374.

# CORPORACION DEL COBRE
# CHILE

## DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LOS MINERALES DE COBRE

BIBLIOTECA IREN

DEPARTAMENTO MINAS Y METALURGIA

1971

# I N D I C E

## PARTE I


| | Página |
|---|---|
| Generalidades | 1 |
| Minerales de Cobre | 1 |
| Formación de los Minerales | 3 |
| Principales Yacimientos de Cobre en Chile y sus Minerales | 4 |


## PARTE II


| | |
|---|---|
| Metalurgia extractiva del Cobre | 5 |
| TRATAMIENTO DE OXIDOS (LIXIVIACION) | 6 |
| Transporte Mina a Planta de los Minerales | 6 |
| Tolva de Recepción | 6 |
| Clasificación de Tamaños de los Minerales | 7 |
| Operación de Chancado primario | 7 |
| Clasificación de Tamaños | 7 |
| Chancado secundario | 7 |
| Tolva de finos | 7 |
| LIXIVIACION | 8 |
| Química de la Lixiviación | 9 |
| Purificación de las soluciones | 9 |
| Precipitación del cobre | 9 |
| Moldeo del cobre precipitado | 11 |
| TRATAMIENTO DE SULFUROS (FLOTACION) | 12 |
| Molienda húmeda de los minerales | 13 |
| Clasificación de la Pulpa | 14 |

Página

Acondicionador de la Pulpa ..... 14

FLOTACION ..... 14

Espesador ..... 15

Filtro ..... 16

Fundición de los Concentrados de Cobre ..... 16

Refinación del Cobre Blister ..... 17

PRINCIPALES FAENAS MINERAS DE CHILE ..... Anexo

ESQUEMA N° 1 (LIXIVIACION) ..... "

ESQUEMA N° 2 (FLOTACION) ..... "

**********

# TRATAMIENTO DE LOS MINERALES DE COBRE

## PARTE I

### 1.- Generalidades.-

Desde la Antiguedad, el hombre se encontró con el problema de querer extraer los metales desde sus depósitos naturales. En nuestro continente, los incas ya elaboraban diversos metales para la confección de sus utensilios y armas, siendo el cobre, el hierro, el oro y la plata, los metales más solicitados para esos fines. Posiblemente, el cobre que utilizaban, al igual que los otros metales, era aquel que se presentaba en la naturaleza como cobre puro, que no requería una mayor refinación o bien, minerales de cobre que, por ser de altísima ley, necesitaban un leve procesamiento manual para su concentración.

Con el transcurrir del tiempo y con el agotamiento de aquellas áreas con un contenido de cobre casi puro, se fué viendo la necesidad de emplear nuevos métodos para poder extraer ese metal desde sus depósitos y desde sus minerales, ahora más complejos y de menor ley.

No sólo el cobre era objeto de estos estudios, también lo eran con más urgencia los metales preciosos como el oro, plata, etc.

Es así que, en la extracción del cobre desde sus minerales, se llega en la actualidad a procesos de concentración muy conocidos, perfeccionados y aplicados como lo son: Flotación, Lixiviación, Electrolisis, Cementación, Fundición, etc.; procesos que garantizan una concentración controlada y comercial del cobre. Al entrar en detalles se definirán esos procesos, como también otros términos técnicos empleados en la Metalurgia Extractiva.

Los minerales y sus productos derivados tienen una gran importancia en nuestra economía, en nuestro desarrollo, en la cultura y en el bienestar. El hombre, desde los albores de la Historia, ha apreciado los minerales encontrados. Hoy la sorprendente explosión científica no habría podido ser tal, de no haber contado los científicos con el Uranio, por ejemplo. Por eso mismo, es que los minerales se transforman en la materia prima más importante de un país, el cual los guarda celosamente.

### 2.- Minerales de cobre.-

Creemos conveniente definir el término "Mineral".

Entenderemos por "Mineral" a aquel elemento o combinación química formado mediante un proceso inorgánico natural.

En general, podemos estimar los minerales como los materiales que forman las rocas de la corteza terrestre, y como tales constituyen los eslabones físicos más importantes de la historia de la Tierra.

/..

La definición dice "proceso natural", de esta manera el acero, el cemento y el vidrio, aunque todos ellos derivan de minerales naturales como materia prima, no se consideran como tales ya que han sufrido un proceso de transformación por la mano del hombre. El rubí sintético, aunque es idéntico física, estructural y químicamente al rubí en su estado natural, no es un mineral. Otra limitación impuesta a los minerales es que éstos deben ser de origen inorgánico; así quedan eliminados el carbón, el aceite, el petróleo, etc. aunque se presentan naturalmente en la corteza terrestre.

Indudablemente, existen en la naturaleza minerales que no tienen valor económico por el momento, en tanto que otros presentan una gran importancia para el desarrollo de nuestra civilización en la etapa presente, debido a su contenido de elementos valiosos para el hombre.

Ahora que entendemos bien el término "mineral" podemos hablar de los minerales de cobre más importantes en Chile, ya sea por la abundancia de sus yacimientos o de acuerdo al potencial económico que significan para el país.

Aquí deberemos hacer la división entre "minerales sulfurados" (Súlfuros) y "minerales oxidados" (Oxidos).

Obviando el conocimiento de las diferencias químicas existentes entre ellos, hay que considerar el hecho que uno y otro sufren diferentes métodos de concentración.

a) Principales minerales sulfurados de cobre en Chile.-

| | |
|---|---|
| Calcosina | $Cu_2S$ |
| Covelina | $CuS$ |
| Bornita | $Cu_5FeS_4$ |
| Calcopirita | $CuFeS_2$ |

Otros súlfuros, secundarios, no frecuentes en Chile son Bournonita ($CuPbSbS_3$); Enargita ($Cu_3AsS_4$) y Estannina ($Cu_2FeSnS_4$).

b) Principales minerales oxidados de cobre en Chile.-

Se agrupan dentro de la clasificación de "minerales oxidados" de cobre a los óxidos propiamente tales, como también a los sulfatos, cloruros, silicatos; es decir, todos aquéllos que no son químicamente súlfuros ni cobre nativo (Cu°).

Podemos citar los siguientes minerales oxidados de cobre:

| | | |
|---|---|---|
| Cuprita | $Cu_20$ | (óxido rojo de cobre) |
| Tenorita | $Cu0$ | (óxido negro de cobre) |
| Crisocola | $CuSi0_3$ | $2H_20$ |
| Malaquita | $Cu_2C0_3\ (0H)_2$ | |
| Atacamita | $Cu_2Cl\ (0H)_3$ | |
| Azurita | $Cu_3(C0_3)_2(0H)_2$ | |

Cabe destacar que es más frecuente ubicar yacimientos con crisocola, malaquita, etc. que depósitos de cuprita o tenorita.

Otros óxidos son: Calcantita ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$),
Antlerita ($Cu_3SO_4(OH)_4$),
Brocantita ($Cu_4SO_4(OH)_6$), etc.

También es frecuente encontrar el término de "minerales mixtos" y son aquellos que contienen tanto de sulfuros como de óxidos.

3.- Formación de los minerales.-

Deberemos entender por "Yacimientos o Depósitos Minerales" a los lugares naturales en que se encuentran los minerales en el subsuelo, en una concentración adecuada para su explotación.

De inmediato uno podría preguntarse: ¿Cómo se formó tal mineral? ¿Por qué tiene esa forma? etc. Las respuestas son tan variadas como variados son los tipos de formación de los minerales.

Queremos aquí citar algunos tipos de génesis de los minerales, los cuales son los más frecuentes e importantes.

a) Por enfriamiento de grandes masas de mezclas magmáticas.

El magma es la masa viscosa a altas temperaturas y presiones que contiene una excesiva variedad de elementos fundidos. Estas masas, por acción de las presiones interiores y exteriores a ellas, se desplazan hacia las cercanías de la superficie terrestre, emplazándose en su posición final. Vemos salir arrojadas estas masas fundidas, por ejemplo, en las erupciones volcánicas.

Existe una teoría que dice que la profundidad de formación de las masas magmáticas en la corteza terrestre no va más allá de los 40 kms.

Mediante este tipo de génesis se originan la mayoría de los minerales componentes de las rocas eruptivas, como ser silicatos, óxidos, súlfuros y metales nativos.

b) Por reducción a metales sulfurados.-

Bajo condiciones especiales como la falta de oxígeno, minerales sulfurados ya existentes producen la precipitación de los metales de una solución en forma de súlfuros o sulfosales. De este modo se forman varios minerales ricos en metales pesados, como ser: bornita y calcosina.

c) Por cristalización y precipitación de soluciones acuosas.-

De las soluciones minerales provenientes de

vertientes termales (soluciones diluídas) pueden precipitarse los minerales por una serie de procesos, entre los cuales citaremos los siguientes:

Por desaparición del medio de solución.- El caso más sencillo es la evaporación del agua, como en los lagos salinos, en que se precipita el cloruro de sodio (NaCl, sal común).

Por la reacción de soluciones con minerales ya existentes.

Por reacción entre dos soluciones.- Por ejemplo, la malaquita se forma por reacción entre el sulfato de cobre y agua bicarbonatada.

Los procesos mencionados anteriormente son los principales referentes a la formación de los minerales.

## 4.- Principales yacimientos de cobre en Chile y sus minerales.-

A lo largo de nuestro país existen diversos tipos de yacimientos en cuanto a minerales de cobre se refieren y por lo tanto, cada yacimiento posee un cierto tipo de Planta de Concentración (Lixiviación y/o Flotación).

Como aún no hemos visto en detalle los métodos de concentración, daremos a continuación una lista de los principales yacimientos de cobre en Chile y sus principales minerales:

| | |
|---|---|
| Chuquicamata | Oxidos (Malaquita, crisocola, atacamita)<br>Sulfuros (calcosina, covelina, calcopirita) |
| El Teniente | Sulfuros (calcopirita) |
| El Salvador | Sulfuros (calcopirita) |
| Exótica | Oxidos (crisocola, atacamita) |
| Andina | Sulfuros (calcopirita) |
| Mantos Blancos | Oxidos (atacamita) |
| Sagasca | Oxidos (crisocola) |
| Disputada de Las Condes | Sulfuros (calcopirita) |

##############

# PARTE II

## METALURGIA EXTRACTIVA DEL COBRE

Creemos que con los alcances dados en las páginas anteriores el lector ya tiene una idea cabal de que existe una división entre los minerales, división que define el método de procesamiento a seguir. Por supuesto, que previamente, deberíamos referirnos al aspecto "Mina" del asunto, es decir, a la manera cómo el mineral es arrancado de sus depósitos, a la manera cómo se trabaja dentro de la mina y cómo, posteriormente, se transporta el mineral arrancado a la Planta, pero no es ésta una materia a tratar en este trabajo. Sin embargo, podemos mencionar que existen dos tipos generales de minas, las cuales pueden clasificarse de acuerdo con el método de explotación aplicado, en minas "Subterráneas" y minas "A tajo abierto". Yacimientos de cobre en Chile del tipo subterráneo son los de El Salvador, El Teniente, Andina, Cerro Negro, etc. Al tipo a tajo abierto pertenecen yacimientos tales como Chuquicamata, Exótica, Sagasca, Mantos Blancos, etc.

Ahora nos disponemos a tratar el siguiente problema básico: tenemos ya nuestros minerales arrancados de sus minas y queremos extraer desde ellos la cantidad máxima posible de cobre. Es aquí cuando deberemos hacer la división entre los minerales oxidados y sulfurados, característica que definirá el proceso extractivo del cobre a seguir.

Los minerales "óxidos" y "súlfuros" difieren bastante en cuanto a ser susceptibles a un tratamiento por uno u otro método de concentración. Las diferencias existentes tienen su origen, primordialmente, en las propiedades químicas de los minerales. Es así que en los "óxidos", el Cu que contienen es relativamente fácil de extraer con soluciones de ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) por ejemplo. Esta extracción se basa en la gran solubilidad del Cu en el ácido. En cambio, en los súlfuros esta propiedad no se repite.

Mientras tanto, diremos que los "óxidos" sufren un proceso de concentración llamado "Lixiviación" y los "sulfuros" una "Flotación".

Veremos también que, luego de sufrir los "óxidos" el proceso de "Lixiviación", las soluciones resultantes portadoras de cobre (ahora como sulfatos de Cu) siguen otros procesos destinados a retirar solamente el cobre desde ellas, procesos tales como Precipitación Electrolítica o Precipitación con Fierro (cementación), principalmente. En los súlfuros, luego de sufrir estos minerales una "Flotación", el resultado es la obtención de Cu asociado íntimamente al azufre (S). Recordemos que son "Sulfuros". Habrá entonces que eliminar el S en una etapa posterior de Fundición, donde se obtendrá Cu casi puro; más tarde vienen etapas de Refino el cual puede ser Refino Electrolítico o a Fuego.

Trataremos de explicar ahora en qué consisten los procesos a que son sometidos óxidos y súlfuros, respectivamente.

/..

## TRATAMIENTO DE OXIDOS

## LIXIVIACION

Por medio de la lixiviación, que es el ataque de los minerales de cobre con soluciones ácidas, podemos extraer desde ellos el cobre contenido resultando finalmente una fase sólida pobre en cobre (ripios) y una fase líquida rica en él (sulfato de cobre).

El orden secuencial de estas operaciones en el caso de los óxidos es el siguiente:

1) Transporte Mina a Planta de los Minerales
2) Tolva de Recepción (Tolva de Gruesos)
3) Clasificación de Tamaños de los Minerales
4) Operación de Chancado Primario
5) Clasificación de Tamaños del Mineral Chancado
6) Operaciones de Chancado Secundario
7) Tolva de Recepción del Producto Chancado (Tolva de Finos)
8) LIXIVIACION
9) Purificación de las soluciones provenientes de la Lixiviación
10) Precipitación del Cu de las soluciones (electrolisis o cementación)
11) Etapas de Moldeo del Cu precipitado (en barras, lingotes, etc.)
12) Cancha de almacenamiento
13) A Consumos

Se incluye a este trabajo, un esquema de estas operaciones secuenciales (esquema N° 1).

A continuación se describe en detalle cada uno de los procesos mencionados, como también indicando las alternativas a optar.

1) Transporte Mina a Planta de los Minerales.-

El mineral se transporta desde los lugares de extracción (minas) hasta aquella Planta donde van a ser procesados. Los medios de transporte son los más variados y van desde el simple carrito empujado por el minero, camiones, trenes, etc. hasta las rápidas Cintas Transportadoras.

2) Tolva de Recepción.-

El mineral traído desde la mina, con una ley que varía habitualmente entre 1% a 5% con Cu, es almacenado en Tolvas, las cuales permiten una fácil evacuación del mineral desde ellas. Las Tolvas son estructuras de concreto,metálicas o de madera de formas cúbicas, cilíndricas, etc. y poseen en su extremo inferior una compuerta regulable para retirar los minerales. Como éste último trae el tamaño con que fué arrancado de la mina, tamaños que van de 2" a 12", es que a esta tolva se le llama Tolva de Gruesos.

/..

3) Clasificación de Tamaño de los Minerales.-

Para atacar con ácido el cobre contenido en los óxidos hay que disminuir los tamaños originales que esos minerales traían desde la mina; se hacen entonces necesarias las operaciones de chancado. Para no alimentar las máquinas chancadoras con minerales de tamaños inferiores a los que ellas deban chancar, se procede mediante algún tipo de equipo (Harneros, Barras de acero en posición paralelas, etc.) a separar las partícular finas de mineral y alimentar las máquinas chancadoras con el material grueso resultante. La acción de separar tamaños es la que se llama "Clasificación". Las partículas finas se juntan posteriormente con el producto que entrega el chancador y viajan juntos a la próxima etapa.

4) Operación de chancado primario.-

El mineral que trae tamaños de 2" a 12" pasa por robustas máquinas que con sus mandíbulas reducen las colpas a tamaños finales del orden de 2".

5) Clasificación de tamaño.-

El producto de las máquinas chancadoras primarias y el de la clasificación anterior pasan ahora a una nueva clasificación, esta vez usando equipos más acabados pues debe separar tamaños menores que varían de 1/4 a 1".

6) Chancado Secundario.-

Los minerales de 2" provenientes del chancador primario deben reducirse a tamaños de 1/4 a 1", que son los tamaños necesarios para poder lixiviar este mineral en los estanques.

7) Tolva de finos.-

El producto del chancado secundario y el de la última clasificación se almacenan en una tolva llamada de "Finos" por contener el mineral con bajos tamaños.

Hasta aquí hemos visto cómo los "óxidos" se preparan para poder recibir las soluciones que extraerán el Cu que aquellos contienen.

Los procesos de chancados anteriores se hacen en seco, o en algunos casos si resultan demasiadas partículas finas, se humedece el mineral para que éstas se adhieran a las partículas mayores y no se escapen fuera de control, como sería la acción del viento. Esta operación de adherencia recibe el nombre de "Aglomeración".

El medio de transporte en todas las etapas anteriores es a través de Correas Transportadoras.

Veremos a continuación cómo opera la Lixiviación misma, sus tipos, su química y sus resultados.

8) LIXIVIACION.-

Es aquel proceso en el cual extraemos el cobre desde los minerales chancados aprovechando su solubilidad en algún tipo de solución. El ácido sulfúrico ($H_2SO_4$) es un buen disolvente del Cu, entre varios otros. Se utilizan soluciones diluídas de $H_2SO_4$ (soluciones no mayores de 60 gramos de ácido por litro) debido al menor costo de éste y a su eficacia como disolvente.

8 a) Lixiviación in situ.-

El mineral se lixivia sin retirarlo de la mina. Su aplicación requiere yacimientos geológicamente favorables, en que el mineral sea permeable y esté recorrido por grietas o fisuras. Además debe poseer inferiormente una base rocosa impermeable que permita recoger las soluciones enriquecidas.

8 b) Lixiviación en cancha.-

El mineral depositado en canchas impermeableas, es regado con la solución lixiviante. Es aplicable a minerales de baja ley y se obtiene una recuperación de Cu sólo algo mayor que en el caso anterior.

8 c) Lixiviación por Percolación.-

El material chancado a un tamaño que varía entre 1/4 y 1" se lixivia en grandes estanques que alcanzan, según la faena, a capacidades hasta de 12.000 tons. de mineral c/u.

8 d) Lixiviación por Agitación.-

Consiste en agitar al mineral finamente molido con el lixiviante. En este caso el mineral requiere un tamaño final inferior a 2mms.

En este resumen queremos dar a conocer la lixiviación por Percolación pues es la más empleada en las faenas mineras de Chile que contienen minerales oxidados de cobre.

En la percolación, el mineral chancado entre 1/4" y 1" es cargado a los estanques y a través de él circulan las soluciones de ácido sulfúrico, disolviendo el Cu. Los estanques poseen un piso filtrante para permitir el retiro inferior de las soluciones. Aquí la solución lixiviante actúa químicamente con los óxidos dando como resultado un líquido color azulino verdoso, es el sulfato de cobre ($CuSO_4$) producto de las reacciones entre $H_2SO_4$ y mineral. Es así cómo la solución se enriquece hasta un promedio de 40 gramos de Cu por litro, previa circulación por un estanque y traspaso o avance de soluciones a otros estanques cuando son varios. Los materiales ya lixiviados o agotados reciben el nombre de Ripios o Colas o Estériles y se llevan a botaderos.

El tiempo de lixiviación, según sea el caso, puede demorarse de unas cuantas horas a días; y con un consumo de $H_2SO_4$ de 2,5 a 5 Kgs. por Kg. de Cu fino recuperado, dependiendo del tipo de ganga o estéril que lleva el material. Una ganga calcárea (carbonatos) consume más ácido que una silícea ($SiO_2$ o cuarzo).

/..

Química de la lixiviación.-

a) Azurita, fácilmente soluble:

$$Cu_3(OH)_2\ CO_3 + 3H_2SO_4 = 3CuSO_4 + CO + 4H_2O$$

b) Malaquita, $Cu_2(OH)_2CO_3$; calcantita $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, fácilmente solubles.

c) Crisocola $CuSiO_3 \cdot 2H_2O$, soluble.

d) Cuprita, soluble:

$$Cu_2O + H_2SO_4 = CuSO_4 + Cu + H_2O$$

e) Tenorita

$$CuO + H_2SO_4 = CuSO_4 + H_2O$$

9) Purificación de las soluciones provenientes de la lixiviación.-

Tal como se dijo anteriormente, el producto de la lixiviación es sulfato de cobre ($CuSO_4$) y de allí queremos retirar el Cu que está en una concentración de 40 gramos por litro, pero previamente hay que purificar las soluciones con el fin de eliminar las impurezas que contienen tales como Cl, Al, Mn, Fe, etc. Estas impurezas impiden la obtención de Cu de excelente calidad, como también en la Electrolisis dificultan la depositación normal del Cu en los cátodos. Cabe hacer notar, que esta etapa de purificación se efectúa solamente en el caso de emplear posteriormente una precipitación electrolítica.

10) Precipitación del Cu desde las soluciones.-

Se trata aquí de retirar desde las soluciones aquel elemento que es útil, en esta caso el Cu.

Existen, para tal propósito, métodos químicos y electrolíticos de precipitación.

10 a) Métodos químicos.-

i) Con hierro; proceso llamado "Cementación"

$$CuSO_4 + Fe^\circ = Cu^\circ + FeSO_4$$

El Cu° aquí resultante recibe el nombre de Cemento de Cobre o Precipitado de Cobre y tiene una pureza que varía entre 60 y 80% de Cu; generalmente en nuestro país, se exporta este cemento o se lleva a Fundiciones.

ii) Precipitación, como CuCl, de soluciones que llevan Cloro

$$2CuSO_4 + 2NaCl + SO_2 + 2H_2O = 2CuCl + 2H_2SO_4 + Na_2SO_4$$

$$4CuCl + 2CaCO_3 = 4Cu^\circ + 2CaCl_2 + 3CO_2$$

iii) Precipitación con $SO_2$ (gas)

$$CuSO_4 + SO_2 + 2H_2O = Cu^\circ + 2H_2SO_4$$

/..

De todos estos métodos químicos de precipitación, indudablemente que la Cementación es el más difundido y empleado de ellos, principalmente en las faenas mineras de pequeña y mediana capacidad.

El método consiste en vaciar las soluciones de Sulfato de Cobre ($CuSO_4$) a estanques que están llenos de chatarra de fierro, donde se produce la reacción antes anotada. Otra modalidad más perfeccionada consiste en emplear tambores rotatorios en los cuales se introduce la chatarra y las soluciones de sulfato de cobre, agitándose contínuamente por la rotación del cilindro.

En ambos casos, el producto final conocido, como ya se dijo, como Cemento o Precipitado de Cobre, se debe secar para eliminar el agua que contiene, y son posteriormente enviadas a refinación en el país o en el extranjero, para lo cual se deben fundir previamente.

10 b) Precipitación Electrolítica.-

Este tipo de precipitación del Cu se basa en la aplicación de la corriente eléctrica, la cual descompone la solución proveniente de la lixiviación (40 gpl de Cu) y deposita el Cu puro de ella en l láminas delgadas que hacen el papel de cátodos (polo negativo). Las láminas, al irse depositando Cu, se van engrosando y pesan finalmente cerca de 70 Kgs., como en el caso de Chuquicamata.

Los cátodos resultantes (inicialmente es una lámina delgada u "hoja madre") puede llegar a un grado de pureza de 99.95% de Cu, dependiendo su menor o mayor concentración, del grado de impurezas que traían las soluciones y que no alcanzaron a ser eliminadas en la etapa anterior de Purificación.

Los ánodos de esta etapa (polos positivos) son, generalmente, una aleación de Pb, Sn y Ag.

Ambos electrodos tienen una superficie de aproximadamente 1.00 x 0.80$m^2$. La distancia que separa ambos electrodos, dentro del recipiente (batea) donde se procede a la electrodepositación, es de unas 2" a 3".

Las bateas son generalmente hechas de concreto, revestidas con Pb, con unos 3 mt. de longitud, 1 mt. de longitud, 1 mt. de ancho y 1 mt. de profundidad.

Las grandes faenas, como Chuquicamata utilizan la Electrolisis en vez de Cementación por diversos motivos, entre los cuales se encuentra el hecho que la Electrolisis da un Cu de aproximadamente 99,95%, en cambio la Cementación rara vez alcanza 85% y con un alto contenido de Fierro.

Es así entonces, que el cobre electrolítico no necesita un posterior refino, sino que los cátodos resultantes se funden y luego se moldean.

/..

11) Moldeo de cobre precipitado.-

El cobre fundido proveniente de electrolisis o de cementación se somete a un proceso de moldeo. Se obtienen así los conocidos "wire-bars" que son lingotes alargados de Cu. También se moldea en forma de "ingot-bars". Ambos con una ley de 99,95% de Cu, y que se envían a los centros de consumos.

Hemos así recorrido brevemente, en qué consiste el Tratamiento de los Oxidos. En resumen, los minerales llegados de la mina, con una le fluctuante entre 1 y 5%, son chancados para una posterior lixiviación. En los estanques de lixiviación el Cu pasa por la acción del ácido sulfúrico a $CuSO_4$. La solución resultante (aprox. 40 gpl de Cu) se somete a una Precipitación, ya sea Electrolisis o Cementación.

Los cementos de cobre, en lo general se exportan. El cobre electrolítico tiene una pureza de 99.95% de Cu y se moldea para obtener los lingotes que vemos, por ejemplo, cargar en los puertos hacia el extranjero.

En el esquema N° 1 se muestran los procesos secuenciales del Tratamiento de Oxidos. Nos parece que se aclarará mejor las dudas que se tengan al respecto.

## TRATAMIENTO DE SULFUROS

## FLOTACION

Veremos ahora cómo se concentra y refina el Cu que proviene de los minerales súlfuros. Encontraremos algunos pasos o etapas comunes a los óxidos, pero habrá una gran diferencia en la etapa de concentración, en este caso flotación en vez de lixiviación.

El orden secuencial de esta operaciones es el siguiente:

1) Transporte Mina a Planta de los Minerales.
2) Tolva de gruesos.
3) Clasificación.
4) Chancado Primario.
5) Clasificación de tamaños del Mineral Chancado.
6) Chancado Secundario.
7) Tolva de Finos.

Hasta el almacenamiento de los Finos en la Tolva, los pasos nombrados resultan muy semejantes a los analizados en el caso de los "Oxidos". De aquí para adelante se produce la diferencia entre ambos métodos.

8) Molienda húmeda de los minerales.
9) Clasificación de la Pulpa proveniente de molienda.
10) Acondicionamiento de la Pulpa.
11) FLOTACION (su producto son los concentrados de cobre)
12) Espesador
13) Filtro
14) Fundición de los concentrados de Cu (reverberos y convertidores)
15) Refinación del Cu ("electrolisis" o "a fuego")
16) Modelo
17) Almacenamiento en cancha
18) A consumos

Se encontrará al final de este trabajo un esquema (esquema N° 2) que muestra los procesos secuenciales mencionados, como también se indica en cada etapa importante los productos que van resultando.

Antes de comenzar con la etapa de Molienda (8) y con

//°

el convencimiento que las etapas 1 a 7 quedaron bien aclaradas cuando se vió el Tratamiento de Oxidos, nos referiremos al problema mismo de la Flotación, a su definición y a su "modus operandi".

La diferencia conceptual entre los procesos de "lixiviación" y de "flotación" reside en el hecho de que en el primero se efectúa una extracción química selectiva del cobre desde sus minerales oxidados, aprovechando la solubilidad de éste en una solución lixiviante adecuada. En cambio, los minerales sulfurados no son químicamente solubles en ninguna solución de tipo comercial conocida hasta la fecha, por lo cual su concentración debe efectuarse recurriendo a procedimientos físicos, como lo es la "flotación" que permiten extraer, no el cobre en sí, sino las particulas de minerales que lo contienen.

Para poder retirar desde la mena la calcopirita, bornita, u otros minerales sulfurados, necesitamos liberarlos físicamente de los otros elementos componentes del mineral. Por esta razón, se procede a una etapa de molienda fina, la cual muele el mineral proveniente del chancado secundario a un tamaño tal que el súlfuro mismo ( por ejemplo la calcopirita) quede libre de los demás componentes. Más tarde, el proceso de Flotación tomará de algún modo todas esas partículas, súlfuros de Cu, y las apartará de los estériles. El producto rico en súlfuros de Cu de esa Flotación es lo que se conoce como "Concentrados de Cu" y con leyes de 20 a 50% en Cu (según sea el tipo de súlfuro que se ha concentrado; los concentrados más ricos son los de calcosina y de menor ley los que contengan calcopirita)

Comenzaremos entonces desde la Molienda.

8) Molienda húmeda de los minerales.-

Luego del chancado secundario (1/4 a 1"), el mineral pasa a un Molino de Bolas, que es una carcaza de acero cilindrica que rota en torno a su eje de simetría horizontal. Los tamaños finales de Molienda son muy variados según la necesidad y van de algunos milímetros hasta pocos milésimos de milímetros.

Este molino lleva interiormente una carga de bolas de acero al manganeso (de aproximadamente 4" de diámetro), las cuales tienen como tarea triturar finamente el mineral cuando el molino gira alrededor de su eje horizontal.

La Molienda es húmeda, para mayor facilidad operacional. El agua se agrega de tal modo que la pulpa formada tenga una dilución de 25-30% de sólido en peso. Es decir por cada 25 a 30 unidades de peso de

//.

sólidos deberán agregarse 70 a 75 unidades en peso de agua.

Como se pretende disgregar con la molienda las partículas sulfuradas de Cu de los demás componentes estériles de los minerales el grado de molienda debe ser tal que asegure la completa liberación de súlfuro de Cu. Frecuentemente, el grado de molienda se mide en % bajo 200 mallas (200 #), es decir se refiere al % de partículas menores que 0,074 mm. Es frecuente moler a 50-70% bajo 200 mallas, por ejemplo.

Generalmente, al Molino de Bolas antecede uno de Barras, con lo cual se consigue una disminución controlada de los tamaños de las partículas de mineral.

9) Clasificación de la Pulpa.-

La pulpa del molino va a un nuevo clasificador; ésta es ya un equipo muy perfeccionado pues debe clasificar tamaños muy finos. Aquellas partículas demasiado grandes las devuelve al molino para volverse a moler y las más pequeñas siguen su curso hacia la Flotación. Algunos tipos de clasificadores son los de Rastras, los de Gusano y los hidrociclones.

10) Acondicionador de la Pulpa.-

Es un estanque cilíndrico donde se prepara la pulpa para que entre a Flotación agregándole ciertos reactivos químicos. El acondicionador agita o revuelve mecánicamente la pulpa con los reactivos.

11) FLOTACION.-

La Flotación es un proceso de concentración que permite recuperar desde una mena compuesta por diferentes minerales, aquéllos que nos son útiles.

El proceso está basado en ciertas propiedades de características físicas y químicas que presentan algunos minerales, como es el caso de los minerales sulfurados de cobre, que permiten la adherencia de partículas de ellos a burbujas de aire cuando el mineral se mezcla en una pulpa de agua, y se hace burbujear aire desde el fondo del recipiente.

De esta forma, la concentración por flotación es posible si en una mena se encuentran presentes minerales que poseen las propiedades antes anotadas conjuntamente con otros que no las tienen. En este último caso, se encuentran la gran mayoría de los minerales estériles, o sin valor económico, que acompañan frecuentemente a los súlfuros de cobre.

Por lo tanto, de acuerdo a estas diferencias en pro-

//.

piedades, las partículas de súlfuros, en una pulpa acuosa adecuada, ascenderán adheridas a las burbujas de aire hacia la superficie del recipiente, del cual se pueden extraer fácilmente, en tanto que las partículas de estériles permanecerán en el interior de la batea.

De esta manera, el proceso de flotación efectúa una extracción física selectiva de las partículas mineralizadas de cobre, separándolas de la ganga que acompaña al mineral. En este caso, para separar el cobre de su combinación química con el Azufre, Fierro, etc. es preciso utilizar con posterioridad al proceso de flotación, métodos de Fundición.

Es necesario agregar reactivos químicos a la pulpa para acentuar las propiedades ya mencionadas que presentan los súlfuros y estériles. También se agregan compuestos que sirven paradar a la burbuja formada una mayor consistencia y evitar que cuando ésta llegue a la superficie se reviente, con lo cual dejaría caer al fondo del recipiente los súlfuros que había recogido en su ascensión. Es el caso del aceite de pino.

Los equipos utilizados para los fines de flotación se llaman Celdas; son,a "grosso modo", cajas cúbicas (metálicas o de madera especial) con volúmenes que promedian 1 m3. Estas celdas poseen un agitador que permite revolver mecánicamente la pulpa e introducir, en el fondo de la celda, el aire destinado a la formación de burbujas.

Cuando las burbujas alcanzan la superficie, ya están impregnadas de súlfuros de cobre, mientras que los estériles permanecen por debajo de ellas. Se procede a retirar la espuma formada mediante paletas rotatorias que las celdas poseen en su borde superior. Esta espuma contiene los concentrados de cobre, mientras que los estériles o relaves van al botadero. Los concentrados tienen una ley en Cu que varía entre 20 y 50%,dependiendo de los tipos de súlfuros que contengan.

El ordenamiento de los súlfuros de cobre de mayor a menor contenido de Cu es el siguiente: Calcosina, Covelina, Bornita y Calcopirita.

12) <u>Espesador</u>.-

Los concentrados de cobre (súlfuros), producidos por la flotación, tienen un gran contenido de agua, pues han sido retirados desde una pulpa, por lo cual es necesario secarlos. Se dirigen entonces a un gran depósito cilíndrico, llamado Espesador. En este estanque, las partículas de sólidos caen al fondo de él, mientras que el agua que traen consigo desde las celdas de flotación queda por encima de ellas. Los espesadores poseen inferiormente una descarga cónica,lugar por el cual se extraen los súlfuros con una hume-

//.

dad de 50%. Una especie de aleta rotatoria inferior, dentro del espesador, se encarga de arrastrar los concentrados hacia esa descarga.

13) Filtro.-

Esta es una unidad que precede al espesador. El filtro retira desde los concentrados la humedad que traian del espesador, hasta lograr un contenido final de sólo 8 a 10% de agua.

Hasta el momento, el problema se ha reducido a aislar y concentrar las partículas de súlfuros, por ejemplo; calcopirita (CuFeS)2, pero no hemos logrado retirar el Cu puro desde ellos.

A semejanza con la lixiviación, cuya soluciones de sulfato de cobre (CuS04) sufrían una precipitación para obtener Cu puro, existe en la flotación la Fundición, la cual eliminará el azufre y otros elementos (Fe, etc.) que contienen los minerales sulfurados.

14) Fundición de los Concentrados de Cobre.-

En esta etapa, mediante el paso de los concentrados a través de los hornos Reverberos y Convertidores, se elimina el azufre (S), como también el Fe y otros elementos no deseados en el cobre.

En la actualidad, dada la calidad de los concentrados de Cu de El Teniente se está tratando de obviar el paso através de los hornos de reverberos llevando el material directamente a los Convertidores.

Los concentrados (20-50% Cu) siguen los siguientes procesos pirometalúrgicos:

14 a) Horno Reverbero.-

Los concentrados, adecuadamente mezclados con fundentes, son sometidos a fusión directa con el fin de eliminar el Fe y el material estéril. Se forman, debido a la fusión, dos capas viscosas,una encima de la otra. La capa superior, de menor densidad, es la Escoria y contiene las impurezas. La escoria es retirada y llevada a botaderos.

Bajo la escoria yace el Eje o Mata, que es el material rico en cobre y con una ley de 40 a 55% Cu.

14 b) Convertidores.-

El Eje o Mata, al contacto con enormes volúmenes de aire inyectado al conver-

//.

tidor, produce una serie de reacciones químicas muy calóricas, tanto que se forma una poderosa llama. Las reacciones traen como consecuencia una oxidación del S como también del Fe residual. El S se escapa en forma de $SO_2$ (gas), que se aprovecha, generalmente, en la fabricación de ácido sulfúrico ($H_2SO_4$).

Resulta así un Cu bastante puro, con una ley no mayor de 99.5% en Cu, pasando posteriormente a Refinación, o se vende como tal.

El cobre resultante del convertidor recibe el nombre de Cobre Blister.

A su vez, el Fe se escorifica. La escoria formada en los convertidores, debido a su alta ley en Cu, retorna al horno reverbero.

15) Refinación del Cobre Blister.-

El Blister resultante de la Fundición, tiene ahora dos alternativas de refinación.

15 a) Refinación a Fuego.-

El Cu Blister sufre en la refinación a fuego una fusión, realizada con el fin de eliminar las últimas impurezas y obtener finalmente una ley de 99.90 a 99.92% Cu. Posteriormente, el Cu refinado se moldea en la forma tradicional.

15 b) Refinación Electrolítica.-

Con el Cu Blister se confeccionan ánodos (polos positivos), los cuales son destinados a las celdas electrolíticas. Aquí, por medio del proceso electrolítico, se disuelven los ánodos y el Cu de ellos se deposita en una lámina delgada o plancha de cobre, el cual hace las veces de cátodo (polo negativo). Luego que la recuperación de cobre ha finalizado, se extraen los cátodos, se funden y moldean. El Cu resulta enriquecido con una ley de 99.96% Cu.

De la Refinería, a Fuego o Electrolítica, y luego del moldeo, resultan los conocidos Wire-Bars, con leyes muy cercanas al 99.95% Cu. Estos productos se destinan a diversos centros nacionales y al extranjero para el consumo industrial.

No podemos dejar de destacar que en algunos casos tales como: Chuquicamata, El Salvador, El Teniente y Andina, hay otro elemento

//.

muy apreciado en los minerales de cobre. Es el Molibdeno. Este elemento también se concentra por Flotación;para ello se desvían los concentrados de cobre hacia la Planta de Molibdeno. Una vez retirado desde los concentrados de cobre el Molibdeno, ellos vuelven a la Planta de Súlfuros y retoman los pasos ya vistos. Los concentrados de Molibdeno son destinados a los centros de consumo.

Agregamos, finalmente, que pueden existir dentro de cada esquema de tratamiento de los minerales una serie de subprocesos menores, pero lo esencial es lo mencionado en este trabajo.

Cualquier faena metalúrgica del cobre emplea, parcial o totalmente, los procesos indicados, finalizando en su producto con mayor o menor grado de concentraciones o pureza como lo es el Cobre, que es el gran pilar de nuestra economía nacional.

Adjunto a este trabajo se incluyen dos esquemas (Lixiviación y Flotación) que permitirán visualizar los procesos mencionados anteriormente.

Se incluye también una lista de las principales faenas mineras de Chile, indicando en cada una de ellas los métodos de tratamiento de sus minerales.

BIBLIOTECA IREN

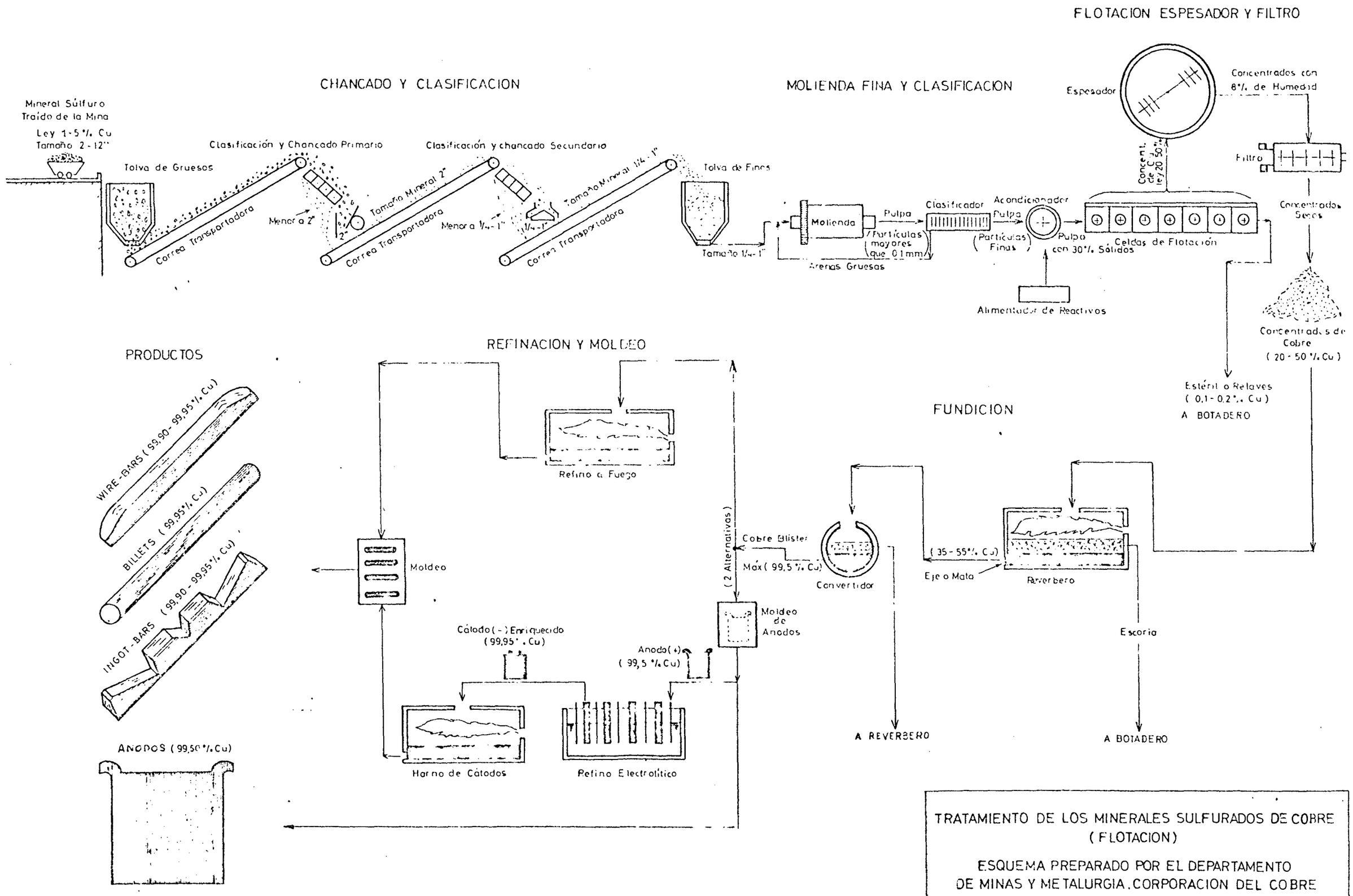
----------o 0 o----------

Santiago, Julio de 1971.-.

## PRINCIPALES FAENAS MINERAS DE CHILE

| FAENA | METODO DE TRATAMIENTO |
|---|---|
| Chuquicamata (óxidos y súlfuros) | Lixiviación por percolación<br>Flotación<br>Fundición<br>Refinación electrolítica |
| El Teniente (súlfuros) | Flotación<br>Fundición<br>Refinación a fuego |
| El Salvador (súlfuros) | Flotación<br>Fundición<br>Ref. electrolítica |
| Exótica (óxidos) | Lixiviación por percolación<br>Precipitación electrolítica |
| Andina (súlfuros) | Flotación |
| Mantos Blancos (óxidos) | Lixiviación por percolación<br>Precipitación con $SO_2$<br>Peletización<br>Fundición |
| Sagasca (óxidos) | Lixiviación por percolación |
| Disputada (súlfuros) | Flotación<br>Fundición * |
| El Soldado (súlfuro) | Flotación<br>Fundición* |
| Carolina de Michilla (súlfuros) | Flotación<br>Lixiviación por agitación<br>Cementación |
| La Africana (súlfuros) | Flotación |

* Disputada y El Soldado poseen una fundición común.

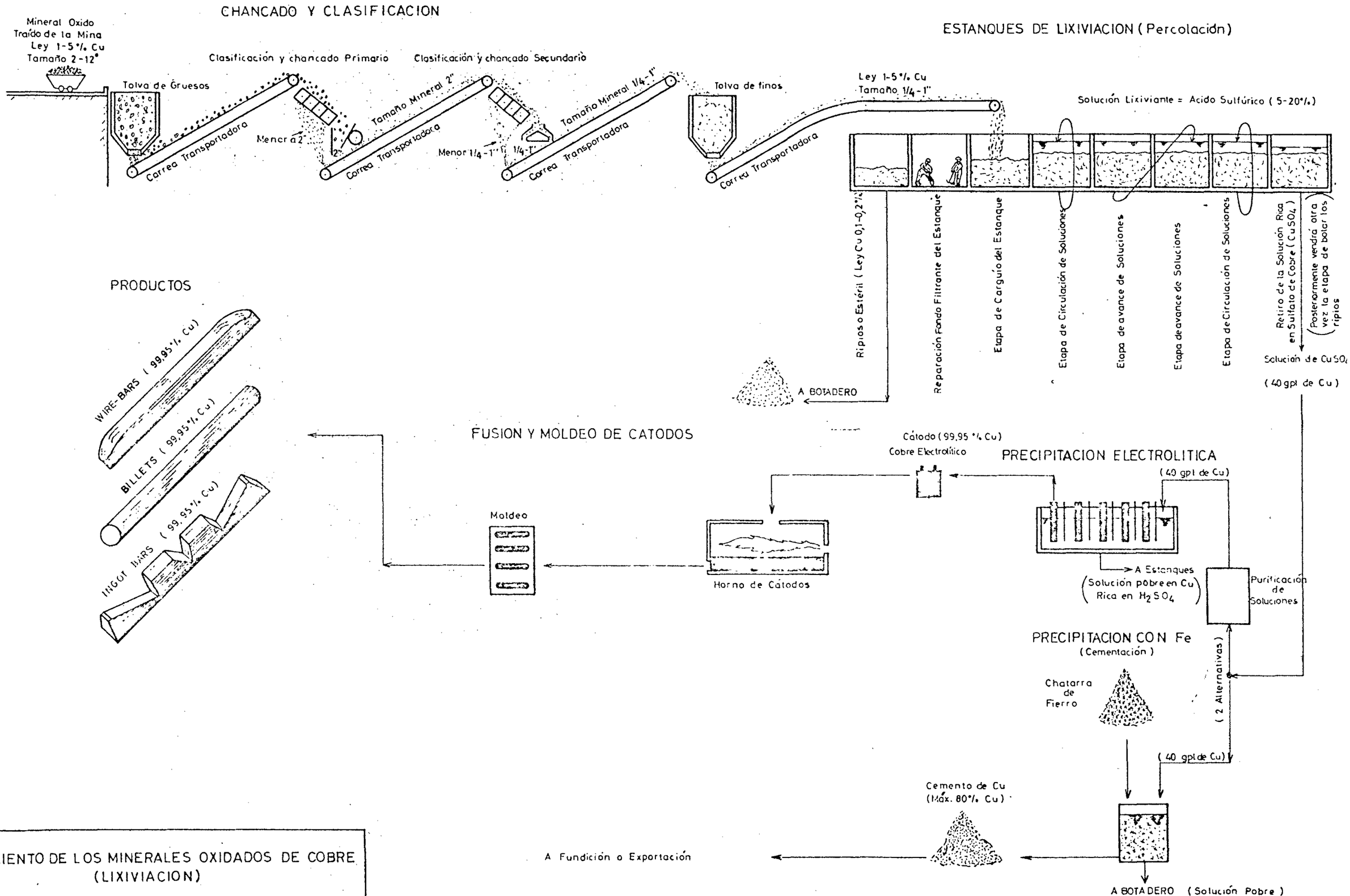



TRATAMIENTO DE LOS MINERALES SULFURADOS DE COBRE
( FLOTACION )

ESQUEMA PREPARADO POR EL DEPARTAMENTO
DE MINAS Y METALURGIA. CORPORACION DEL COBRE

DIBUJO: ARNALDO VELASQUEZ N. FEBRERO - 1970

ESQUEMA Nº 2




TRATAMIENTO DE LOS MINERALES OXIDADOS DE COBRE
(LIXIVIACION)

ESQUEMA PREPARADO POR EL DEPARTAMENTO
DE MINAS Y METALURGIA. CORPORACION DEL COBRE

DIBUJO: ARNALDO VELASQUEZ N — FEBRERO 1970

ESQUEMA Nº 1