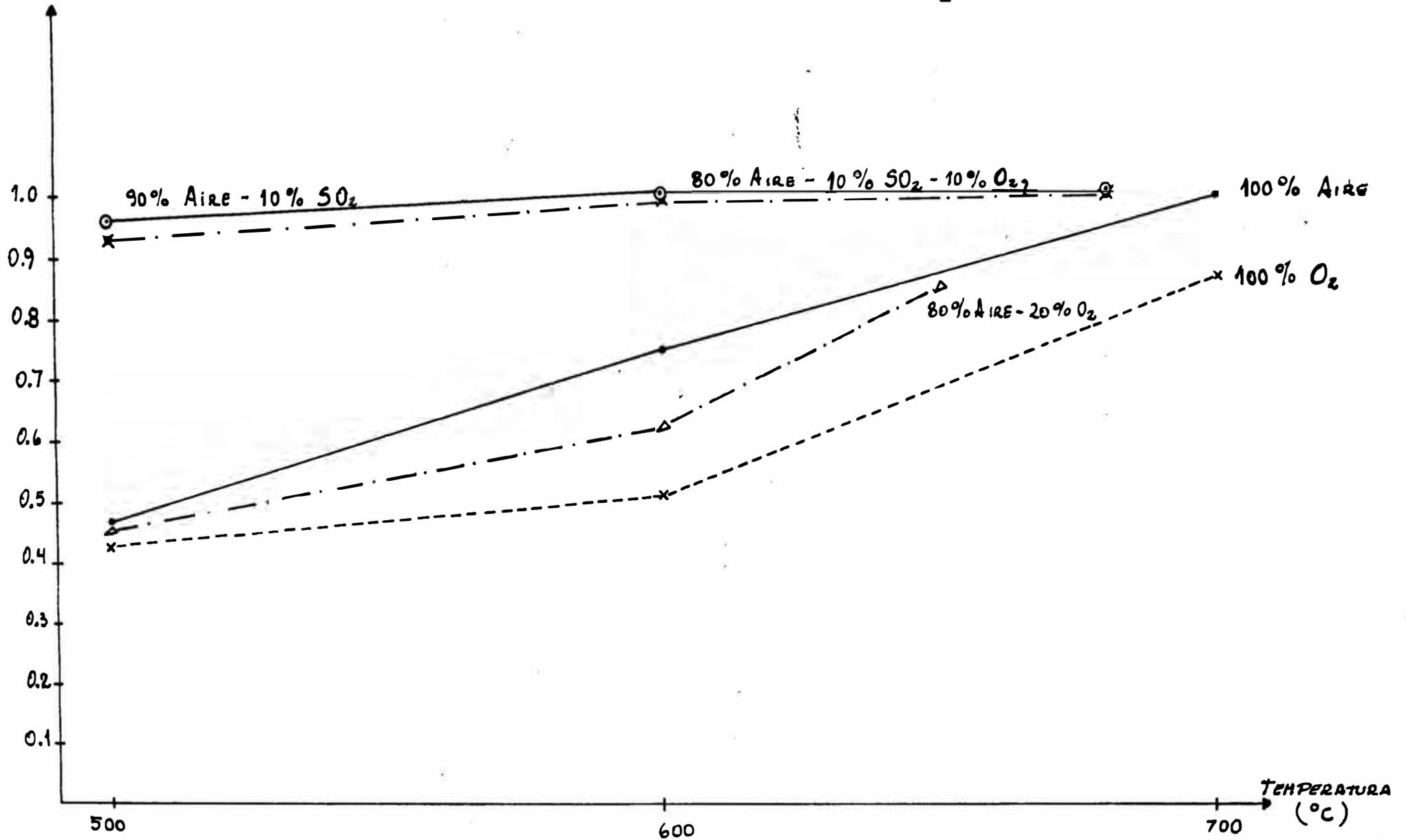
c. PRUEBAS METALURGICAS DE TOSTACION DE LODO ANODICO DESCOBRIZADO CON CARBONATO DE SODIO

El objetivo de esta prueba fue extraer selenio del Lodo Anódico volatilizando en pequeña parte como SeO₂ ó haciéndolo soluble en agua los compuestos de

GRAFICO N° 13

CURVAS VOLATILIDAD DE SELENIO & TEMPERATURA EN PRUEBAS DE TOSTACION
SULFATIZANTE POR ADICION DE OXIGENO, AIRE y SO₂

VOLATILIDAD DE S₂



selenio, luego de la tostación. Para tal caso se utilizó un horno calentado a petróleo donde internamente se dispone bandejas con lodo anódico peletizado con granulometría de 2 a 5 mm, con carbonato de sodio en una relación de 66.7% de lodo y 33.3% carbonato de sodio la temperatura de tostación fue de 450°C y por el lapso de 18 horas se obtiene una calcina con el 94% del total del selenio y perdiendo 6% por volatilización del selenio como SeO_2 .

La calcina es formada por compuestos como selenitos (Na_2SeO_3 y selenatos de sodio Na_2SeO_4 , solubles en agua. Es pulverizado y sometida a proceso hidrometalúrgico de lixiviación en agua a temperaturas de 75 a 85°C con suficiente agitación para solubilizar el Na_2SeO_3 Na_2SeO_4 contenidos en el material; entran a solución otros elementos pero en menor cuantía la plata, plomo, telurio, sílice, fierro, etc.

La relación calcina/agua es 1/3, a esta pulpa es filtrada con finalidad de separar la solución concentrada en selenio y el residuo rico en plata. El

residuo de filtración puede ser enviado a la planta de recuperación de plata y oro y la solución rica en selenio se purifica con polvo de zinc, el cual es añadido a un PH de 5.5 y con adición adecuada de aire, para lo cual el H_2SO_4 se utiliza para regular el ph, de este modo se precipita el plomo, telurio, silicio (Dióxido de telurio hidratado), solo por efecto del ph.

Al filtrar se separa la solución purificada y el residuo de purificación con 44.15% de selenio.

El SO_2 gaseoso se agrega a la solución purificada para reducir el selenio, puede también añadirse el bisulfito de sodio ($NaHSO_3$), en medio ácido para generar el gas reductor SO_2 .

El selenio reducido es un polvo fino rojizo (amorfo), pero luego cambia de color formándose negro (exagonal) coagulándose gradualmente cuando se le reduce a temperaturas sobre $80^\circ C$. Resumiendo la secuencia que siguió la prueba de tostación oxidante con

carbonato de sodio a partir de lodo anódico peletizado fue:

1. Tostación con soda en cama estática
2. Lixiviación de calcina en agua
3. Neutralización y purificación de la solución de purificación
4. Precipitación del selenio con SO_2
5. Balance metalúrgico del selenio

c.1 PARAMETROS DE TRABAJO SOBRE TOSTACION
EN CAMA ESTATICA

Peso de Lodo Anódico	= 150kg. (66.7%)
Peso de carbonato de sodio	= 75 Kg. (33.3%)
Temperatura	= 400 - 450°C
Tiempo	= 18 horas
Altura de cama	= 12 cm.
Peso de calcina	= 212 kg.

c.2 PARAMETROS DE TRABAJO SOBRE
LIXIVIACION DE CALCINA EN AGUA

Agua	= 600 lts.
Calcina	= 212 kg.
Molienda de calcina	= a malla - 20
Relación calcina/ H_2O	= 1/3
Temperatura	= 75 - 80°C

Tiempo	=	4 horas
Agitación	=	Mecánica
Peso seco de residuo de lixiviación	=	119 kg.
Solución de lixiviación	=	638 lt.

Ensaye:

	Ag	Se	Pb	Cu	Te	Au
Residuo (%)	53.48	4.12	2.84	1.89	0.140	0.132
Solución (gr/lt)	0.002	50.14	0.001	0.005	0.029	---

c.3 PARAMETROS DE TRABAJO SOBRE
NEUTRALIZACION Y PURIFICACION

Volumen a solución de lixiviación	=	638 lts.
Ph inicial	=	11
H ₂ SO ₄ adicionado	=	5.4 lts.
Ph final	=	5.5
Viruta de zinc adicionada	=	2.96kg.
Solución purificada	=	640lts.
Residuo de purificación	=	521grs.

Ensaye:

	Ag	Se	Te	Cu	Pb
Residuo Purif. (%)	---	44.15	0.125	0.063	0.081
Soluc.Lixiviac.(gr/lt)	0.001	49.62	0.162	---	0.002

c.4 PARAMETROS DE TRABAJO SOBRE
PRECIPITACION DEL SELENIO CON SO₂

Volumen de solución purificada	=	640lts.
Adiciones: H ₂ SO ₄	=	126lts.
Na H SO ₃	=	76kg.
H Cl	=	84lts.
Peso de selenio precipitado	=	32.64kg.
Solución de descarte	=	630lts.

Ensayes:

	Se	Te	Pb	Cu
Selenio Precipitado (%)	97.3	0.24	0.015	0.097
Solución Descarte (gr/lt)	0.01			

c.5 BALANCE METALURGICO DE SELENIO DE
PRUEBAS DE TOSTACION CON CARBONATO DE
SODIO.

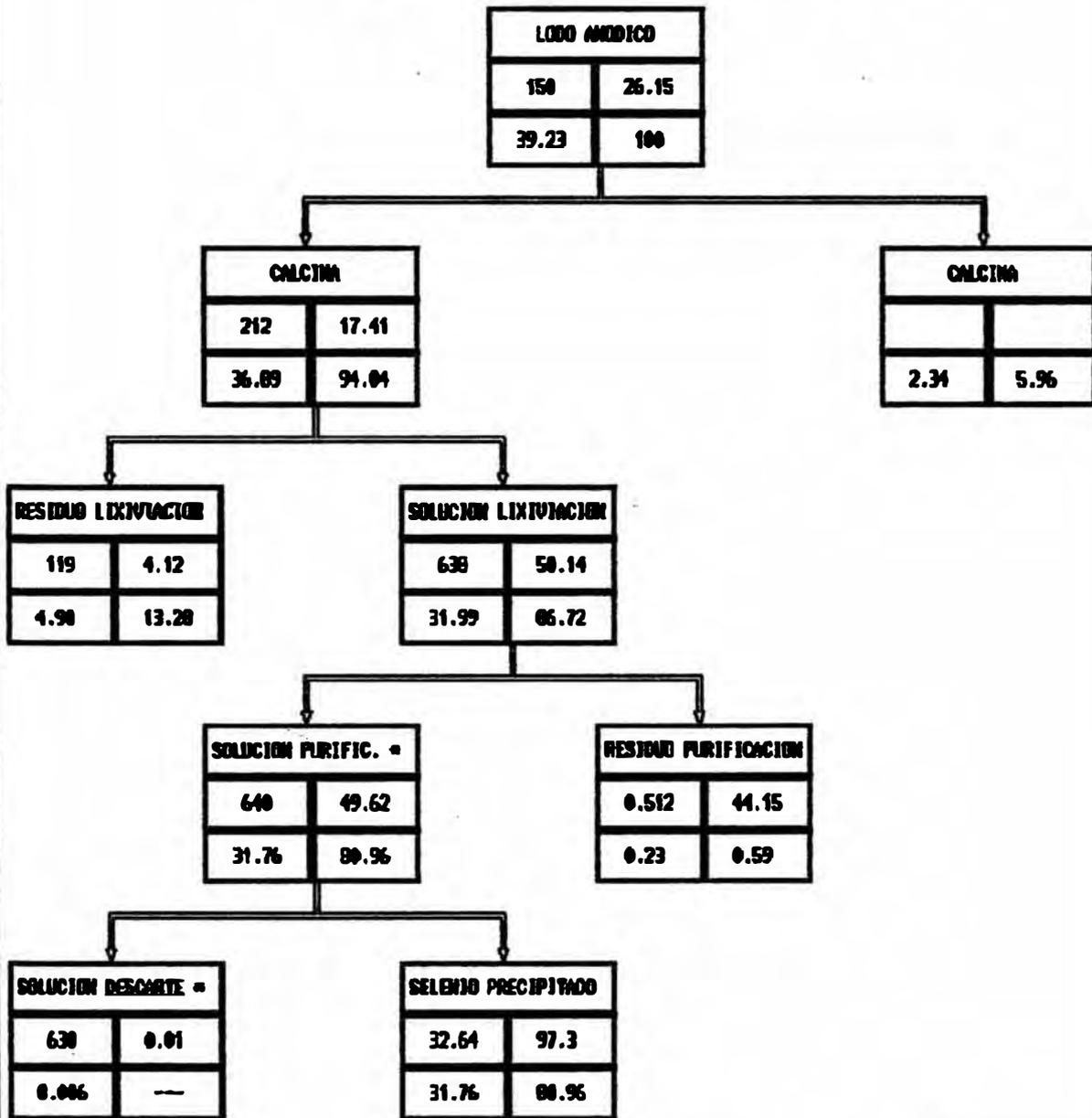
(Ver Cuadro No.15)

II.4 PROYECTO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL EN LA
REFINERIA DE ILO

II.4.1 TECNOLOGIA DE PRODUCCION DE SELENIO
COMERCIAL POR EL METODO DE SULFATO

La producción del selenio por el método de sulfato tiene una gran aplicación a nivel industrial para el tratamiento de Lodos

CUADRO No.15 BALANCE METALURGICO DE SELENIO DE PRUEBAS DE TOSTACION CON CARBONATO DE SODIO



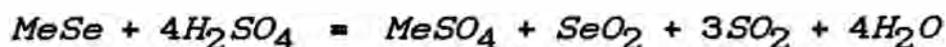
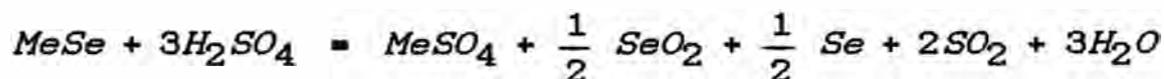
DESCRIPCION	
VALOR EN (g)	PORCENT (g/g)
CONTENIDO DE SELENIO	DISTRIB. (%)

DESCRIPCION	
PESO (kg)	PORCENT (%)
CONTENIDO DE SELENIO	DISTRIB. (%)

Anódicos. El Lodo Anódico es mezclado con ácido sulfúrico concentrado en frío formando el SeSO_3 . Luego es cargado a un horno de tostación hasta una temperatura de descomposición del material y volatilizar el selenio como SeO_2 y a su vez producir el SO_2 a partir del ácido sulfúrico que sirve como reductor del selenio.

a. TERMODINAMICA DE LAS REACCIONES

Análisis termodinámicos de las reacciones de selenitos de metales pesados (plomo, zinc, cobre y plata) y selenio elemental con ácido sulfúrico pueden ser representados por la siguiente ecuación química:



Los potenciales isobáricos y constantes de equilibrio de estas reacciones pueden ser calculadas sobre la suposición que el calor de formación de gases de SeO_2 es

aproximadamente 22.58 Kcal/mol.

El cuadro 16 nos muestra las ecuaciones de reacción y constantes de equilibrio entre el selenio elemental y selenuros con ácido sulfúrico entre 100 y 300°C. La reacción del selenio elemental con ácido sulfúrico procede de izquierda a derecha cerca de 250°C a su vez ocurre la formación de productos volátiles y gaseosos bajo 250°C, la reacción se desplaza a la izquierda hacia la formación de selenio.

La sulfatización del seleniuro de plata cerca a 200°C es apenas termodinámicamente probable y parece posible solo a altas temperaturas. La reacción del seleniuro de cobre con H_2SO_4 es termodinámicamente probable cerca de los 100°C, esto ocurre con la formación de SeO_2 y selenio elemental.

La primera reacción que ocurre es la sulfatización de selenuros de plomo y selenio elemental. Los selenuros de cobre y plata son sulfatizados luego.

CUADRO No.16. ECUACIONES DE REACCION Y CONSTANTES DE EQUILIBRIO, ENTRE EL SELENIO ELEMENTAL Y SELENUROS CON ACIDO SULFURICO

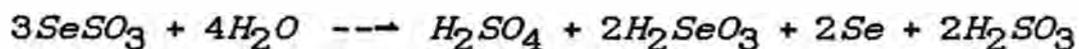
ECUACION DE REACCION			Log Kp		
			100°C	200°C	300°C
Se+2H ₂ SO ₄	⇌	SeO ₂ +2SO ₂ +2H ₂ O	-12.9	-3.83	2.16
PbSe+3H ₂ SO ₄	⇌	PbSO ₄ +0.5Se+2SO ₂ +3H ₂ O	13.6	18.4	21.5
Cu ₂ Se+5H ₂ SO ₄	⇌	2CuSO ₄ +0.5SeO ₂ +3SO ₂ +5H ₂ O	4.38	15.0	22
Ag ₂ Se+3H ₂ SO ₄	⇌	AgSO ₄ +0.5SeO ₂ +0.5Se+2SO ₂ +3H ₂ O	-4.31	4.22	9.73
PbSe+4H ₂ SO ₄	⇌	PbSO ₄ +SeO ₂ +3SO ₂ +4H ₂ O	7.10	16.5	22.6
Cu ₂ Se+6H ₂ SO ₄	⇌	2CuSO ₄ +SeO ₂ +2SO ₂ +6H ₂ O	-2.05	13.2	24.8
Ag ₂ Se+4H ₂ SO ₄	⇌	AgSO ₄ +SeO ₂ +3SO ₂ +4H ₂ O	-10.8	2.2	10.8
CON EXCESO DE H ₂ SO ₄					

b. GRADO DE SULFATIZACION DE LODO ANODICO

El grado de sulfatización se incrementa a mayor temperatura, cuando un lodo con contenidos de selenio y seleniuro de cobre o seleniuro de plata es calentado con ácido sulfúrico concentrado, resultando una sustancia cristalina verde de SeSO_3 , la cual se descompone a mayor temperatura acorde con la reacción:



Luego reacciona con el agua de acuerdo a:



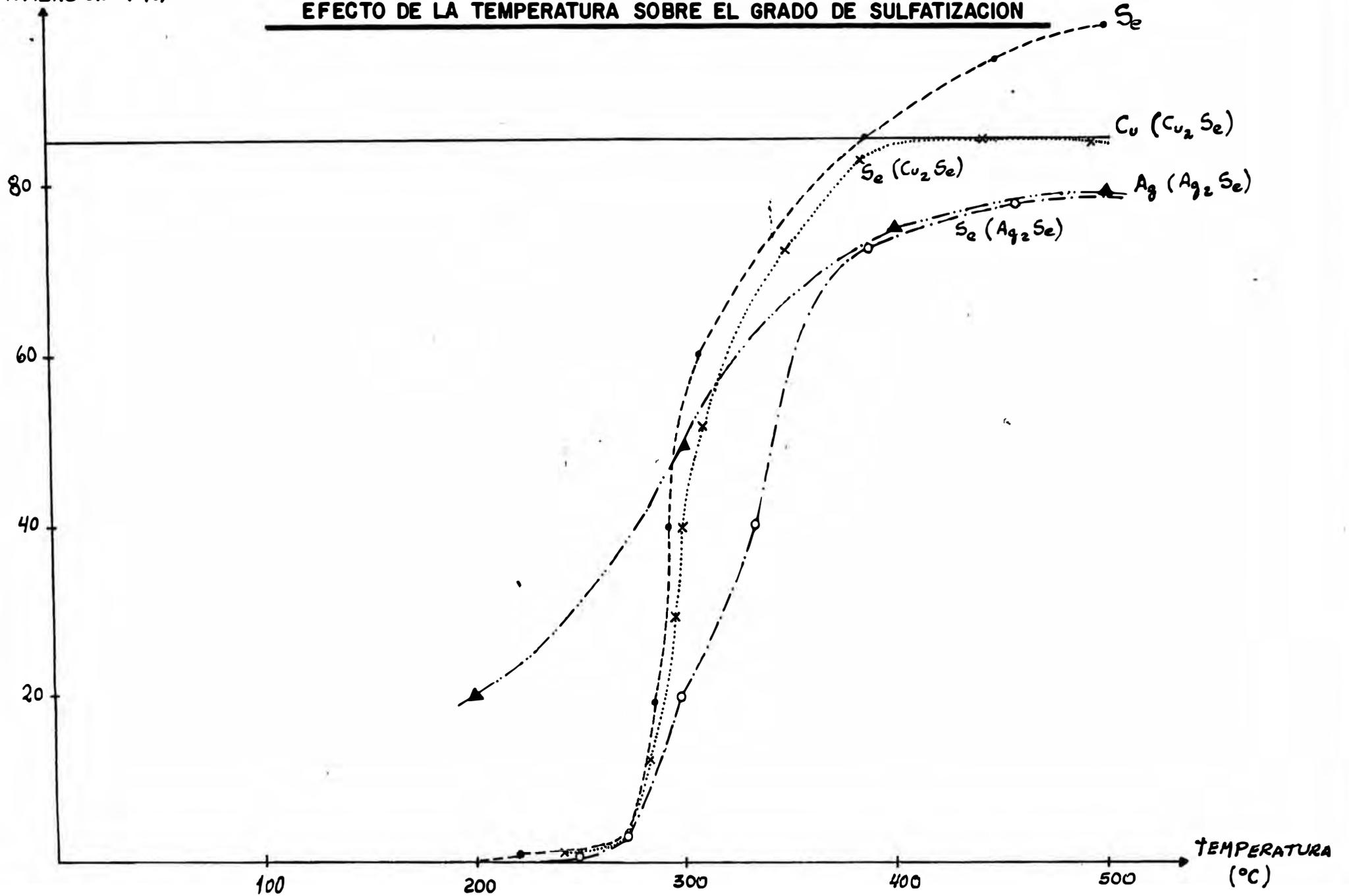
Produciendo la formación de ácido selenioso y selenio elemental.

La gráfica 14 nos muestra el efecto de la temperatura de calentamiento sobre el grado de sulfatización de selenios y selenuros de cobre y plata para su consumo teórico de ácido y tiempo de calentamiento de 30 minutos.

GRAFICO N° 14

EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL GRADO DE SULFATIZACION

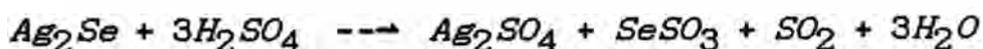
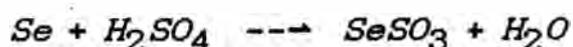
SULFATIZACION (%)



Bajo temperatura de 230°C, difícilmente ocurre una reacción para una efectiva volatilización del selenio, la tostación sulfatizante del selenio y selenuro de cobre debe ser efectuada sobre una temperatura no menos de 350°C y para el selenuro de plata no menos de 400°C.

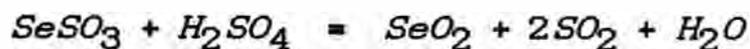
c. DESARROLLO DE REACCIONES DE ACUERDO CON LA TEMPERATURA

Se observa diversas fases: La primera fase se inicia cerca de 100°C sulfatizándose el selenio, los selenuros de cobre y plata se sulfatizan sobre los 170-230°C en concordancia con las ecuaciones:



La segunda fase de volatilización de selenio y selenuro ocurre lentamente sobre 200°C y más intensamente sobre los 300°C y es acompañada por la formación de

SO₂ y SeO₂ acorde con la ecuación:



A 200°C y con cantidad de ácido 120% de teórico, el 4% de selenio es oxidado y solo el 0.32% es volatilizado, bajo condiciones similares sobre 250, el 20% es oxidado y 4% es volatilizado.

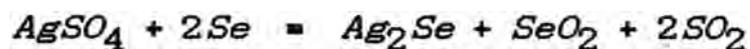
Cuando el selenio y seleniuro de cobre son sulfatizados con deficiencia de ácido sulfúrico, el selenio es formado acorde con la reacción.



Y el selenio es volatizado en el estado elemental.

Cuando el seleniuro de plata es sulfatizado bajo similares condiciones solo el 50% del selenio es volatizado.

En una tercera y última fase, sobre los 400°C ocurre una reacción vigorosa.



Bajo estas condiciones el sulfato de cobre y selenio no reaccionan.

Con lodo rico en selenio, la sulfatización y volatilización ocurren simultáneamente en una retorta calentada externamente a 450 - 500°C.

El consumo de ácido sulfúrico es 50 - 60% por peso de lodos. Con una retorta de 25 a 35 cm. de diámetro el tiempo de tostación es de 4 a 5 horas.

En este caso la oxidación del selenio ocurre acorde con la ecuación:



La formación de SeO_2 se incrementa marcadamente entre 300 y 400°C. La energía de activación aparente de esta reacción es 5,910 cal/mol.

II.4.2 PRUEBAS DE LIXIVIACION CON AGUA CALIENTE DE LODO DE SELENIO (REQUERIMIENTOS PARA PRODUCIR SELENIO COMERCIAL)

El selenio impuro tiene el siguiente ensaye característico:

Se 94%	As 0.05%
Cu 0.2%	Sb 0.03%
Ni 0.1%	Insolubles HNO ₃ 1.1%
Pb 0.10%	H ₂ SO ₄ 3.9%
Fe 0.02%	

Puede observarse que tiene como elemento infestante el H₂SO₄, insolubles en HNO₃ como sílice y aluminio proveniente de la tierra de los alrededores; cobre, arsénico y antimonio provenientes de lodos de segunda liberadora; níquel y fierro provenientes de la infestación con el subproducto de sulfato de níquel producido por evaporación del ácido decoperizado de celdas de segunda liberación.

a. Pruebas de lixiviación con agua caliente de lodo de Selenio impuro

Se realizó evaluaciones para observar hasta cuanto se eleva la concentración por la solubilidad de los sulfatos

contenidos en el material, para ello se seleccionaron 5 muestras al azar de los lotes producidos de Selenio impuro.

El procedimiento de las pruebas consiste en tomar la muestra pesada y lixiviarlo con agua caliente en vasos de precipitación por el lapso de 15 minutos y con agitación mecánica. Luego esta pulpa secarla en una centrífuga de laboratorio; el agua de lavado #1 es la primera agua utilizada, el agua #2 es cuando se le adiciona agua caliente a la centrífuga hasta el lavado final. Esta pulpa secada es pesada y enviada para análisis químicos respectivos. El cuadro 17 y el cuadro 18 explican los resultados de las pruebas.

De los resultados obtenidos tenemos que los ensayos de los lotes arrojan valores diversos debido a que el trato de este material en el momento de la descarga es variado. Se trabajó solo con ensayos de H_2SO_4 , e insolubles en HNO_3 debido a que los demás valores de menor importancia, excepto en los lotes especiales donde la

CUADRO No.17 RESULTADOS DE PRUEBAS DE LAVADO DE SELENIO

SELENIO SIN LAVAR

P R U E B A	PESO INICIAL HUMEDO (gr)	% H ₂ O	PESO SELENIO SECO (gr)	ENSAYES			
				Se	H ₂ SO ₄	INSOLUBLES HNO ₃	OTROS
A	150	3.60	144.6	96.5	3.0	0.46	0.04
B	250	14.52	213.7	96.9	2.0	0.88	0.22
C	250	10.92	222.7	80.4	5.8	5.52	8.28
D	250	18.04	204.9	91.6	4.0	0.74	3.66
E	250	13.6	216.0	94.3	3.8	0.22	1.68

SELENIO LAVADO

P R U E B A	PESO FINAL HUMEDO (gr)	% H ₂ O	PESO SELENIO SECO (gr)	ENSAYES			
				Se	H ₂ SO ₄	INSOLUBLES HNO ₃	OTROS
A	162	13.77	139.7	99.5	N.D.	0.49	0.01
B	268	22.00	209.0	99.0	N.D.	0.81	0.14
C	233	15.15	197.7	90.5	0.08	6.2	3.29
D	230	15.74	193.8	96.5	0.08	0.82	2.63
E	260	20.96	205.5	98.8	N.D.	0.22	1.02

infestación del material por razones externas al proceso cobraba valores importantes.

El ácido sulfúrico tiene presencia debido

CUADRO No.18 ENSAYES DEL AGUA DE LAVADO EN PRUEBAS
DE LAVADO DE SELENIO

PRIMER AGUA DE LAVADO

PRUEBA	VOLUMEN ml	ENSAYES gr/lt			
		H ₂ SO ₄	Cu	Ni	As
A	720	5.53	0.07	N.D.	N.D.
B	805	5.09	0.12	0.10	N.D.
C	735	14.30	7.07	5.31	0.54
D	630	10.63	1.59	1.27	0.16
E	580	10.52	0.86	0.17	N.D.

SEGUNDA AGUA DE LAVADO

PRUEBA	VOLUMEN ml	ENSAYES gr/lt			
		H ₂ SO ₄	Cu	Ni	As
A	575	0.63	N.D.	N.D.	N.D.
B	730	0.23	0.68	0.00	0.00
C	1210	1.87	0.74	0.16	0.00
D	310	4.32	0.32	0.00	0.00
E	275	7.64	0.73	0.00	0.00

a que la reacción de reducción del Selenio en el tanque de circulación produce el mencionado ácido, llegando a mantenerse en valores de 400 gr/l. Por ello no se encuentran elementos químicos porque a las condiciones de 80°C y

agitación por circulación de ácido fuerte lixivía y los convierte en sulfatos, facilitando el estudio evaluando la solubilidad de sulfatos en agua caliente. Los insolubles en HNO_3 , básicamente son sílice y aluminio que se infesta debido a la acumulación de tierra y suciedad.

Luego de la lixiviación en agua se observa la completa solubilidad del ácido sulfúrico y como es lógico continúa infestando al Selenio crudo los solubles en HNO_3 y en menor cuantía otros elementos.

b. Pruebas de lixiviación con agua caliente de lodo de Selenio extraído directamente del tanque de circulación

Estas pruebas se realizaron para evaluar cuanto desmejoraba la calidad del Selenio debido a las operaciones de transporte, almacenamiento y centrifugación. Para ello se procedió igual a las pruebas descritas en el rubro II.4.2 a. y los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 19, donde se observa que la ley promedio de Selenio es 99.6% donde en el

mercado internacional se cataloga como "Selenio Comercial". Se concluye tratando el material de una forma aséptica para no infestar el producto. Cabe indicar que la cantidad de agua caliente utilizada es 8 metros cúbicos por tonelada métrica.

Por consiguiente para producir Selenio Comercial, al reactor de Selenio adicionar una bomba y construir una línea independiente para drenados continuos de pulpa. Recibir en un tanque inoxidable limpio (cubierto con plomo) con su sistema de válvulas para, mediante una bomba enviar el material a un circuito independiente de secado en centrífuga, que consta de tanque de circulación (tapado) bomba, líneas independientes y centrífugas. En la centrífuga adicionarle agua caliente, hasta que todos los sulfatos sean lavados y comprobar adicionando al agua de lavado Cloruro de Bario.

CUADRO No.19 ENSAYES QUIMICOS DE PRUEBAS DE LIXIVIACION CON AGUA CALIENTE
DEL LODO DE SELENIO, DIRECTAMENTE DEL TANQUE DE CIRCULACION

P R U E B A	E N S A Y E S															
	Se	Ag	Cu	Pb	Fe	Bi	Zn	Ni	As	Sb	Te	S	H ₂ SO ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cd
1	99.68	0.006	0.004	0.018	0.003	N.D.	0.0001	0.0007	N.D.	N.D.	0.0028	0.062	0.083	0.045	N.D.	0.0001
2	99.50	0.001	0.002	0.127	0.009	0.0007	0.0002	0.0031	0.002	0.0042	0.0003	0.119	0.083	0.049	N.D.	N.D.
3	99.51	0.001	0.002	0.114	0.001	0.0013	0.0001	0.0010	0.002	0.0053	0.0007	0.114	0.083	0.061	N.D.	0.0001
4	99.50	0.001	0.004	0.091	0.003	0.0018	0.0001	0.0007	0.002	0.0070	0.0015	0.105	0.083	0.099	N.D.	N.D.
5	99.57	0.009	0.001	0.135	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	0.017	0.023	0.0016	0.056	0.083	0.028	N.D.	N.D.
6	99.59	0.011	0.002	0.119	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	0.018	0.0026	0.0020	0.059	0.083	0.012	N.D.	N.D.
7	99.59	0.009	0.001	0.123	0.001	N.D.	N.D.	N.D.	0.017	0.0043	0.0019	0.058	0.083	0.014	N.D.	N.D.
8	99.69	0.006	0.001	0.049	0.001	N.D.	0.0001	N.D.	N.D.	0.0003	0.0020	0.035	0.083	0.030	N.D.	N.D.
9	99.68	0.005	0.001	0.071	0.001	0.0003	0.0010	N.D.	0.002	0.0014	0.0028	0.035	0.083	0.015	N.D.	N.D.
10	99.73	0.003	0.003	0.038	0.002	0.003	0.0001	0.0008	N.D.	0.0066	N.D.	0.047	N.D.	0.066	N.D.	0.0001

Desbordar el Selenio lavado en recipientes limpios y enviar a un horno de secado a 110°C, luego pulverizarlo en un martillo de molinos, tamizarlo a malla 20, embalarlo en cilindros de acero con bolsas de Polietileno en la parte interior y enviarlos a exportación.

II.4.3 ANALISIS DEL PROCESO DE RECUPERACION DE SELENIO POR EL METODO DE DIGESTION CON ACIDO SULFURICO Y VOLATILIZACION A NIVEL INDUSTRIAL

Se analizan 80 batch a nivel industrial, de los cuales 28 batch guardaban características de operación similares donde los parámetros eran los siguientes:

Peso lodo anódico seco	400 kg
Peso de ácido sulfúrico concentrado	308 kg
Peso de tierras Diatomeas	40 kg
Tiempo de Digestión	4 horas
Temperatura máxima de tostación	520°C
Temperatura del agua ácida tanque de circulación	80°C
Tiempo total del proceso	23 horas
Tiempo con insuflamiento de aire	14hrs (final)
Tiempo sin insuflamiento de aire	9 hrs.(inicial)

En el proceso actual se observa que la

cantidad de aire adicionado al proceso era variable a través del tiempo y del mismo modo la presión de vacío resultante en el Reactor. Además se observa que en forma constante se obstruye el eyector de vacío y tuberías del sistema de recirculación de agua ácida, esto debido a que se reduce Selenio vítreo en las paredes del mencionado equipo.

Se realizó evaluaciones con una bomba de plástico de mayor capacidad en reemplazo de la bomba inoxidable, que actualmente es usada para ver el efecto que producía en la corrosión del material, vacío generado y deselenización de la calcina.

Con este objetivo se separaron los 28 batch mencionados en cuatro grupos:

Grupo #1. Calcinas con menor contenido de Selenio y con una bomba de plomo de circulación de agua ácida.

Grupo #2. Calcinas con mayor contenido de Selenio y con bomba de plomo de circulación de agua ácida.

Grupo #3. Calcinas con menor circulación de Selenio, bomba de plástico de circulación de agua ácida.

Grupo #4. Calcinas con mayor contenido de Selenio y con bomba plástica de circulación de agua ácida.

El cuadro 20 muestra los resultados.

Cabe indicar que cada uno de estos valores es el promedio de las presiones del reactor tomado en forma horaria en el transcurso de las 23 horas de operación.

Podemos observar que los grupos que tienen menor contenido de Selenio tienen en valor de vacío más altos que los grupos con mayor contenido de Selenio, ya sea con bomba de plomo (flujo 200 lt/min) o bomba plástica (flujo 400 lt/min), comparando estos valores sin adición de aire al Reactor. Además comparar los valores en pleno proceso y con adición de aire la presión del Reactor es inversamente proporcional a la ley de Calcina.

CUADRO No.20 RESULTADOS DEL ANALISIS DE 80 BATCH DE TOSTACION SULFATIZANTE A NIVEL INDUSTRIAL

	# BATCH	% Se CALCINA	PRESIONES PROMEDIO DEL REACTOR	
			SIN AIRE	CON AIRE
GRUPO # 1	1	5.6	- 74.3	80
	2	5.9	- 14	53.3
	3	4.1	- 10	61.3
	4	3.0	- 51.3	73.3
	5	3.3	+ 14.3 *	68.3
	6	2.1	+ 27.5 *	67.1
	7	4.8	+ 6.7 *	84
	PROM.	4.1	- 14.4	69.6
GRUPO # 2	8	12.9	0	150
	9	11.8	+ 16.7 *	80
	10	12.0	- 8	68
	11	11.2	0	100
	12	11.4	- 4	54
	13	10.2	+ 10 *	60
	PROM	11.6	+ 2.5 *	85.3
GRUPO # 3	14	3.9	-158	47
	15	3.3	-159.3	35
	16	3.1	0	54.4
	17	2.8	- 13	55
	18	3.8	+ 2.5 *	50
	19	3.7	+ 55	94
	20	4.0	0	50
	21	4.4	+ 30 *	46
	22	4.5	+ 20 *	84
	23	4.3	- 18	72
PROM	3.8	- 24.1	58.7	
GRUPO # 4	24	11.3	+ 44 *	61
	25	8.6	+ 24 *	86.7
	26	9.5	-162.5	82
	27	9.0	0.0	77
	28	10.2	- 50.2	106
PROM	9.7	- 28.9	82.5	

* gr/cm³

* mm Hg

Es lógico concluir que existe una relación directa en el Reactor industrial entre el vacío y la ley de Selenio en la Calcina. Teniendo vacíos de rangos mayores, obtendremos Calcinas con menor contenido de Selenio, el cual reportará recuperaciones más altas de Selenio.

II.4.4 BALANCE METALURGICO DEL PROYECTO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL

En el batch analizado #6 se puede observar que se puede llegar optimizando el vacío a valores de 2.1% de Selenio, pudiendo bajarse más si se observa la limpieza de tuberías y eficiencia del eyector. Para los cálculos utilizamos dicho valor. Cabe indicar que con el nuevo equipo, las pérdidas por las tuberías, tanques C-7 y otras más, no se repiten por tener circuito propio e independiente.

a. Cantidad de Selenio en el lodo por Batch

Peso lodo anódico seco	400 kg
% de Selenio	20.4 % (*)
Contenido de Selenio	81.5 kg

(*) Considerando que no recircularía lodo anódico.

b. Cantidad de Selenio en la Calcina por Batch

Peso de Calcina	389 kg
% de Selenio	2.1 %
Contenido de Selenio	82 kg

c. Cantidad de Selenio recuperado por Batch

Selenio recuperado igual a 81.5 - 8.2
igual 73.3 kg.

d. Cantidad de Selenio adicional recuperado por Batch

Cantidad de Selenio recuperado actualmente	46.4 kg/batch
Cantidad de Selenio que puede recuperarse	73.3 kg/batch
Cantidad adicional que se recuperaría	26.9 kg/batch
Incremento adicional	58%

En la actualidad se tiene en la refinería una producción de 1000 kg. de Selenio seco y se podría aumentar a 1,580 kg. mejorando el sistema de vacío y controlando la presión de trabajo. Teniendo una producción anual de 18.96 TM de Selenio Comercial seco.

El balance metalúrgico del proyecto de Selenio Comercial en la Refinería de Cobre de Ilo, se explica en el cuadro 21.

CUADRO No.21 BALANCE METALURGICO CARACTERISTICO
- SISTEMA MEJORADO -

	PESO SECO (Kg)	ENSAYES (%)			CONTENIDO (Kg)			DISTRIBUCION %		
		Se	Ag	Cu	Se	Ag	Cu	Se	Ag	Cu
LODO ANODICO	400	20.4	40.3	1.8	81.5	161.2	7.2	100	100	100
CALCINA	389	2.1	41.4	1.8	8.2	161.2	7.2	10.1	100	100
SELENIO COMERC.	73.6	99.6	0.001	0.001	73.3	--	--	89.9	--	--

II.5 PROYECTO DE PRODUCCION DE SELENIO DESTILADO EN LA REFINERIA DE ILO

II.5.1 TECNOLOGIA PARA LA PRODUCCION DE SELENIO DESTILADO

El método más utilizado en Purificación de Selenio es el de destilación. Debido a la alta presión de vapor y volatilidad, el Selenio puede ser liberado de una marcada cantidad de impurezas tales como el Cobre, Plata, Fierro, Plomo, Bismuto y otros. Las impurezas tales como Teluro, Arsénico y Azufre son difíciles de eliminar por destilación ordinaria debido a sus

volatilidades relativas cercanas a la unidad.

En el sistema Se-S, Se-Te la volatilidad relativa de los elementos cercanos a la unidad con la reducción de la temperatura.

Esto explica que el efecto de vacío es desfavorable, por consiguiente la temperatura necesaria para purificar el Selenio de las impurezas de Azufre y Teluro.

El Selenio líquido es muy reactivo y es problema seleccionar materiales para la confección del destilador, por ello es mejor conducir la destilación con la temperatura lo más baja posible.

Los aparatos de destilación para la purificación de Selenio, pueden ser contruidos de diversos tipos, tales como acero al cromo-níquel, grafito, pirocerámicos, vidrio y cuarzo fundido.

a. Equipos de destilación de Selenio

Existen dos equipos para destilación:

- a) Equipo para destilación a presión atmosférica.
- b) Equipo para sublimación en vacío y

condensación.

El aparato de destilación atmosférica consiste en una retorta y un recipiente. La tapa de la retorta está provista de dos aberturas una para la alimentación del Selenio y la otra para la entrada de vapor hacia el condensador.

Una abertura en el tubo de conexión, sirve como una caja térmica y para permitir la entrada de gas inerte. El volumen del condensador es la mitad de la retorta.

El condensador está provisto con una abertura en el fondo, para retirar el Selenio líquido. La retorta es calentada eléctricamente, el tubo conectado a la retorta con el condensador, es calentado con elementos enrollados de resistencias eléctricas, tan solo la parte mas baja del condensador es calentada.

b Producción de Selenio Destilado

A lo largo de la destilación existen tres fracciones, la primera fracción de Selenio destilado, recuperado por debajo del punto de ebullición del Selenio es

recogido por separado y retirado. La segunda fracción recogida en el punto de ebullición es vaciado y almacenado, la tercera y última fracción es retirado porque está contaminado con impurezas.

La temperatura en el tubo conectado al condensador, es mantenida de 350 a 400°C, para que las impurezas altamente volátiles se vayan con los gases sin condensarse en el tubo. La purificación de la primera fracción varía desde 99.99 a 99.993 por ciento de Selenio con contenidos de arsénico menores a 0.00005%.

c. Comportamiento de las impurezas en la destilación

El arsénico es una impureza difícil de eliminar, los experimentos muestran que en una etapa de destilación de Selenio técnico, el contenido de arsénico puede ser disminuido, solo por orden de magnitudes de 0.1 a 0.02%. En la destilación doble decrece éste a 0.005%, en una destilación adicional no disminuye notablemente el contenido de arsénico del Selenio, antes de la destilación.

Tratamientos preliminares del Selenio técnico pulverizado en solución de 0.5N a 1 N de soda cáustica, se disminuye marcadamente el contenido de arsénico.

El Azufre, Talio y Mercurio acompañan al Selenio en la destilación y condensado, casi nada de Talio es volatilizado del Selenio a 250°C. Pero a 275°C éste es volatilizado notablemente.

El azufre es volatilizado a 200°C y a 240°C volatiliza junto con el Selenio. La destilación no es eficiente para la eliminación del mercurio. Para remover el Azufre y parte del Teluro, a 400°C el Selenio líquido es soplado con aire enriquecido con oxígeno o vapor de agua. Después de la doble destilación, el Selenio recuperado es muy puro. Una patente recomienda calentar una mezcla granulada de 99.98% de Selenio técnico, con Carbón a presión atmosférica y con aumento de temperatura a 660°C.

Después de remover en el condensador la primera fracción del destilado se eliminan los contenidos de Azufre y Arsénico, la temperatura de destilación

es aumentada de 700°C a 1000°C y la mayor parte del Selenio es destilado. La impureza del Teluro queda como residuo sólido en el destilador, cuando el Selenio es calentado a 450°C a presión atmosférica hace expulsar fuera impurezas volátiles como agua, SO₃, Mercurio, Oxido de Selenio y Haluros.

II.5.2 PRUEBAS METALURGICAS DE DESTILACION

Las pruebas metalúrgicas de destilación se realizan a nivel piloto en la Refinería de Ilo, en un horno eléctrico cilíndrico de estructura de 3 mm. de espesor y de dimensiones:

Altura	71.5 cm.
Diámetro	75.0 cm.

Internamente con ladrillo refractario de sílice tipo K-20 fabricado por REPSA con un espesor de 7 cm.

Los bancos de resistencias están ubicados en un portaresistencias de 5 cm. de espesor. Finalmente el horno tiene un diámetro efectivo de trabajo de 37 cm.

La retorta fue confeccionada de una aleación especial de la línea de acero BOEHLER tipo

antitherm FFB con 20% Níquel, 25% Cromo, 2% Sílice y 0.15% de Carbón, de acuerdo a normas AISI 310 o DIN X15 Cr, Ni, Si, 25 20, resistente a altas temperaturas, internamente se ubicó un crisol de grafito, debido a la alta corrosividad del selenio. El condensador fue fabricado de acero inoxidable 316L, el cual tiene implementado un orificio de colada de 2.6 mm. de diámetro y una serie de calentadores eléctricos alrededor del condensador.

El esquema 15 explica por sí mismo el detalle del equipo piloto utilizado para tal evaluación.

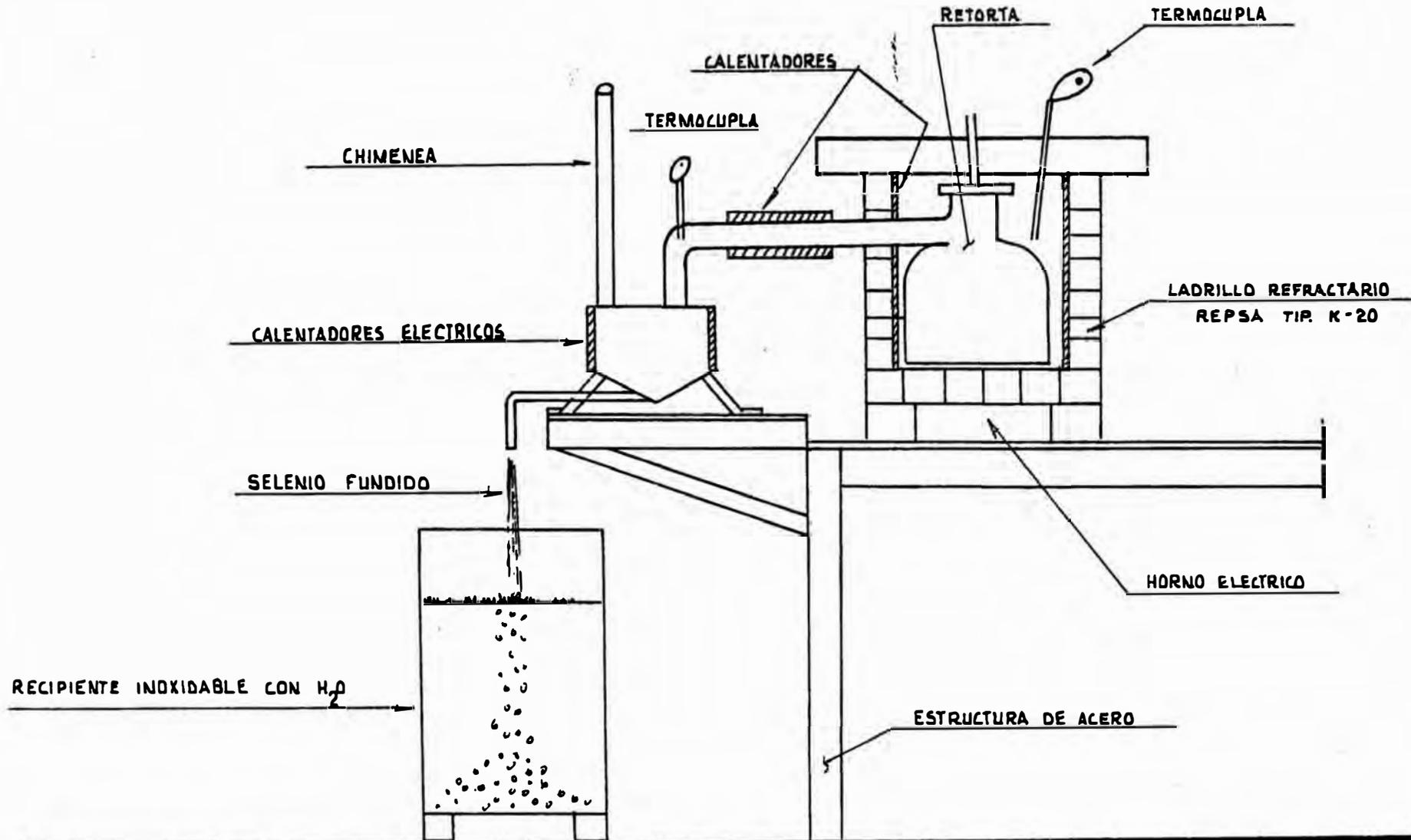
a. Pruebas metalúrgicas de Destilación de Selenio Impuro

El objetivo de las pruebas era observar hasta cuanto era factible purificar el Selenio Impuro del stock en la RCu con baja ley de Selenio. La secuencia de la prueba fue:

- a.1 Lixiviación en agua caliente y centrifugado
- a.2 Secado de Selenio y pulverizado
- a.3 Carguío en la retorta y fusión

ESQUEMA N° 15

EQUIPO PILOTO PARA DESTILACION DE SELENIO



del Selenio

a.4 Soplado de la carga

a.5 Volatilización, Condensación y
Colada del Selenio Purificadoa.1 Lixiviación en Agua Caliente y
Centrifugado Selenio Impuro

Peso del Selenio Impuro Húmedo	75 kg
Humedad	11.2%
Peso del Selenio Impuro Seco	66.6 kg
Análisis Químico:	
Selenio	91.7 %
H ₂ SO ₄	4.7 %
Cu	0.16%
Ag	1.53%
Fe	0.43%
Sb	0.04%
As	0.09%
SiO ₂	1.8 %
Volumen de agua de lixiviación	300 lts
Temperatura de lixiviación	80°C
Tiempo de lixiviación	30min.
Selenio Lixiviado:	
Peso del Selenio húmedo y centrifugado	75kg
Humedad	14.4%
Peso del Selenio lixiviado seco	64.2kg
Análisis Químico:	
Se	95.2%
H ₂ SO ₄	N.D.
Cu	0.17%
Pb	0.38%
Ag	1.59%
Fe	0.45%
Sb	0.04%
As	0.09%
SiO ₂	1.87%

a.2 Secado del Selenio y Pulverizado

Temperatura de secado	120 °C
Tiempo de secado	48 hrs
Peso de Selenio secado	64.5 kg
Humedad del Selenio secado	0.5 %
Peso de Selenio seco	64.2kg
Pulverizado a malla-20 (Serie Tyler)	

a.3 Carguío en la Retorta y fusión del Selenio

Temperatura del horno	300°C
Tiempo de carguío	15 min
Peso de primer carguío	40 kg
Tiempo de fusión de primer carguío	60 min
Peso de segundo carguío	24.5kg
Tiempo de fusión del segundo carguío	30 min.

a.4 Soplado de la carga

Temperatura del baño	400°C
Tiempo del soplado	10 min
Agente Oxidante	Aire

a.5 Volatilización, Condensación y Colada de Selenio Purificado

Temperatura de Volatilización	800°C
Tiempo de Volatilización	3 hrs.
Temperatura de condensación	170°C
Tiempo de colada	2 hrs.
Peso del destilado húmedo	59.5kg
Humedad	2.8%
Peso destilado seco	57.9kg
Peso de residuo	5.6kg
Pérdidas metalúrgicas	1.1%
Recuperación de Selenio	94.6%

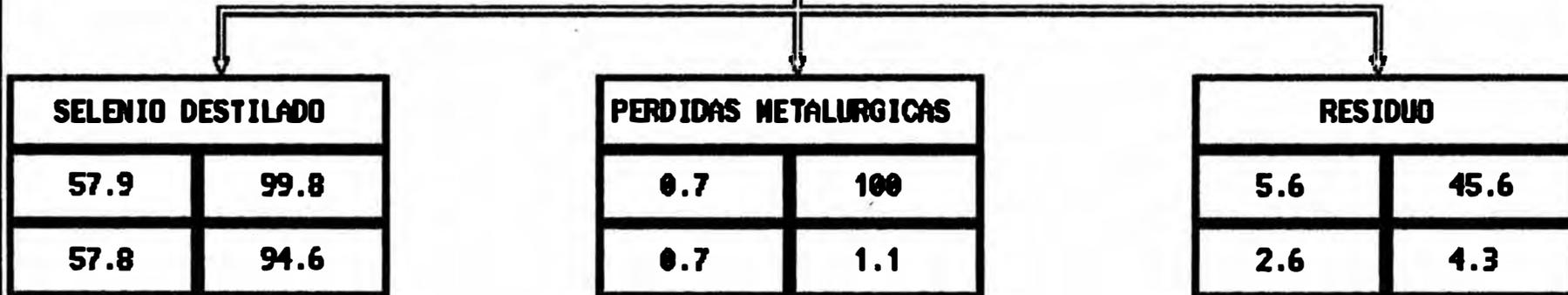
El balance metalúrgico se observa en el cuadro 22.

a.6 Análisis Químico de Selenio Destilado y Residuo

	Selenio Destilado	Residuo
Se	99.8%	45.6%
Te	0.001%	0.031%
Cu	0.001%	1.9%
Pb	0.009%	4.4%
Ag	0.006%	18.2%
Fe	0.008%	5.2%
S	0.04%	N.A.
SiO ₂	0.09%	21.4%
As	0.004%	0.6%
Sb	0.004%	0.5%

CUADRO No.22 BALANCE METALURGICO DE LAS PRUEBAS DE DESTILACION DE SELENIO CRUDO

SELENIO IMPURO SECO Y PULVERIZADO	
64.2	95.2
61.1	100



DESCRIPCION	
PESO (Kg)	ENSAYE Se %
CONTENIDO Se (Kg)	DISTRIBUCION Se %

LEYENDA

b. Pruebas metalúrgicas de Destilación de Selenio Comercial

El objetivo de las pruebas era observar hasta cuanto es factible purificar el Selenio Comercial con 99.5% de pureza. La secuencia de las pruebas fue semejante a la destilación de Selenio impuro, siendo:

b.1 Secado del Selenio y pulverizado

b.2 Cargado de la retorta y fusión del Selenio

b.3 Soplado de la carga

b.4 Volatilización, Condensación y Colada de Selenio Purificado

b.1 Secado del Selenio y Pulverizado

Temperatura de secado	120°C
Tiempo de secado	48 hrs
Peso de Selenio húmedo	75 kg
Humedad	12.4%
Peso de Selenio seco	65.7 kg
Pulverizado a malla-20 (Serie Tyler)	

Análisis Químico:

Se	99.56%
Cu	0.002%
H ₂ SO ₄	0.16%
Pb	0.130%
Ag	0.012%
Fe	0.009%
Sb	0.005%
As	0.002%
SiO ₂	0.099%

b.2 Carguío de Retorta y Fusión de Selenio

Temperatura del horno en el carguío	300°C
Tiempo de carguío	15 min
Peso del primer carguío	40 kg
Tiempo de fusión del primer carguío	60min
Peso de segundo carguío	26 kg
Peso de fusión de segundo carguío	35 min

b.3 Soplado de la Carga

Temperatura del baño	400°C
Tiempo de soplado	10min
Agente Oxidante	Aire

b.4 Volatilización, Condensación y Colada de Selenio Purificado

Temperatura de Volatilización	800°C
Tiempo de Volatilización	3hrs.
Temperatura de Condensación	180°C
Tiempo de Colada	100min
Peso de destilado húmedo	66.1kg
Humedad	3.2%
Peso destilado seco	64 kg
Peso de residuo	2.66kg
Pérdidas metalúrgicas	1.3%
Recuperación de Selenio	95.2%

El balance metalúrgico se observa en el cuadro 23.

CUADRO No.23 BALANCE METALURGICO DE LAS PRUEBAS DE DESTILACION DE SELENIO COMERCIAL

SELENIO COMERCIAL SECO Y PULVERIZADO	
65.7	99.56
65.203	100

SELENIO DESTILADO	
64.0	99.98
63.98	95.2

PERDIDAS METALURGICAS	
0.87	100
0.87	1.3

RESIDUO	
2.66	88.3
2.35	3.5

DESCRIPCION	
PESO (Kg)	ENSAYE Se %
CONTENIDO Se (Kg)	DISTRIBUCION Se %

LEYENDA

CAPITULO III

INGENIERIA GENERAL

III.1 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

Para producción de Selenio Comercial, se tiene en cuenta, el diseño de una bomba de circulación de agua ácida de 400 lts/min., el cual de acuerdo al análisis de recuperación de Selenio por el método de digestión con ácido sulfúrico y volatilización a nivel industrial, se concluye con la mejora en el vacío del reactor el cual incrementará la recuperación en 58%; alcanzando una recuperación total del Selenio a 90%.

Se rediseñará el tanque de circulación de agua ácida que permita una fácil evacuación del Lodo del tanque por intermedio de una bomba, hacia un tanque de espera, para luego ser bombeado al sistema de centrifugación y finalmente a secado, pulverizado, tamizado, pesado y embalado para su comercialización final.

III.1.1 GENERALIDADES

Actualmente en la Refinería de Cobre de Ilo se ha diseñado el sistema de deselenización desde la óptica de extraer parte del selenio del Lodo Anódico, lo suficiente como para producir oro y plata fina, sin que influya el selenio en la calidad final de estos productos. El selenio fue considerado sin valor comercial debido a que al vender el lodo anódico, no se consideraba pago alguno

del selenio, en consecuencia no se analiza el potencial de desarrollo de este importante subproducto, por lo cual las operaciones de digestión, llenado de bandejas, carguío de pulpa al horno, evacuación de la calcina, y el desbordado de la calcina se realizan normalmente, en virtud del objetivo de ese entonces de producir metales preciosos. Por consiguiente en el presente trabajo se realizará la descripción de estas labores, por ser de importancia en el proceso general, donde se hará mención al diseño de los principales equipos construidos en la RCu y se adjuntarán los diseños adicionales para la producción de selenio comercial.

No se exponen los planos del Proyecto de selenio destilado por no ser una alternativa importante, las consideraciones se explican en el Capítulo IV.

El Flow sheet cualitativo, se centrará en el diseño adicional el cual inicia en el drenado de pulpa de selenio del tanque de circulación y termina en tambores de acero, listo para su exportación, la parte anterior se describe en el rubro II.3.2 y se explica

en el Esquema # 9. En el Flow sheet cuantitativo se describe desde la digestión para visualizar en forma integral el proceso general.

La ubicación de la Planta de Selenio se eligió en la planta de purificación por tener espacio disponible, disponerse de instalaciones auxiliares y servicios, disminuyendo el costo de inversión y el costo operativo, se adjuntarán recortes de planos de los equipos auxiliares, servicios, equipos y maquinarias, con especificaciones técnicas y costos aproximados de los equipos.

III.1.2 DESCRIPCION DE LAS OPERACIONES UNITARIAS

a. Secado de la Materia Prima en Horno Eléctrico

El lodo anódico húmedo lixiviado y centrifugado, es cargado en bandejas de acero, un operador con ayuda de un grúa giratoria y una pala, carga el material al horno de secado.

Materia Prima	Lodo anódico lixiviado y centrifugado
Humedad inicial	15 %
Humedad final	menos de 1%

Temperatura de secado	110 °C
Tiempo de secado	24 horas
Potencia del horno	28 Kw
Altura de Cama	7 cm.

b. Pulverizado de Lodo Anódico Seco

El lodo anódico seco es cargado a un micropulverizador de martillos, para llevarlo de trozos que llegan de 1 a 5 cm. a malla -10. Un operador carga el material al sistema de alimentación, para luego terminar en cilindros de acero previamente acondicionados.

Capacidad	900 Kg/hr
Malla final	- malla 10 (serie Tyler)
Material	Acero Inoxidable
Potenc. de Alimentador	1.5 Kw/hr
Potenc. del Pulverizador	5.5 Kw/hr

c. Digestión del Lodo Anódico con Acido Sulfúrico Concentrado

Al tanque digestor por medio de una bomba, se envía ácido sulfúrico concentrado del tanque de almacén, hasta un volumen determinado, se pone en movimiento el agitador para cargarse el lodo anódico seco pulverizado y pesado

para la homogeneización con el ácido sulfúrico.

Peso del lodo anódico	400 Kg
Peso de ácido sulfúrico concentrado	400 Kg
Tiempo de digestión	8 hrs
Material del digestor	Acero Inoxidable
Potencia Motor del agitador	5 Kw

d. Carguío del Lodo Anódico al Reactor de Selenio y Descarga de Calcina

El lodo digestado es cargado en bandejas de fierro negro, las cuales vacías son colocadas cerca del reactor. Las bandejas están compuestas de dos paquetes, donde cada paquete se llena con lodo digestado, utilizando un recipiente almacén de lodo digestado y una grúa para izarla a la altura de la bandeja superior y por medio de una válvula de PVC 25 mm., ir graduando el flujo de digestado sobre los paquetes.

Una vez llenas las bandejas con la pulpa, los dos paquetes de bandejas son izadas por la grúa mecánica y cargadas dentro del horno de tostación, para luego sellar con una tapa por medio de ajuste de

pernos diseñados para tal fin y evitar emanación gases de tostación al ambiente, a la vez que se le coloca un tubo de acero de 1/4 de pulgada de diámetro para insuflar aire de acuerdo a los requerimientos.

Luego de terminar el proceso de deselenización, se deja enfriando por el lapso de 4 horas, para luego sacar la tapa del horno y sacar las bandejas con el material procesado con acción de la grúa mecánica.

Inmediatamente con la ayuda de otro juego de paquetes de acero se llena con material digestado y se carga el horno, obedeciendo a un ciclo continuo de cargas diarias.

e. Tostación Sulfatizante de Lodo Anódico

Los parámetros de trabajo en el sistema son:

Peso de lodo anódico/ácido	1/1
Temperatura de tostación	
100°C - 300°C	4 hrs
300°C	2 hrs
300°C - 500°C	7 hrs
500°C	5 hrs
Enfriamiento	4 hrs
Presión interna	- 100 mm Hg

Insuflamiento de aire	Sobre lo 350°C (de acuerdo a presión)
Altura de cama de tostación	5 cm
Espaciamiento entre bandejas	2 cm
Diatomea	7% peso de lodo anódico
Temperatura agua ácida	80°C
Concentración agua ácida	80 - 450 gr/lt
Potencia del reactor	40 Kw/hr
Potencia calentador ducto	3.5 Kw/hr

f. Drenado de Selenio

Consiste en evacuar el lodo del tanque de circulación de agua ácida hacia otro tanque de recepción; luego adicionar agua condensada como reposición.

Volumen de pulpa	2 m ³
Temperatura	80°C
Drenados de pulpa	2 drenados por semana
Producción de selenio comercial seco	350 Kg/semana
Agua de Reposición	4 m ³ /semana 208 m ³ /año

g. Lavado Parcial y Centrifugado

Consiste en lavar el lodo evacuado, con agua, con objeto de disolver las sustancias solubles (sulfatos) que infestan el material.

El lavado se prolonga a lo largo de toda la etapa de centrifugado, hasta que el análisis del agua de lavado con cloruro de bario, no haya reacción alguna.

# de lavados	1 vez/semana
Volumen de agua/lavado	2 m ³ /semana, 104 m ³ /año
# de centrifugados	3/semana, 156/año
Volumen de agua centrifugada	1 m ³ /semana, 52 m ³ /año

h. Embalado y Transporte a Sala de Selenio

El material centrifugado con 13% de agua, se carga en cilindros metálicos y deben ser transportados a la sala de selenio

Bolsas	65 bls/año
Cilindros	5 cil/año (para transporte)
Capacidad de Cilindros	400 Kg Se

i. Secado en Horno

El selenio húmedo es cargado en bandejas y secado hasta una humedad final menor de 1%.

Potencia	42.2 Kw
Tiempo de Trabajo	1680 hr/año
Total de Energía	70,896 Kw-hr/año
Costo Unitario de Energía	US\$ 0.06 /Kw-hr

Costo Energía para Secado	US\$ 4253 / año
---------------------------	-----------------

j. Pulverizado

El material seco es pulverizado hasta malla 200 en molinos de martillos de alta velocidad.

Potencia	4.0 Kw
Tiempo de Trabajo	876 hr/año
Total de Energía	3504 Kw-hr/año
Costo Energía para Pulveriz.	US\$ 210 / año

k. Tamizado

El selenio pulverizado, se envía a un cedazo vibratorio para separar los finos a m-200.

Potencia	1.1 Kw
Tiempo de Trabajo	4000 hr/año
Total de Energía	4400 Kw-hr/año
Costo Energía para Tamizado	US\$ 264 / año

l. Llenado de Cilindros, Pesado y Rotulado

Consiste en llenar el selenio pulverizado en cilindros a un peso determinado, rotular con pintura el peso, lote y fecha del producto.

Capacidad	40 Kg de Se
# de Cilindros	474 /año
# de Bolsas	474 /año
Pintura	4 Gals/año

m. Embalado con Madera

Consiste en proteger con madera grupos de 12 cilindros con selenio comercial seco.

Madera (500 pies embalan una tonelada de selenio)	US\$ 0.57 /pie
Costo Total	US\$ 284.8 /Ton
Costo Anual	US\$ 5400

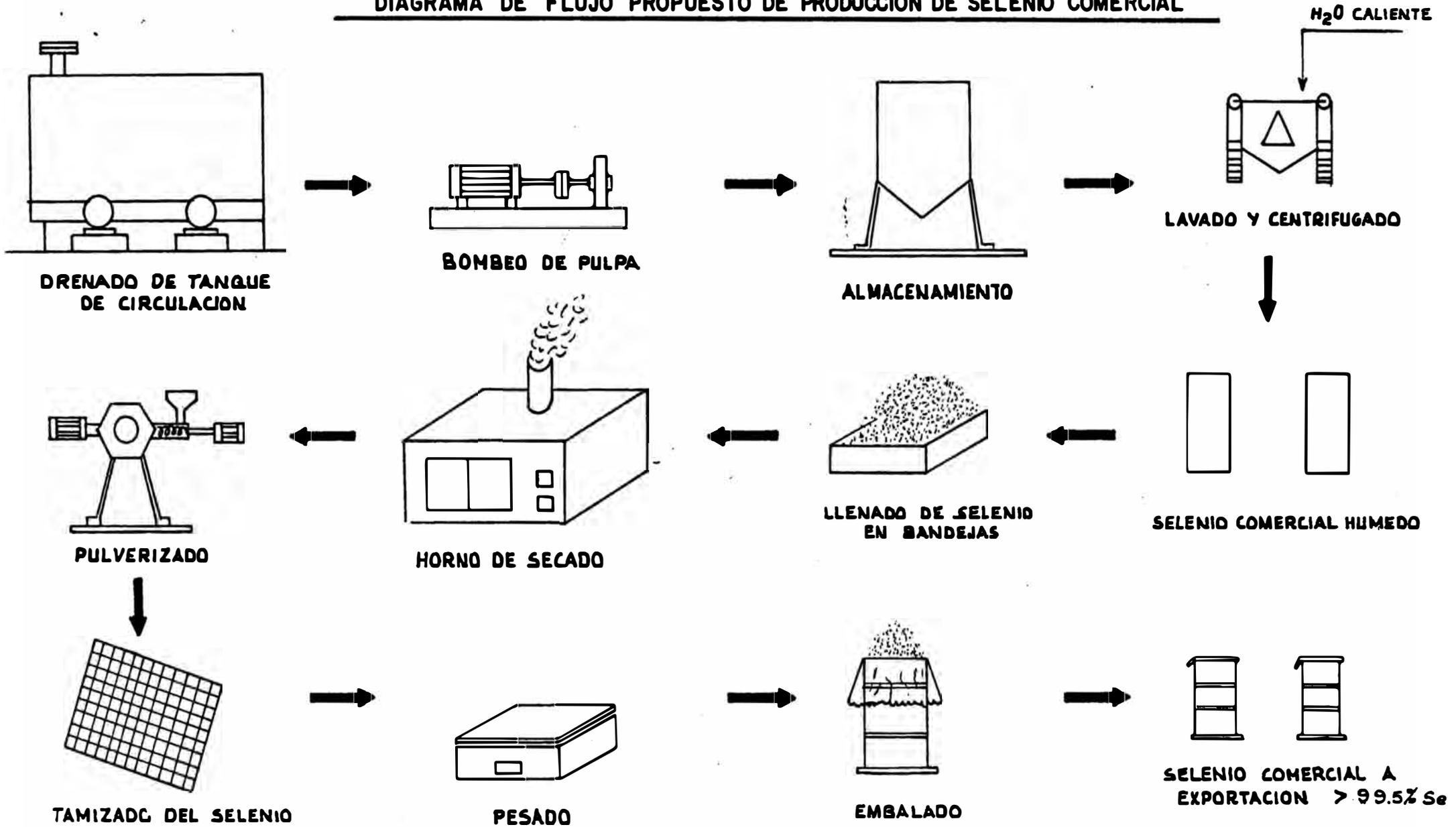
III.1.3 FLOW SHEET CUALITATIVO

El rubro II.3.2 y el Esquema No.9 y No.10, muestran el detalle del diagrama de flujo actual y se explica en el rubro II.3.2 de producción de selenio crudo en la Refinería a nivel industrial, el Esquema No.16 describe el diagrama de flujo cualitativo de producción de selenio comercial, y se describe sus operaciones unitarias en el rubro III.1.2.

III.1.4 FLOW SHEET CUANTITATIVO

El Cuadro No.4, sobre el balance metalúrgico del selenio, en el proyecto de selenio

DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL



comercial y el Esquema No.17 sobre el Flow Sheet cuantitativo de producción de selenio comercial, ilustran las cantidades del proceso del proyecto.

III.2 UBICACION DE LA PLANTA DE RECUPERACION DE SELENIO

El horno de deselinización se ubicó en la planta de purificación por la siguientes consideraciones:

- a. El lodo anódico descobrizado se encuentra con custodia de policía particular, el cual daría menor costo por este concepto debido a que el resguardo es por 24 horas.
- b. Disponibilidad de energía eléctrica, a bajo costo de inversión debido al mínimo gasto de insumos por la poca distancia del tendido de cables, no se necesita transformador.
- c. Disponibilidad de insumos secundarios como vapor, agua fría y caliente, necesarios para las operaciones de deselenizado.
- d. Menor costo de horas-hombre, al asumir la supervisión el mismo personal de la planta de purificación, tanto en el sistema productivo como en mantenimiento.

El esquema No.18 muestra la ubicación de la zona de tratamiento de lodos anódicos y del proyecto de

CUADRO No.24 BALANCE METALURGICO DE SELENIO EN EL PROYECTO DE DE SELENIO COMERCIAL

LODO ANODICO A DIGESTAR	
400 Kg	20.4 %
81.5 Kg	100 %

CALCINA	
389 Kg	2.1 %
8.2 Kg	10.1 %

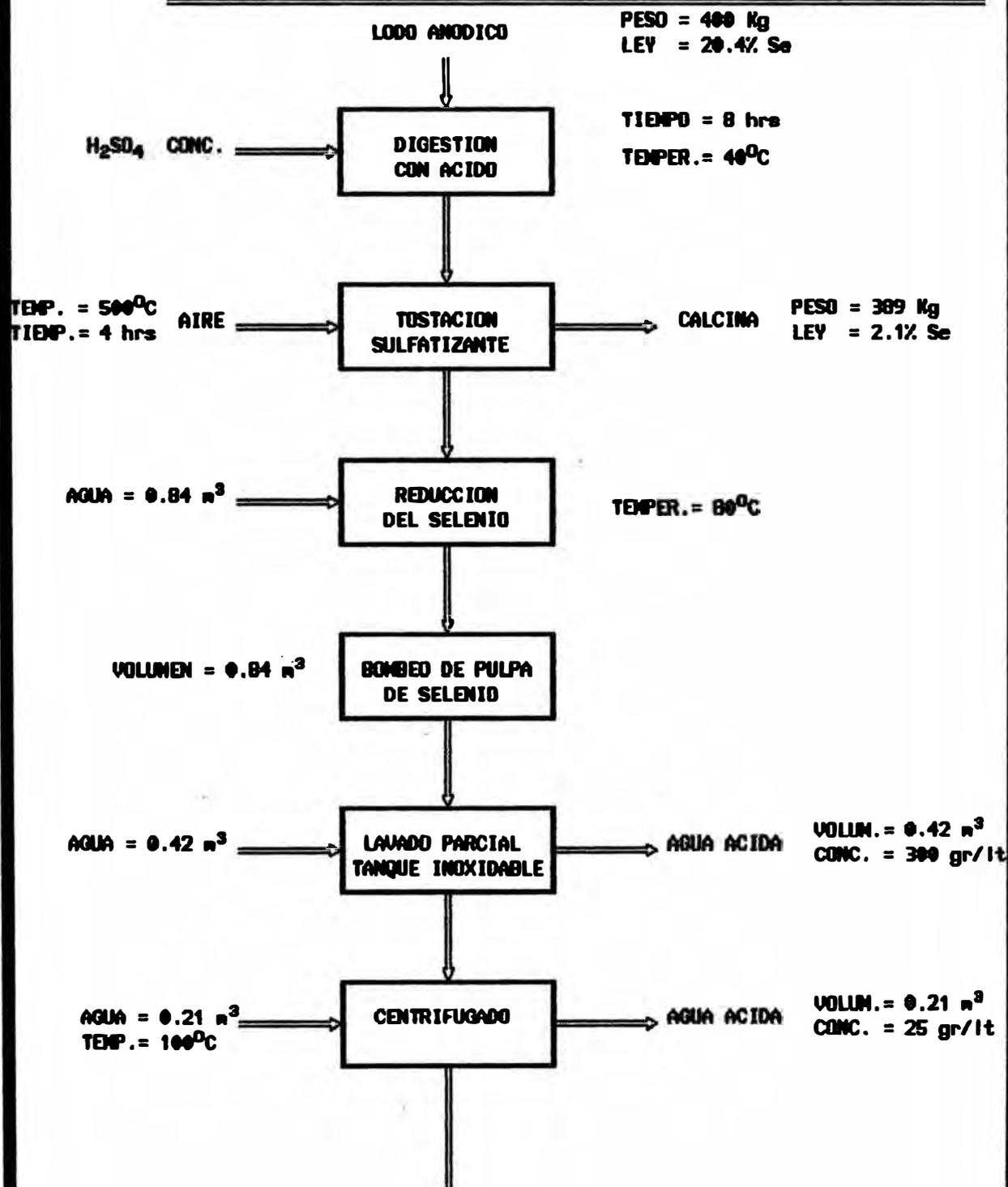
SELENIO COMERCIAL	
73.6 Kg	99.6 Kg
73.3 Kg	89.9 Kg

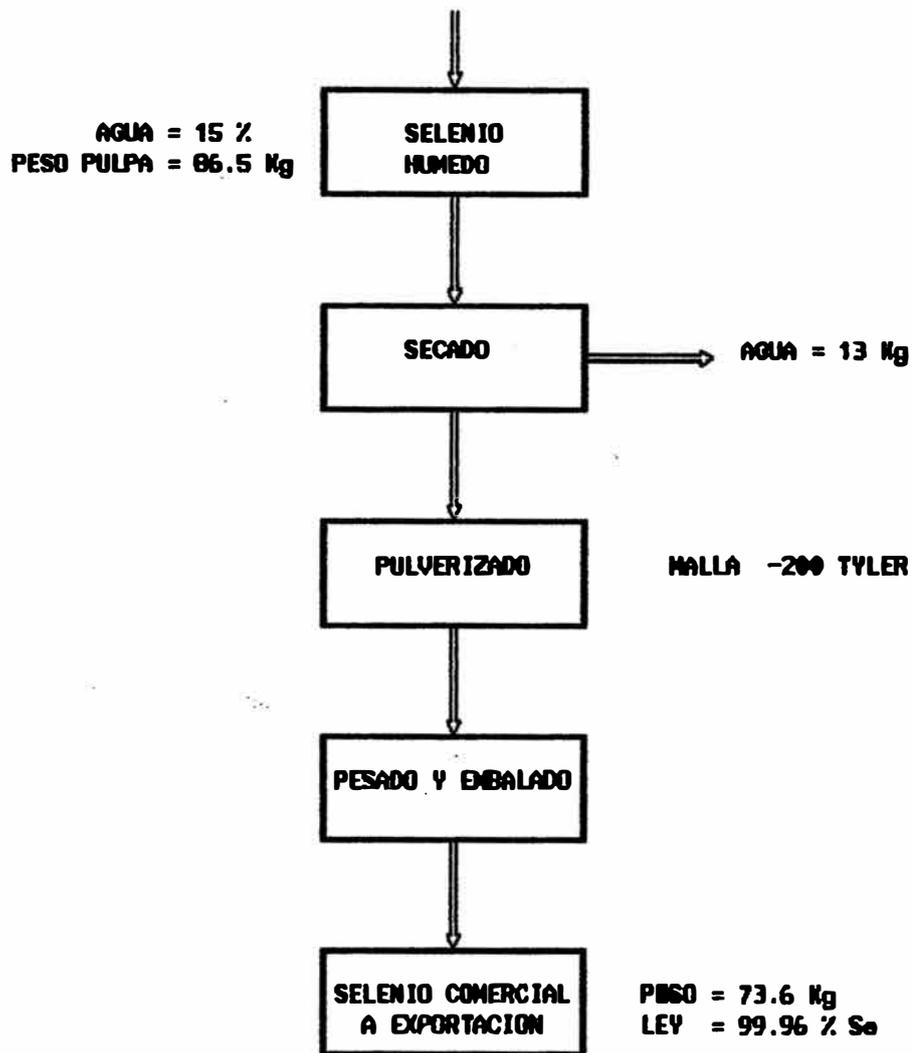
DESCRIPCION	
PESO DEL MATERIAL	ENSAYE Se %
CONTENIDO de Se	DISTRIBUCION %

LEYENDA

ESQUEMA 17

FLOW SHEET CUALITATIVO DE PRODUCCION DE SELENIO COMERCIAL





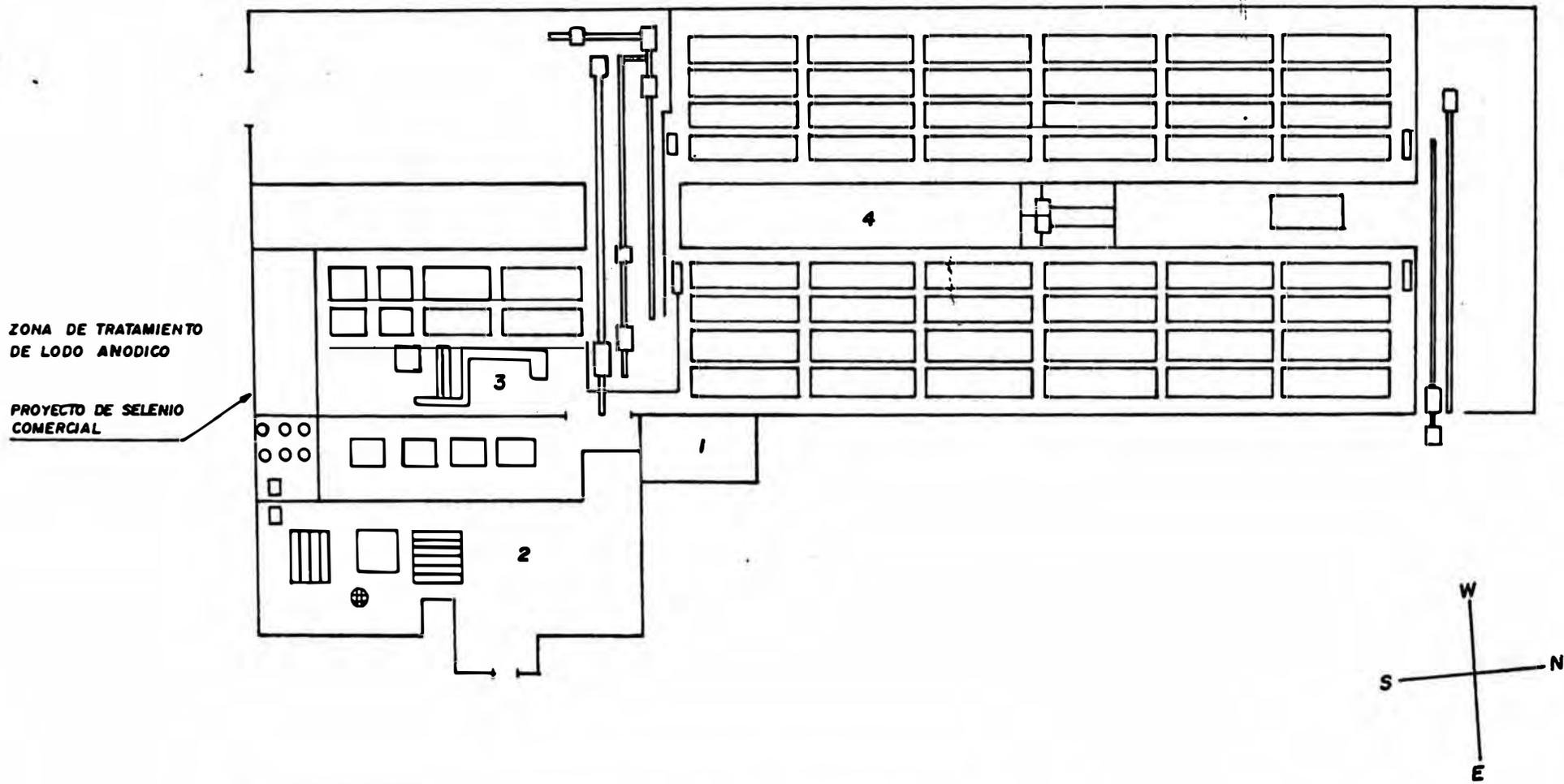


DIAGRAMA GENERAL DE PLANTA ELECTROLITICA

- 1.- Rectificadores
- 2.- Planta de purificación
- 3.- Planta de laminas de arranque
- 4.- Planta de cátodos comerciales

Escala: 1:10,000

selenio comercial, el plano No.1 explica la ubicación de los equipos actuales y futuros del mencionado proyecto.

III.3 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCION DE EQUIPO Y MAQUINARIA

a.- Tanque digestor (plano #2)

Material : Acero inoxidable AISI 316L

Espesor : 1/2 pulgada

Dimensiones parte cilíndrica

Diámetro : 1.1 mts.

Altura : 1.3 mts.

Dimensiones parte cónica

Diámetro mayor : 1.1 mts.

Diámetro menor : 0.1 mts.

Diámetro de la tapa : 1.2 mts.

b.- Bandeja para lodo deselenizado (plano #3)

Material : Acero estructural ASTM A36

Portapaquete : 01

Paquetes : 02

Bandejas : 08 por paquete (total=16)

Diámetro de bandeja : 0.78 mts.

Altura de bandeja : 7.5 cm.

c.- Reactor de selenio (plano #4)

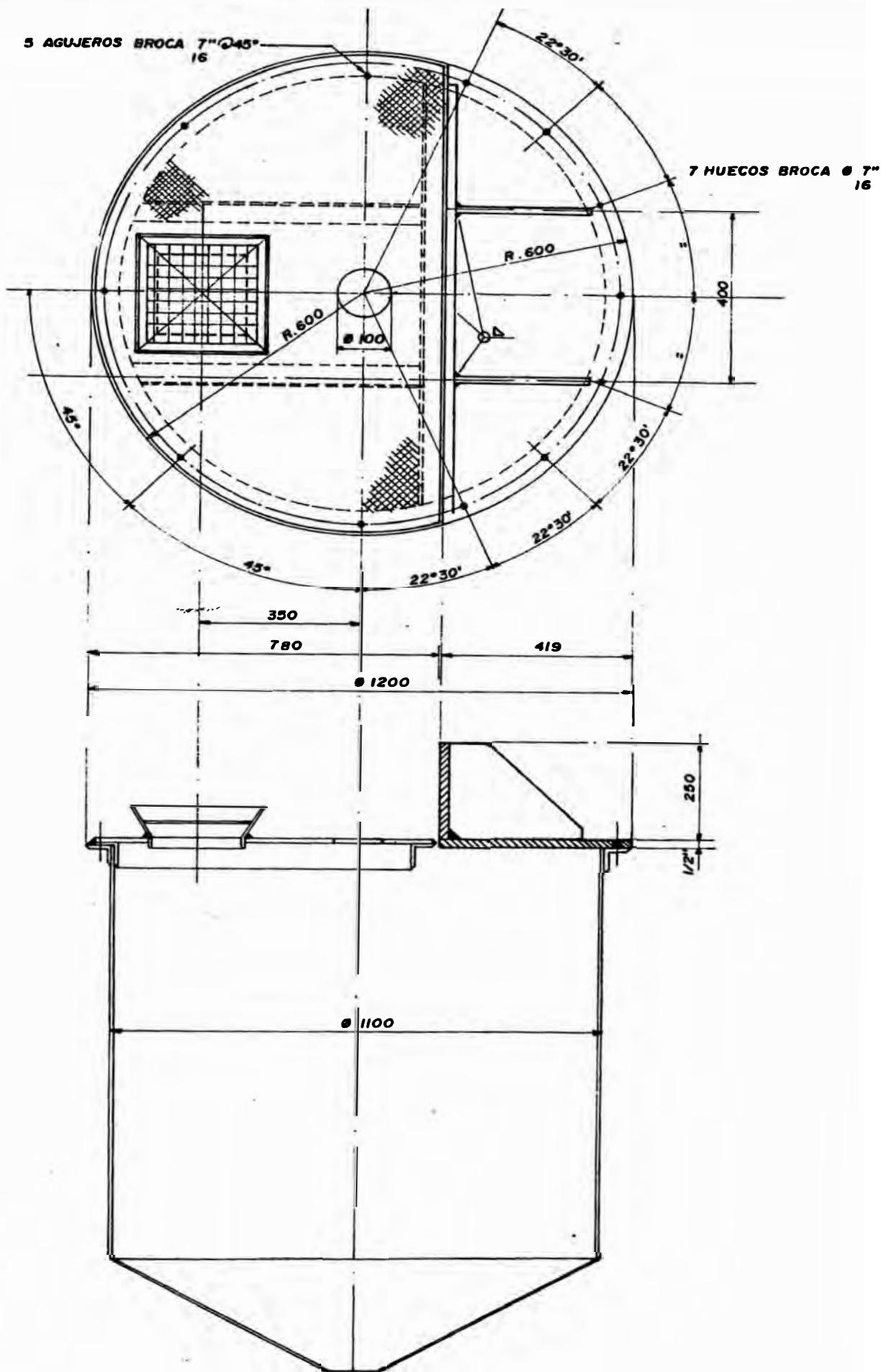
Mat. funda interior : Acero inoxidable 304

Espesor de funda : 1/8 pulgada

Mat. carcasa inter. : Acero estructural

Espesor carcasa : 3/8 pulgada

PLANO N° 2



MATERIAL : ACERO INOXIDABLE AISI 316-L

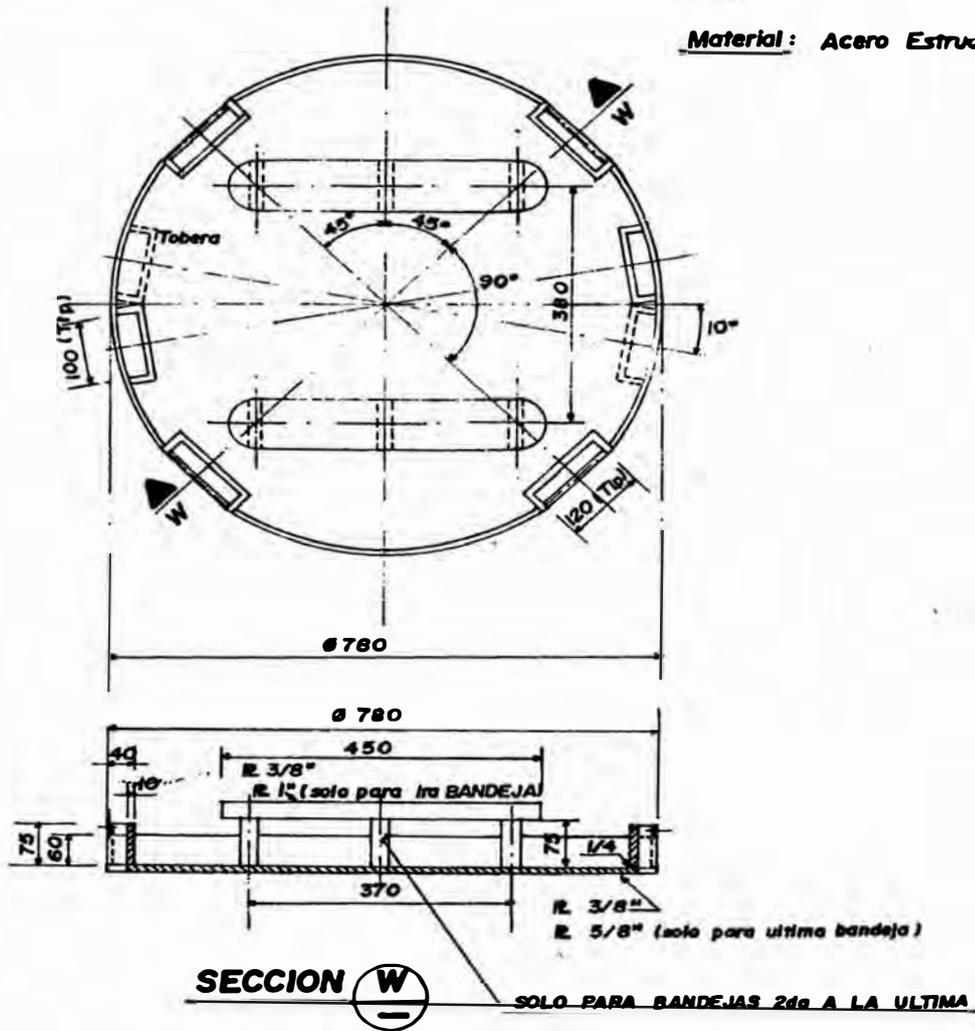
ENSAMBLE

TK. DIGESTOR

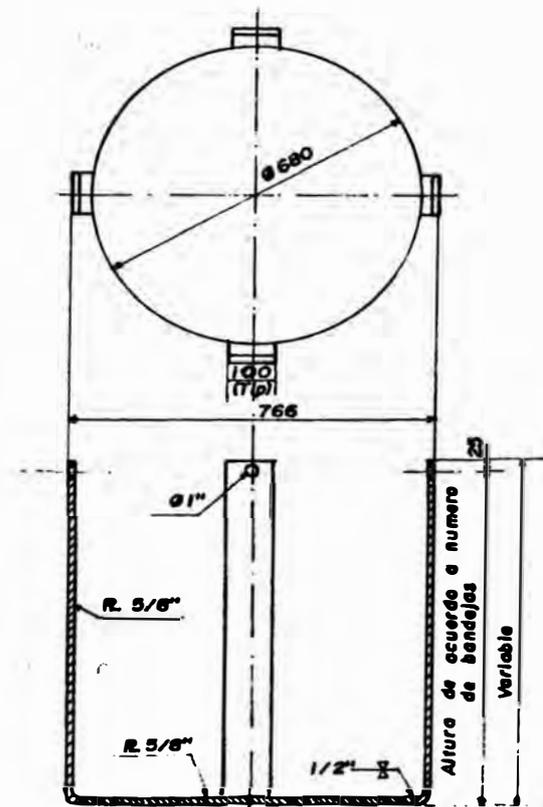
PLANO N° 3

BANDEJA PARA LODO DESELINIZADO

Material: Acero Estructural ASTM-A 36

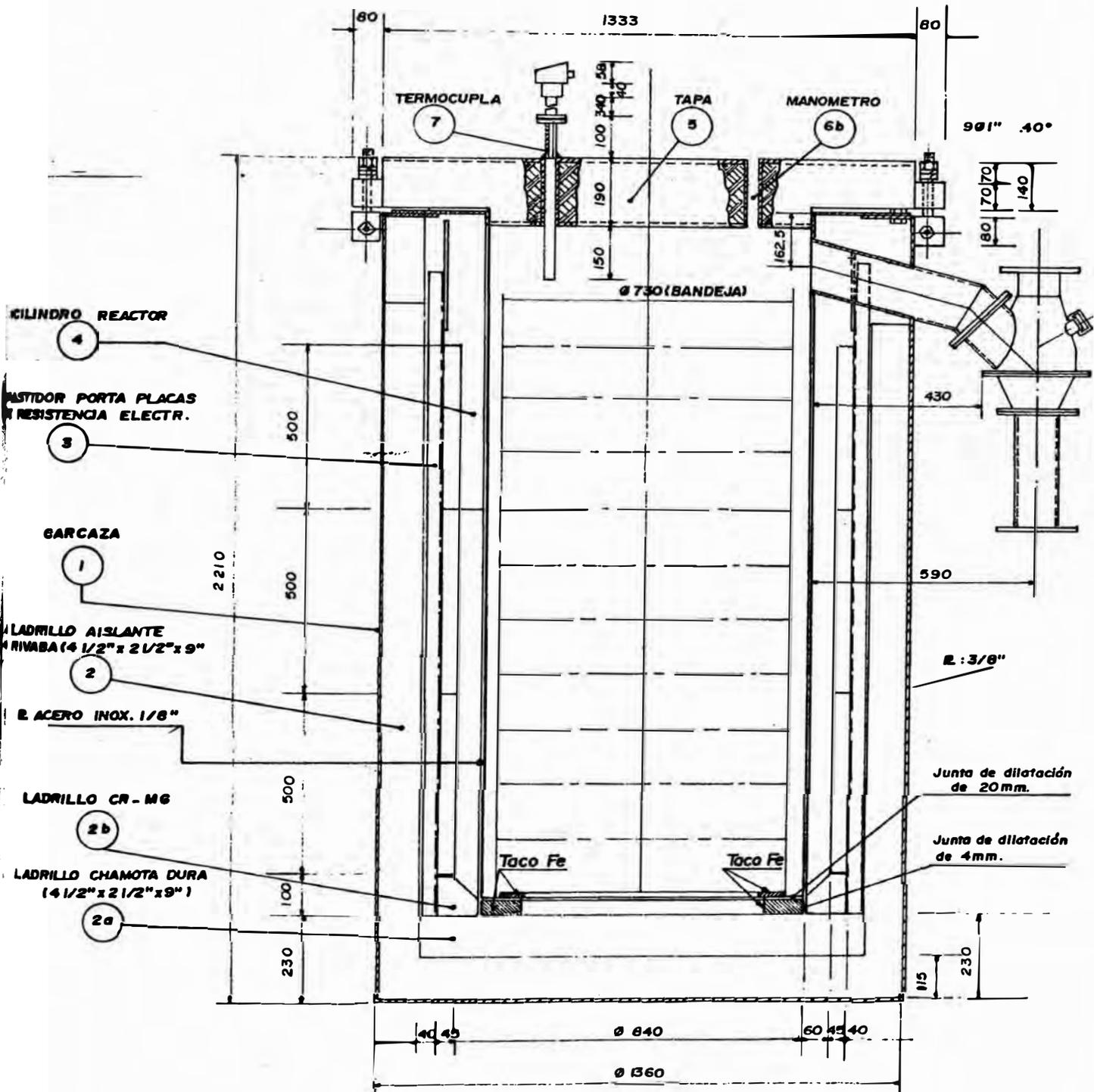


SECCION W SOLO PARA BANDEJAS 2da A LA ULTIMA



PORTAPAQUETE

PLANO N° 4

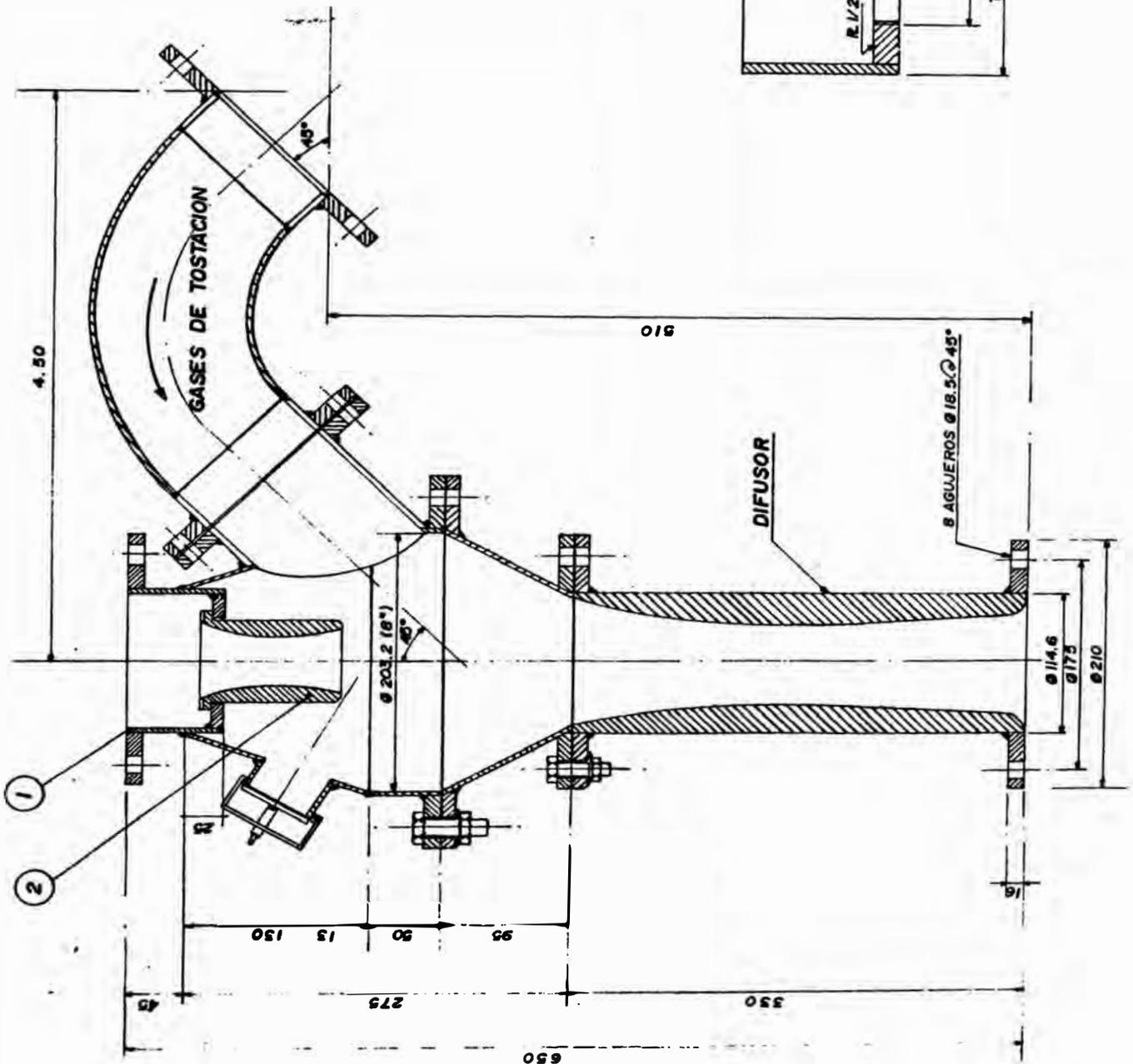


REACTOR DE SELENIO

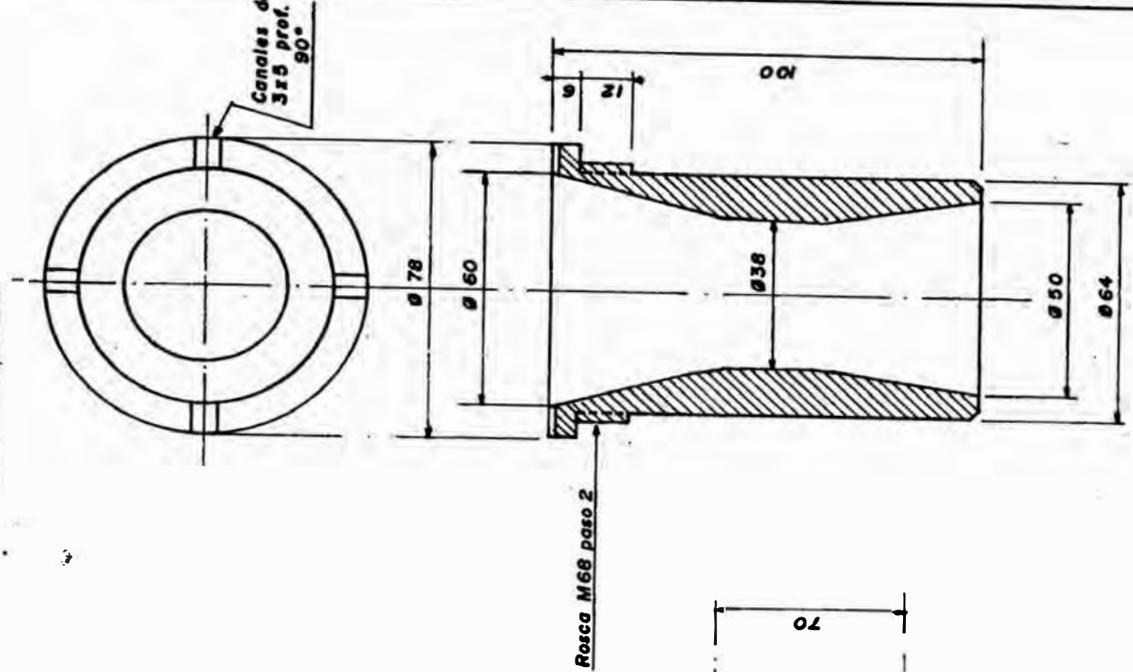
SECCION A - A'

PLANO N° 5

EYECTOR



INYECTOR



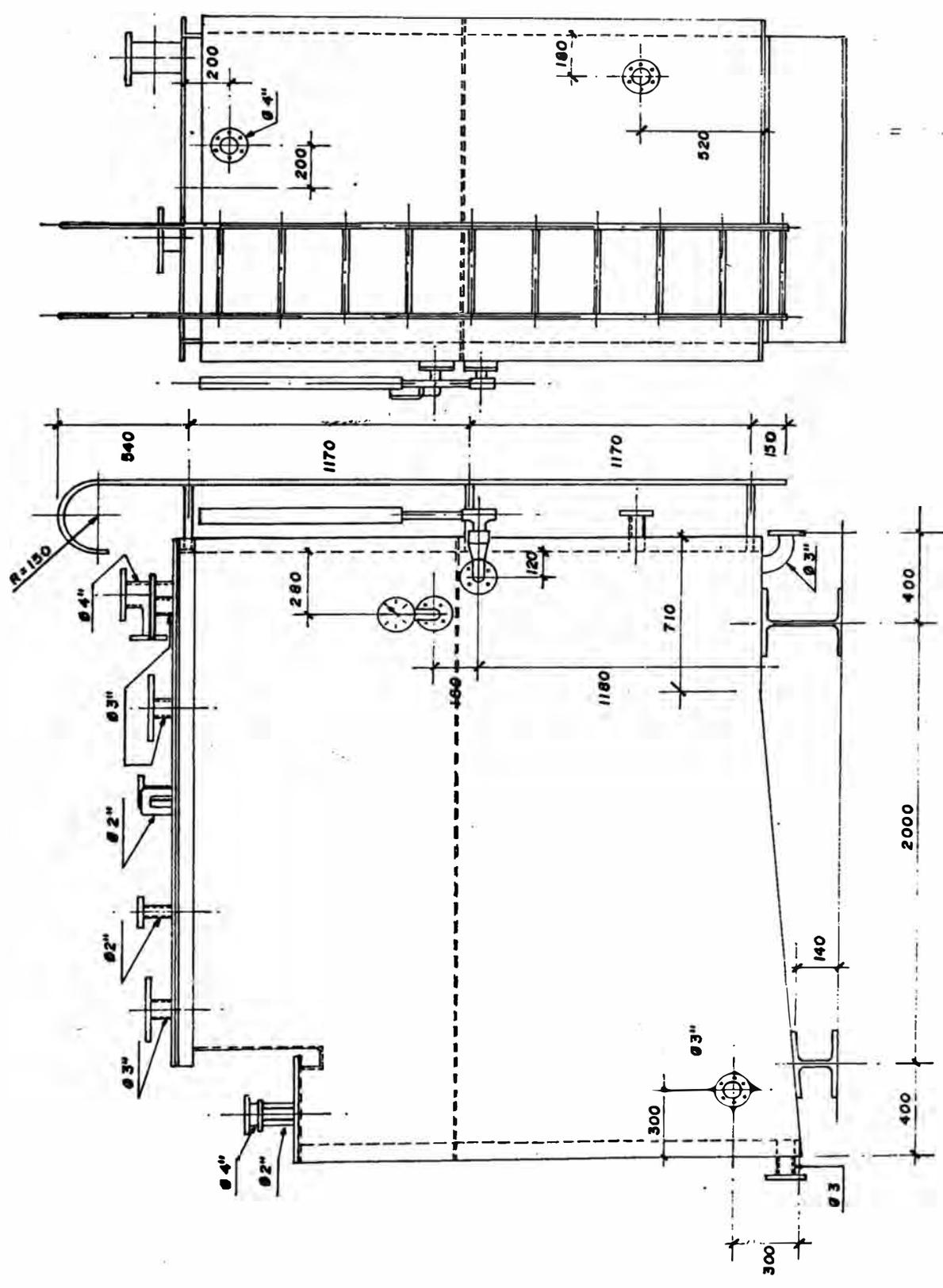
Canales d
3x5 prof.
90°

Rosca M68 paso 2

M 68 paso 2
Tubo Ø 4"

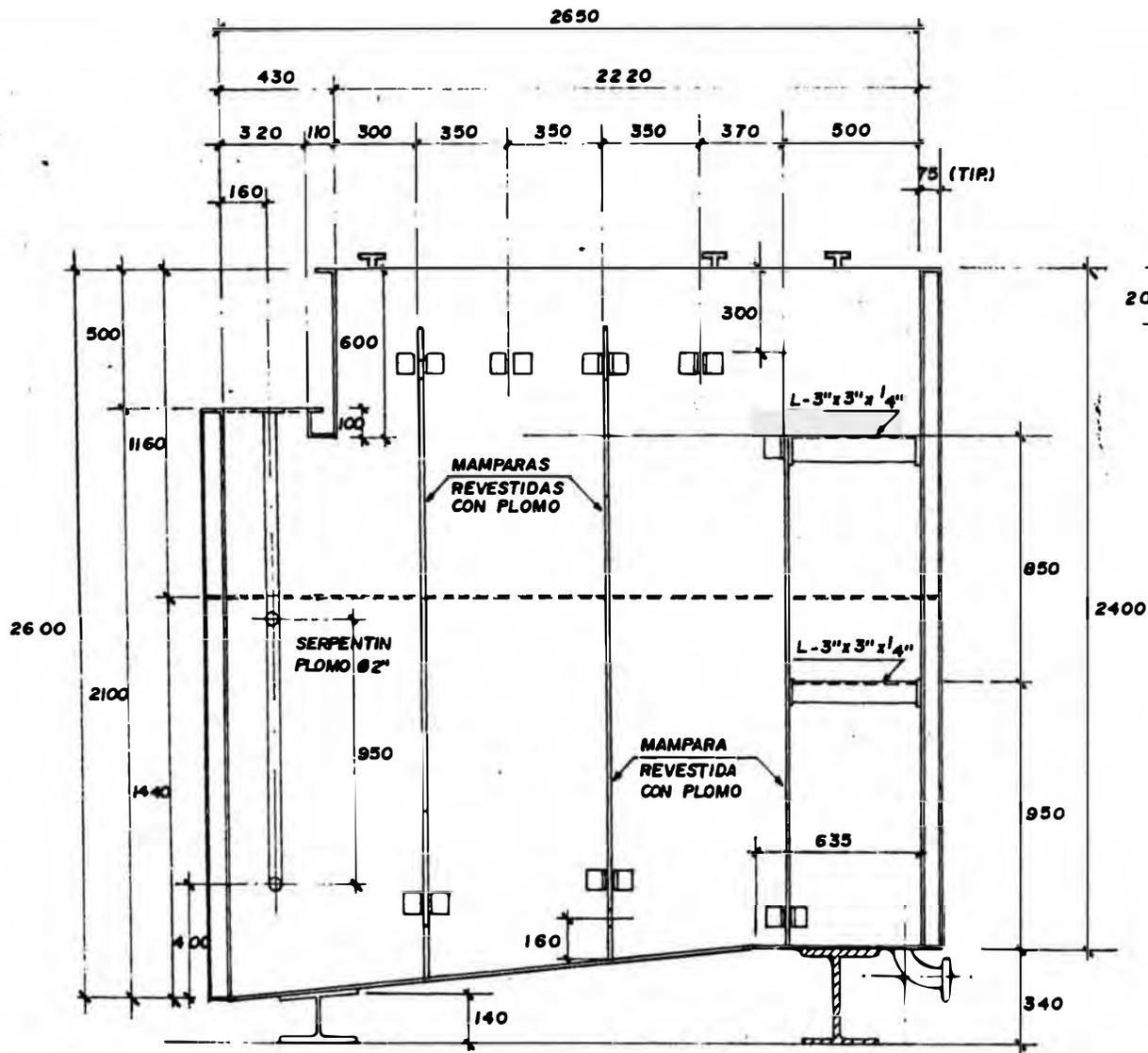
1

2



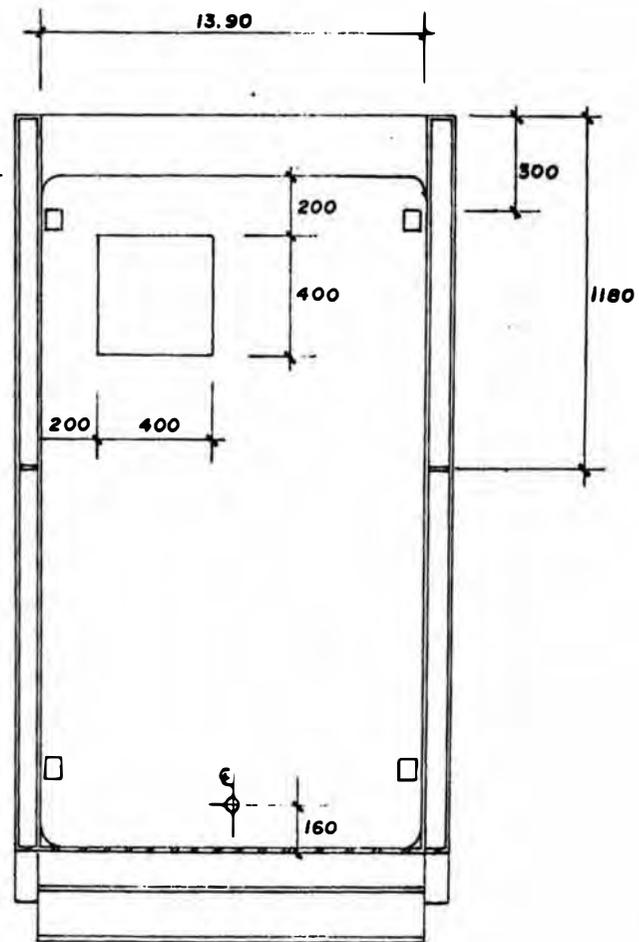
ENSAMBLE GENERAL
TANQUE DE SOLUCION DE AGUA ACIDA

PLANO N° 7



TANQUE CIRCULACION AGUA ACIDA

SECCION A



SECCION B

Manómetro de presión para vapor: 0 - 8kg/cm²

Termómetro : 0 - 120°C

Indicador de nivel : Vidrio

f.- Bomba de Circulación de agua ácida

Material : Plástico
Caudal : 400 lt/min
Potencia : 4 Kw
Costo : US\$ 11,000

g.- Bomba de Envío de Pulpa al Sistema de Centrifugado

Material : Plástico
Caudal : 100 lt/min
Potencia : 1.5 Kw
Costo : US\$ 5,000

h. Tanque de Espera de Almacenamiento de Pulpa (Plano # 8)

Material : Acero Inoxidable 316
Revestimiento : Plomo laminado
Espesor de Revestimiento : 1/2"
Volumen : 6 m³
Costo : US\$ 4,000

i.- Bomba de Circulación en Centrífuga

Material : Acero Inoxidable 316
Caudal : 200 lt/min
Potencia : 2.5 Kw

Costo : US\$ 5,000

j.- Centrífuga Mecánica

Diámetro Canasta : 760 mm

Capacidad Canasta : 65 lts

R.P.M. : 1,300

Potencia : 5.5 Kw

k.- Sala de Selenio

Area : 84 m²

Dimensiones : Largo = 12 mts.

Ancho = 7 mts.

Costo : US\$ 20,000

l.- Horno de Secado

Material : Acero Inoxidable
316

Tipo : Aire caliente

Calentadores : Eléctricos

Potencia del Soplador : 3 H.P.

Potencia de Calentadores : 40 Kw

Temperatura Máxima : 260°C

Costo : US\$ 15,000

Dimensiones Internas

Longitud : 152 cm

Ancho : 243 cm

Altura : 182 cm

Dimensiones de la Bandeja

Longitud : 120 cm

Ancho	:	210 cm
Espesor	:	5 cm
Número de Bandejas	:	10
Material Bandejas	:	Acero Inoxidable 316
Costo	:	US\$ 1,000

m.- Micropulverizador

Material del Casco	:	Acero Estructural
Material de Martillos	:	Acero Inoxidable
Pot. Motor de Martillos	:	5 H.P.
R.P.M.	:	9,600
Pot. Motor de Alimentac.	:	1/3 H.P.
Costo	:	US\$ 8,000

n.- Tamizador

Material de Construcción	:	Acero Estructural
Material de Tamiz	:	Acero Inoxidable
Pot. Motor del Cedazo	:	1.5 H.P.
Costo	:	US\$ 8,000

o.- Montacargas Manual

Capacidad	:	2,000 Kg
Altura Elevac. de Carga	:	1.20 mt
Costo	:	US\$ 4,000

III.4 EQUIPO AUXILIAR Y SERVICIOS

a.- Tuberías de Agua Caliente

Material	:	Acero Inoxidable
----------	---	------------------

Diámetro : 1/2 " Diámetro
Longitud : 20 mts.
Costo : US\$ 2,000

b.- Tubería de Agua Fría

Material : Acero Inoxidable
Diámetro : 1/2 " Diámetro
Longitud : 12 mts.
Costo : US\$ 1,200

c.- Tubería de Pulpa de Selenio

Material : PlásticoReforzado
Diámetro : 2 " Diámetro
Longitud : 14 mts.
Costo : US\$ 2,800

d.- Tubería de Desague

Material : Plástico
Diámetro : 4 " Diámetro
Longitud : 16 mts.
Costo : US\$ 200

e.- Tubería del Sistema de Centrifugación

Material : PlásticoReforzado
Diámetro : 2 " Diámetro
Longitud : 10 mts.
Costo : US\$ 2,000

f.- Tendido de Línea Eléctrica

Costo : US\$ 1,800

g.- Total Costo de Equipo Auxiliar y Servicios

Costo : US\$ 10,000

III.5 AREA REQUERIDA EN RELACION DEL EQUIPO BASICO

La sala de selenio tiene 86 m² donde se ubica los nuevos equipos como centrífuga, bomba, tanque de almacenamiento de pulpa, horno de secado, pulverizadora, tamizadora y balanza. El Plano #8 explica el detalle del asunto.

III.6 ESTIMACION DE LOS CONSUMOS UNITARIOS

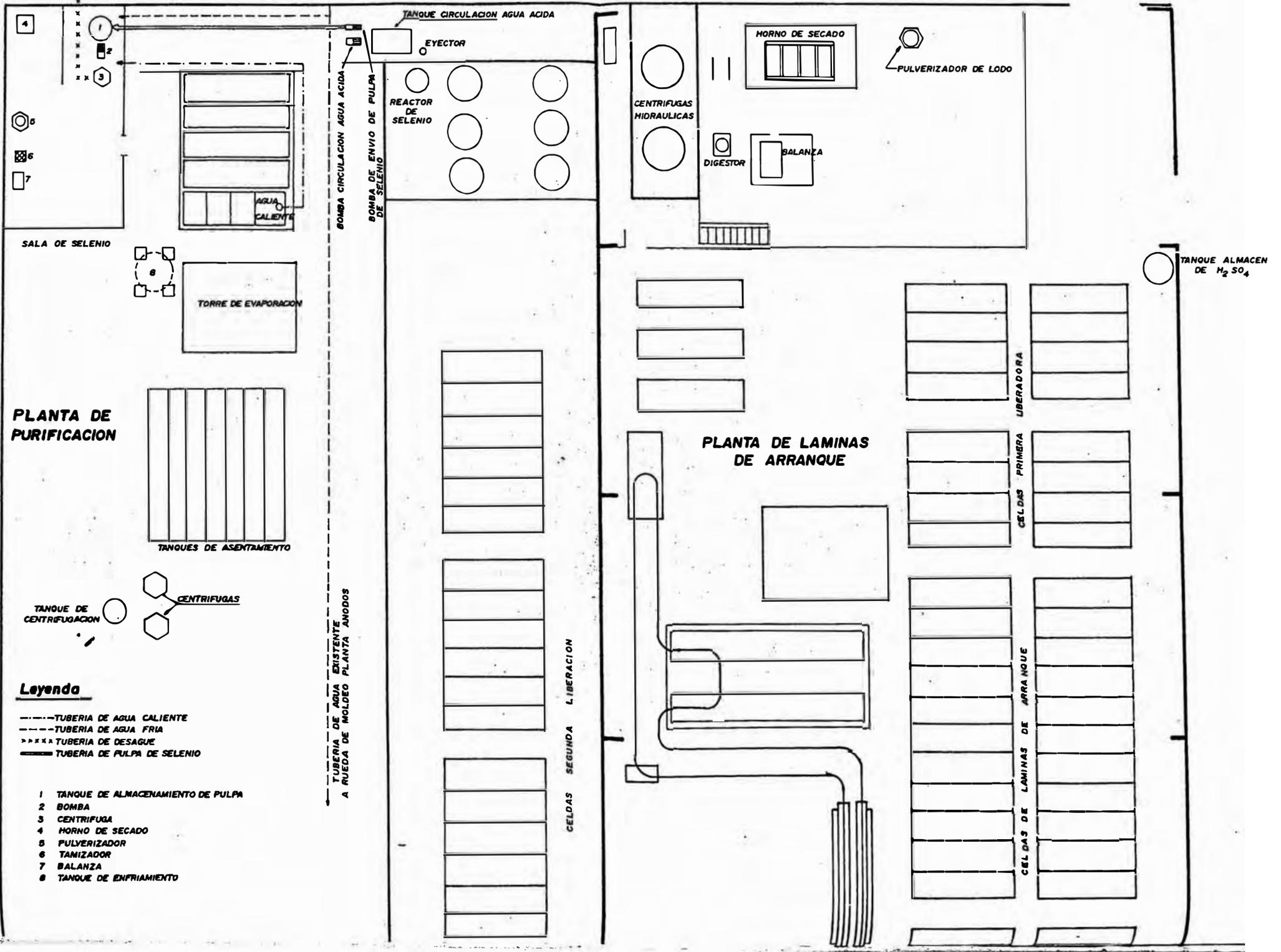
La producción anual de selenio comercial sería 18.96 Ton.

a. Consumo de Agua

- Drenado de Selenio	:	208 m ³ /año
- Lavado Parcial y Cent.	:	52 m ³ /año
- Total	:	260 m ³ /año
- Consumo Unitario	:	13.71 m ³ /Ton Se
- Costo Total(US\$1.5/m ³)	:	US\$ 390 /año

b. Consumo de Energía Eléctrica

- Bomba Circ. agua ácida	:	35,040 Kw/año
- Bomba de envío de Pulpa al sistema de centrifugado (8 hrs./semana)	:	624 Kw/año
- Bomba de Circulación en Centrífuga (hrs/sem)	:	1,040 Kw/año
- Centrífuga Mecánica		



(8 hrs/semana)	:	2,288 Kw/año
- Ilumin.sala de Selenio	:	20,000 Kw/año
- Horno de Secado	:	70,896 Kw/año
- Micropulverizador		
(1 semana/mes)	:	3,504 Kw/año
- Tamizador	:	4,400 Kw/año
- Energía Total	:	137,792 Kw/año
- Consumo Unitario	:	7,268 Kw/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 8,268/año
(1 Kw = US\$ 0.06)		

c. Bolsas de PVC para Embalado de Selenio

- Consumo anual	:	474 Bolsas
- Consumo Unitario	:	25 Bls/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 711 /año

d. Cilindros de Acero con Tapa a Presión

- Consumo	:	474 cilindros/año
- Consumo unitario	:	25 cil/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 3,555/año

e. Pintura

- Consumo	:	4 Gal/año
- Consumo Unitario	:	0.21 Gal/año
- Costo Total	:	US\$ 60/año

f. Cilindros para Transporte de Selenio Comercial Lavado

- Consumo	:	5 Cilindros/año
- Consumo Unitario	:	0.26 Cil/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 150/año

g. Bolsas para Transporte de Selenio Comercial
Lavado

- Consumo	:	48 Bolsas/año
- Consumo Unitario	:	2.53 Bls/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 144/año

h. Madera

- Consumo Unitario	:	500 Pies/Ton Se
- Costo Total	:	US\$ 5,400/año

i. Mano de Obra

- Consumo	:	5 Operarios (4 producción, 1 mantenimiento)
- Consumo Unitario	:	96.3 H-H/Ton Se
- Costo por Operario	:	US\$ 500 /mes
- Costo Anual Operario	:	US\$ 7,000 (14 sueldos/año)
- Costo Total	:	US\$ 35,000/año

CAPITULO IV

ECONOMIA

Los cálculos económicos se refieren al proyecto de producción de selenio comercial seco, el cual es factible su producción, sin el apoyo de consultoría externa, debido a la simplicidad de las operaciones y proceso.

El proyecto de selenio destilado, por su particularidad, debe adquirirse bajo un contrato con modalidad llave en mano; esta evaluación se realiza por la diferencia de precios de los productos, el selenio comercial con ley de 99.5% de Se. cuesta U.S.\$ 5.5/lb y el selenio fino con ley de 99.9% de Se. cuesta U.S.\$ 14.0/lb. El costo aproximado de la inversión adicional es de U.S.\$ 500,000 comprando el sistema Outokumpu.

IV.1 ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN - PROYECTO SELENIO COMERCIAL

IV.1.1 CAPITAL FIJO

a. Terrenos

El terreno es propiedad de la Refinería de Cobre de Ilo

b. Edificaciones

Sala de Selenio:

ITEM	COSTO US\$
Obras Preliminares	300
Movimiento de Tierras	2,000
Concreto	4,000
Albañilería	12,000
Pisos	1,700

TOTAL	20,000
-------	--------

c. Equipos

DESCRIPCION	COSTO US\$
Horno de Secado	15,000
Balanza	4,000
Montacargas Manual	4,000
Pulverizador	8,000
Tamizador	8,000
Eyector (sistema de Vacío)	2,000
Tanque de Espera para almacenamiento	4,000
Bomba Plástica circulación de agua ácida	11,000
Bomba circulación en centríf.	5,000
Bomba para pulpa a Centrifug.	5,000
TOTAL	66,000

d. Instalaciones Complementarias

DESCRIPCION	COSTO US\$
Bandejas Inoxidables	1,000
Accesorios	2,500
Tuberías	5,000
Controles Eléctricos	2,500
Controles Electrónicos	5,000
TOTAL	16,000

e. Intangibles

DESCRIPCION	COSTO US\$
Investigación e Ingeniería	5,000
Supervisión de Obra	10,000
Puesta en Marcha	10,000
TOTAL	25,000

f. Total Inversión Fija

DESCRIPCION	COSTO US\$
Edificaciones	20,000
Equipos	66,000
Instalaciones Complementarias	16,000
Intangibles	25,000
Imprevistos (10%)	12,700
TOTAL	139,700

IV.1.2 CAPITAL DE TRABAJO

a. Materias Primas

El selenio es propiedad de la Refinería de Cobre de Ilo, y actualmente se encuentra almacenado, sin tener comprador de este material, por tal motivo no se considera costo alguno por productos en proceso.

b. Materiales

El ciclo operacional se define en cuatro meses, donde se adquieren los activos corrientes necesarios para las etapas de

producción y comercialización.

DESCRIPCION	COSTO US\$
Bolsas PVC embalado de Selenio	237
Cilindros tapa presión Embalado	1,185
Pintura	20
Cilindros transporte Se lavado	50
Bolsas transporte Selenio lavado	48
Madera	1,800
TOTAL	3,340

c. Mano de Obra

Cinco operarios en cuatro meses, cuesta US\$ 11,667.

d. Servicios

DESCRIPCION	COSTO US\$
Agua	130
Energía	2,756
TOTAL	2,886

e. Total Capital de Trabajo (para ciclo operacional 4 meses)

DESCRIPCION	COSTO US\$
Materiales	3,340
Mano de obra	11,667
Servicios	2,886
TOTAL	17,893

IV.1.3 CUADRO GENERAL DE INVERSIONES

CALENDARIO DE INVERSIONES

(EN DOLAR CONSTANTE)

	M E S E S								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
INVERSION FIJA									
1.Edificaciones	2300	4000	6000	6000	1700				
2.Equipos				33000	33000				
3.Instalaciones Complementar.						16000			
4.Intangibles	1667	1667	1667	1666	1666	1667	5000	5000	5000
SUBTOTAL INVERSION FIJA	3967	5667	7667	40666	3636	17667	5000	5000	5000
5.Imprevistos (10%)	6700		6000						
TOTAL INVERSION FIJA	10667	5667	13667	40666	36366	17667	5000	5000	5000
CAPITAL DE TRABAJO									
6.Materiales						3340			
7.Mano de Obra						2917	2917	2917	2916
8.Servicios							2886		
TOTAL CAPITAL DE TRABAJO						6257	5803	2917	2916
TOTAL INVERSIONES	10667	5667	13667	40666	36366	23924	10803	7917	7916

IV.2 ESTIMACION DEL COSTO DE PRODUCCION DEL PROYECTO
SELENIO COMERCIAL

DESCRIPCION	COSTO ANUAL
A. Materiales	
Bolsas embalado de Selenio	711
Cilindros de acero tapa presión	3,555
Pintura	60
Cilindros transporte de Se	150
Bolsas transporte de Selenio	144
Madera	5,400
B. Insumos	
Energía	8,268
Agua	390
Repuestos	1,000
C. Laborales	
Mano de Obra	35,000
D. Depreciación	13,970
E. Imprevistos (10%)	6,865
T O T A L	75,513

IV.3 BALANCE ECONOMICO

Se considera un préstamo en Dólares Americanos con 12% de interés pagaderos en 5 años: la caja mínima es considerando el monto para gastos laborales y para pagar insumos como agua y energía para un año, el cual asciende a US\$ 44,658. La producción realizada en el año 1, es contabilizada en activo corriente

como el 50% en Cuentas por Cobrar a los clientes que adquirieron el producto el 50% como existencia de producción terminada en almacenes de planta.

Los materiales a utilizarse en un año son contabilizados como activo corriente de existencias el cual asciende al monto de US\$ 10,020.

En el pasivo corriente tenemos las cuentas por pagar, que lo considero como el costo operativo menos la depreciación, y junto con la deuda del préstamo prorrateado en los 5 años pagaderos, se contabiliza como deuda a corto plazo; en el último ítem de pasivo corriente se incluye los intereses del préstamo respectivo. El pasivo fijo se tipifica como la deuda a largo plazo del préstamo que nos queda por pagar.

En el año 1 tenemos un aporte por parte de accionistas que asciende a US\$ 54,678, para cubrir la caja mínima y la existencia de materiales para un sistema logístico adecuado.

Las participaciones definidas como la diferencia entre el activo fijo y el pasivo fijo, se resta al aporte de los accionistas y muestra el superávit anual del proyecto, donde están las ganancias retenidas, y reservas legales. Su valor refleja que hay un aumento hasta el año 6 del valor de las acciones, atribuible exclusivamente a la evolución

BALANCE ECONOMICO DEL PROYECTO

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7
ACTIVO CORRIENTE								
Caja Mínima		44,658	44,658	44,658	44,658	44,658	44,658	44,658
Cuentas por Cobrar		114,708	114,708	114,708	114,708	114,708	114,708	114,708
Existencias de Materiales		10,020	10,020	10,020	10,020	10,020	10,020	10,020
Existencia de Producción Terminada		114,708	114,708	114,708	114,708	114,708	114,708	114,708
TOTAL ACTIVO CORRIENTE		284,094						
ACTIVO FIJO								
Inversión Acumulada	139,700	139,700	139,700	139,700	139,700	139,700	139,700	139,700
Depreciación		13,970	27,940	41,910	55,880	69,850	83,820	97,790
ACTIVO FIJO NETO	139,700	125,730	111,760	97,790	83,820	69,850	55,880	41,910
TOTAL ACTIVOS	139,700	409,824	395,854	381,884	367,914	353,944	339,974	326,004
PASIVO CORRIENTE								
Cuentas por Pagar		61,543	61,543	61,543	61,543	61,543	61,543	61,543
Intereses del Préstamo		16,764	13,411	10,058	6,706	3,353		
Deuda a Corto Plazo		27,940	27,940	27,940	27,940	27,940		
TOTAL PASIVO CORRIENTE		106,247	102,894	99,541	96,189	92,836	61,543	61,543
PASIVO FIJO								
Deuda a Largo Plazo	139,700	111,760	83,820	55,880	27,940			
TOTAL PASIVOS	139,700	218,007	186,714	155,421	124,129	92,836	61,543	61,543
PARTICIPACIONES								
Aportes Acumulados:		54,678	54,678	54,678	54,678	54,678	54,678	54,678
- De la Empresa								
- De los Accionistas		54,678	54,678	54,678	54,678	54,678	54,678	54,678
Superávit (Déficit)		137,139	154,462	171,785	189,107	206,430	223,753	209,783
TOTAL PARTICIPACIONES		191,817	209,140	226,463	243,785	261,108	278,431	264,461

del patrimonio del proyecto, independientemente de las fluctuaciones del mercado.

IV.4 INDICE DE EVALUACION ECONOMICA PROYECTO SELENIO COMERCIAL

Se hará evaluación económica para una producción de 18.96 ton. de selenio comercial seco al año, el precio promedio es U.S. \$5.5/lb (descontando fletes, pago de comercialización, impuestos, etc.), por consiguiente el ingreso anual por ventas sería U.S. \$229,416.

IV.4.1 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El valor actual neto es la suma de los valores actualizados de los costos y beneficios generados por el proyecto, durante 10 años de horizonte del proyecto y con una tasa de actualización del 12% ($r=0.12$).

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + r_t)^t}$$

Como el beneficio anual asciende a U.S. \$229,416 y el costo anual de producción asciende a U.S. \$75,513 tenemos:

$$B_t = 229,416$$

$$C_t = 75,513$$

AÑO	INVERSION	BENEFICIO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.)(B.N.)
0	139,700			-139,700
1		153,903	0.8929	137,420
2		153,903	0.7972	122,691
3		153,903	0.7118	109,548
4		153,903	0.6355	97,805
5		153,903	0.5674	87,325
6		153,903	0.5066	77,967
7		153,903	0.4523	69,610
8		153,903	0.4039	62,161
9		153,903	0.3606	55,497
10		153,903	0.3220	49,557

$$F.A. = \frac{1}{(1 + r_t)^t} \quad VAN = US\$729,881$$

IV.4.2 TASA INTERNA DE RETORNO

Es la tasa de descuento para la cual el VAN, resulta igual a cero, La TIR refleja la rentabilidad total del proyecto por unidad de ingreso. Se calcula por tanteos y por interpolación.

Para una tasa de 110% tenemos:

AÑO	INVERSION	BENEFICIO NETO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.)(B.N.)
0	139,700			-139,700
1		153,903	0.4762	73,298
2		153,903	0.2268	34,905
3		153,903	0.1080	16,622
4		153,903	0.0514	7,911
5		153,903	0.0245	3,771
6		153,903	0.0177	1,801
7		153,903	0.0056	862
8		153,903	0.0026	400
9		153,903	0.0013	200
10		153,903	0.0006	92

Por consiguiente VAN = U.S. \$153

Para una tasa de descuento de 115% tenemos:

AÑO	INVERSION	BENEFICIO NETO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.)(B.N.)
0	139,700			-139,700
1		153,903	0.4651	71,580
2		153,903	0.2326	35,798
3		153,903	0.1006	15,483
4		153,903	0.0468	7,203
5		153,903	0.0218	3,355
6		153,903	0.0101	1,554
7		153,903	0.0047	723
8		153,903	0.0022	339
9		153,903	0.0010	154
10		153,903	0.0005	77

VAN = US\$ -3,443

Por consiguiente:

Para $i = 110\%$ VAN = US\$ 153
 $i = \text{TIR}$ VAN = 0
 $i = 115\%$ VAN = US\$ -3,443

Interpolando:

$$\text{TIR} = 110.2\%$$

IV.4.3 COEFICIENTE BENEFICIO COSTO

Es la relación entre los beneficios actualizados y los costos actualizados para una tasa de descuento del 12% y un horizonte de 10 años.

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r_t)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r_t)^t}}$$

AÑO	BENEFICIO	COSTO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	BENEFICIO ACTUALIZADO	COSTO ACTUALIZADO
0		139,700			-139,700
1	229,416	75,513	0.8929	204,846	67,426
2	229,416	75,513	0.7972	182,890	60,199
3	229,416	75,513	0.7118	163,298	53,750
4	229,416	75,513	0.6355	145,794	47,989
5	229,416	75,513	0.5674	130,171	42,846
6	229,416	75,513	0.5066	116,222	38,255
7	229,416	75,513	0.4523	103,765	34,155
8	229,416	75,513	0.4039	92,661	30,500
9	229,416	75,513	0.3606	82,727	27,230
10	229,416	75,513	0.3220	73,872	24,315

Beneficio actualizado total = US\$ 1'296,246

Costo actualizado total = US\$ 566,365

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{1'296,246}{566,365} = 2.29$$

IV.4.4 PERIODO DE RECUPERACION

Es el lapso en el que la sumatoria de los valores actualizados de los beneficios, iguala a la de los costos del proyecto. En el Cuadro de los beneficios actualizados observamos que en el año 1, el costo actualizado asciende a US\$ 207,126, mientras que el beneficio actualizado es US\$ 204,846 mostrando que el período de recuperación es en el primer año luego de el arranque de la planta.

IV.4.5 PUNTO DE EQUILIBRIO

El precio de venta sería P.V. = US\$ 12,100 T
Siendo T = Tonelada de Selenio Seco.

El costo fijo = C.F. = Inversión = US\$ 139,700

$$\begin{aligned} \text{El costo variable} &= \frac{\text{Costo de Operación}}{\text{Toneladas Producidas}} \\ &= \frac{\text{US\$ 75,513}}{18.96 \text{ Ton.}} \end{aligned}$$

El costo variable = C.V. = 3,982.8 US\$ / Ton

Costo total = C.T. = C.F. + C.V.
 = 139,700 + 3,982.8 T

En el punto de equilibrio:

Costo Total = Precio de Venta
 139,700 + 3,982.8 T = 12,100 T
 T = 17.2 Ton.

Tiempo = 0.91 años = 10.9 meses

IV.5 PERFIL ECONOMICO DEL PROYECTO DE SELENIO DESTILADO

IV.5.1 ESTIMACION DE LA INVERSION

Al tener el selenio comercial seco, presenta las condiciones requeridas para su respectivo afino por el método de destilación, por lo que se convierte en materia prima de la planta de destilación. El costo de esta planta, con contrato tipo llave en mano, asciende a U.S. \$500,000 (incluye infraestructura y equipo), los principales equipos son:

Horno de destilación

Horno de secado

Pulverizador

Retortas de destilación

La inversión total del proyecto sería considerando el costo del proyecto de

selenio comercial seco el cual asciende a U.S. \$139,700 dando una inversión total del orden de U.S.\$639,700.

IV.5.2 CAPITAL DE TRABAJO

a. MATERIA PRIMA

El selenio es propiedad de la refinería de cobre de Ilo, por lo cual no se considera costo alguno.

b. MATERIALES

El ciclo operacional se define como seis meses donde se adquieren los activos corrientes necesarios para las etapas de producción y comercialización.

DESCRIPCION	COSTO
Bolsas de PVC para embalado de Se	355
Cil. tapa a presión para embalado	1,777
Pintura	30
Cilindros transporte Se lavado	75
Bolsas transporte de Se lavado	72
Madera	2,700
Nitrógeno Líquido	5,000
Tubos para soplado	2,000
TOTAL	12,009

c. Mano de Obra

El consumo es de 8 operarios (7 de producción y 1 de mantenimiento).

Ocho operarios en 6 meses cuestan US\$ 28,000.

d. Servicios

La cantidad de energía adicional requerida en medio año sería:

DESCRIPCION	KW	COSTO US\$
Destilador de Selenio	144,000	8,640
Horno de Secado	35,448	2,127
Pulverizador	1,752	105
Iluminación	10,000	600
Proyecto Selenio comercial	68,896	4,134
TOTAL	260,096	15,606

La cantidad de agua adicional utilizada en medio año, se utiliza como agente refrigerante del selenio destilado fundido; el consumo total sería:

DESCRIPCION	M ₃	COSTO US\$
Proyecto Selenio Comercial	130	195
Proyecto Selenio Destilado	25	37
TOTAL	155	232

e. Total Capital de Trabajo (Por ciclo operacional de 6 meses)

DESCRIPCION	COSTO US\$
Materiales	12,009

Mano de Obra	28,000
Servicios	15,838
TOTAL	55,847

IV.5.3 ESTIMACION DEL COSTO DE PRODUCCION DEL PROYECTO DE SELENIO REFINADO

DESCRIPCION	COSTO ANUAL
A. Materiales	
Bolsas embalado de Selenio	711
Cilindros de acero tapa presión	3,555
Pintura	60
Cilindros transporte de Se	150
Bolsas transporte de Selenio	144
Madera	5,400
Nitrógeno Líquido	10,000
Tubos	4,000
B. Insumos	
Energía	31,212
Agua	462
Repuestos	3,000
C. Laborales	
Mano de Obra	56,000
D. Depreciación	63,970
E. Imprevistos	17,866
T O T A L	196,530

IV.5.4 INDICES DE EVALUACION ECONOMICA

Se realiza la evaluación para producir selenio destilado, pulverizado, tamizado y seco, a partir del selenio actual, con una

recuperación metalúrgica de 95.2%, valor encontrado en las pruebas piloto. Por consiguiente la producción de selenio fino 99.9% sería 18.05 Ton/año, el precio promedio de este material es de 14.0 US\$/lb. (descontando fletes, pago de comercialización, impuestos, etc.), por consiguiente el ingreso anual asciende a US\$ 555,940 y el costo anual de producción a US\$ 196,530

a. Valor Actual Neto (VAN)

Para un horizonte del proyecto de 10 años y una tasa de descuento de 12% tenemos:

$$B_t = \text{US\$ } 555,940$$

$$C_t = \text{US\$ } 196,530$$

AÑO	INVERSION	BENEFICIO NETO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.) (B.N.)
0	639,700			-639,700
1		359,410	0.8929	320,917
2		359,410	0.7972	286,522
3		359,410	0.7118	255,828
4		359,410	0.6355	228,405
5		359,410	0.5674	203,929
6		359,410	0.5066	182,077
7		359,410	0.4523	162,561
8		359,410	0.4039	145,166
9		359,410	0.3606	129,603
10		359,410	0.3220	115,730

Por consiguiente VAN = US\$ 1'391,038

b. Tasa Interna de Retorno

Calculando tenemos:

Para $i = 50\%$

AÑO	INVERSION	BENEFICIO NETO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.)(B.N.)
0	639,700			-639,700
1		359,410	0.6667	239,619
2		359,410	0.4444	159,722
3		359,410	0.2963	106,493
4		359,410	0.1975	70,983
5		359,410	0.1317	47,334
6		359,410	0.0878	31,556
7		359,410	0.0585	21,025
8		359,410	0.0390	14,017
9		359,410	0.0260	9,345
10		359,410	0.0173	6,218

Por consiguiente VAN = U.S.\$ 66,612

Calculando para $i = 60\%$

AÑO	INVERSION	BENEFICIO NETO	FACTOR DE ACTUALIZACION F.A.	VAN = (F.A.)(B.N.)
0	639,700			-639,700
1		359,410	0.6250	224,631
2		359,410	0.3906	140,386
3		359,410	0.2441	87,732
4		359,410	0.1526	54,846
5		359,410	0.0954	34,288
6		359,410	0.0596	21,421
7		359,410	0.0373	13,406
8		359,410	0.0233	8,374
9		359,410	0.0146	5,247
10		359,410	0.0091	3,271

Por consiguiente VAN = US\$ -46,098

Interpolando estos valores tenemos:

TIR = 55.9%

c. Coeficiente Beneficio Costo

Es la relación entre los beneficios actualizados y los costos actualizados.

AÑO	BENEFICIO	COSTO	FACTOR DE ACTUALIZAC. F.A.	BENEFICIO ACTUALIZADO	COSTO ACTUALIZADO
0		639,700			639,700
1	555,940	196,530	0.8929	496,399	175,482
2	555,940	196,530	0.7972	443,195	156,674
3	555,940	196,530	0.7118	395,718	139,890
4	555,940	196,530	0.6355	353,300	124,895
5	555,940	196,530	0.5674	315,440	111,511
6	555,940	196,530	0.5066	281,639	99,562
7	555,940	196,530	0.4523	251,452	88,891
8	555,940	196,530	0.4039	224,544	79,378
9	555,940	196,530	0.3606	200,472	70,869
10	555,940	196,530	0.3220	179,013	63,283

Beneficio actualizado total

= US\$ 3'141,172

Costo actualizado total

= US\$ 1'750,135

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = 1.79$$

d. Período de Recuperación

Al año 2 el beneficio acumulado actualizado asciende a la suma de US\$ 939,594, y el costo actualizado a US\$ 971,856 indicándonos que el período de recuperación es aproximadamente después del segundo año luego del arranque de la planta.

e. PUNTO DE EQUILIBRIO

Precio de venta = P.V. =

$$\frac{\text{US\$ 555,940}}{18.05 \text{ Ton}} = \text{US\$ 30,834 T}$$

Siendo T = Tonelada de Selenio Fino.

Costo fijo = C.F. = Inversión = US\$ 639,700

Costo variable = $\frac{\text{Costo de Operación}}{\text{Toneladas Producidas}}$

$$= \frac{\text{US\$ 196,530}}{18.05 \text{ Ton.}}$$

C.V. = 10,888.1 US\$ / Ton

Costo total = C.T. = C.F. + C.V.

$$= 639,700 + 10,888.1 T$$

En el punto de equilibrio:

$$\text{Costo Total} = \text{Precio de Venta}$$

$$639,700 + 10,888.1 T = 30,834 T$$

$$T = 32.1 \text{ Ton.}$$

$$\text{Tiempo} = 1.78 \text{ años} = 21.3 \text{ meses}$$

IV.6 CONCLUSIONES FINALES

- Es factible producir selenio comercial calidad 99.5% de selenio en la Refinería de Cobre de Ilo, esto duplicará el volumen total de exportación de selenio en nuestro país.
- La inversión del proyecto de selenio comercial asciende a U.S. \$139,700 y el período de recuperación es luego del primer año de producción, el montaje de planta se calcula en seis meses.
- Los índices económicos del proyecto para producir selenio comercial muestran:
 - VAN = U.S.\$ 729,881
 - TIR = 110.2%
 - Relación beneficio/costo = 2.29
- Es factible producir selenio fino calidad 99.9% de selenio, en la Refinería de Cobre de Ilo, por el proceso de destilación aumentando el valor agregado del producto.

- La inversión del proyecto de selenio fino, asciende a U.S.\$ 639,700 y el período de recuperación es aproximadamente dos años después del montaje de la planta que se calcula en nueve meses.
- Los índices económicos del proyecto para producir selenio refinado muestran:

VAN = U.S.\$ 1'391,038

TIR = 55.9%

Relación beneficio/costo = 1.79

BIBLIOGRAFIA

1. Roasting of Cooper anode slimes with high selenium Content by Flavio Begazo M. Metallurgical review of M.M.I.J.
2. Seleniun and Selenides: D.M. Chizhikow and V.P. Shchastlivyi.
3. Ingeniería Electroquímica.- C.L. Mantell.
4. The economics of selenium, seventh edition 1990. Roskill information services Ltda.
5. Compendio de proyectos de inversión. Fernando Carbajal D'angelo.
6. Manual de proyectos de desarrollo económico. Naciones Unidas.
7. Tecnología de los materiales industriales. José M. Lasheras Esteban.
8. El Perú Minero: Mario Samamé Boggio.
9. Ingeniería Básica de Refinería de Cobre de Ilo. Minero Perú.
10. Operaciones y Procesos en la metalurgia extractiva no ferrosa: La Oroya 1988.
11. Proyecto de tratamiento de lodos anódicos comerciales. Refinería de Cobre Ilo-Minero Perú.
12. Recuperación Selectiva de Selenio a partir de lodos anódicos de cobre por Ulises Palma- Dpto. de Investigaciones Metalúrgicas Centromín Perú S.A.
13. Seminario Internacional "Procesos Especiales en la Metalurgia Extractiva del Cobre".
14. IV Ciclo de Conferencias Metalúrgicas Univ. Nac.

Metalurgia Jorge Basadre Groman-Tacna "Producción de Selenio Comercial en la Refinería de Cobre de Ilo" por Edgar Cornejo Flores.

15. Memorándum de Evaluaciones Técnicas, División de Investigación y Desarrollo. Refinería de Cobre de Ilo- Minero Perú.