PROCESOS ELECTRO OBTENCION DE COBRE EW

Roberto E. Alfaro Cortes
robertoalfaroc@hotmail.com

Prop:Roberto Alfaro Cortes

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CELDAS ELECTROLÍTICAS

Introducción

La electroobtención es el proceso final en la producción de cobre catódico de alta pureza. En la electroobtención el cobre metálico se recupera desde una solución de sulfato de cobre ácido ($CuSO_4$) mediante el proceso de electrólisis sumergiendo dos electrodos (cátodo y ánodo) en una solución electrolítica de cobre.

Solución electrolítica: Es una solución líquida que tiene la propiedad de permitir el paso de la corriente eléctrica. En la planta la solución electrolítica es una mezcla de agua, ácido sulfúrico y sulfato de cobre.

Electrodos: Son planchas metálicas que se usan para hacer pasar la corriente eléctrica por el electrolito. El cátodo inicial (carga negativa), es una plancha de acero inoxidable 316L y el ánodo (carga positiva), es una plancha rolada en caliente de plomo-calcio-estaño.

Para realizar la descomposición de la solución de sulfato de cobre, la corriente eléctrica continua (CC) cierra un circuito; ingresa por el ánodo, atraviesa la solución electrolítica y sale por el cátodo.

Descripción del proceso de celdas electrolíticas

El electrolito rico proveniente de las etapas de extracción por solventes es filtrado y acondicionado para el proceso de electroobtención; cuando la concentración de cobre es de 38,6 g/l es enviado a las celdas de electroobtención en la casa de celdas.

Véase la *Sección 2.1.2, Diagramas de flujo, 500-M7-2-DF2, Diagrama de flujo de celdas electrolíticas.*

Las celdas electrolíticas están dispuestas en una sola sección que consta de dos filas de 50 celdas cada una, haciendo total de 100 celdas, cada celda contiene 67 ánodos y 66 cátodos.

Las celdas en cada fila están conectadas eléctricamente en serie y los cátodos individuales están conectados en paralelo en cada celda.

El electrolito a EW se bombea desde el tanque de recirculación de electrolito (TK-400-036, lado del electrolito a EW), hacia la línea de alimentación a celdas de electroobtención, por las bombas (PP-400-046, 047 y 048). El flujo total de electrolito a las celdas es de 1 530 m^3/h aproximadamente.

La mayor parte del flujo de electrolito (90% aproximadamente), es bombeado directamente a las celdas, que constituye un flujo nominal de 1 350 m^3/h; la otra parte es derivada al intercambiador de calor (HX-400-001, electrolito a EW /agua caliente) para alcanzar una temperatura entre 47 ^oC a 50 ^oC, con un flujo nominal de 150 m^3/h aproximadamente.

El electrolito se distribuye uniformemente a través de las celdas electrolíticas y sobre las caras de los cátodos gracias al marco distribuidor de electrolito.

Las celdas tienen un drenaje en la parte inferior (tubería de 3") y otro en la pared del lado de descarga de la celda (tubería de 2"), hacia el cajón de drenaje general de la casa de celdas; en la parte superior de las celdas se tiene un soporte para las pasarelas y varios soportes de la barra colectora. Cada una de las celdas tiene una válvula manual de 3" de ingreso de electrolito, correspondiéndole a cada celda un flujo de 15 m^3/h aproximadamente.

A medida que el electrolito fluye a través de la celda, el cobre se deposita electrolíticamente sobre la plancha madre (cátodo permanente), y el oxígeno es liberado en forma de gas en el ánodo. El cobre se acumula sobre la superficie de la plancha madre por un período de 7 días. Al final del ciclo de deposición de 7 días, las planchas madre se cosechan (se retiran) de las celdas y se llevan a la máquina despegadora de cátodos, donde se separan las láminas de cobre catódico de las planchas madre. Estas planchas madre se reparan o pulen si es necesario y se retornan a las celdas de electroobtención para iniciar un nuevo ciclo de deposición de 7 días.

Después de que el electrolito fluye a través de la celda, rebosa en el extremo opuesto de la admisión de alimentación a través de un cajón de rebose. El electrolito descargado (electrolito pobre), es recolectado desde el cajón de rebose por medio de una manguera flexible, a un colector común, para luego fluir por gravedad al tanque de recirculación de electrolito (TK-400-036, lado del electrolito pobre).

La energía de corriente continua (DC) para las celdas, es suministrada por dos rectificadores /transformadores (RF-500-971 y 972), que operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (EW-500-001 a 100).

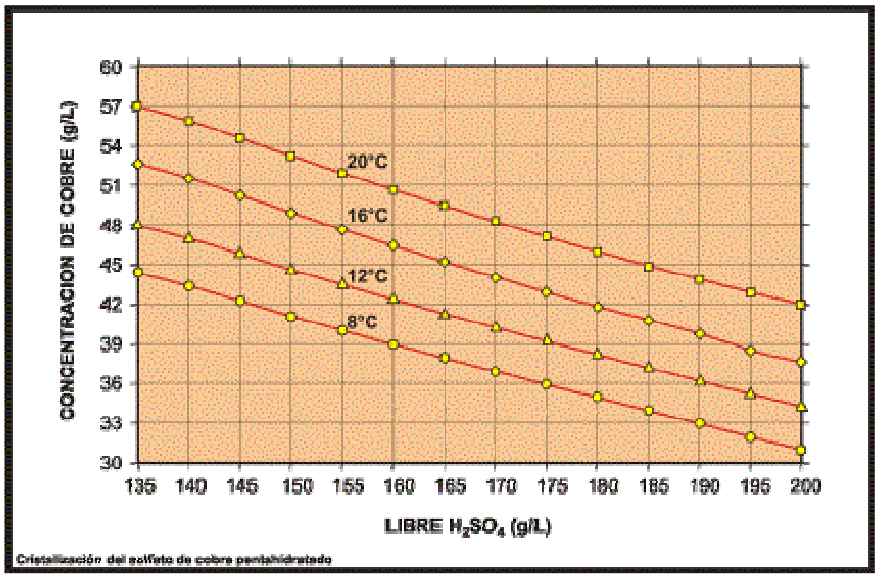
Prop:Roberto Alfaro Cortes

La capacidad de corriente continua de cada rectificador es de 232,5 V y 24 053 A de corriente continua, los dos rectificadores podrán entregar una máximo de corriente de 48 106 A, hacia la casa de celdas de electroobtención.
El voltaje normal por celda es de 2 voltios para una densidad de corriente de 280 A/m^2, con una eficiencia de corriente del 92% para obtener una calidad de cobre 99,999% de pureza. Los cátodos son conectados a la barra de contacto con carga negativa y los ánodos son conectados a la barra de contacto con carga positiva.
La eficiencia de corriente diseñada es de 92%, la densidad de corriente nominal es de 280 A/m^2, aunque el diseño permite un máximo de 344 A/m^2.
Un rectificador de respaldo (RF-500-973) está en espera, dispuesto para suministrar energía en caso que los rectificadores principales pierdan energía eléctrica. El rectificador de emergencia tiene una capacidad de salida de 205 V a 723 A de corriente continua.
Durante un corte de energía o una condición de parada parcial, el rectificador de respaldo suministrará una corriente baja a las celdas de electroobtención, para impedir que los ánodos pierdan su capa de óxido de plomo. Si no hay una pequeña carga lenta fluyendo a través del ánodo, el recubrimiento de óxido de plomo se desprenderá, lo cual hace que el ánodo se transforme en pasivo. Si esto sucede, la electroobtención de cobre de los cátodos adyacentes se detiene hasta que la superficie del ánodo sea reactivada.
Los ánodos comienzan a degradarse inmediatamente después de que se pierde la energía. Para impedir la degradación, el sistema de energía de respaldo se pone en marcha automáticamente. El generador entrega la energía necesaria para el rectificador de respaldo que proporciona suministro a las celdas de electroobtención durante el corte de energía principal.
Consulte la *Sección 2.2.7, Diagramas P&ID, 500-D-001 Celdas electrolíticas.*

El electrolito a EW
A medida que el electrolito a EW fluye a través de las celdas de electroobtención, en el proceso se producen varios cambios:
· El contenido de cobre del electrolito disminuye a medida que el cobre se deposita en los cátodos.
· La concentración de ácido sulfúrico aumenta, debido a la descomposición del H_2O en el ánodo.
· La temperatura del electrolito aumenta, debido al calor producido por la resistencia y otras ineficiencias.
La **Tabla 2.1.1** resume el flujo del electrolito, la temperatura, la concentración de ácido sulfúrico y el contenido de cobre en base a las condiciones de diseño de la operación de electroobtención.
Tabla 2.1.1 Condiciones de diseño de la casa de celdas de EW

Soluciones	Flujo m^3/h	Temperatura ºC	Cobre g/L	H_2SO_4 g/L
Electrolito rico al tanque de recirculación (lado del electrolito a EW), desde el intercambiador de calor electrolito rico /electrolito pobre, vía los filtros de electrolito.	325,5	43,1	48,5	158,3
Electrolito hacia celdas de EW.	1 500	47,8	38,6	171
Electrolito pobre desde celdas de EW.	1 500	48,3	36	175
Electrolito pobre desde el tanque de recirculación (lado del electrolito pobre) hacia el intercambiador de calor electrolito rico/ electrolito pobre.	330,2	48,3	36	175

Además, la **Figura 2.1.1** ilustra un gráfico de las temperaturas de cristalización del sulfato de cobre en el electrolito para diversas concentraciones de cobre y ácido.
Figura 2.1.1 Cristalización del sulfato de cobre pentahidratado



Electroquímica del cobre

En la electroobtención el cobre metálico se recupera por electrólisis a partir de una solución altamente ácida de sulfato de cobre ($CuSO_4$). El proceso de electrólisis se logra haciendo pasar una corriente eléctrica continua entre los electrodos (ánodos inertes pero conductivos, y cátodos), los cuales están sumergidos en un electrolito rico en cobre ($CuSO_4$, H_2SO_4 y H_2O). La **Figura 2.1.2** ilustra el proceso de electrólisis en una celda de electroobtención.
El ánodo lleva carga eléctrica positiva y el cátodo, carga eléctrica negativa. Los iones de cobre (Cu^{++}) son reducidos, es decir neutralizados en el cátodo por los electrones que fluyen por él, depositándose una capa de cobre metálico sobre la superficie de la plancha madre de acero inoxidable (cátodo permanente).
La reacción de deposición electrolítica en el cátodo es:

$$Cu^{+2} + 2\,e^- \rightarrow Cu^0$$

Donde (e^-) denota un solo electrón, necesitándose dos para neutralizar un ión Cu^{++}. Sin embargo, la reacción en el ánodo es completamente diferente. El gas oxígeno se forma en el ánodo inerte por la descomposición del agua. Los iones sulfato (SO_4^-) se neutralizan en el ánodo formando inmediatamente ácido sulfúrico (H_2SO_4) y oxígeno (O_2) según las reacciones siguientes:

$$H_2O \rightarrow \tfrac{1}{2}\,O_2 + 2\,H^+ + 2\,e^-$$

Reacción global

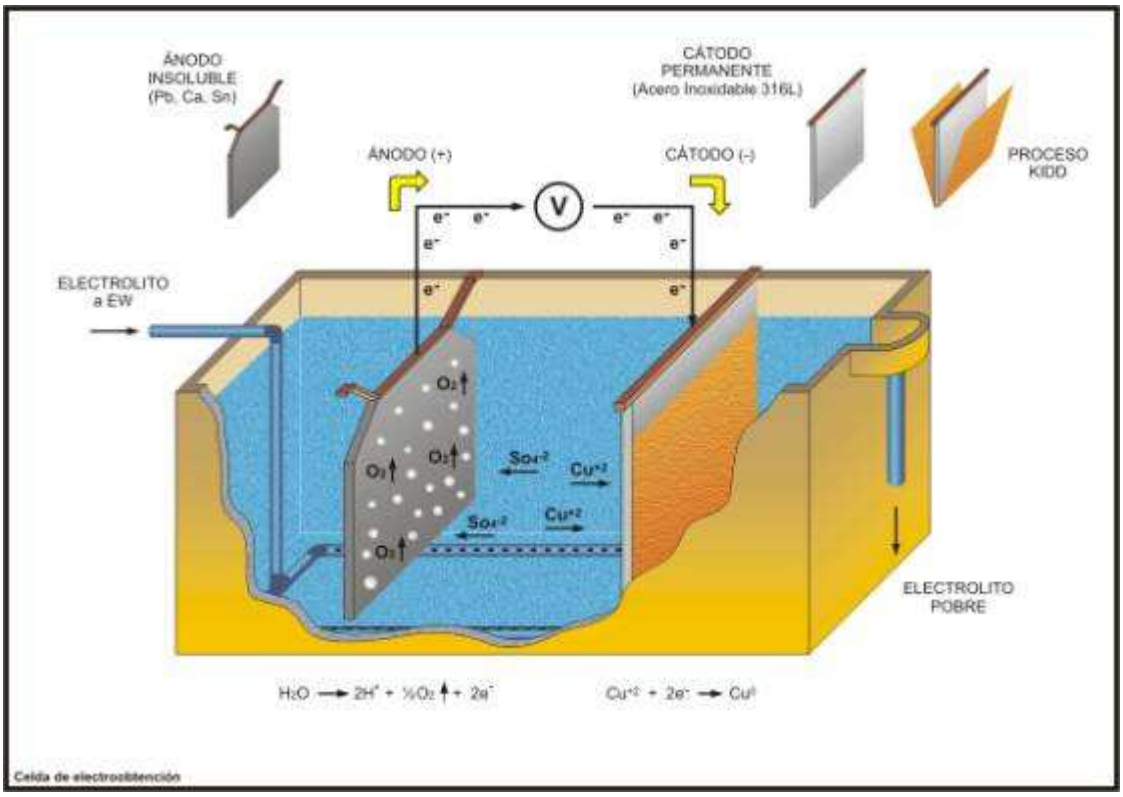
$$Cu^{+2} + H_2O \rightarrow Cu^0 + \tfrac{1}{2}\,O_2 + 2\,H^+$$

El oxígeno producido en la reacción anterior escapa como gas en el ánodo. La reacción neta para una celda es:

$$\mathbf{Cu\,SO_4 + H_2O \rightarrow Cu^0 + \tfrac{1}{2}\,O_2 + H_2SO_4}$$

Prop:Roberto Alfaro Cortes

La ley de la fisicoquímica que gobierna la electrólisis es la Ley de Faraday, la cual se enuncia de la siguiente manera:
"*Cada 96 500 coulombios que pasan por una celda electrolítica alteran químicamente un equivalente-gramo de material en cada electrodo*".
Un equivalente-gramo (eq-gr), se define como el peso atómico de un elemento dividido por su número de valencia (estado de oxidación). En el caso del cobre, un equivalente-gramo es igual a 63,54/2 = 31,77 gramos.
Un coulombio se define como la cantidad de electricidad que pasa a través de conductores en un segundo cuando una corriente de un amperio está fluyendo. El coulombio también se denomina amperio-segundo.
La *Ley de Faraday* se usa para calcular teóricamente la cantidad de cobre que se depositaría en una celda de electroobtención. Sin embargo, en la realidad el paso de toda la corriente, no deposita el cobre deseado. Por ejemplo, algunos iones H^+ pueden ser neutralizados en el cátodo usando energía eléctrica. Algo de energía eléctrica también es consumida por la resistencia del electrolito al paso de la corriente y por otros factores. El resultado es que toda la energía disponible para la celda de electroobtención no se usa exclusivamente para depositar cobre sobre el cátodo.



Prop:Roberto Alfaro Cortes

La relación entre la deposición real y la deposición teórica es conocida como eficiencia de corriente. Debido a las fugas o pérdidas de corriente, redisolución del cobre depositado y reacciones electroquímicas secundarias, el cobre realmente depositado es siempre menor que el cobre teórico calculado por la *Ley de Faraday*.

$$\text{Eficiencia de corriente} = \frac{\text{Cobre real depositado}}{\text{Cobre calculado teóricamente}} \times 100$$

La densidad de corriente es una medida de la intensidad de aplicación de energía eléctrica por unidad de área y está expresada en A/m^2. Se calcula dividiendo los amperios que fluyen a través de una celda, entre el área de la superficie de deposición catódica en la celda. La densidad de corriente se utiliza para expresar las ventajas y desventajas entre una producción alta y rápida sin mucha calidad y una producción baja aunque más lenta, pero con excelente calidad de depósito de cobre catódico.
Además de la tensión de descomposición deben vencerse la resistencia del electrolito, resistencia de los conductores eléctricos y contactos, y aplicar una sobretensión anódica y catódica para hacer posible el proceso. El voltaje total de celda para electroobtención está en el rango de 2 a 2,5 v, comparado a solamente 0,2 – 0,25 v para la refinación del cobre.
La **Tabla 2.1.2**, muestra el voltaje en una celda de electroobtención.

Tabla 2.1.2 Voltaje total en una celda de electroobtención

	Voltaje
Potencial de descomposición para producir Cu^0	0,9
Sobrevoltaje anódico	0,6
Caída de voltaje en el electrolito (V = I x R)	0,05
Potencial en el cátodo debido al orgánico y a la polarización	0,05
Conexiones en el ánodo y cátodo, busbar (barra colectora) y pérdidas por conducción	0,5
VOLTAJE TOTAL POR CELDA	2,1V

La energía eléctrica por tonelada de cobre producido es directamente proporcional al voltaje de celda, es decir:

$$\text{KW/Ton de Cátodo} = \frac{V \times 8{,}4 \times 10^5 \ (\text{A- hora} - \text{Ton}^{-1})}{1000 \times CE/100}$$

Donde

V= Voltaje
CE = Eficiencia de corriente

La energía consumida en un proceso de electroobtención es aproximadamente 10 veces la energía consumida en un proceso de electrorefinación, es decir, 200 a 2 500 kWh/t de energía DC (2 100 a 2 700 Kwh de energía AC contabilizado por rectificación).

Calidad de la plancha de cobre
El control de las condiciones del electrolito es importante para mantener la calidad de los depósitos de cobre y para asegurar la eficiencia de la electroobtención. No se debe permitir que el contenido de cobre en el electrolito pobre caiga por debajo de 30 a 32 g/L. Debajo de ésta concentración, la movilidad

reducida de los iones de cobre en la región del cátodo conllevaría a depósitos blandos o esponjosos y de una calidad baja.
Un depósito de cobre de densidad pareja es importante porque:

· Cualquier porosidad o irregularidad de la superficie aumenta la posibilidad de que el óxido de plomo se adhiera a la cara de depósito del cátodo.

· Una vez iniciada la deposición del cobre, la nodulación en el cátodo puede acelerarse, pudiendo llegar a hacer contacto con el ánodo. Esto produciría una mayor contaminación del cátodo y reduciría la eficiencia de corriente.

· La porosidad de los depósitos del cátodo, puede llevar a la *oclusión* del electrolito en el depósito (electrolito atrapado en los poros), que no puede eliminarse con lavado. El electrolito atrapado contribuye con impurezas (hierro y sulfato) al producto final. Similarmente, una irregularidad excesiva de la superficie puede interferir con un lavado adecuado, lo que lleva a que el electrolito permanezca en la superficie del cátodo lavado.

Las impurezas del cátodo que preocupan más son el plomo, hierro, cloruro y el sulfato (en orden decreciente de importancia). El nivel de sulfato del electrolito (la suma de sulfato de cobre y ácido sulfúrico), también es importante debido a su efecto sobre la resistividad del electrolito. Una resistividad alta (es decir, debido al bajo contenido de sulfato), dá como resultado un voltaje más alto en la celda y un mayor consumo de energía. También es importante que la temperatura del electrolito se mantenga en aproximadamente 45 ºC a 50 ºC, debido al significativo efecto de la temperatura sobre la resistividad del electrolito junto con la movilidad de los iones.
Los niveles de impureza del electrolito deben ser controlados estrictamente. Las impurezas tales como el cloruro, hierro y manganeso, son muy perjudiciales para la electroobtención de cobre. Dependiendo de otras condiciones del electrolito, los cloruros en el electrolito pueden atacar el ánodo de plomo, causar la picadura de las planchas madre de acero inoxidable, quedar atrapados en el depósito de cobre y producir la generación del gas de cloro. La concentración de cloruro en el electrolito debe mantenerse bajo (30 mg/L aproximadamente).
El contenido de hierro en el electrolito causa la pérdida del rendimiento de corriente debido a la reacción electrolítica parasitaria:
El Fe^{+2} es fácilmente oxidado en Fe^{+3} en el circuito de electroobtención, de forma que la electrólisis parasitaria se repite indefinidamente. El contenido de hierro (total) en el electrolito se debe controlar a una concentración menor a 1,5 g/L aproximadamente.
Un exceso de manganeso en el electrolito en celdas puede provocar la formación de iones permanganato, al reducirse los iones manganato:
El permanganato es un fuerte oxidante que:

· Ataca la capa de óxido de plomo del ánodo, provocando una aceleración en la oxidación del ánodo y por lo tanto la contaminación del electrolito por los descascaramientos de los ánodos.

· Ataca la fase orgánica de extracción por solventes, llevando a una rápida degradación y destrucción del extractante.

· El contenido de hierro en el electrolito debe mantenerse al menos 20 veces más alto que el de manganeso. Esto asegurará que la unión Fe^{3+} / Fe^{2+} estará sobre la unión manganato /permanganato, suprimiendo la formación de permanganato. A pesar de que la electrólisis Fe^{3+} / Fe^{2+} es parasitaria y causa pérdida de rendimiento de corriente, es menos perjudicial que la formación de permanganato. El control de las impurezas del electrolito se realiza en la operación de extracción por solventes, otra forma de control es mediante la purga de electrolito pobre hacia el mezclador decantador E-1. Sin embargo, las operaciones de electroobtención se ven afectadas principalmente por la calidad de este control.

Condiciones óptimas de la electroobtención
Las condiciones de operación garantizan:
· Larga vida útil del cátodo.

· Eficiencia operacional.
· Flexibilidad operacional.
· Facilidad en el desmonte del depósito de cobre.
· Pureza del depósito.

Las condiciones óptimas son las siguientes:

· **Contenido de cobre (35/40 g/L)**

La planta jamás debe operar con un contenido de cobre menor a 30 g/L en el electrolito a EW. Si el contenido baja de este valor la calidad de cobre catódico se deteriora y en consecuencia habrá un mayor contenido de azufre en el depósito, esto es causado por un cambio en la distribución y tamaño de los cristales depositados.

La presencia de más de 50 g/L, puede provocar la formación de cristales de cobre en las tuberías.

· **Contenido de ácido (150/180 g/L)**

Si la concentración sobrepasa los 180 g/L, la corrosión del ánodo es mayor, y es necesario incrementar el agua en electrolito o reducir la adición de ácido.

Si hay menos de 150 g/L, el cobre catódico depositado será blando y difícil de desmontar. También se reduce la conductividad del electrolito y por consiguiente aumenta el costo de la electricidad.

· **Concentración de cobalto (100/150ppm, 150 si el contenido de manganeso en el electrolito es alto)**

Si la concentración de cobalto baja de 90 ppm, el sobrepotencial del ánodo aumenta. Se reduce la resistencia a la corrosión del ánodo de plomo y por lo tanto su vida útil.

· **Cloruro (menos de 30 ppm)**

Si el nivel de cloruro sobrepasa los 30 ppm, se debe revisar el nivel de cloruro en la solución de electrolito y PLS. A esta concentración se incrementa la posibilidad de picaduras del acero inoxidable del cátodo, por lo tanto el despegado de cobre se hace difícil.

También se ven afectados el depósito y la orientación de los cristales de cobre depositados, resultando un gránulo más grueso y con ello un aumento del nivel de impurezas en el depósito.

La presencia de 100 ppm tendrá como consecuencia una extensa corrosión por picadura. El daño a las planchas es permanente y es necesario pulirlas.

· **Orgánico (< 1ppm)**

El orgánico que esté presente en el electrolito en casa de celdas, puede afectar la distribución del depósito de los cristales de cobre por lo que resulta un depósito quebradizo con mayor cantidad de impurezas.

El orgánico se adhiere en la planchas de acero inoxidable y el resultado será una quemadura orgánica que produce una pobre presencia de cátodo de cobre.

· **Hierro (< 1,5g/L)**

El nivel de operación de hierro en el electrolito depende de la cantidad de hierro transferida a través de la extracción por solventes.

En la medida que aumenta el hierro en el electrolito, disminuye la eficiencia de corriente y en cierto grado mejora la calidad del cátodo. Sin embargo, si el cátodo es de baja calidad el hierro será atrapado, lo que lleva a un aumento de las impurezas del depósito.

· **Flujo a las celdas**

Mantener siempre el caudal del electrolito dentro de la celda tan alto como sea posible (de acuerdo al diseño 15 m^3 /h/celda como mínimo).

Si la solución baja más allá de dicho nivel, la calidad del depósito catódico se puede deteriorar y hay más posibilidad de que el electrolito disminuya a menos de 30 g/L.

· **Reactivo Guartec (150 a 250 g/ tonelada de cobre depositado)**

Las tasas de adición son específicas para cada planta. Cuando se agrega electrolito, este reactivo puede ayudar como agente suavizante para lograr un buen depósito de cobre a alta densidad de corriente y a baja temperatura del electrolito.

· **Densidad de corriente (280 A/m^2)**

El rango de operación depende del cobre que llega a casa de celdas. Se varía cambiando la potencia del rectificador. A baja densidad de corriente (100 a 200 A/m^2), se producen otros efectos en la calidad del cátodo (por ejemplo, baja temperatura, bajo contenido de cobre, etc.). El nivel óptimo es de 280 A/$m^{2.}$.

A niveles de corriente de 280 a 300 A/m^2, se puede obtener cobre catódico de buena calidad en condiciones constantes de operación.

· **Temperatura de la celda (45–50ºC)**

Es importante mantener la temperatura tan constante como sea posible para minimizar el desprendimiento de óxido de plomo del ánodo (45 +/- 2ºC). Una temperatura menor de 30ºC, puede dar como resultado un grano más grueso y por consiguiente, un cobre catódico de menor calidad.

Una temperatura de más de 50ºC puede degradar el orgánico en el proceso de extracción por solventes.

Principales problemas en la electroobtención

· **Corrosión**

u **Por cloruros**

Cuando el nivel de cloruro en el electrolito es alto, se puede producir una acumulación de gas de cloruro sobre la línea de solución. Este cloruro es transportado en el vapor ácido que se desprende al liberarse oxígeno en el ánodo. Este vapor se deposita en el cátodo y acumula suficiente cantidad de cloruro como para empezar el proceso de corrosión.

Los niveles de cloruro sólo se pueden controlar reduciendo la cantidad de cloruro que entra al electrolito. Las principales vías son:

< El solvente donde se han acumulado iones cloruro.

< El agua que se usa en la mezcla del electrolito, la que podría contener niveles elevados de cloruro.

u **Anódica**

Si la plancha catódica se llegara a colocar en una celda como ánodo, la corrosión por disolución anódica que se produciría sería extremadamente grave. Si el error se corrige en las primeras etapas de disolución, será difícil desmontar el cobre depositado en el centro de la plancha, no así el cobre depositado en el perímetro de la plancha.

Si el error no se detecta a tiempo, el electrodo de acero inoxidable se corroe totalmente. En este caso, será necesario sacarlo y lo más probable, es que haya que desecharlo.

u **Galvánica**

La corrosión se produce debido al acoplamiento del par galvánico de los electrodos de acero inoxidable y plomo, puede ser grave si no se pone el suficiente cuidado (se deposita el cobre sobre el ánodo y se disuelve el cátodo). El acero inoxidable es anódico para el plomo y si hay acoplamiento galvánico se corroe.

Mientras no haya energía, las celdas de electroobtención deben mantenerse en circuito abierto. Para crear un circuito abierto los cátodos de las celdas se levantan de los contactos. Debajo de las áreas de contacto de la barra de suspensión se colocan bloques de madera que aíslan las celdas y por lo tanto esa sección. La grúa entonces con cuidado deposita los cátodos sobre la madera.

u **Por contactos**

Si no se realiza la limpieza adecuada y si los procedimientos de operación que se usan son incorrectos, el enchapado de cobre de la barra de suspensión se corroe.

Si el contacto de cobre está totalmente corroído y el acero inoxidable expuesto, rápidamente se formará una capa de óxido de acero no conductor. Debido al aumento de la resistencia; por lo descrito anteriormente, la corriente circulante será de bajo nivel, por lo tanto los depósitos de cobre serán más delgados.

Los procedimientos para alargar el periodo de vida de la barra de contacto son los siguientes:

< Lavado constante y efectivo de los contactos y barras de suspensión para eliminar el ácido residual y sales electrolíticas que se forman a partir de las salpicaduras y derrames de electrolito.

< Reducción de cortocircuitos que causan calentamiento de la barra de suspensión y mayor incidencia de corrosión.

< Retiro efectivo de niebla ácida. El ácido en forma de neblina se puede acumular en la región de contacto y causar corrosión.

Es importante destacar que la barra de alimentación y la barra de suspensión se corroerán por igual. Los efectos de la corrosión son mayores en la región de contacto debido al aumento de reacciones que causa la corrosión (en grietas*)*.
Evitar en lo posible:
< Ánodos o cátodos doblados, que al ser instalados en las celdas, rayan el ánodo produciendo el desprendimiento de la capa de óxido de plomo. Todas las placas deben estar derechas antes de entrar en las celdas.
< El manganeso atrapado en el electrolito, genera MnO_2 en el ánodo. El MnO_2 produce desprendimiento de la capa conductora de PbO_2. Cuando se da esta situación hay que sacar los ánodos y limpiarlos para generar una nueva capa de PbO_2.
< Si la temperatura de electrolito baja súbitamente, se produce desprendimiento de la capa de PbO_2 y contaminación. Se debe mantener una temperatura estable dentro de la celda de electroobtención.
< La causa más probable es el uso de altas densidades de corriente que rápidamente forma una capa de PbO_2 y un elevado flujo de circulación de electrolito que produce mayor agitación entre los electrodos. Es necesario limpiar los ánodos y la celda periódicamente.
< La interrupción de la electrólisis, debido al desmontaje sin corriente, a las fallas de energía, etc perturban la capa de PbO_2 y la posibilidad de desprendimiento. Para no interrumpir la electrólisis, en el proceso de electroobtención se recomienda procesar un tercio de los cátodos de la celda y hacerlo mientras hay corriente en el electrolito.
< Si se eleva los niveles de ácido sulfúrico en el electrolito, aumenta la generación de la capa de PbO_2 y la posibilidad de desprendimiento.
Para estabilizar la capa de PbO_2 se le agrega sulfato de cobalto $CoSO_4$ $7H_2O$ al electrolito. La experiencia en las plantas de electroobtención a través del mundo recomienda que para mantener la pureza del depósito catódico, los niveles de cobalto (Co) en el electrolito deben estar entre 100 a 200 ppm.

· **Nivel de electrolito en la celda**

El electrolito que está operando a baja temperatura (menos de 35ºC), puede dar lugar a la formación de sulfato de cobre cristalizado, especialmente en la parte superior del nivel de electrolito.

· **Alineamiento**

u **Efectos del espacio de separación entre electrodos**

Si la distancia es mayor que los valores especificados de separación entre electrodos, se forma una capa delgada, tipo cero ó galleta, que cuando se procesa la placa no se despega.
Si la distancia es menor, en la zona de alta densidad de corriente se forma una capa de crecimiento acordado o nodular. Se prefiere un cobre catódico liso.

u **Paralelismo**

Un factor imprescindible para conseguir la efectiva distribución de la corriente y reducir la formación de cortocircuitos, es que el cátodo quede bien alineado entre dos ánodos.

· **Orgánico**

La solución orgánica es el reactivo que se usa para extraer cobre de una solución. La planta de SX/EW, está diseñada para eliminar el arrastre de orgánico hacia la casa de celdas de electroobtención. El método para eliminar el orgánico es por la filtración del electrolito.

· **Cortocircuitos**

El cortocircuito es la condición física que causa que la corriente fluya entre los electrodos sin tomar parte en la reacción electrolítica.
Típicamente el cortocircuito causa:
u Disminución del voltaje en las celdas.
u Disminución de la producción de cobre debido a una reducción en la eficiencia de corriente.
u Calentamiento de las barras de suspensión de los electrodos debido a la altas corrientes que circulan, originadas por la baja resistencia de cortocircuito. El calentamiento aumenta la corrosión y en casos extremos las barras se derriten.
u La plancha anódica se calienta y al calentarse aumenta la producción de óxido de plomo y el riesgo de desprendimiento.

Los cortocircuitos por crecimientos son causados por la inclusión en el depósito catódico de una partícula conductora. La partícula atrae mas carga y así crece más rápidamente que el depósito catódico que está alrededor.

Desborre de celdas

El desborre se realiza para la limpieza de la celda y para evacuar el lodo del plomo que se acumula en el fondo.

La acumulación de plomo se debe al desprendimiento de capas de óxido de plomo, estas *cáscaras de oxido* de plomo contaminan el cobre catódico.

Los pasos a seguir en el retiro de lodo de plomo son los siguientes:

· En primer lugar se bajará la corriente en las celdas hasta que su valor sea cero amperios.

· Luego se colocará el marco cortocircuitador, el cual puentea las celdas que se tienen que limpiar.

· En seguida se subirá la corriente en las celdas.

· La grúa puente deberá retirar los cátodos y posteriormente los ánodos, para lo cual se tendrá que quitar las cascarillas de óxido de plomo que puedan haber.

· Luego se tendrá que retirar las bolas de polipropileno que existen en cada celda para recuperar electrolito hacia el sistema y luego el drenaje inferior.

· A continuación se abrirá el drenaje lateral de la celda para recuperar electrolito y luego el drenaje inferior hacia el sistema.

· Una vez drenado el electrolito, la celda será limpiada haciendo uso del agua de lavado y herramientas para retiro del lodo de plomo.

· Luego que la celda este limpia, se colocará el tapón de drenaje lateral e inferior de la celda y se permitirá el ingreso de electrolito; posteriormente se añadirán las bolas de polipropileno retiradas y con la grúa puente se colocarán los ánodos y los cátodos. Antes de retirar el marco cortocircuitador se bajará la corriente de las celdas y una vez retirado se restablecerá la corriente.

Equipos asociados al proceso de celdas electrolíticas

El **Diagrama 2.1.8,** muestra la disposición de equipos en el área de celdas electrolíticas.

Los equipos asociados al proceso son:

· Casa de celdas.

· Celda de electroobtención.

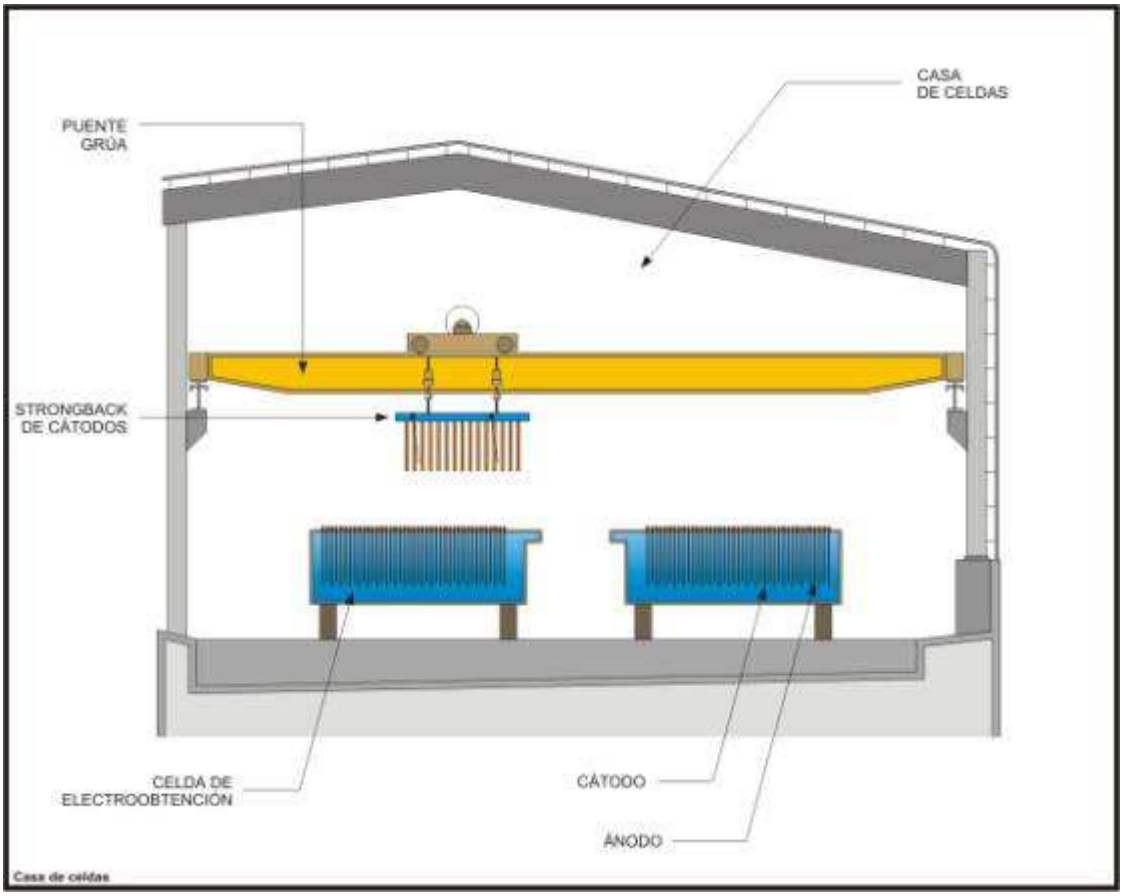
· Marco distribuidor de electrolito.

· Marco cortocircuitador.

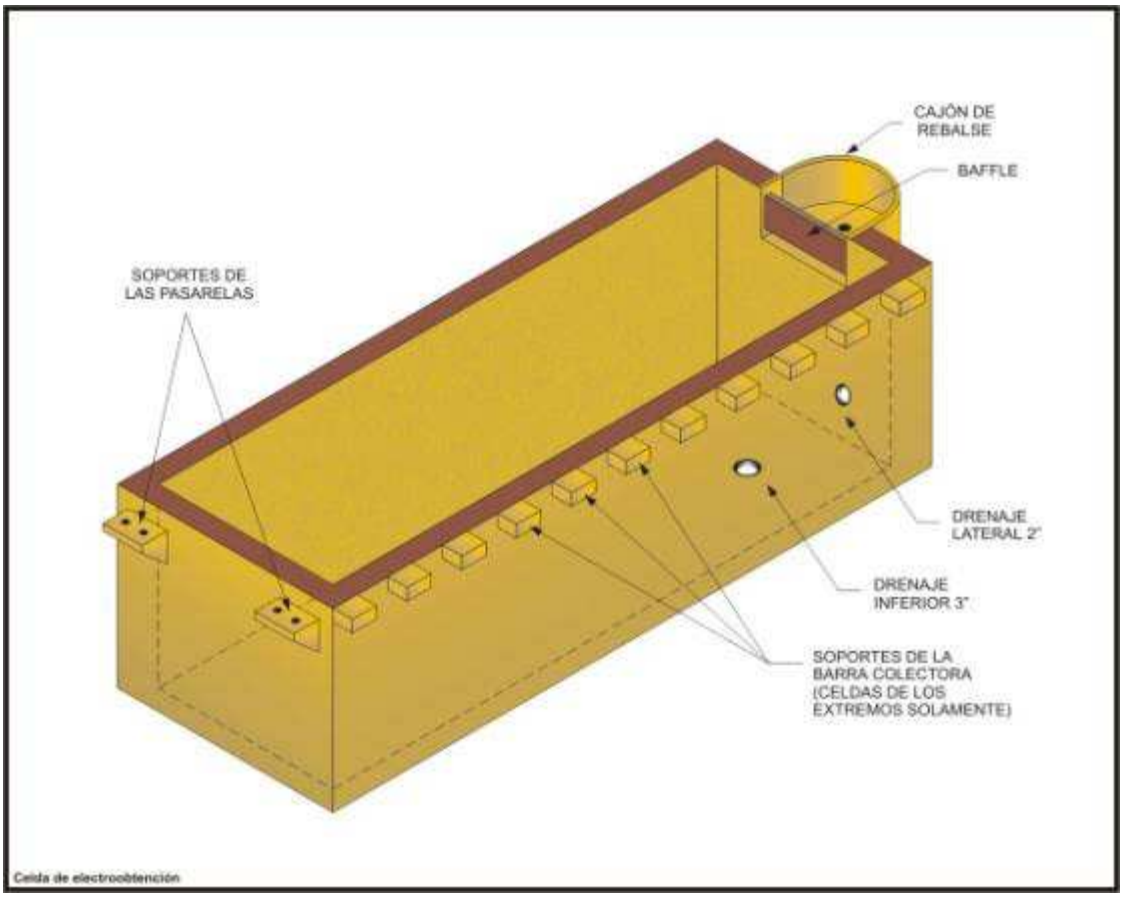
· **Casa de celdas**

La casa de celdas de electroobtención contiene 100 celdas individuales monolíticas de concreto polímero con cajones de rebalse integrales (cada celda con 67 ánodos y 66 cátodos). Los ánodos son planchas roladas en caliente y hechas de una aleación de plomo, calcio y estaño. La plancha está unida a una barra de contacto de cobre. Cada ánodo está equipado con espaciadores de plástico tipo ala delta. Las planchas madre están hechas de acero inoxidable 316 L con un área para la deposición de 1 m^2 ; tienen aisladores de plástico en los bordes laterales y una barra de cobre sólido soldada en la parte superior, el borde inferior de la plancha esta libre.

Figura 2.1.3 Casa de celdas



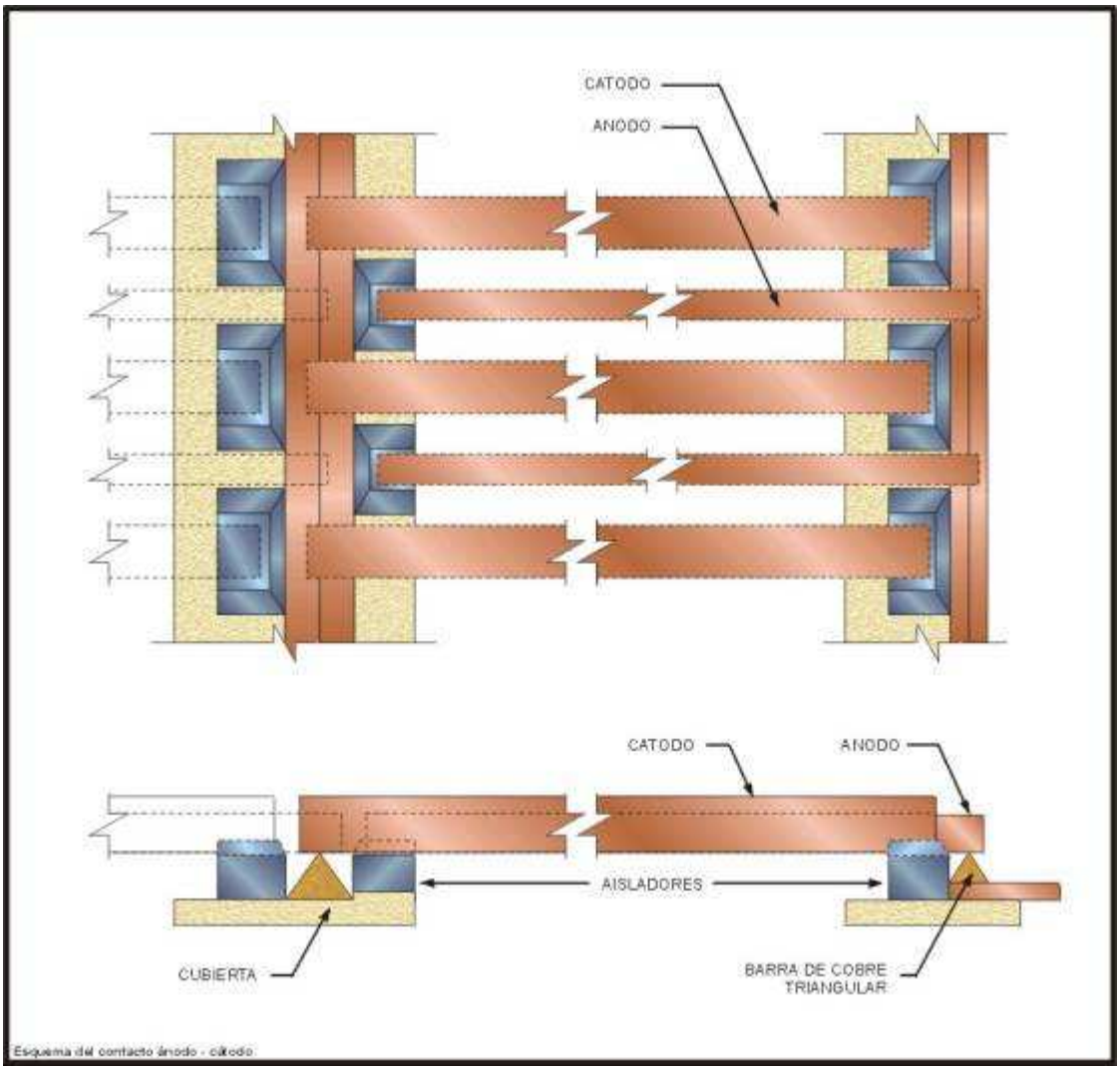
· **Celda de electroobtención**
Las celdas están construidas en concreto polímero (resina de viniliéster con agregado de arena de sílice inerte). Cada una está equipada con un tapón de drenaje ubicado en el fondo y en la parte lateral de la celda (en un extremo de la celda). En la Figura 2.1.4, se ilustra una celda de electroobtención.
Figura 2.1.4 Celda de electroobtención



Periódicamente, las celdas deben drenarse y limpiarse del óxido de plomo que haya decantado al fondo de la celda. Antes de que pueda limpiarse una celda debe cortocircuitarse usando el *marco cortocircuitador* *(Veáse la tarea del operador 4.4.5 retiro de lodo de plomo de las celdas)*. Una vez que se ha cortado la energía eléctrica de la celda, los electrodos son retirados y la solución se drena desde la celda, luego se saca el lodo de plomo del fondo y se pone en depósitos de limpieza. Después de que la celda está limpia, se instalan nuevamente los cátodos y ánodos y se llena la celda con electrolito. Una vez que la celda está llena, se retira el *marco cortocircuitador* y la electricidad fluye nuevamente a través de la celda.

Un extremo del electrodo hace contacto con la barra triangular de cobre mientras el otro extremo descansa sobre un material no conductor colocado entre las ranuras de cobre triangulares. La **Figura 2.1.5,** ilustra la relación del contacto eléctrico de los ánodos y cátodos en la barra de cobre.

Figura 2.1.5 Esquema del contacto ánodo-cátodo



Esquema del contacto ánodo - cátodo

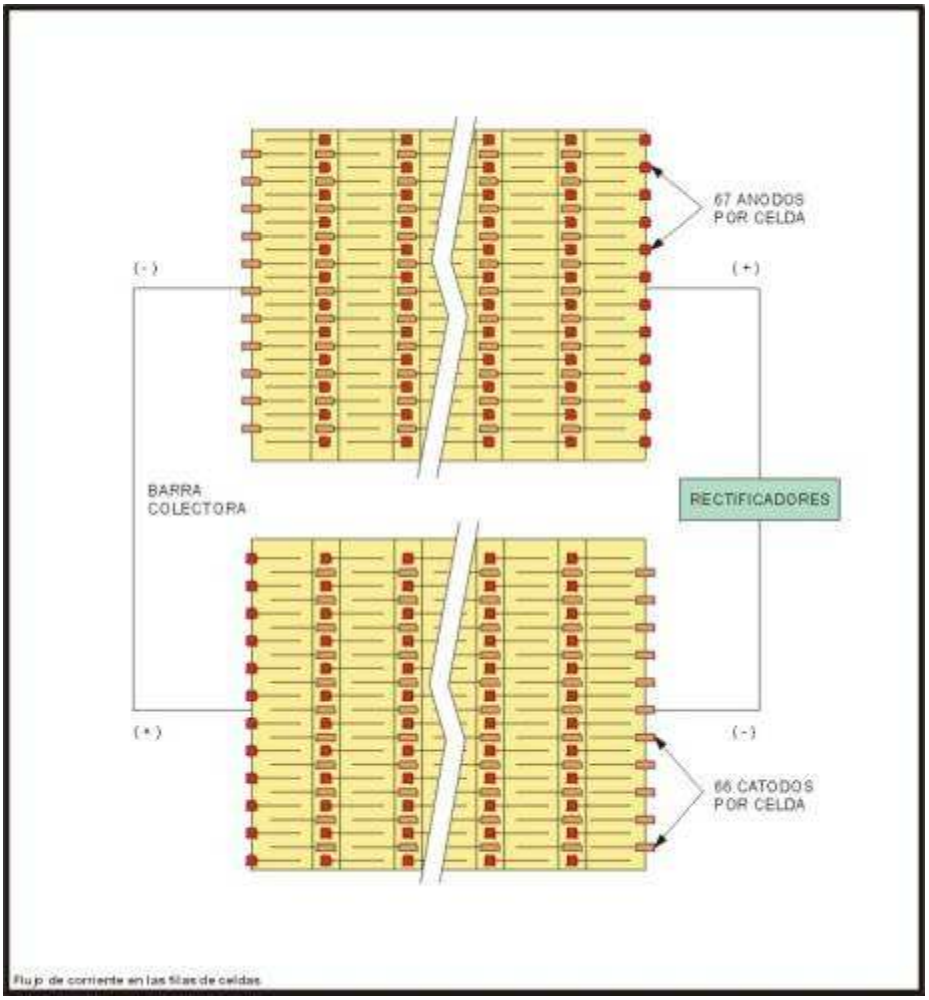
u **Flujo de corriente en las filas de las celdas**

Entre los cátodos y ánodos de cada celda fluye corriente continua del rectificador, la misma corriente fluye de una celda a otra a través de todo el circuito.

El flujo de corriente va desde los rectificadores hacia los ánodos, a través del electrolito, y sigue hasta llegar al cátodo. En la **Figura 2.1.5,** se ilustra el sistema de aislamiento eléctrico de un extremo de cada electrodo al terminar cerca de la barra conductora de la celda opuesta. Las barras de suspensión de los ánodos y cátodos puentean las celdas. Sin embargo, cada barra de suspensión descansa sobre un soporte aislado, esto fuerza a la corriente a que fluya a través del electrolito entre los electrodos.

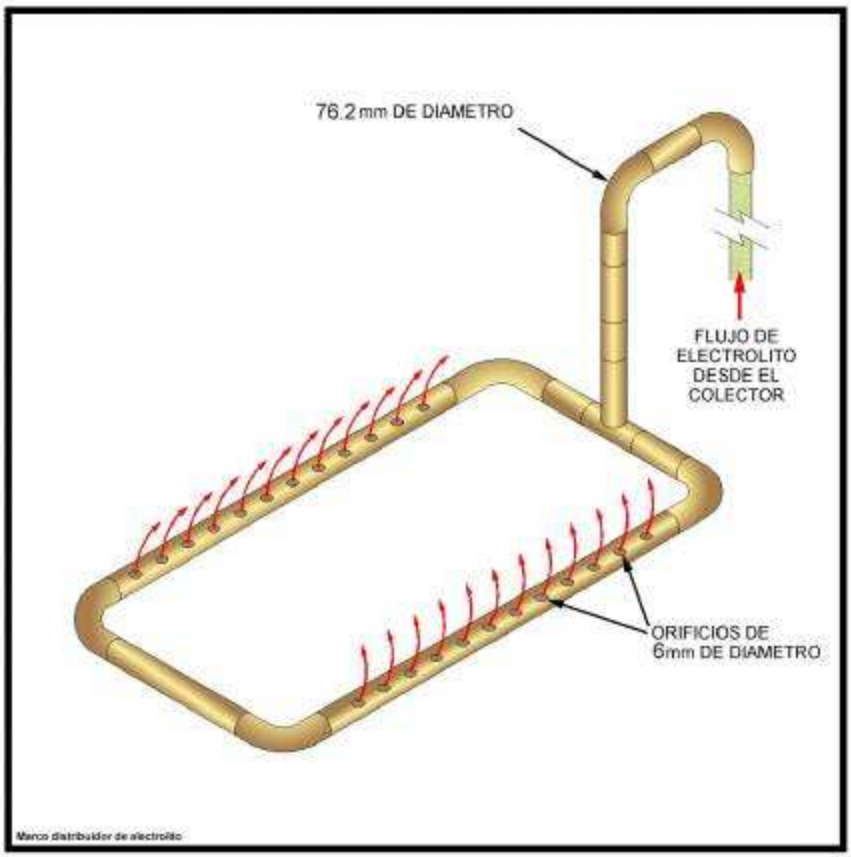
La **Figura 2.1.6** ilustra el flujo de la corriente eléctrica dentro de un grupo de celdas.

Figura 2.1.6 Flujo de corriente en las filas de las celdas



Flujo de corriente en las filas de celdas

A medida que el electrolito fluye a través de la celda, el cobre del electrolito se deposita en el cátodo por electrolisis, lo cual libera oxígeno en el ánodo. Se deja que se acumule cobre en las planchas madre
las y se despegan los depósitos
se devuelven a las celdas de
nte el ciclo de siete días.



Marco distribuidor de electrolito

ría de 3" de forma rectangular,
en cada costado de la sección
electrolito sobre las caras de los
ctada al marco distribuidor para

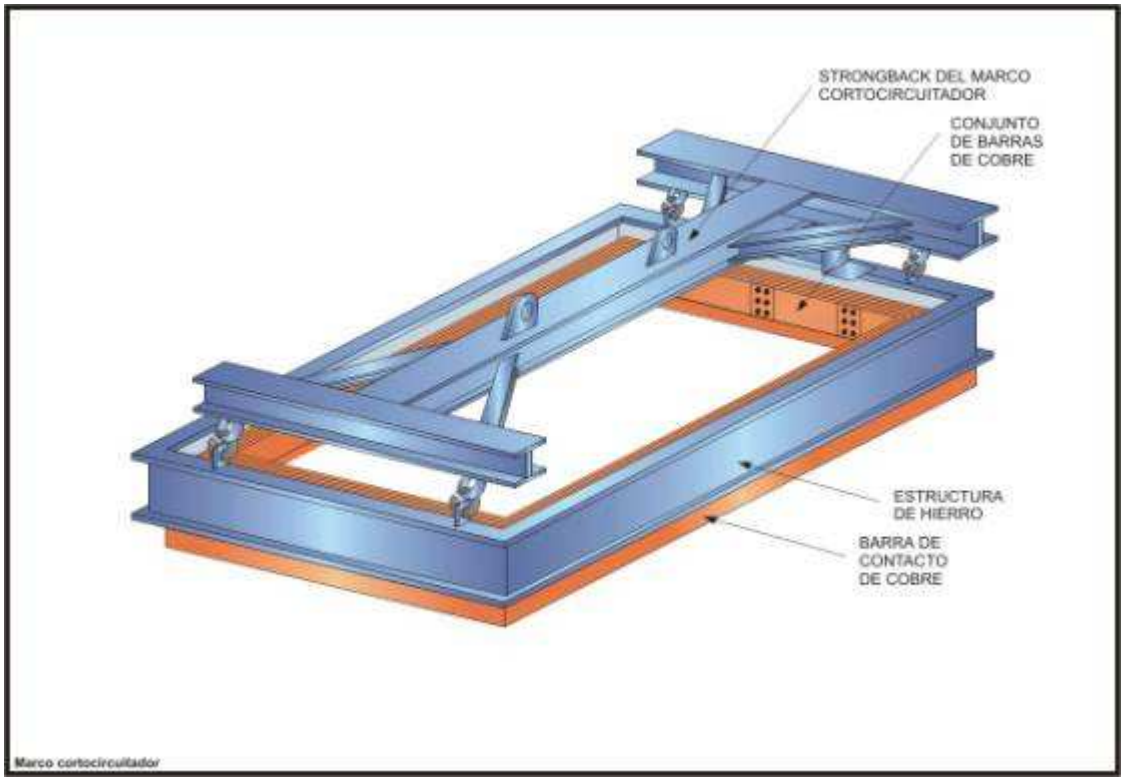
· **Marco cortocircuitador**

Para realizar la limpieza de las celdas es necesario hacer un puente en el paso de la corriente eléctrica sobre las celdas que van a ser limpiadas, para ello se utiliza un marco cortocircuitador.

El marco puentea las celdas y está compuesto de una estructura de acero unida a unas barras de cobre, lo cual permite un buen contacto entre las celdas puenteadas.

La **Figura 2.1.8**, ilustra un marco cortocircuitador.

Figura 2.1.8 Marco cortocircuitador



Descripción del proceso de captación de niebla ácida

Para minimizar el problema de la niebla ácida, la solución de electrolito en las celdas es cubierta con dos capas de bolas supresoras de niebla ácida (bolitas de polipropileno de 20 mm de diámetro). Las bolas flotan sobre el electrolito fomentando la coalescencia de las diminutas gotas de electrolito. Adicionalmente una solución supresora de niebla ácida (FC-1100) es adicionada manualmente en el circuito de electrolito de avance hacia celdas (en el lado del electrolito a EW del tanque de recirculación de electrolito, TK-400-036); la solución reduce la tensión superficial y no permite el brusco desprendimiento del oxígeno.
Para evitar que la niebla ácida ya minimizada y en menor proporción escape al ambiente, se ha dispuesto de un sistema de captación de niebla que consiste de dos depuradores de niebla ácida (scrubber´s), ubicados a cada lado de la casa de celdas; estos equipos extraen la niebla ácida. Para ello se ha provisto de una campana colectora de niebla ácida que cubre cada celda y un sistema de tuberías que conducen la niebla ácida hacia los scrubber´s (depuradores).
Describiremos a continuación cada una de las medidas tomadas para minimizar la niebla ácida en la casa de celdas:
· Adición de las bolas supresoras de niebla ácida en las celdas de EW.
· Adición de la solución supresora de niebla ácida en el electrolito a EW (FC-1100).
· Sistema de ventilación (scruber's).

Adición de las bolas supresoras de niebla ácida a las celdas de EW

Al pasar la corriente por las celdas que contienen el electrolito se provoca la deposición de cobre en el cátodo, mientras que cerca del ánodo se descompone el agua dando lugar a burbujas de oxígeno O_2 e iones H^+ que a su vez originan el H_2SO_4.
Las reacciones, tanto en el ánodo como en el cátodo en las celdas son las siguientes:
Reacción anódica:

$$H_2O \rightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

Reacción catódica:

$$Cu^{+2} + 2e^- \rightarrow Cu^0$$

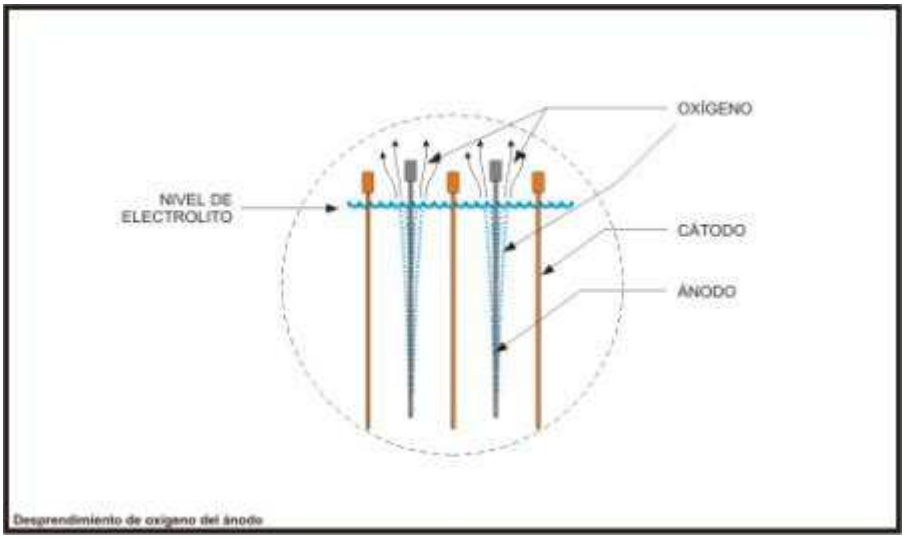
La reacción global es:

$$Cu^{+2} + SO_4^{-2} + H_2O \rightarrow Cu^0 + ½\,O_2 + 2H^+ + SO_4^{-2}$$

De las reacciones anteriores deducimos que:
· El oxígeno gaseoso se desprende de la superficie del ánodo.
· El ión hidrógeno enriquece en ácido al electrolito, es decir que la concentración de ácido sulfúrico se incrementa.
· La temperatura del electrolito se incrementa.
· El cobre metálico se deposita en la superficie de la plancha madre, por lo que el contenido de cobre del electrolito decrece.
· Los reactantes en el proceso se empobrecen.

Si observamos la reacción que se produce en el ánodo, nos daremos cuenta que se produce oxígeno gaseoso; este elemento trata de abandonar la celda, ascendiendo de las inmediaciones del ánodo, en forma de burbujas, al hacerlo el electrolito se enriquece de hidrógeno y el anión sulfato, en contacto con el hidrogeno, forma el ácido sulfúrico, ambos son los que forman la niebla ácida que existe sobre las celdas de EW.
La niebla ácida también se forma por arrastre de electrolito hacia la atmósfera cuando el oxigeno se desprende de las celdas.
Vea la Figura 2.1.2.

Figura 2.1.2 Desprendimiento de oxígeno del ánodo



Para evitar que estas burbujas abandonen el electrolito sin arrastrar ácido, se adiciona una capa continua de elementos inertes que tienen la propiedad de flotar; a estos elementos se les llama *antinebolizantes* y son precisamente las bolas supresoras de niebla ácida (bolas de polipropileno).
Es importante que cada vez que se haga limpieza de las celdas, se deben retirar las capas de bolas supresoras, este procedimiento se realiza utilizando una malla plástica unida a un bastón. Las bolas retiradas no deben ser devueltos a las celdas, sin antes haber sido lavadas con agua.

Adición de la solución supresora de niebla ácida FC-1100, en el electrolito a EW

La solución supresora de niebla ácida (FC-1100), es un reactivo líquido, agente controlador de niebla ácida. Su composición es de 50% de fluoruro químico sólido y 50% de agua, con una densidad 1,23 g/cm^3 a 25 ºC. Su función es controlar el desprendimiento del oxígeno, reducir la tensión superficial y no permitir el brusco desprendimiento del oxigeno que escapa desde la solución electrolítica de las celdas de EW.
La descarga y adición de FC-1100 se describe a continuación:
Los camiones entregan el FC-1100 en contenedores (proporcionados por el vendedor). Por una línea flexible de polietileno o polipropileno de ½" de diámetro, el FC-1100, es bombeado hacia el tanque de recirculación (lado de electrolito a EW) (TK-400-036), por medio de la bomba dosificadora (MP-610-099), accionada por un motor eléctrico. El consumo es de 0,16 Kg/h.
El FC-1100 agregado al electrolito a EW en el tanque de recirculación (lado de electrolito a EW), forma una espuma similar a un manto espumoso que flota sobre la superficie de la solución en las celdas. Vea la *Sección 2.1.2, Diagramas de flujo, 400-M6-1-DF3, Diagrama de flujo recirculación de electrolito del manual de operaciones O-400-M6-1 Manejo de electrolito.*

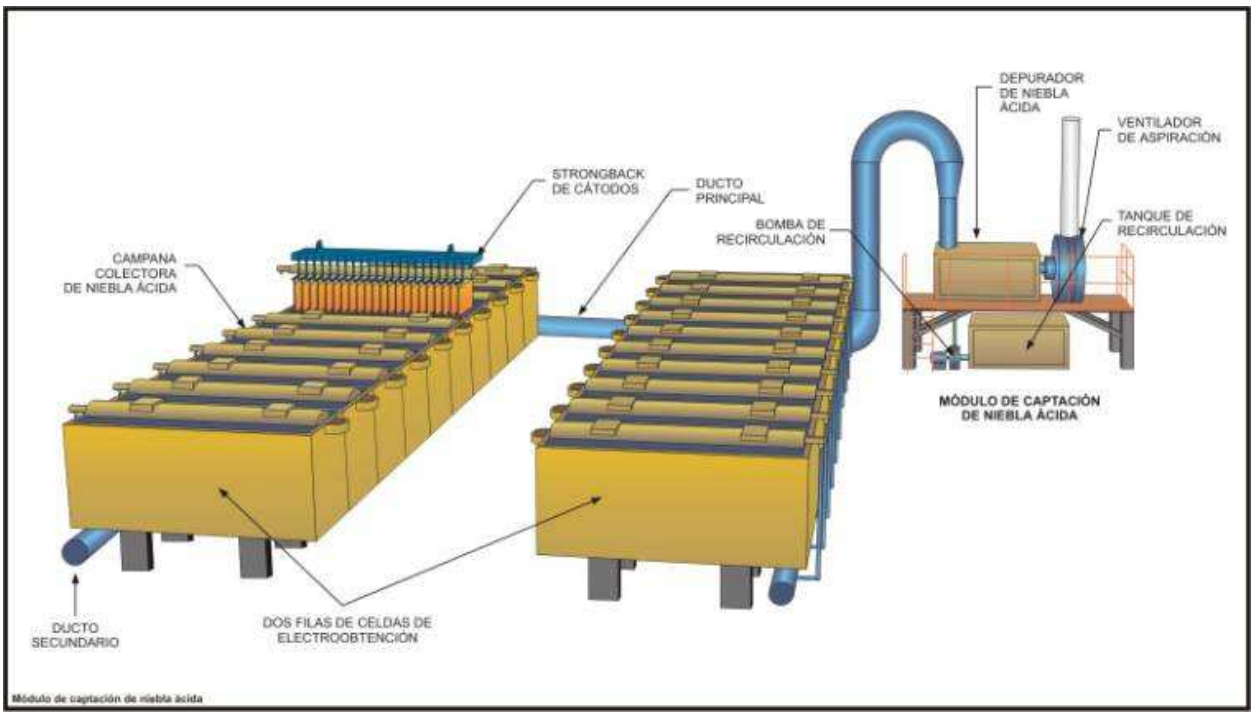
Sistemas de ventilación (Scrubber´s)

Véase la *Sección 2.1.2, Diagramas de flujo, 500-M7-2-DF2, Diagrama de flujo de la captación de la niebla ácida.*
La casa de celdas de electroobtención cuenta con dos módulos de captación de niebla ácida. Cada módulo, está constituido por:

· Un ventilador aspirador de niebla ácida (FN-500-013 ó 014).
· Un depurador de niebla ácida (Scrubber, DC-500-013 ó 014).
· Un tanque de recirculación.
· Un tanque de condensación de niebla ácida.
· Una bomba de recirculación (PP-500-013 ó 014).

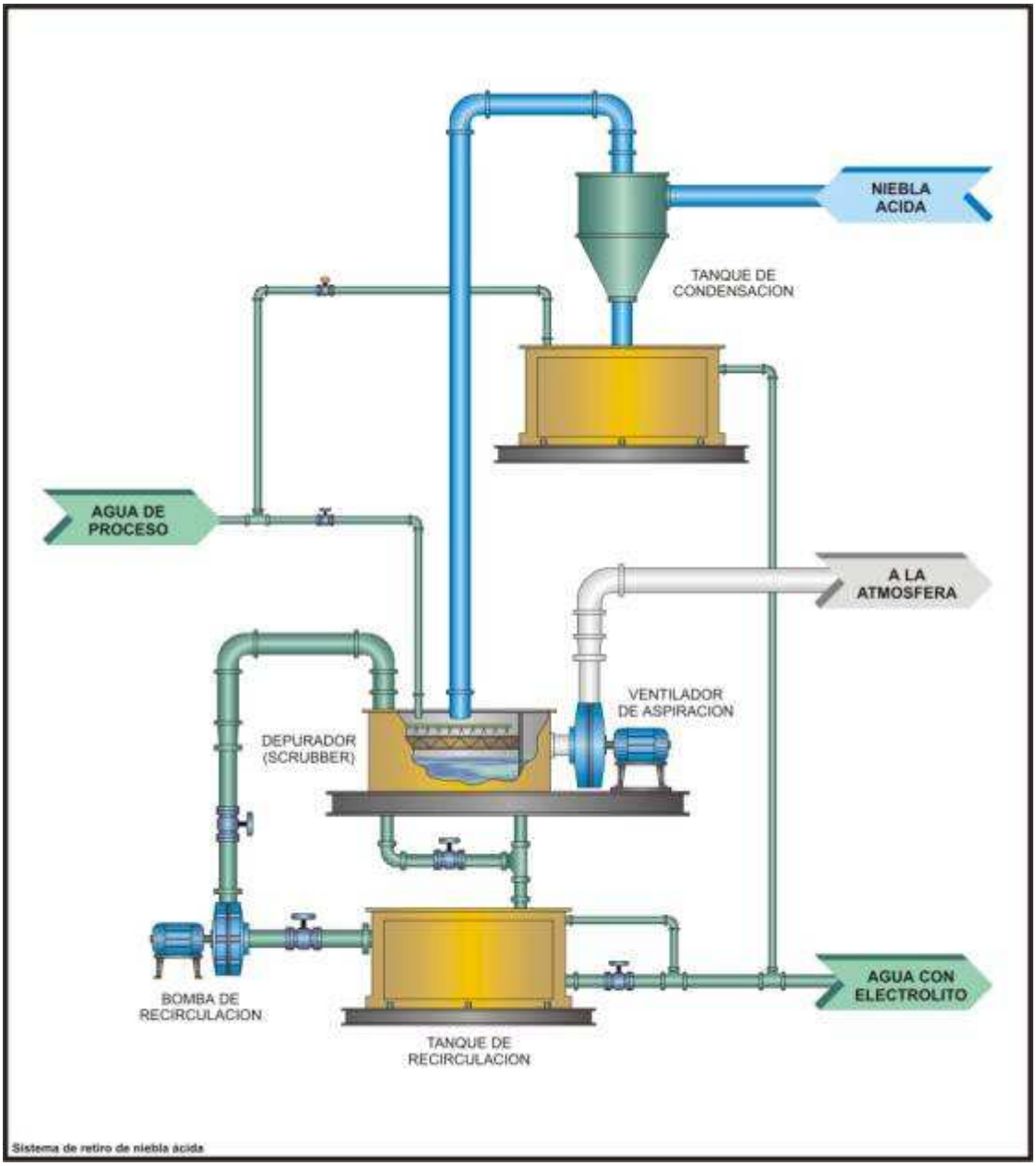
Ver la **Figura 2.1.3.**

Figura 2.1.3 Módulo de captación de niebla ácida



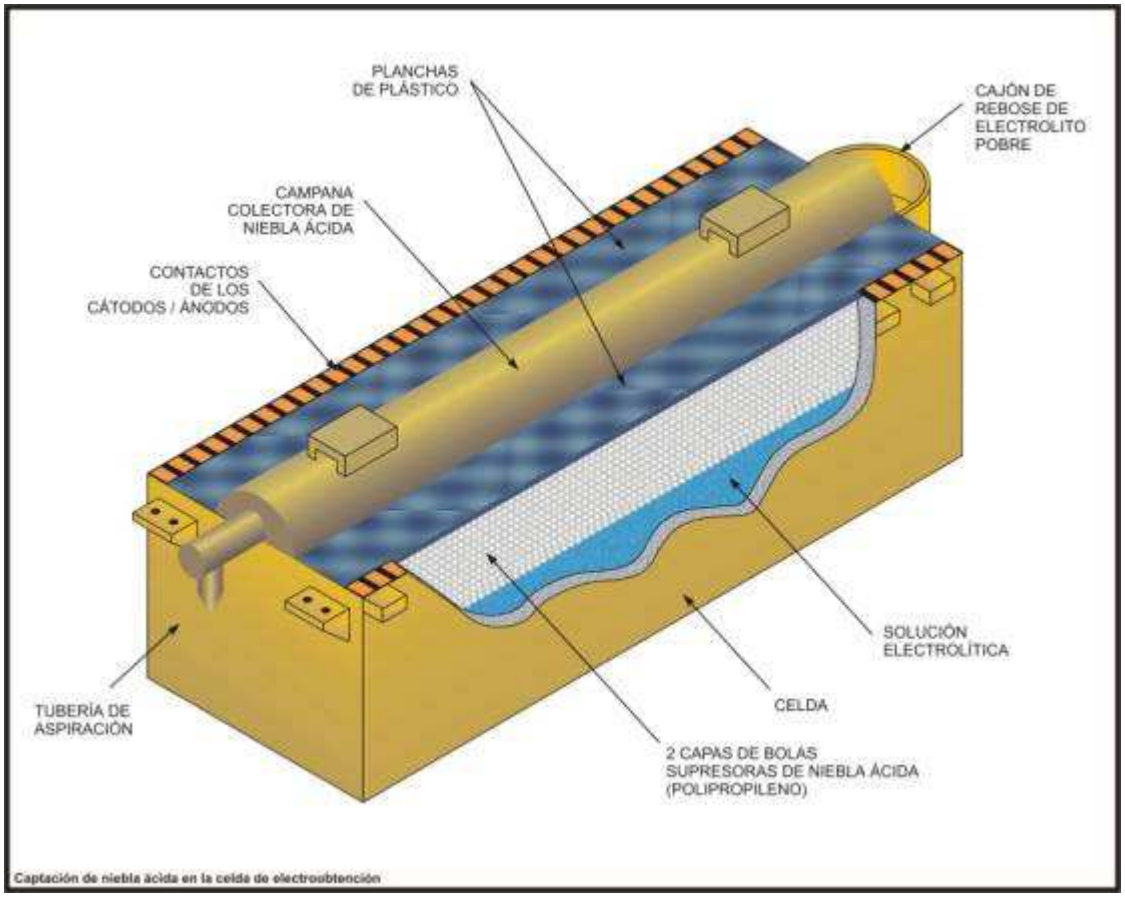
La niebla ácida es extraída de la casa de celdas a través de los ventiladores aspiradores de niebla ácida (FN-500-013 y 014), luego en el depurador (Scrubber), se agrega agua por medio de un aspersor, gracias a la combinación de agua con la niebla ácida, se produce la condensación de la niebla. La niebla ácida mezclada con agua por rebose del tanque se conduce hacia el colector de drenaje principal de casa de celdas y de allí se dirige hacia el tanque trampa de orgánico. Ver la **Figura 2.1.4.**

Figura 2.1.4 Sistema de captación de niebla ácida



En conclusión, la niebla ácida es controlada por medio de:
· El sistema de captación de niebla ácida, que extrae la niebla ácida desde la celda.
· Las bolas supresoras de niebla ácida, que evitan que la niebla ascienda hacia fuera de la celda.
· Con la adición del reactivo FC 1100, que reduce la tensión superficial en la solución y no permite el brusco desprendimiento del oxigeno. Vea la **Figura 2.1.5.**

Figura 2.1.5 Captación de niebla ácida en la celda de electroobtención



Captación de niebla ácida en la celda de electroobtención

Equipos asociados al sistema de captación de niebla ácida
El **Diagrama 2.1.11,** muestra la disposición de equipos en el área de celdas electrolíticas.

Los equipos asociados al proceso son:
· Campana colectora de niebla ácida.
· Strongback de cátodos.
· Ventiladores de aspiración.
· Bombas centrífugas.
· **Campana colectora de niebla ácida**
Cada celda es cubierta por una campana colectora y planchas plásticas, de tal manera que se cubra la mayor parte de las celdas, a excepción de las barras de contacto. Esto se hace con el fin de poder observar los cortocircuitos o chisporroteos posibles; en esta campana se inyecta agua en forma de spray que permite la condensación de la niebla. Por un lado de la campana se tiene un ducto de aspiración de la niebla ácida, el cual conectado a una tubería de colección común, conducen la niebla extraída hacia los Scrubber´s.
El agua, se distribuye a las campanas colectoras de la casa de celdas por medio de 20 tuberías principales y cinco secundarias por cada principal, haciendo un total de 100 líneas secundarias (una por cada celda). El ingreso de agua a las líneas principales es constante y controlado por electroválvulas. Dentro de la campana la línea secundaria se divide en varias líneas aspersoras de agua; éstas distribuyen el agua en aspersión en forma uniforme, tratando de hacer contacto, en la mayor parte

posible con el gas de niebla ácida. Puesto que la campana no abarca toda el área superior de la celda, es necesario colocar 2 planchas de plástico a los lados de la campana, con el fin de cubrir toda el área de la celda y captar la mayor cantidad de niebla ácida posible. Las planchas de plástico no deben cubrir los contactos de los electrodos, con el fin de permitir observar los cortocircuitos y los chisporroteos posibles en éstos. Ver la **Figura 2.1.6.**

Véase la *Sección 2.1.2, Diagramas de flujo, 500-M7-2-DF2, Diagrama de flujo de la captación de la niebla ácida*.

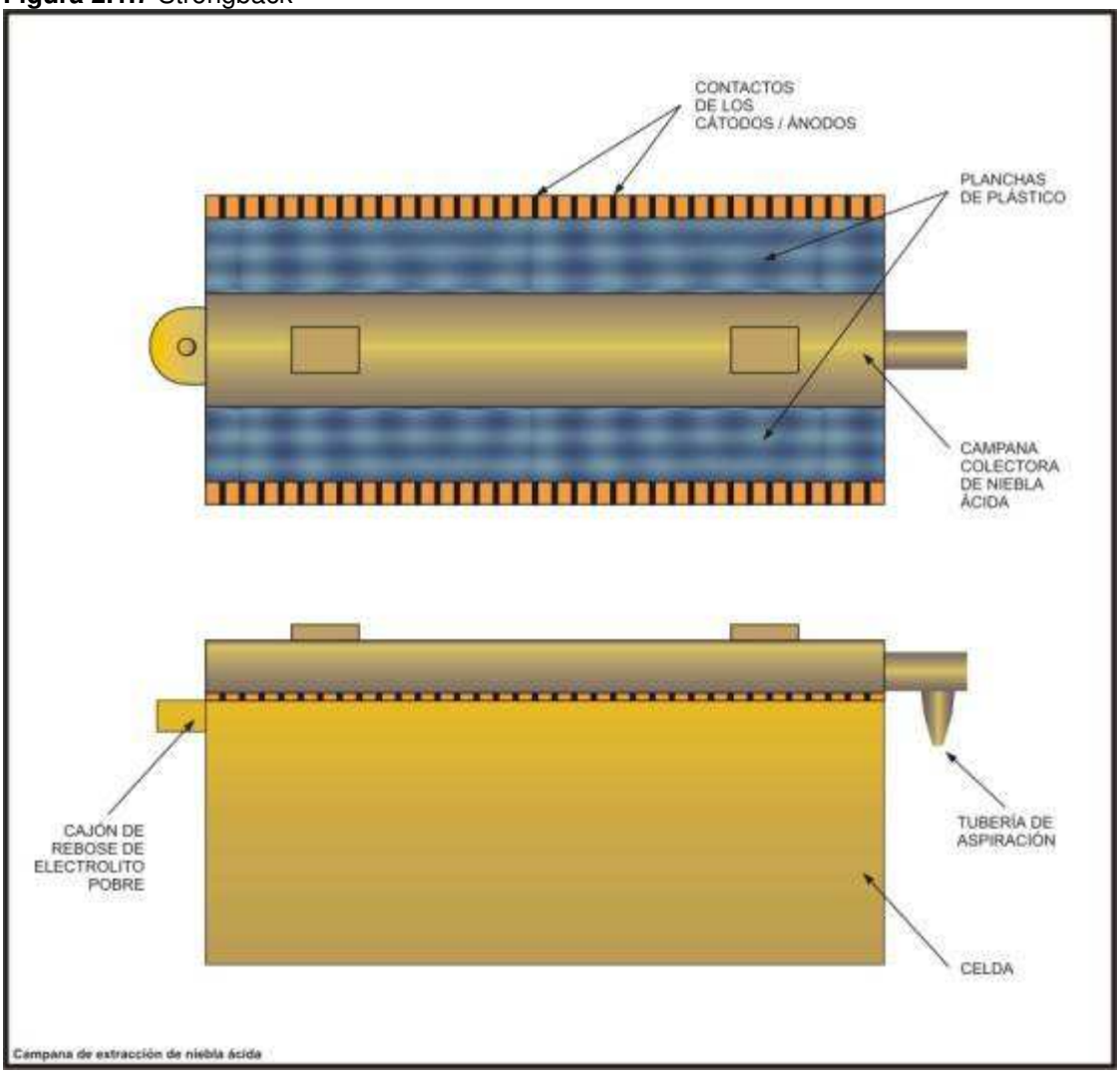
Figura 2.1.6 Campana de extracción de niebla ácida

Strongback de cátodos

Para poder realizar la cosecha de cátodos es necesario retirar la campana colectora de niebla ácida; para ello se utiliza el mismo strongback de cátodos utilizado para levantar los cátodos.

El strongback cuenta con cuatro sujetadores accionados por el control remoto del puente grúa, que enganchan la campana a la vez que se enganchan los cátodos cosechados. Ver la **Figura 2.1.7.**

Figura 2.1.7 Strongback



· **Ventiladores de aspiración**
El sistema de ventilación de la casa de celdas de electroobtención, emplea dos ventiladores de aspiración (FN-500-013 y 014) del tipo centrífugo (donde la corriente de aire se establece radialmente a través del rodete-impulsor), estos aspiran la niebla ácida que es colectada en la campana colectora. La Figura 2.1.8, ilustra un ventilador centrífugo.
Figura 2.1.8 Ventilador Centrífugo

· **Bombas centrífugas**
Cumplen una función importante en el sistema de ventilación de la casa de celdas (Scrubber´s), ya que recirculan el agua de condensación de la niebla ácida. Son las bombas (PP-500-013 y 014).
Principio de operación Bomba centrífuga
La **Figura 2.1.9,** ilustra la acción de bombeo de una bomba centrífuga.
El motor de la bomba acciona el eje, el que a su vez, gira el impulsor dentro de una carcasa estacionaria. Los álabes giratorios del impulsor hacen girar el fluido, expulsándolo hacia el exterior de la carcasa por efecto de la fuerza centrífuga. El fluido es trasladado del área de baja presión (ojo de la bomba), hacia el área de alta presión que está conectada a la descarga de la bomba.
El fluido al desplazarse desde el centro de la bomba (ojo de la bomba), hacia la cámara de voluta (exterior de la carcasa), produce mediante succión una zona de baja presión en el ojo de la bomba que permite el ingreso de más fluido. Si no hay suficiente presión en la zona de succión, para permitir el ingreso de mas fluido, como para reemplazar el fluido que ya se ha bombeado, la bomba cavitará (se formarán bolsones de vapor en el ojo de la bomba para llenar el espacio desocupado). La cavitación causará un desgaste bastante acelerado de las piezas de la bomba. También producirá una seria vibración que puede dañar cualquier pieza del sistema.
Si la bomba arrastra aire al ojo (si el líquido está espumoso o si la velocidad del impulsor es muy lenta) se puede formar una burbuja de aire en la parte superior de la carcasa. Si esto sucede, la bomba se puede bloquear por la formación de un bolsón de aire, lo que detendrá el bombeo hasta que la burbuja de aire salga nuevamente. Esto no sucede si la bomba tiene la descarga en la parte superior.
Figura 2.1.9 Acción de una bomba centrífuga

La **Figura 2.1.10,** muestra la disposición típica de una bomba centrífuga. Su carcasa está empernada a una estructura. El soporte del eje también está unido a la estructura. Para impedir que el fluido escape a través del espacio entre el eje y la carcasa, el eje pasa a través de un prensaestopas. Los anillos de empaquetadura del prensaestopas envuelven el eje formando un sello, que impide la salida del fluido alrededor del eje. Estos anillos de empaquetadura son comprimidos contra el eje y el prensaestopas por un casquillo (un collar que se encuentra detrás de los anillos). El agua de sello del prensaestopas se inyecta en el prensaestopas justo dentro de los anillos de empaquetadura; el agua es inyectada por una pequeña tubería de conexión a una presión mayor o igual a la descarga de la bomba. El casquillo está apretado lo suficiente como para que pueda pasar una pequeña cantidad de agua a través del sello y lubricarlo. La carcasa de la bomba está protegida de la abrasión por medio de revestimientos reemplazables (revestimiento de voluta y revestimiento de succión).
Figura 2.1.10 Bomba centrífuga

1 PROCESOS Y EQUIPOS

Tarea de aprendizaje 1:

Describir los procesos y equipos del área de Nave de Electroobtención.
Identificar los parámetros de proceso en la Nave de electroobtención.

La Sección 2 presenta una descripción general de la operación de la nave de electroobtención de la planta de óxidos de Escondida. En esta sección se entregan detalles adicionales sobre los procesos y equipos de las unidades individuales.

Esta descripción del proceso tiene las siguientes subdivisiones:

- RESUMEN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN
- FILOSOFÍA DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN
- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE ÓXIDO
- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE SULFURO
- PRINCIPIOS DE OPERACIÓN
- PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE ELECTROOBTENCIÓN
- MAMIPULACIÓN DE CÁTODOS
- DIAGRAMA DE FLUJO

1.1 RESUMEN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN

La electroobtención es el paso final en la producción de cobre catódico de alta pureza. El paso de una corriente eléctrica a través de las celdas de EW que contienen electrolito rico purificado da como resultado la electrodepositación de cobre sobre los cátodos permanentes de acero inoxidable. Los cátodos permanentes se cosechan (despegan) en un ciclo de cinco días. El cobre que se ha depositado en los cátodos permanentes se saca con una máquina despegadora de cátodos.
La nave de electroobtención se dispone en cuatro secciones (Secciones A, B, C y D), donde cada sección consta de dos filas separadas de celdas de electroobtención (60 celdas en cada fila), totalizando 480 celdas. Las celdas están construidas en concreto polímero como celdas monolíticas, cada una con un cajón de rebalse interno. Cada celda contiene 61 ánodos y 60 cátodos. Las placas de cátodos son láminas de acero inoxidable 316L con barras de cobre y con bordes laterales plásticos. El borde inferior de la placa está libre. Los ánodos son placas laminadas de plomo-calcio-estaño con barras de cobre cubiertas de plomo.
El electrolito circulante se distribuye a través de cuatro tuberías de suministro principales, una hacia cada sección de celda. Cada celda tiene una tubería distribuidora sumergida suministrable a través de una manguera flexible. El electrolito débil se descarga desde las celdas a través de la manguera flexible y fluye por gravedad de regreso hacia el estanque de electrolito débil.
Cada celda tiene capas de bolas de polipropileno para reducir la neblina de ácido que se genera en cada celda durante el proceso de electroobtención. También se agrega un supresor de neblina (FC-1100) al electrolito para ayudar a mantener baja la neblina ácida. Ventiladores ubicados a cada lado de la nave de electroobtención entregan una ventilación de flujo cruzado que permite eliminar la neblina ácida del área de trabajo sobre las celdas de electroobtención.
Las celdas están conectadas eléctricamente en serie con los cátodos individuales en cada celda conectada en paralelo. Ocho rectificadores transformadores, dos en paralelo por sección, entregan 30,3 kA para cada sección a aproximadamente 207 voltios de corriente continua. El voltaje de operación normal por celda es de 2 voltios con una densidad de corriente nominal de 280 A/m^2.

1.2 FILOSOFÍA DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN

La electroobtención es el último paso en la producción de cobre catódico de alta pureza. En la electroobtención, el cobre metálico se recupera desde una solución de sulfato de cobre ácida ($CuSO_4$) mediante la electrólisis.

1.2.1 ELECTROQUÍMICA

La electrólisis se logra al hacer circular una corriente eléctrica continua entre los electrodos (ánodos inertes pero conductores y cátodos metálicos) inmersos en un electrolito ($CuSO_4$-H_2SO_4-H_2O).

El ánodo porta una carga eléctrica positiva y el cátodo una carga eléctrica negativa. Los iones de cobre (Cu^{++}) son neutralizados por la adición de electrones en el cátodo y depositados como un recubrimiento metálico sobre el cátodo permanente de acero inoxidable.

$$Cu^{++} + 2\,(e^-) \rightarrow Cu^0$$

(Donde [e^-] significa un solo electrón.)

En el ánodo inerte, el agua es hidrolizada de acuerdo con la siguiente reacción:

$$2\,H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4\,H^+ + 4\,(e^-)$$

El oxígeno producido por la reacción anterior escapa como gas en el ánodo y los iones de hidrógeno (H^+) se unen con un ion de SO_4^{--} que no participa para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La reacción neta para una celda es la siguiente:

$$2\,CuSO_4 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,Cu^0 + O_2\uparrow + 2\,H_2SO_4$$

La ley de físicoquímica que regula la electrólisis es la *Ley de Faraday*. Ésta afirma lo siguiente:

Un gramo equivalente de material es alterado químicamente en cada electrodo por cada 96.500 coulombs que pasan a través de la celda electrolítica.

Un equivalente gramo es el peso atómico de un elemento dividido por su estado de valencia. En el caso del cobre, el equivalente a un gramo es igual a 31,8 gramos.

Un *coulomb* es la cantidad de electricidad que pasa entre los conductores en un segundo cuando está fluyendo una electricidad de un amperio. El coulomb también se denomina *amperio/segundo*.

La Ley de Faraday se usa para calcular la cantidad de cobre que se depositará teóricamente en una celda de electroobtención. Sin embargo, no toda la corriente disponible para la celda de electroobtención resulta en la reacción deseada que deposita cobre en el cátodo. Parte de la energía eléctrica se desvía a reacciones

secundarias. Por ejemplo, la reacción secundaria principal es la unión férrico/ferroso (Fe^{3+}/Fe^{2+}), en la cual la energía eléctrica se consume al oxidar/reducir hierro en la celda de electroobtención.

La relación entre la depositación *real* y *teórica* se denomina *eficiencia de corriente*. Debido a la pérdida de corriente, la resolución química del cobre depositado y las reacciones electroquímicas secundarias, el cobre realmente depositado es menor que la cantidad prevista por la Ley de Faraday.

$$\text{Rendimiento de corriente} = \frac{\text{Cu efectivamente depositado x 100\%}}{\text{Cu teórico calculado}}$$

Un ejemplo de la cantidad de cobre que debe electrodepositarse teóricamente se calcula de la siguiente forma:

Usando la Ley de Faraday, un peso equivalente a un gramo de cobre (31,8 gramos) demora 26,8 amp-hora en depositarse. Por lo tanto:

$$\frac{31{,}785 \text{ gramos de Cu}}{26{,}8 \text{ amp hora}} \times \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ gramos de Cu}} = \frac{0{,}02846 \text{ kg de Cu}}{\text{amp día}}$$

Se depositan 0,02846 kg de cobre con una eficiencia de corriente de 100 por ciento en un amp-día.

Si la energía hacia cada celda es de 30.000 amperios, la cantidad de cobre depositado con un 100 por ciento de rendimiento de corriente es:

$$\frac{0{,}02846 \text{ kg de Cu}}{\text{amp día}} \times \frac{30.000 \text{ amperios}}{\text{celda}} = \frac{853{,}8 \text{ kg de Cu}}{\text{celda día}}$$

Si la celda produjo realmente 781,2 kg de Cu, el rendimiento de corriente sería de:

$$\frac{781{,}2 \text{ kg de Cu}}{853{,}8 \text{ kg de Cu}} = 91{,}5\ \%$$

Densidad de corriente es la medición de la intensidad de la aplicación de la energía eléctrica y se mide en amperios/m^2. Se calcula dividiendo los amperios que fluyen por una celda por el área de la superficie de electrodepositación del cátodo en la celda. La densidad de la corriente varía para cada nave de electroobtención y se usa para llegar a un equilibrio entre una producción alta rápida y una excelente pureza de cobre. Parte de la energía eléctrica es consumida también por la resistencia del electrolito y otros factores.

La nave de electroobtención de Escondida tiene 480 celdas individuales monolíticas de concreto polímero con cajones de rebalse integrales. Cada celda contiene 61 ánodos y 60 cátodos. Las placas de ánodos están fabricadas de una lámina de cobre de aleación de plomo, calcio y estaño. La placa está unida a una barra de contacto de cobre cubierta con plomo. Los ánodos están equipados con pinches espaciadores de plástico en cada ánodo. Los cátodos permanentes están hechos de acero inoxidable,

tienen aisladores de plástico en los bordes laterales de la hoja del cátodo y tienen una barra de cobre sólido soldada en la parte superior.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE ÓXIDO

La nave de electroobtención está dispuesta en cuatro secciones (Secciones A, B, C y D) con dos filas de celdas en cada sección. Cada fila de cada sección tiene 60 celdas; el total para cada sección es de 120 celdas. Cada sección tiene un puente grúa para el movimiento de los electrodos hacia y desde las celdas. Las celdas de cada sección están conectadas eléctricamente en serie con los cátodos individuales en cada celda conectados en paralelo.

La energía de corriente continua (DC) para las celdas es suministrada por ocho rectificadores/transformadores; los rectificadores (FTWY001-01 y -02) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (A-001 a A-120), los rectificadores (FTWY002-01 y -02) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (B-001 a B-120), (FTWY003-01 y -02) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (C-001 a C-120), y (FTWY004-01 y -02) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (D-001 a D-120). La capacidad de corriente continua para cada rectificador es de 15.100 amperios a 220 voltios de corriente continua.

Los rectificadores de emergencia están dispuestos para suministrar energía en caso que los rectificadores principales pierdan energía eléctrica. Cada rectificador de emergencia tiene una capacidad de salida de 300 amperios a 220 voltios de corriente continua. Se suministra una corriente baja de entre 30 y 50 amperios a las celdas de electroobtención para impedir que los ánodos pierdan su capa de óxido de plomo durante un corte de energía o una condición de detención parcial. Si no hay una pequeña carga lenta fluyendo a través del ánodo, el recubrimiento de óxido de plomo se descascara, lo cual hace que el ánodo se transforme en pasivo. Si esto sucede, la electroobtención de cobre de los cátodos adyacentes se detiene hasta que la superficie del ánodo sea reactivada.

Los ánodos comienzan a degradarse inmediatamente después de que se pierde la energía. Para impedir la degradación, el generador de reserva, que se pone en marcha automáticamente cuando hay una pérdida de energía hacia los rectificadores principales, entrega la energía necesaria para los rectificadores de reserva que proporcionan suministro a las celdas de electroobtención durante el corte de energía principal.

El rendimiento de corriente diseñada es de 92 por ciento; la densidad de corriente nominal es de 280 amps/m^2, mientras que el diseño permite un máximo de 325 amps/m^2.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE SULFURO

La nave de electroobtención de Lixiviación de sulfuro Escondida tendrá 568 celdas individuales monolíticas de concreto polímero con cajones de rebalse integrales, dotadas con sistema de inyección de aire burbujeante a todas ellas. Cada celda contiene 61 ánodos y 60 cátodos. Las placas de ánodos están fabricadas de una aleación de plomo, calcio. La placa está unida a una barra de contacto de cobre cubierta con plomo. Los ánodos están equipados con pinches espaciadores de plástico en cada ánodo. Los cátodos permanentes están hechos de acero inoxidable 316 SS, tienen aisladores de plástico en los bordes laterales de la hoja del cátodo y tienen una barra de cobre sólido soldada en la parte superior.

La nave de electroobtención está dispuesta en cuatro secciones (Secciones E, F, G y H) con dos filas de celdas en cada sección. Cada fila de cada sección tiene 71 celdas; el total para cada sección es de 142 celdas. Cada sección tiene un puente grúa para el movimiento de los electrodos hacia y desde las

celdas. Las celdas de cada sección están conectadas eléctricamente en serie con los cátodos individuales en cada celda conectados en paralelo.

La energía de corriente continua (DC) para las celdas es suministrada por ocho rectificadores/transformadores; los rectificadores (3700-7W00-611/612) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (E-001 a E-142), los rectificadores (3700-W00-613/614) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (F-001 a F-142), (3700-7W00-615/616) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (G-001 a G-142), y (3700-7W00-617/618) operan en paralelo para suministrar energía a las celdas (H-001 a H-142). La capacidad de corriente continua nominal para cada rectificador es de 16.800 amperios a 286 voltios, mientras que el diseño permite entregar 21.000 amperios a 328,6 voltios.

Los rectificadores de emergencia están dispuestos para suministrar energía en caso que los rectificadores principales pierdan energía eléctrica. Cada rectificador de emergencia tiene una capacidad de salida de 150 amperios a 315 voltios de corriente continua por diseño. Se suministra una corriente baja de entre 30 y 50 amperios a las celdas de electroobtención para impedir que los ánodos pierdan su capa de óxido de plomo durante un corte de energía o una condición de detención parcial. Si no hay una pequeña carga lenta fluyendo a través del ánodo, el recubrimiento de óxido de plomo se descascara, lo cual hace que el ánodo se transforme en pasivo. Si esto sucede, la electroobtención de cobre de los cátodos adyacentes se detiene hasta que la superficie del ánodo sea reactivada.

Los ánodos comienzan a degradarse inmediatamente después de que se pierde la energía. Para impedir la degradación, el generador de reserva, que se pone en marcha automáticamente cuando hay una pérdida de energía hacia los rectificadores principales, entrega la energía necesaria para los rectificadores de reserva que proporcionan suministro a las celdas de electroobtención durante el corte de energía principal.

El rendimiento de corriente diseñada es de 92 por ciento; la densidad de corriente nominal es de 279 amps/m^2, mientras que el diseño permite un máximo de 350 amps/m^2.

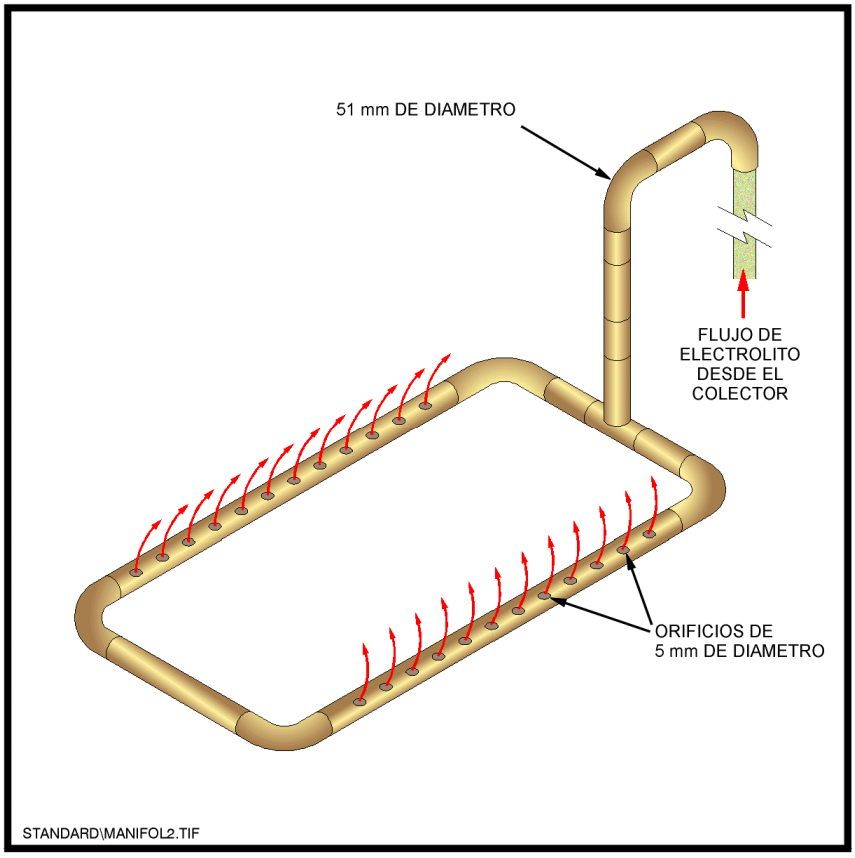
1.5 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

1.5.1 DISPOSICIÓN DE LAS CELDAS EN LA NAVE DE ELECTROOBTENCIÓN Y FLUJO DEL ELECTROLITO

El electrolito rico se bombea desde el estanque de recirculación de electrolito a través de un colector hacia las celdas de electroobtención mediante los intercambiadores de calor. Cada celda está equipada con un distribuidor ubicado en el fondo de la celda (consulte la Figura 2.1.1). El distribuidor tiene aproximadamente 120 orificios de distribución de 5 mm de diámetro en cada costado de la sección longitudinal de la cañería, lo que permite una distribución uniforme del electrolito sobre las caras del cátodo suspendido en la celda. Cada celda está conectada individualmente usando una válvula de bola de 2 pulgadas para permitir el cierre del flujo durante el drenaje de la celda.

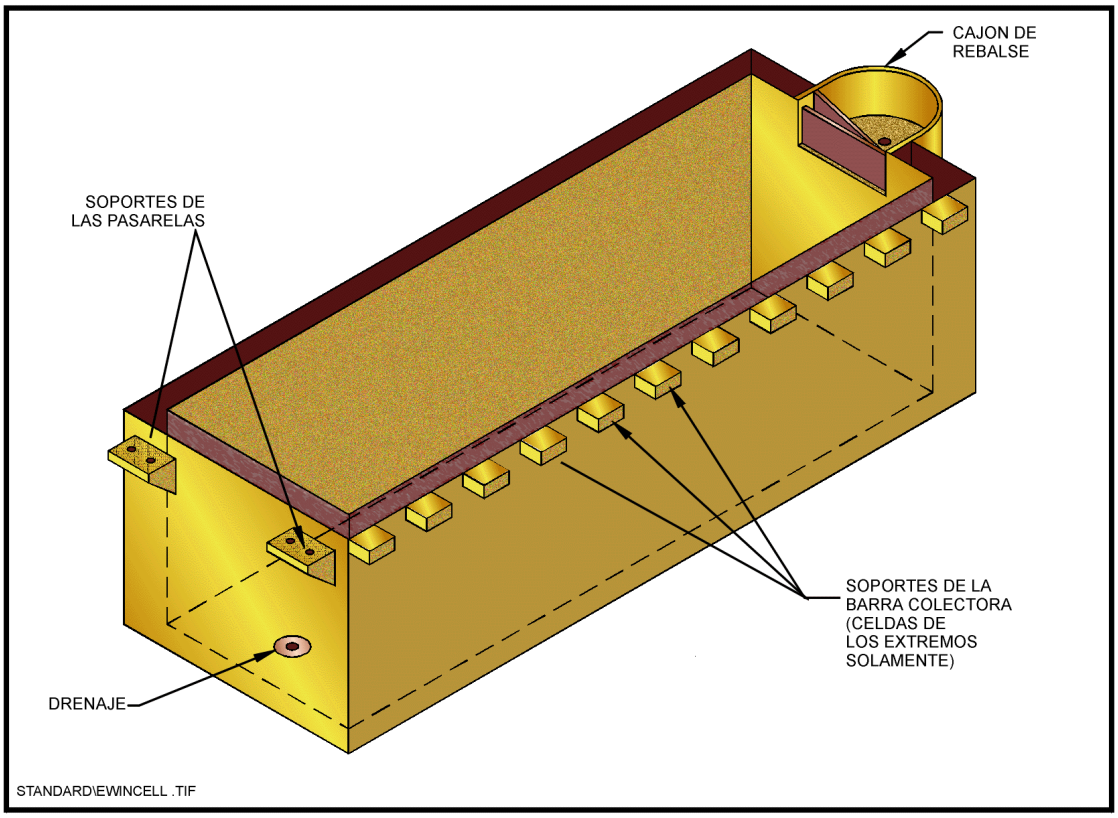
Después de que el electrolito fluye a través de la celda, rebalsa en el extremo opuesto de la admisión de alimentación a través de una manguera flexible. El electrolito es recolectado, desde la manguera flexible, en un colector común y luego fluye por gravedad al estanque de electrolito débil. La Figura 2.1.1 ilustra el distribuidor de electrolito en la celda.

Figura 2.1.1 Múltiple de distribución del electrolito



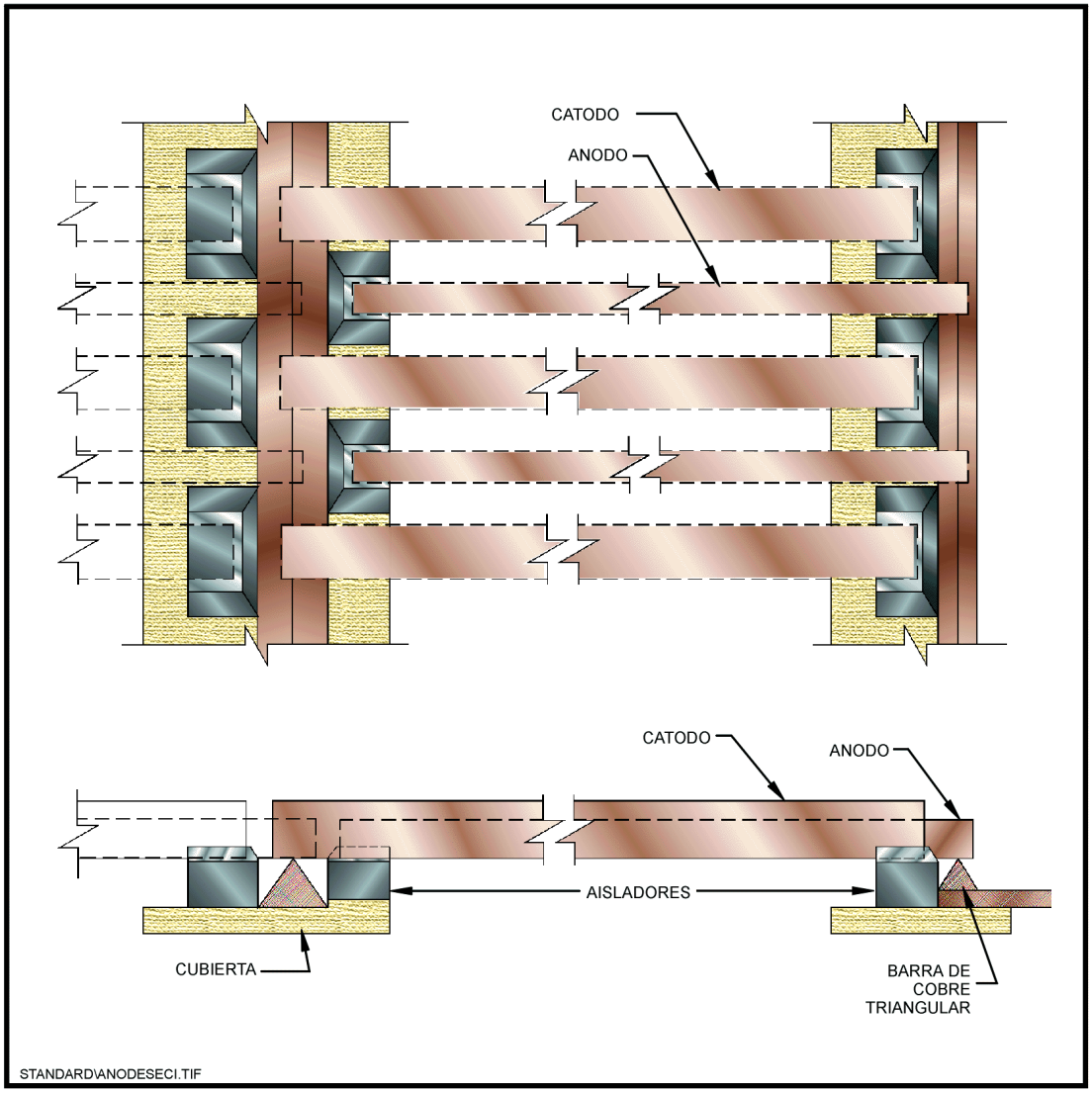
Las celdas están construidas en concreto polímero (resina de viniliéster con agregado de arena de sílice inerte) y cada una está equipada con un tapón de drenaje ubicado en el fondo en un extremo de la celda. Una barra de cobre equipotencial, la cual aísla y espacia eléctricamente los cátodos y ánodos, se ubica en la parte superior de la pared de la celda adyacente. En la Figura 2.1.2 se ilustra una celda de electroobtención.

Figura 2.1.2 Celda de electroobtención



Un extremo del electrodo hace contacto con la barra triangular de cobre mientras el otro extremo descansa sobre un material no conductor colocado entre las ranuras de cobre triangulares. La Figura 2.1.3 ilustra la relación del contacto eléctrico de los ánodos y cátodos en la barra de cobre. Periódicamente, las celdas deben drenarse y limpiarse de óxido de plomo que haya decantado al fondo de la celda. Antes de que pueda limpiarse una celda, debe cortocircuitarse usando el marco cortocircuitador. Consulte la Sección 4.4, *Operación: Cortocircuitado de celdas de la nave de electroobtención*. Una vez que se ha cortado la energía eléctrica de la celda, los electrodos son retirados y la solución se drena desde la celda. Luego se saca el lodo de plomo del fondo de la celda y se pone en tambores de limpieza. Después de que la celda está limpia, se instalan nuevamente los cátodos y ánodos y se llena la celda con electrolito. Una vez que la celda está llena con electrólito, se saca el marco cortocircuitador y la electricidad fluye nuevamente a través de la celda.

Figura 2.1.3 Esquema del contacto ánodo-cátodo

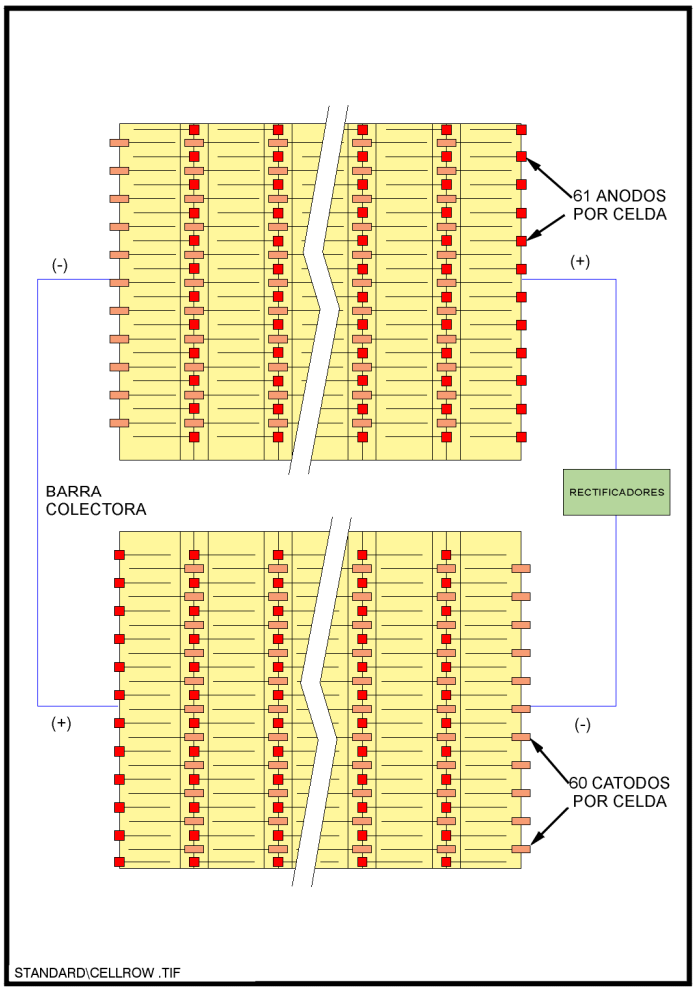


1.5.2 FLUJO DE CORRIENTE EN LAS FILAS DE CELDAS

En cada celda fluye corriente directa del rectificador entre los cátodos y ánodos de cada celda. La misma corriente fluye de una celda a otra a través de todo el circuito.

El flujo de corriente va desde los rectificadores hacia los ánodos, a través del electrolito, y sigue hasta llegar al cátodo. En la Figura 2.1.4 se ilustra la aislación eléctrica de un extremo de cada electrodo al terminar cerca de la barra conductora de la celda opuesta. Las barras de suspensión de los ánodos y cátodos puentean las celdas. Sin embargo, cada barra de suspensión descansa sobre en soporte aislado. Esto fuerza a la corriente a que fluya a través del electrólito entre los electrodos.
La Figura 2.1.4 ilustra el flujo de la corriente eléctrica dentro de un grupo de celdas.

Figura 2.1.4 Flujo de corriente en las filas de celdas



A medida que el electrólito fluye a través de la celda, el cobre del electrólito se deposita en la placa del cátodo por electrólisis, lo cual libera oxígeno en el ánodo. Al final del ciclo de cinco días, se sacan los cátodos de las celdas y se cosechan (despegan) los depósitos de cobre. Luego, los cátodos permanentes se devuelven a las celdas de electroobtención.
Durante el proceso de electroobtención, la evolución del oxígeno libre provoca dos problemas. En primer término, las burbujas de gas producidas son muy pequeñas y, al elevarse a la superficie y reventar, la energía liberada expulsa gotas extremadamente finas de electrólito a la atmósfera, lo que produce una neblina altamente corrosiva de electrólito rico en ácido sobre las celdas. Esta neblina ácida es irritante para los operadores y el personal de mantención y corrosiva para los componentes y equipos de la instalación de electroobtención. Para minimizar este problema, las celdas se cubren con tres capas de bolas de polipropileno de 19 mm. Las múltiples capas de bolas flotan sobre el electrolito en las celdas para fomentar la coalescencia de las diminutas gotas de electrolito. El segundo problema es que el oxígeno liberado en la superficie del ánodo puede hacer que se desprendan escamas de óxido de plomo, las cuales decantan como lodo no soluble. El lodo se saca en intervalos periódicos mediante la limpieza de las celdas.
Un costado de la nave de electroobtención está equipado con 108 ventiladores (27 para cada sección) que crean una ventilación de flujo cruzado. Esto ayuda a mejorar la calidad del aire sobre las celdas donde está trabajando el operador.
Actualmente en la sección A, se implemento un Sistema de extracción y abatimiento de neblinas ácidas (SEANA) desarrollado por SAME Ltda., formado principalmente por Campanas de Alta Energía (CAE) fabricadas en fibra de vidrio que se ubican sobre cada una de las celdas de la nave de EW, su misión es capturar los aerosoles ácidos contaminantes arrastrados por el aire desplazado por el oxígeno que se genera en la reacción electro-química del proceso de electrólisis aplicando captación local forzada directamente desde su fuente de origen (la celda) .
Cada una de estas campanas está unida a una red de **ductos**, también de fibra de vidrio, conectados a un **ventilador centrífugo** que en su conjunto transportan los aerosoles ácidos fuera del área de trabajo, forzándolos a pasar por un equipo de retención del tipo **lavador – condensador multiventuri** de alta eficiencia que tiene como función abatir la neblina ácida. El remanente es emitido por una chimenea que en su parte más alta tiene un equipo de acero inoxidable (demister) que atrapa y condensa las últimas gotas de neblina finalizando el proceso.

Prop:Roberto Alfaro Cortes

En las cuatro secciones E, F, G y H de la Nave de E-W de lixiviación de sulfuros, serán instalados estos módulos de ventilación.

1.5.3 ELECTRÓLITO RICO

A medida que el electrólito rico fluye a través de las celdas de electroobtención en el proceso se producen varios cambios:

- El contenido de cobre del electrólito disminuye a medida que el cobre se deposita en los cátodos.
- La concentración de ácido sulfúrico aumenta debido a la descomposición del H_2O en el ánodo.
- La temperatura del electrólito aumenta debido al calor producido por la resistencia y otras ineficiencias.

La siguiente tabla resume el flujo del electrólito, la temperatura, la concentración de ácido sulfúrico y el contenido de cobre en base a las condiciones de diseño de la operación de electroobtención de Escondida.

1.5.4 CALIDAD DEL COBRE CATÓDICO

El control de las condiciones del electrólito es importante para mantener la calidad de los depósitos de cobre y para asegurar la eficiencia de la electroobtención. No se debe permitir que el contenido de cobre del electrólito caiga por debajo de 38 a 40 g/L de cobre en el electrólito débil. Bajo este nivel, la movilidad reducida de los iones de cobre en la región del cátodo lleva a depósitos más blandos o esponjosos de una calidad más baja.

Un depósito de cobre de densidad pareja es importante, porque:

- Cualquier porosidad o irregularidad de la superficie aumenta la posibilidad de que el óxido de plomo se adhiera a la cara de depósito del cátodo.
- Una vez iniciado, la nodulación puede acelerarse, llevando a un contacto con el ánodo. Esto produce una mayor contaminación de plomo del cátodo y reduce el rendimiento de la corriente.
- La porosidad de los depósitos del cátodo puede llevar a la oclusión del electrolito en el depósito, que no puede eliminarse con lavado. El electrolito atrapado contribuye con impurezas (hierro y sulfato) al producto final. Similarmente, una irregularidad excesiva de la superficie puede interferir con un lavado adecuado, lo que lleva a que el electrolito permanezca en la superficie del cátodo lavado.

Las impurezas del cátodo que preocupan más son plomo, hierro, cloruro y el sulfato (en orden decreciente de importancia). El nivel de sulfato del electrolito (la suma de sulfato de cobre y ácido sulfúrico) también es importante debido a su efecto sobre la resistividad del electrolito. Una resistividad alta (es decir, debido al bajo contenido de sulfato) da como resultado un voltaje más alto de la celda y un mayor consumo de energía. También es importante que la temperatura del electrólito se mantenga en aproximadamente 50 ºC debido al significativo efecto de la temperatura sobre la resistividad del electrólito junto con la movilidad de los iones.

Los niveles de impureza del electrólito deben ser controlados estrictamente. Las impurezas tales como cloruro, hierro y manganeso son muy perjudiciales para la electroobtención de cobre. Dependiendo de otras condiciones del electrolito, los cloruros del electrolito pueden atacar al ánodo de plomo, causar la picadura de los cátodos permanentes de acero inoxidable, quedar atrapados en el depósito de cobre y producir la generación del gas de cloro. La concentración de cloruro en el electrolito debe mantenerse bajo 18 a 30 mg/L.

El contenido de hierro en el electrolito causa la pérdida del rendimiento de corriente debido a la reacción electrolítica parasitaria:

$$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$$

El Fe^{2+} es fácilmente oxidado en Fe^{3+} en el circuito de electrolito recirculante, de forma que la electrólisis parasitaria se repite indefinidamente. El contenido de hierro (total) en el electrolito se debe controlar bajo 1.5 mg/L.

Un exceso de manganeso en el electrólito puede provocar en la formación de permanganato, al reducir el manganato:

$$(MnO_4)^- + e^- \rightarrow (MnO_4)^{2-}$$

El permanganato es un fuerte oxidante que:

- Atacará la capa de óxido de plomo del ánodo, provocando una aceleración del consumo del ánodo y contaminación por plomo del depósito de cobre.
- Atacará la fase orgánica de extracción por solventes, llevando a una rápida oxidación y destrucción del extractante.

El contenido de hierro en el electrolito debe mantenerse al menos 20 veces más alto que el de manganeso. Esto asegurará que la unión $Fe^{3+/}Fe^{2+}$ estará sobre la unión manganato/permanganato, suprimiendo la formación de permanganato. A pesar de que la electrólisis $Fe^{3+/}Fe^{2+}$ es parasitaria y causa pérdida de rendimiento de corriente, es menos perjudicial que la formación de permanganato. El control de las impurezas del electrólito se realiza en la operación de extracción por solventes. Las impurezas son minimizadas por la planta de extracción por solventes mediante la purga de electrólito débil desde el sistema y al lavar la fase acuosa residual de la fase orgánica. Sin embargo, las operaciones de electroobtención se ven afectadas principalmente por la calidad de este control.

1.6 PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE ELECTROOBTENCIÓN

1.6.1 CONDICIÓN DE OPERACIÓN NAVE DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE ÓXIDO

Tabla de Parámetros de operación de electroobtención
SECCIÓN : A-B-C-D

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Parámetro	Unidades	Valor nominal	Valor diseño
Flujo electrólito a celdas	m^3/h/sección	1800	1800
Voltaje por celda	v	2,0	
Densidad de corriente	A/m^2	296	280 -298
Eficiencia de corriente	%	92	
Ciclo de cosecha	días	5	
Celdas de electroobtención:			
Número de secciones		4	
Número total de celdas		480	
Número de filas/sección		2	
Celdas por fila		60	
Temperatura electrólito alimentación a celdas	º C	50	50 – 51
Cátodos:			
Tipo		Kidd 316 L	
Número por celdas		60	
Cátodos extraídos por ciclo con grúa		20	

Ancho de la placa	mm	1,02	
Altura de la placa	mm	1,20	
Espesor de la placa	mm	3,1	
Barra de cobre:			
Altura barra	mm	35,2	
Ancho barra	mm	25	
Largo barra	m	1,43	
Peso cuerpo acero inoxidable	Kg	29,5	
Peso barra de cobre	Kg	13,5	

Parámetro	Unidades	Valor nominal	Valor diseño
Ánodos:			
Tipo		Pb-Ca-Sn	
Temperatura de operación	ºC		
Número por celdas		61	
Ancho de la placa	M	0,92	
Altura de la placa	m	1,06	
Espesor de la placa	mm	6,35	
Barra de Cu/Pb:			
Altura barra	mm	35,1	
Ancho barra	mm	19	
Largo barra	m	1,42	
Máquina despegadora:			

Prop:Roberto Alfaro Cortes

Tipo		AISCO Systems	
Capacidad	Cátodos/h	400	
Número de máquinas		2	
Rectificadores:			
Número total de rectificadores		8	
Número rectificadores por sección		2	
Número de secciones		4	
Salida rectificador	v	207	
Salida rectificador	KA	30,3	
Grúas puente:			
Número		4	
Tipo		P & H	
Capacidad	t	7,5	

SOLUCIONES

Parámetro	Unidades		Rango Aceptable
Electrolito alimentado a celdas:			
Flujo por sección	m^3/h	1800	1800
Temperatura de operación	ºC	48	47 – 51
Cobre	gpl	42	40 – 44
Fe Total	g/l	1.3	0.5 – 1.5
Cl	ppm	18	14 – 20
Galactasol	gpt	200	180 – 240
Co	ppm	160	125 - 165

Prop:Roberto Alfaro Cortes

Electrolito Pobre:			
Flujo por sección	m^3/h	1800	180
Cobre	Gpl	38	38 – 40
Ácido total	gpl	240	238 - 242

Prop:Roberto Alfaro Cortes

1.6.2 CONDICIÓN DE OPERACIÓN NAVE DE ELECTROOBTENCIÓN PLANTA DE SULFURO

Tabla de Parámetros de operación de electroobtención

SECCIÓN : E-F-G-H

CONDICIONES DE OPERACIÓN

Parámetro	Unidades	Valor nominal	Valor diseño
Producción de cobre	t/a	90.000	112.775
Disponibilidad	%	99	
Producción diaria	t/d	249	312
Flujo electrólito a celdas	m^3/d	14,4	16,9
Flujo electrolito por m^2 de cátodo	$m^3/h/m^2$	0,120	0,140
Voltaje por celda	v	2,0	2,3
Densidad de corriente	A/m^2	279	350
Eficiencia de corriente	%	92	
Ciclo de cosecha	días	5	
Celdas de electroobtención:			
Número de secciones		4	
Número total de celdas		568	
Número de celdas por sección		142	
Número de filas		8	
Celdas por fila		71	
Temperatura electrólito alimentación a celdas	º C	50	
Sistema de aire a celdas:			

Prop:Roberto Alfaro Cortes

Presión a celdas múltiples	Kpag		70
Flujo por sección	Nm^3/h		2.130
Temperatura entrada	º C		10
Humedad de entrada	%		25
Humedad de entrada	g H_2O/Kg aire		2,7
Cátodos:			
Tipo			316 L SS
Número por celdas			60
Cátodos extraídos por ciclo con grúa			20
Dimensiones Placa			
Ancho de la placa	mm	990	
Altura de la placa	mm	1.010	
Espesor de la placa	mm	3,15	
Peso cuerpo de acero	kg	29.5	
Dimensiones Barra			
Altura de la barra	mm	43	
Ancho de la barra	mm	30	
Largo de la barra	mm	1.378	
Peso barra	kg	13.5	

Parámetro	Unidades	Valor nominal	Valor diseño
Ánodos:			
Tipo		Pb-Ca	

Prop:Roberto Alfaro Cortes

Temperatura de operación	ºC		50
Número por celdas			61
Ancho de la placa	mm	930	
Altura de la placa	mm	980	
Espesor de la placa	mm		7,5
Máquina despegadora:			
Tipo			TBD
Capacidad	Cátodos/hora		500
Número de máquinas			2
Rectificadores:			
Número total de rectificadores		8	
Número rectificadores por sección		2	
Número de secciones		4	
Salida rectificador	v	286	328,6
Salida rectificador	KA	16,8	21
Corriente por sección (2 rectificadores en paralelo)	KA	33,5	42
Potencia del rectificador	KW		6.900
Rectificadores de emergencia:			
Número total de rectificadores			2
Salida rectificador	v		315
Salida rectificador	KA		150

Prop:Roberto Alfaro Cortes

Salida rectificador	KW		48
Grúas puente:			
Número			4
Capacidad	t		7,5

SOLUCIONES

Parámetro	Unidades	Valor nominal	Valor diseño
Electrolito Rico alimentado:			
Flujo por sección	m^3/h	2045	2400
Flujo por celda	m^3/h	14,4	16,9
Temperatura de operación	ºC	50	
Cobre	g/l	42,5	
Fe	g/l	1,5	
Cl	ppm	18	
Ácido	g/l	176	
Electrolito Pobre:			
Flujo por sección	m^3/h	2045	2400
Flujo por celda	m^3/h	14,4	16,9
Temperatura de operación	ºC	51	
Cobre	g/l	40	
Fe	g/l	1,50	
Cl	ppm	18	
Ácido	g/l	180	
FC-1100:			
Flujo por sección		3 L /d	1,0 L/h
Gravedad específica		1,23	

Prop:Roberto Alfaro Cortes

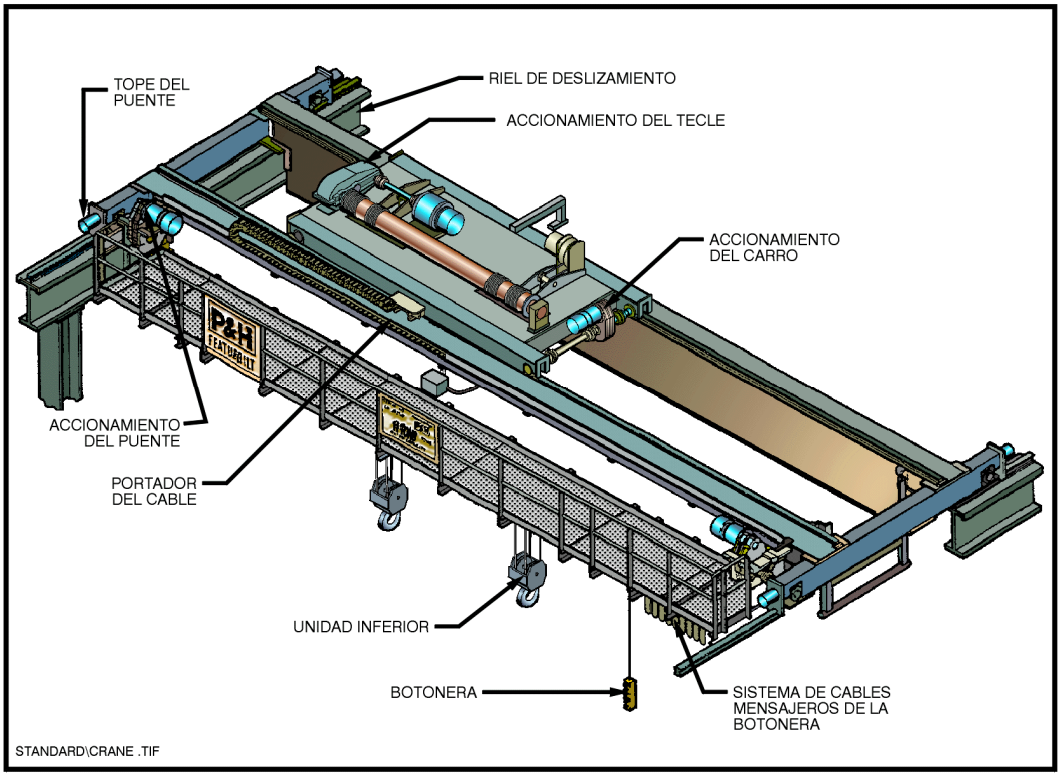
Temperatura	ºC	10 - 20	
pH		4,4	
Sulfato de Cobalto:			
Flujo por sección	m^3/h	0,01	0,07
Gravedad específica		1,2	
Temperatura		10 – 20	
pH		4,0	

1.7 DESCRIPCIÓN DE LA MANIPULACIÓN DE CATODOS

Las celdas de electroobtención son servidas por cuatro puentes grúa, uno para cada sección. Cada grúa tiene una capacidad de 7,5 toneladas en el tecle principal y una capacidad de 2 toneladas en el tecle auxiliar. La araña de la grúa está diseñada para recoger 20 cátodos a la vez durante la cosecha. Esto se logra con la cremallera vertical de cátodos que está enganchada en los dos ganchos de la grúa. Durante la limpieza de celdas, se levantan a la vez 31 ánodos de la celda. Esto se lleva a cabo enganchando

manualmente hacia arriba la araña de levantamiento de ánodos en los dos ganchos de la grúa de manera que se pueda levantar toda la celda de ánodos.

Figura 2.1.5 Puente grúa típico



1.7.1 PUENTE GRÚA TÍPICO

El puente grúa se posiciona sobre la celda que se va a cosechar. Una vez que la grúa está sobre la celda en la posición correcta, la araña de cátodos se baja hasta la parte superior de la celda de electroobtención. Luego los cátodos (20) se recogen y se sacan de la celda. Luego la carga de cátodos se transfiere a la correa transportadora de carga de cátodos de la máquina despegadora.

El puente grúa levanta los cátodos permanentes despegados desde la correa transportadora de separación de cátodos permanentes de la máquina despegadora y los regresa a la celda de electroobtención desde donde se extrajeron, luego coloca los cátodos permanentes en la celda. El puente grúa se mueve hacia la celda siguiente y

repite el procedimiento o extrae otra carga desde la misma celda. Al final del programa de cosecha del día, la grúa se estaciona en su área de estacionamiento designada.

La nave de electroobtención opera los 365 días al año, 24 horas diarias. Los cátodos se cosechan después de cinco días de depositación. Normalmente, la cosecha se lleva a cabo siete días a la semana, con un turno diario. Después de que se ha completado la cosecha, el resto del tiempo en el programa de trabajo se usa para la limpieza, el orden y aseo, la mantención de la celda y el despegado de cátodos, en caso de que el puente grúa o la máquina despegadora se haya detenido debido a una falla de energía o mecánica.

El puente grúa extrae un tercio de los cátodos depositados en una celda al mismo tiempo. Por lo tanto, el puente grúa demora tres viajes en retirar los cátodos de una celda completa.

Mientras se extrae desde la celda un tercio de los cátodos para el despegue, se continúa suministrando energía eléctrica a la celda. La densidad de la corriente es un 50 por ciento más alta durante este período. Por lo tanto, es muy importante minimizar el tiempo durante el cual se produce esta densidad alta de corriente. Una densidad alta de corriente puede traducirse en características catódicas no deseadas, tales como:

Apariencia	La alta densidad de corriente produce un depósito rugoso y más nodular, capaz de producir un aumento de cortocircuitos en la celda
Impurezas	Un depósito rugoso y nodular es más susceptible a oclusiones de partículas de óxido de plomo y a un electrolito incrustado en el depósito de cátodos, por lo tanto, se producen cátodos contaminados.
Fragilidad	La alta densidad de corriente contribuye a un mayor desarrollo de granos. Esto lleva a un depósito más frágil, el que resulta difícil de extraer.

1.7.2 CÁTODOS

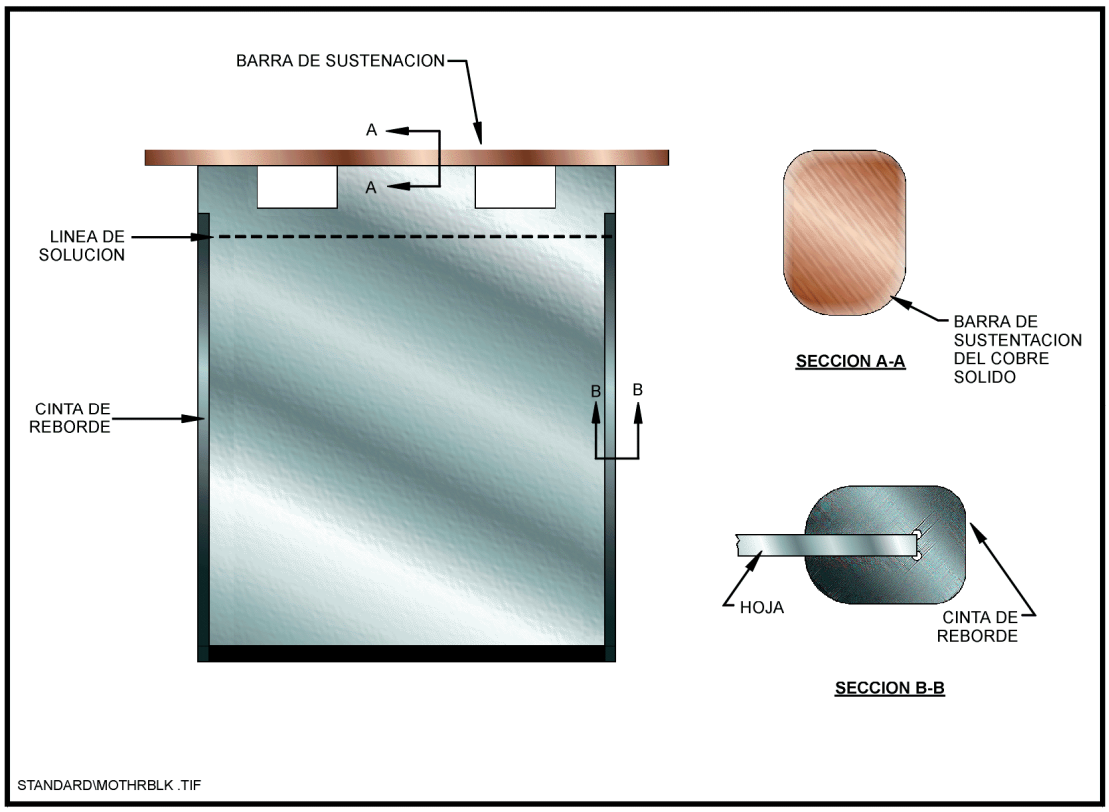
La nave de electroobtención emplea el proceso de tecnología de cátodos permanentes Kidd. Esta tecnología utiliza cátodos permanentes de acero inoxidable y una máquina despegadora automática. La precisión de las dimensiones y la rigidez de los cátodos permanentes de acero inoxidable permiten una separación de 100 mm entre los cátodos permanentes. La rigidez de los cátodos también produce una cantidad menor de cortocircuitos en las celdas de electroobtención, lo que mejora la eficiencia de la corriente. En la Figura 2.1.6, se ilustra el cátodo permanente de acero inoxidable.

1.7.2.1 Cátodo permanente de acero inoxidable

El cobre depositado en la superficie del cátodo permanente se extrae mediante una máquina despegadora automática luego de que se ha completado el ciclo de depositación de cátodos (cinco días). El cátodo permanente debe ser capaz de electrodepositarse con cobre y despegarse del depósito. El cátodo permanente debe ser resistente a la corrosión del electrólito ácido. Las propiedades de la superficie y los materiales de construcción cumplen con estas metas.

Figura 2.1.6 Cátodo permanente de acero inoxidable

Prop:Roberto Alfaro Cortes



La lámina del cátodo permanente está fabricada en acero inoxidable 316 L y tiene 3,1 mm de espesor. La barra de suspensión está hecha de cobre de alta conductividad. La barra de suspensión está soldada a la lámina de cátodo permanente. La superficie inferior de la barra de suspensión está redondeada de modo que el cátodo permanente cuelgue verticalmente, haga un buen contacto eléctrico con la barra colectora intermedia y minimice la corrosión por contacto. Los cátodos permanentes están provistos de cintas plásticas de borde a lo largo de cada lado para evitar que el cobre se electrodeposite alrededor de los bordes del cátodo permanente. Las cintas del borde se introducen en un surco que corre a lo largo de toda la lámina.

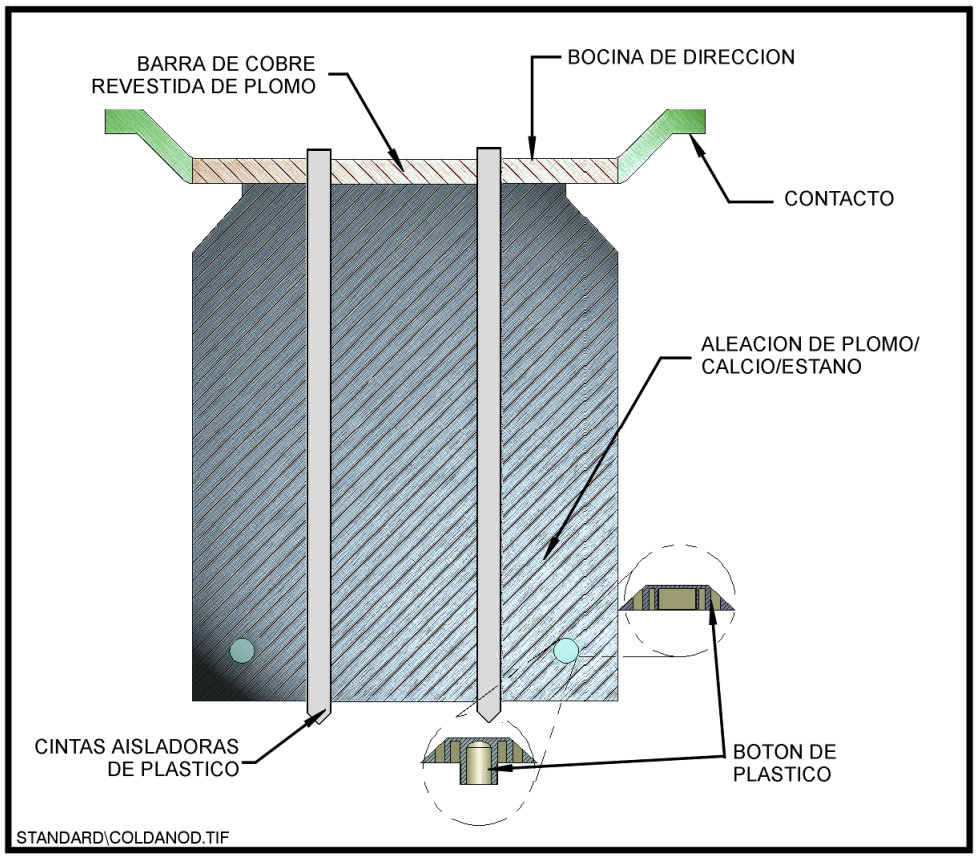
1.7.2.2 Ánodo

Los ánodos tienen 6,35 mm de espesor y están hechos a partir de una placa laminada de aleación de plomo, calcio y estaño.
Los ánodos laminados conservan su forma y tienen menos tendencia a doblarse o deformarse con el tiempo, en comparación con otros tipos de ánodos. Los ánodos laminados tienen las siguientes ventajas:

- Producen un producto de corrosión de granulación fina, el cual desciende fácilmente al fondo de la celda, en vez de escamas más grandes, las cuales pueden hacer contacto con los depósitos de cobre en crecimiento.

- Una buena estabilidad dimensional ante condiciones de electrodepositación con densidad alta de corriente.
- Una junta de la barra de suspensión con la lámina soldada mediante un proceso especial que da una baja caída de voltaje, lo que da como resultado un bajo consumo de energía. La Figura 2.1.7 ilustra un ánodo laminado.

Figura 2.1.7 Ánodo laminado



La corrosión del ánodo

de plomo se presenta con el tiempo, dando como resultado la caída del óxido de plomo al fondo de las celdas como lodo. Si se deja acumular, el lodo puede subir hasta un nivel en que sería arrastrado hasta el área de los electrodos por el flujo de electrólito desde el distribuidor del fondo de la celda, provocando la contaminación del cobre catódico. Para evitar esto, se elimina periódicamente (cada tres a seis meses) el lodo de plomo del fondo de cada una de las celdas.
La superficie del ánodo se oxida durante una operación normal. El descascaramiento de la capa de óxido de plomo puede llevar a la contaminación del cobre catódico depositado. El descascaramiento es causado por:

- Una disminución repentina de la temperatura del electrólito.
- Los ánodos curvados que son rayados o abollados por los cátodos permanentes a medida que se cargan en la celda. La verticalidad de los ánodos debe revisarse cada vez que se limpia la celda.
- Los cátodos permanentes curvados que rayan a los ánodos a medida que se cargan en las celdas. Se debe inspeccionar la verticalidad de los cátodos permanentes después de cada extracción y antes de que se vuelvan a poner en las celdas.
- Las densidades altas de corriente, las que rápidamente forman la capa de PbO_2, y mayores velocidades de circulación de electrólito, lo que lleva a una mayor agitación entre electrodos y descama la capa de PbO_2.
- La interrupción de la electrólisis debido a cortes de energía, lo que altera la capa de PbO_2 y acelera el descascaramiento.
- Los niveles altos de ácido sulfúrico en el electrólito, lo que produce un aumento en la capa de PbO_2, aumentando el potencial de descascaramiento.
- Se insertan pinches de plástico de PVC (cloruro de polivinilo) en los dos extremos de la hoja de plomo. Estos pinches son para impedir que el ánodo de plomo haga contacto con el cátodo de acero inoxidable. Cualquier contacto del ánodo y el cátodo con corriente aplicada a la celda provoca un corte eléctrico directo que disminuye el rendimiento de la corriente del proceso de electroobtención.

Se agrega sulfato de cobalto ($CoSO_4$) al estanque de recirculación de electrólito. Su objetivo es estabilizar la capa de PbO_2. La práctica de electroobtención recomienda niveles de cobalto entre 125 y 165 mg/L. Los niveles de cobalto en Escondida se mantienen en 160 mg/L. La adición de cobalto también ayuda a disminuir el sobrevoltaje anódico, reduciendo de esta manera el consumo de energía. Se debe tener cuidado para controlar el descascaramiento de los ánodos y la posibilidad final de la contaminación con plomo del cátodo de cobre.