

Modernización de la Refinería de Ilo con implementación de la Tecnología de Cátodos Permanentes

Manuel Munguía¹, Flavio Begazo², Ángel Villanueva³, Henry Choque⁴

¹ Dirección de Operaciones Ilo, Southern Peru, (MMunguia@SouthernPeru.com.pe)

² Gerencia de Refinería Ilo, Southern Peru, (FBegazo@SouthernPeru.com.pe)

³ Superintendencia Técnica, Southern Peru, Refinería de Ilo, (AjVillanueva@SouthernPeru.com.pe)

⁴ Metalurgista, Southern Peru, Refinería de Ilo, (Hchoque@SouthernPeru.com.pe)

RESUMEN

Tras 46 años de operación continua, La Refinería de cobre de SPCC se plantea su modernización con el objetivo de renovar sus equipos mayores, los cuales tienen frecuentes paradas que conllevan pérdidas de producción. El proyecto de modernización consiste en realizar un cambio tecnológico, reemplazando la tecnología actual de "láminas de arranque de cobre" por la tecnología de "cátodos permanentes".

La implementación del proyecto no considera un incremento de producción, pero si se ha conceptualizado para que este alineado con futuras ampliaciones. El proyecto se ha dividido en 5 etapas, siendo la primera de ellas el desarrollo de pruebas metalúrgicas a nivel industrial que demuestren la viabilidad técnica del nuevo proceso. El presente trabajo técnico describe los resultados alcanzados en las pruebas, con las cuales se verificó que los cátodos producidos mantienen su calidad química, la calidad física se mejora, logrando disminuir el porcentaje de cátodos observados por apariencia física de 3 a 1%.

Otros resultados importantes indican que la eficiencia de corriente se mantiene sobre el objetivo anual (> 98.0%). El voltaje de celda se incrementó en 4mV (+2%) debido a la menor conductividad eléctrica de los cátodos inoxidables, por lo que se estima se tendrá un incremento equivalente en el consumo de energía.

Los principales desafíos para el desarrollo de las pruebas fueron: definir el tipo de cátodo permanente a utilizar y el diseño de este, definir el nuevo arreglo de electrodos al interior de la celda, establecer los nuevos criterios de inspección y control de cortos circuitos; y principalmente mantener el ciclo de cosecha de 12 días.

La conceptualización del proyecto y el diseño del proceso se ha realizado empleando el know-how del staff técnico de la Refinería de Ilo, que a la fecha han

logrado producir cátodos de 188 Kg/Ud., los cuales se convierten en los cátodos más pesados del mundo obtenidos con la tecnología de cátodos permanentes. Los cátodos han sido comercializados como un nuevo producto denominado "Cátodos de Cobre Ilo", que tienen la misma y reconocida calidad de los "Cátodos Comerciales" que actualmente produce la Refinería de Ilo.

1. Introducción

La Refinería de Ilo de SPCC inició sus operaciones en 1976, diseñada con una capacidad de producción de 150,000 Ton/año de cátodos de cobre alta pureza. Actualmente su capacidad de producción es de 290,000 Ton/año.

Este incremento de producción se ha alcanzado sin ampliar el edificio de su casa tanque y manteniendo la tecnología original de diseño de su Planta Electrolítica, la cual considera el uso de hojas iniciadoras de cobre o láminas de arranque.

De igual manera, en este periodo de 46 años de operación continua, se han conservado los mismos equipos mayores, los cuales presentan frecuentes paradas no programadas que afectan su disponibilidad y conllevan pérdidas de producción. El mantenimiento de estos equipos es complicado debido a la falta de repuestos. Mas aún, su renovación es costosa ya que actualmente no se fabrican por ser una tecnología obsoleta.

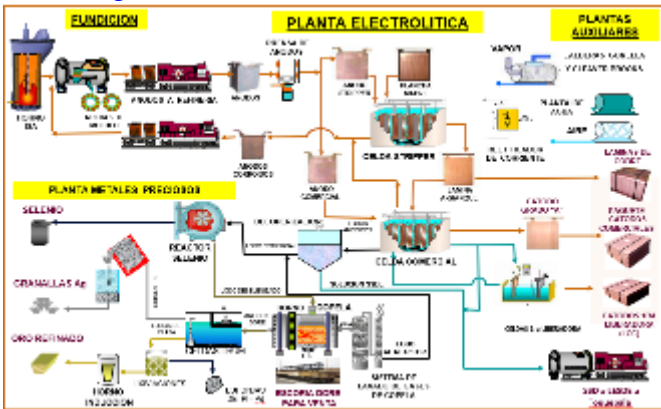
Frente a esta necesidad SPCC se plantea migrar hacia la tecnología de cátodos permanentes con lo que se podría reemplazar 05 equipos destinados a la cosecha de cátodos y preparación de láminas de arranque por 01 moderna y automatizada "Máquina Deslaminadora de Cátodos", simplificando la operación y con la ventaja adicional que se liberarán espacios para poder instalar nuevas celdas que permitirán incrementar a futuro la capacidad de tratamiento de la Planta Electrolítica.

2. Descripción del Proyecto

2.1 Descripción de la Refinería de Ilo.

La materia prima de la Refinería de Ilo son los ánodos de cobre impuro (Cu = 99.7%) producidos por La Fundición, ánodos que son procesados en la Planta Electrolítica (Refinería) para obtener cátodos de cobre de alta pureza (Grade A, Cu > 99.99%, impurezas < 1ppm). La figura 1 presenta el Flowsheet de la Refinería.

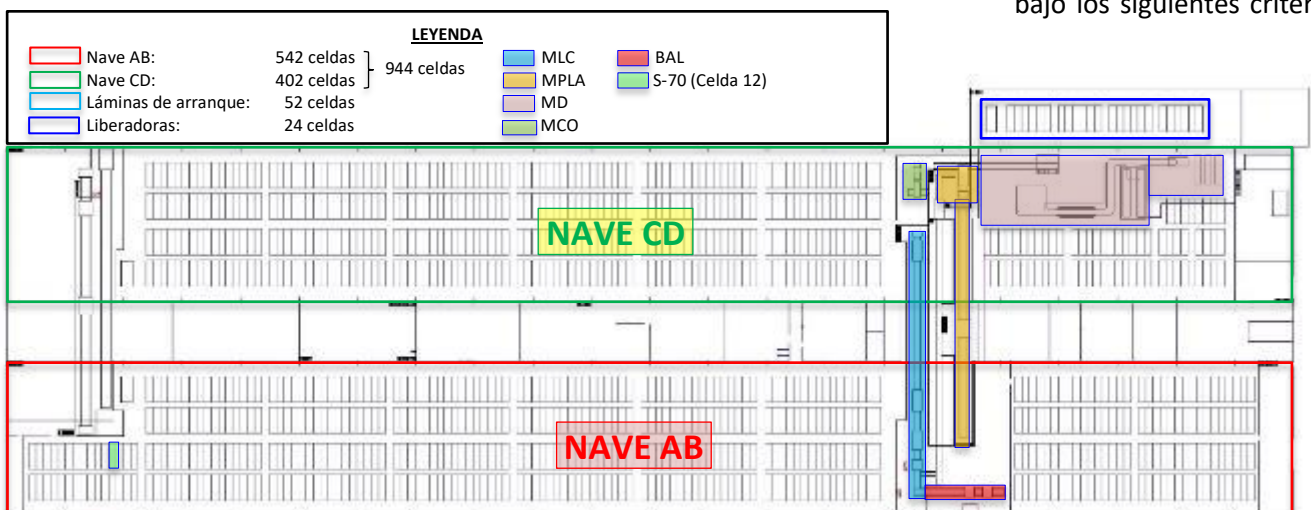
Fig. 1 Flowsheet de Refinería de Ilo – SPCC.



La Planta Electrolítica está conformada por 1,020 celdas electrolíticas, las cuales están distribuidas en 2 naves de su casa tanque de la siguiente manera:

- Celdas comerciales 944
- Celdas de láminas de arranque 52
- Celdas liberadoras 24
- Total 1020

En la Fig. 2 se presenta el layout de la Planta electrolítica con la distribución de sus celdas.



2.2. Alcance del proyecto:

El proyecto consiste en implementar cátodos permanentes de acero inoxidable para 1,020 celdas e instalar una Máquina Deslaminadora de Cátodos (MDC). La instalación de la MDC simplificará la operación al reemplazar 05 equipos que actualmente sirven para la cosecha de cátodos y preparación de láminas de arranque, según se detalla a continuación:

- Máquina Lavadora de Cátodos (MLC).
- Máquina Preparadora de Láminas (MPLA).
- Máquina y trolley de Deslaminado (MD)
- Máquina cortadora de orejas (MCO).
- Balanza, pesado y etiquetado (BAL)

La ubicación de estos equipos se presenta en la Fig. 2. Los espacios que quedarán disponibles después de retirar los equipos se podrán utilizar para instalar 158 celdas adicionales que permitirán a futuro incrementar la capacidad de producción de la Refinería a 338,000 Ton/año.

El cronograma de implementación del proyecto se ha dividido en 5 etapas, según:

- Etapa 1: Pruebas metalúrgicas
- Etapa 2: Implementación de la MDC y pilotaje en 128 celdas
- Etapa 3: Cambio tecnológico de Nave AB
- Etapa 4: Cambio tecnológico de Nave CD
- Etapa 5: Desmontaje de equipos.

Mientras se realiza la implementación del proyecto, se tendrá de forma paralela celdas con producción de cátodos de cobre a partir de láminas de arranque y también celdas con producción de cátodos a partir de cátodos permanentes, por lo que el proyecto se ha planificado para no afectar los estimados de producción de cobre refinado.

La conceptualización del proyecto se ha desarrollado bajo los siguientes criterios

y restricciones:

- Implementar la nueva tecnología de forma progresiva, sin pérdidas de producción y sin interferir en las operaciones de la planta actual.
- Mantener la calidad química de los cátodos.
- Mantener o mejorar la calidad física de los cátodos y la presentación estética de los paquetes.
- Mantener el ciclo de cosecha en 12 días para no alterar los programas de cosecha y los roles de turno del personal.

2.3. Descripción del nuevo proceso:

El proceso de electrorefinación con cátodos permanentes es muy similar al proceso actual, con la única diferencia que el cobre refinado se deposita sobre cátodos inoxidables en lugar de hacerlo sobre láminas de cobre. En la tabla 1 se comparan los dos procesos.

Tabla 1. Cuadro comparativo del proceso de electrorefinación con láminas y con cátodos permanentes [Ref. 1].

PROCESO ACTUAL	PROCESO CON CATODO PERMANENTE
<p>ANODO</p> <p>CATODO INICIAL Lámina de cobre</p>	<p>ANODO</p> <p>CATODO INICIAL Acero inoxidable</p>
Cátodo inicial: Lámina de cobre puro	Cátodo inicial: Acero inoxidable 316L
<p>Reacción electroquímica:</p> $Cu_{anodo}^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu_{catodo}^0$ <p>No hay generación de gases.</p>	<p>Reacción electroquímica:</p> $Cu_{anodo}^0 \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu_{catodo}^0$ <p>No hay generación de gases.</p>
Ánodo: Cobre impuro de 99.7%	Ánodo: Cobre impuro de 99.7%
<p>Cátodo de cobre electrorefinado depositado sobre una lámina de inicial</p>	<p>Cátodo de cobre electrorefinado depositado sobre plancha de acero</p>

de cobre.	inoxidable.
-----------	-------------

3. Pruebas metalúrgicas para el diseño del proceso:

3.1. Descripción de las pruebas:

Las pruebas se realizaron en la celda comercial N 12 de la Sección S-70 de Nave AB (ver ubicación en la Fig. 2). La celda en prueba operó en las mismas condiciones de proceso que las 944 celdas que producen cátodos comerciales, ya que está conectada eléctricamente al mismo rectificador y comparten el circuito de circulación de electrolito. Los principales parámetros de proceso fueron los siguientes:

- Amperaje 29,450 A
- Densidad de corriente 278 A/m²
- Tiempo de depósito 12 días
- Electrodo en celda 52 cátodos/53 ánodos
- Temperatura de electrolito 61.5 C
- Flujo de electrolito 25 L/min
- Contenido de cobre en electrolito 41-45 g/L
- Contenido de ácido en electrolito 167- 175 g/L
- Contenido de cloro en electrolito 28-35 g/L

Se realizaron 18 pruebas utilizando 2 diseños de cátodos inoxidables. Se probaron ciclos de cosecha de 8 y 12 días. En las pruebas de 8 días el peso promedio del cátodo producido fue de 125 Kg, mientras que para las pruebas de 12 días el peso del cátodo alcanzó 188Kg. En la tabla 2 se resumen las pruebas realizadas.

Tabla 2. Cuadro resumen de las pruebas realizadas

PRUEBA	DÍAS DE DEPOSITO	PESO DE CATODO	TIPO DE CATODO INOXIDABLE USADO	TIPO DE CATODO PRODUCIDO
P1	8	Promedio 125 Kg.	Toquepala adaptado	2 hojas separadas
P2	8			
P3	8			
P4	8			
P5	8			
P6	8	Promedio 188 Kg.	Diseño mejorado	2 hojas unidas por su borde inferior Tipo taco
P7	12			
P8	12			
P9	12			
P10	12			
P11	12			
P12	12			
P13	12			
P14	12			
P15	12			
P16	12			
P17	12			
P18	12			

3.2. Diseño del cátodo permanente:

Para el diseño del cátodo permanente se debe partir de las dimensiones del ánodo a procesar, que para el

caso del presente proyecto permanece sin variaciones en peso y dimensiones para no hacer modificaciones aguas arriba en la máquina preparadora de ánodos o en la planta de afino.

El diseño del cátodo consideró las características y dimensiones de la lámina de arranque actual. Inicialmente, se utilizaron cátodos permanentes de la planta de Electrodeposición de Toquepala. Estos cátodos eran de mayores dimensiones por lo que se recortó la barra de suspensión y el largo de la plancha de acero inoxidable. En la Fig. 3 se presenta un cátodo Toquepala adaptado a las dimensiones de la lámina de arranque.

Fig. 3 Cátodo permanente Toquepala adaptado.



A partir de los primeros resultados obtenidos en las pruebas con el cátodo Toquepala se diseñó un nuevo cátodo con las siguientes características:

- Barra sólida de cobre.
- Cuerpo de acero inoxidable 316L con rugosidad > 0.6 μm .
- Bordes aislantes laterales de polipropileno.
- Borde inferior con V Groove para facilitar el deslaminado del cobre.

Fig. 4 Diseño mejorado de cátodo permanente.



3.3. Resultados:

3.3.1. Calidad física de los cátodos:

A diferencia de otras instalaciones, la Refinería de Ilo no cuenta con una planta de alambión a la cual pueda derivar los cátodos que tengan defectos físicos apreciables. Esta condición obliga a que la calidad física de los cátodos, así como la presentación estética de los paquetes deba ser libre de observaciones, para asegurar la venta del 100% de su producción.

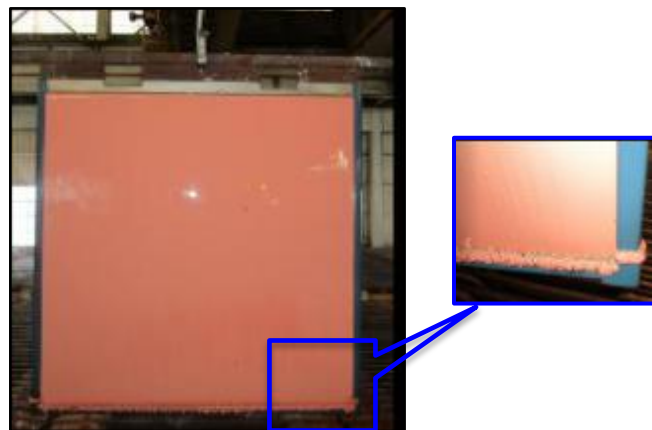
Durante el desarrollo de las pruebas se han presentado diferentes condiciones que desmejoraban la calidad física de los cátodos. La mejora de su calidad física es el proceso que mejor describe la evolución del conocimiento de la nueva tecnología. A continuación, se describen los principales retos que se presentaron y como se fueron superando.

- Cátodos con depósito irregular en el borde inferior.

Las primeras pruebas se realizaron con los cátodos adaptados provenientes de la planta de electrodeposición de Toquepala. Los cátodos venían provistos de bordes aislantes en forma de U. (Ver Fig. 3)

Inicialmente se consideró conveniente el uso del borde aislante tipo U, que permite obtener 2 hojas de cobre separadas. Sin embargo, los cátodos producidos presentaban un crecimiento irregular de cobre en la parte inferior debido al atrapamiento de lodo anódico en el borde aislante inferior (ver Fig. 5).

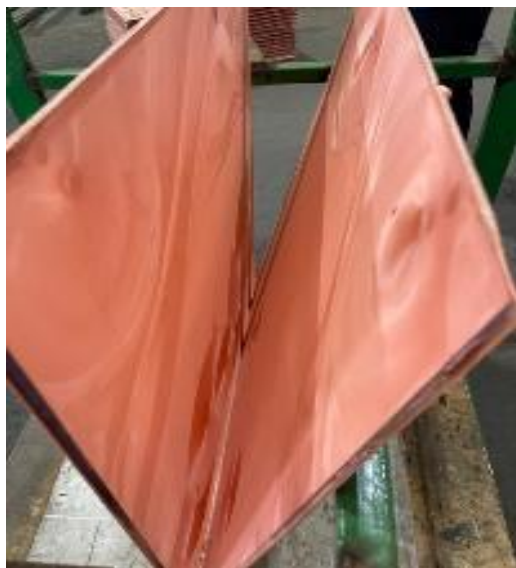
Fig. 5 Cátodo con crecimiento irregular parte inferior



Para superar este problema se cortaron los bordes tipo U, dejando solamente los bordes laterales. Debido a esta modificación ya no se producirían 2 hojas de cobre separadas, sino que se obtendrían 2 hojas de

cobre unidas por su borde inferior, se tendría un cátodo conocido como tipo “taco”. (ver Fig. 6)

Fig. 6 Cátodo tipo “taco”.



El despegado prematuro de las hojas de cobre se acentuaba a medida que transcurrían los días de depósito por incremento del peso de los cátodos. En las pruebas de 8 días de depósito se registró 10% de cátodos despegados. Mientras que para las pruebas con 12 días se presentaron hasta 40% de cátodos que se despegaban estando aún en las celdas, lo que causaba cortos circuitos, afectando la eficiencia de corriente como se describe en el punto 3.2.4.

Se estudiaron diferentes posibles causas, entre otros el choque térmico por uso de agua caliente para el lavado de los contactos. Finalmente se identificó la causa principal, siendo la pobre adherencia del depósito de cobre debido a la baja rugosidad de la plancha de acero inoxidable (0.3 μm).

Esta fue la conclusión obtenida después de probar el pulido de un grupo de planchas con diferentes rugosidades, resultando que las planchas con rugosidad $> 0.6 \mu\text{m}$ presentaban depósitos de cobre con una adherencia adecuada sin que se produzcan cátodos despegados. (Ver resultados en tabla 3 y Fig. 9 y 10).

- **Cátodos con infiltración de electrolito en la cara interna.**

El problema más grave y que no se pudo resolver completamente hasta la implementación de los cátodos con diseño mejorado fue el ingreso o infiltración de electrolito entre el depósito de cobre y plancha de acero inoxidable por despegado de la hoja de cobre.

Este problema que produce cátodos con fuertes sulfataciones que no solo afectan la su calidad física, sino que producen contaminación por azufre e impurezas (ver Fig. 7 y 8).

Fig. 7 Cátodo despegado



Fig. 8. Cátodo con sulfataciones

Tabla 3. Adherencia del depósito de cobre en función de la rugosidad de la plancha de acero inoxidable

N° Hoja abrasiva	Rugosidad (μm)	Adherencia del depósito de cobre
40	1.6	Muy Fuerte
60	1.3	Muy Fuerte
80	0.8	Fuerte
100	0.6	Media
120	0.4	Débil
240	0.3	Débil

Fig. 9. Cátodo buena adherencia, no presenta despegado de su parte superior.

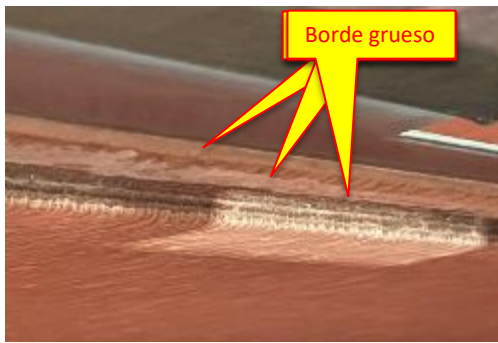


Fig. 10. Cátodo buena adherencia. Producido a partir de una plancha pulida con abrasivo N°40.



- **Cátodos con borde grueso.**

El borde grueso de los cátodos es un problema que también se presenta con láminas de arranque. Este problema ocurre por un alineamiento inadecuado de los cátodos respecto al ánodo.

Para el caso de los cátodos permanentes el borde grueso invade el cubrecanto lateral (Ver Fig. 11), condición que provoca que el cubrecanto se mueva de su posición al momento de realizar el deslaminado de las hojas de cobre. De suceder que los cubrecantos no estén en su posición correcta para el siguiente ciclo de depósito, se tendría la unión de las 2 hojas de cobre lo que imposibilitaría su deslaminado.

Este problema se solucionó realizando el correcto alineamiento no solo de los cátodos permanentes sino también de los ánodos durante el carguío y acondicionado de los electrodos.

Fig. 11. Cátodo con borde grueso



- **Cátodos con sulfataciones en el puente o borde superior.**

Inicialmente las pruebas se realizaron utilizando un solo nivel de electrolito con el objetivo de simplificar la operación. Sin embargo, se tuvo que optar por utilizar 2 niveles por la necesidad de conservar el puente de los ánodos corroídos se según se describe en el punto 3.3.4.

El uso de 2 niveles provocó que se formen sulfataciones en el borde superior de los cátodos, como se puede apreciar en la Fig. 12. Estas sulfataciones que se formaban debido a la evaporación del electrolito se adherían fuertemente al cátodo y no se removían por aplicación de lavado con vapor, debiendo utilizarse una limpieza mecánica con escobillas de acero.

Fig. 12. Cátodo con sulfataciones en el borde superior



Para resolver este problema se realizó un cambio en la secuencia de cambio de niveles según se detalla en la Tabla 3. En el programa modificado, el último

día del ciclo de depósito, se sube el nivel de electrolito al nivel 1 (superior) para disolver las sulfataciones.

Los resultados de esta modificación se pueden apreciar en la Fig. 13 que presenta una vista de los bordes superiores de los cátodos libre de sulfataciones.

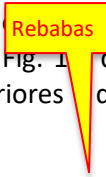


Tabla 3. Modificación en el programa de niveles para eliminar las sulfataciones del borde superior

Días de depósito	Programa Inicial	Programa modificado
	Nivel	Nivel
Día 1	1	1
Día 2	1	1
Día 3	1	1
Día 4	1	1
Día 5	1	1
Día 6	1	1
Día 7	2	2
Día 8	2	2
Día 9	2	2
Día 10	2	2
Día 11	2	2
Día 12	2	1

Fig. 13. Vista de los bordes superiores de los cátodos libre de sulfataciones.



- **Cátodos con crecimiento de rebabas en las esquinas inferiores.**

La parte inferior de los cubrebordes laterales vienen selladas con cintas adhesivas. Sin embargo, durante el desarrollo de las pruebas, la cinta adhesiva se degradó por el contacto con el electrolito generando el crecimiento de rebabas de cobre en las esquinas inferiores de los cátodos, como se puede apreciar en la Fig. 14 (a).

Estas rebabas representan un peligro por sus filos cortantes y además afectan la calidad y presentación de los paquetes de cátodos debido a que se sulfatan como se puede ver en la Fig. 14 (b).

Fig. 14. Rebasas en las esquinas inferiores de los cátodos



Para solucionar este problema, inicialmente se probaron otras cintas adhesivas sin éxito. Posteriormente, se probó sellar la parte inferior del cubrebordo utilizando resinas, las cuales dieron resultado parcial, muchos de los cátodos perdían el relleno de resina durante el deslaminado de las hojas de cobre, lo que obligaba a retirar las planchas inoxidables a reparación.

Finalmente, se optó por aplicar un relleno con soldadura de polipropileno; solución que dio buen resultado permitiendo utilizar los mismos cátodos inoxidables de forma continúa en varios ciclos de cosecha seguidos. (Ver Fig. 15)

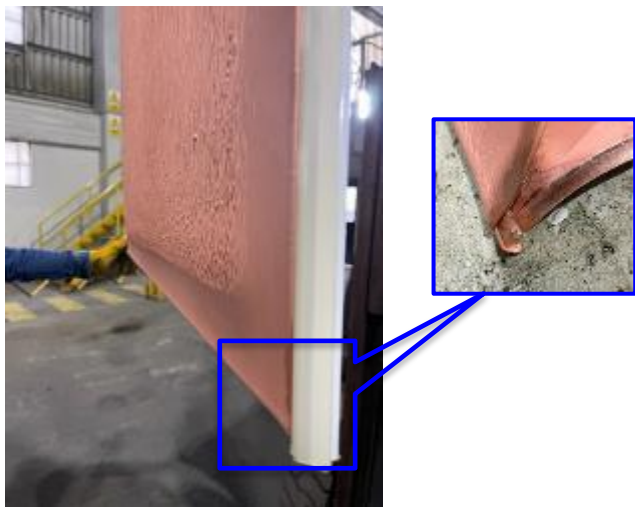
Fig. 15. Relleno de soldadura de polipropileno, utilizado para sellar los cubrecantos



Una alternativa de solución para evitar el crecimiento de las rebabas fue incrementar 2cm el largo del cátodo inoxidable. Esta modificación provocó que se obtuvieran cátodos más delgados en su borde inferior

pero no se evitó el crecimiento de las rebabas, como se puede apreciar en la Fig. 16.

Fig. 16. Cátodo producido con inoxidable alargado en 2cm.



A la fecha se está a la búsqueda de proveedores que fabriquen cubrebordes sellados, que se estima será la solución definitiva a este problema.

Todos los problemas arriba descritos, que desmejoraban la apariencia física de los cátodos y las soluciones encontradas constituyen experiencias importantes de conocimiento del nuevo proceso, desafíos cuyas soluciones exigieron desarrollar ideas y estrategias para finalmente llegar a producir cátodos de excelente calidad física y presentación según se pueden apreciar en la Fig. 17. La Tabla 4 compara los cátodos observados por apariencia física de los cátodos producidos en las pruebas versus los cátodos que se producen actualmente a partir de láminas de arranque.

Tabla 4. Porcentaje de Cátodos observados por apariencia física en las pruebas con cátodos permanentes comparado con el proceso convencional de láminas de arranque.

Prueba	Cátodos observados (%)	
	Celda con láminas de arranque	Celda con cátodos permanentes
P11	5.5	0.0
P12	5.5	1.9
P13	3.9	1.9
P14	1.3	1.9
P15	2.0	1.9
P16	2.7	0.0
P17	0.3	0.0
P18	4.0	0.0
Promedio	3.2	1.0

3.3.3. Cambios en la presentación de los paquetes:

El cambio más visible en la presentación de los paquetes de los “Cátodos Cobre Ilo” (ver Fig. 17) es la

ausencia de orejas propias de los cátodos comerciales producidos a partir de láminas de arranque (ver Fig. 18). Este cambio representa una ventaja ya que no será necesario realizar el lavado con vapor para eliminar el sulfato residual que queda atrapado en las orejas de los cátodos.

Fig. 17. Primer paquete de Cátodos Cobre Ilo.



Fig. 18. Paquete de Cátodos Comerciales que actualmente produce la Refinería de Ilo



3.3.2. Calidad química de los cátodos:

Además, del precio internacional del cobre, los cátodos que produce la Refinería de Ilo reciben un premio adicional en su comercialización debido a su excelente calidad química, la cual supera las especificaciones del estándar ASTM B115-10 para cátodos de cobre.

A diferencia de las láminas de arranque, los cátodos permanentes tienen bordes aislantes, los cuales incrementan el ancho de los cátodos en 2 cm a cada lado. Este incremento del ancho de los cátodos (+4cm), reduce los espacios al interior de la celda, lo que podría afectar la circulación del electrolito, al generar segregación electrolito y la correcta distribución de los

aditivos, lo que finalmente afectaría la calidad química de los cátodos.

Para verificar que no exista variaciones en la calidad química de los cátodos debido a la alteración de la circulación del electrolito, causado por el uso de cátodos de mayor tamaño, se realizó un muestreo especial. Los cátodos se muestrearon por niveles, de su parte superior, media e inferior. Igualmente se muestrearon cátodos según su ubicación en la celda, al inicio, mitad y final de la celda.

En la tabla 5 se presentan los ensayos del muestreo especial, el cual verifica que la calidad química de los cátodos es homogénea, no existe variación en la calidad del cobre a lo largo del cuerpo del cátodo y tampoco existe variaciones en la calidad química de los cátodos por su ubicación en la celda.

Tabla 5. Ensayos químicos de los cátodos producidos en las pruebas. Muestreo por niveles y por ubicación en la celda.

Elemento	Inicio de celda			Mitad de celda			Salida de celda		
	Superior	Medio	Inferior	Superior	Medio	Inferior	Superior	Medio	Inferior
Cu (%)	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.998	99.997
S (ppm)	3.82	4.01	3.51	3.12	3.29	4.19	3.32	3.88	3.72
O2 (ppm)	26.59	12.64	15.19	16.00	14.92	15.05	11.23	16.70	14.90
Ag (ppm)	6.80	7.46	8.61	6.62	8.54	8.17	7.65	8.32	8.86
Se (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ni (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Pb (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Fe (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cd (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Bi	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sb (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
As (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Te (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sn (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

3.3.3. Nuevo arreglo de electrodos en celdas:

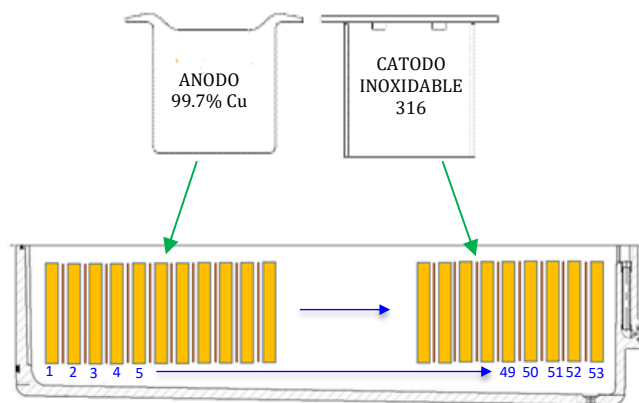
Actualmente el arreglo de electrodos en celdas está conformado por 52 ánodos y 53 cátodos. Este arreglo considera cátodos extremos, es decir que se tiene un cátodo al inicio y al final de la celda.

Al implementar cátodos permanentes, se debe cambiar el arreglo de electrodos a 53 ánodos y 52 cátodos (ver Fig. 19), ya que no se puede tener cátodos extremos debido a que su cara externa no recibe depósito de cobre, lo que causaría corrosión de la

plancha de acero inoxidable al estar expuesta permanentemente al electrolito.

El nuevo arreglo de electrodos afecta principalmente la distribución de la corrosión de los ánodos, debido a que los ánodos extremos se desgastan parcialmente y los ánodos interiores se desgastan más. Las pruebas han permitido estimar que el porcentaje de corrosión de los ánodos aumenta de 14 a 15%.

Fig. 19. Nuevo arreglo de celdas con ánodos extremos considera 53 ánodos y 52 cátodos en celdas.



3.3.4. Ánodos corroídos y control de niveles de electrolito.

Al modificar el arreglo de electrodos en celdas también se debe modificar el control de niveles de electrolito para asegurar que los ánodos corroídos al final de su ciclo de vida de 24 días tengan la suficiente resistencia para no caer al interior de la celda (ver Fig. 20) además de mantener su posición vertical (ver Fig. 21) sin doblarse o caer durante su traslado a Fundición.

Fig. 20. Vista de los ánodos corroídos en celdas al final de su ciclo de vida. No se tiene corroídos caídos

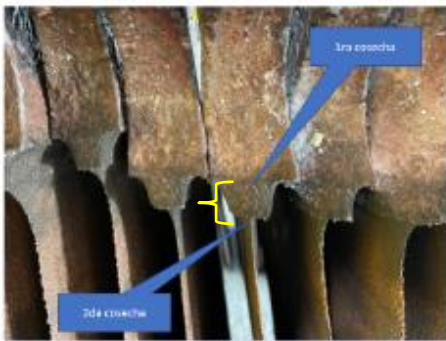


Fig. 21. Vista de los ánodos corroídos apilados verticalmente a ser recirculados a Fundición



Para conseguir que los ánodos no caigan al interior de la celda es importante mantener el puente de un espesor adecuado, para ello empleó 2 niveles a fin de no adelgazar el puente de los corroídos según se puede apreciar en la foto de la Fig. 22.

Fig. 22. Vista de los 2 niveles empleados para no debilitar el puente de los corroídos.



3.3.3. Voltaje de celda y consumo de energía:

Los cátodos de acero inoxidable tienen menor conductividad eléctrica que las láminas de arranque, lo que provoca un incremento del voltaje de celda.

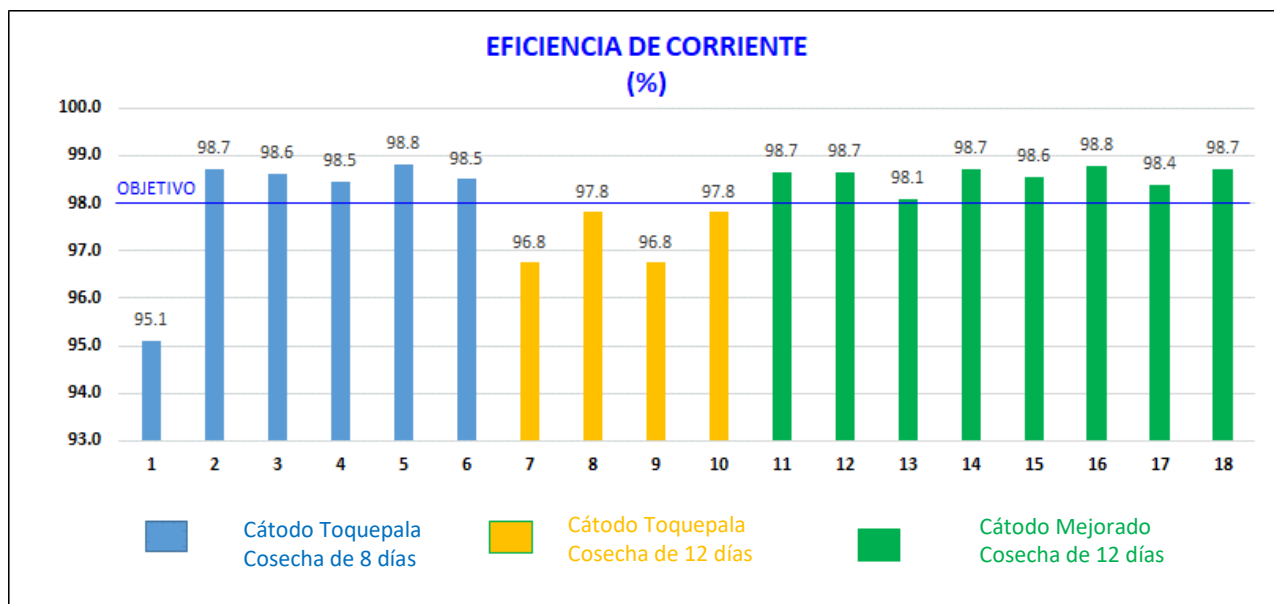
Durante el seguimiento de las pruebas se realizaron mediciones del voltaje de celda en 1er y 2do ciclo. Los resultados se reportan en la tabla 5.

En el primer ciclo de depósito, el voltaje de celda es menor debido a la menor separación de los electrodos. Para un ciclo completo de 24 días se reporta un incremento de 4.4 mV que representa un incremento de 1.7% para el consumo de energía.

Tabla 5. Voltaje de celda promedio 12 días para las celdas con cátodos permanentes y con láminas de arranque.

Prueba	Voltaje de celda (mV)		
	Celda con láminas de arranque	Celda con cátodos permanentes	Diferencia
P11 (Ciclo 1)	231	238	7
P12 (Ciclo 2)	289	296	7
P13 (Ciclo 1)	222	225	3
P14 (Ciclo 2)	287	290	
P15 (Ciclo 1)	223	227	
P16 (Ciclo 2)	297	301	4
P17 (Ciclo 2)	230	235	5
P18 (Ciclo 2)	295	299	4
Prom (Ciclo 1) día 1 a 12	225.4	229.9	4.4
Prom (Ciclo 2) día 13 a 24	291.0	295.3	4.3
Promedio 24 días		262.6	4.4

Fig. 23p. Eficiencia de corriente obtenidas en las pruebas.



3.2.4 Eficiencia de corriente

El objetivo anual de Eficiencia de Corriente de Refinería es mantenerlo >98%. La gráfica de la Fig. 23 resume la evolución de las eficiencias de corriente obtenidas en pruebas, donde se destaca lo siguiente:

La eficiencia de corriente de la prueba 1 es baja (95.1%) debido al crecimiento de depósito irregular en la parte inferior por uso de los cátodos Toquepala con bordes tipo U según se detalla en el punto 3.3.1.

En las pruebas 2 a 6 la eficiencia de corriente mejora sobre >98% porque se utilizan ciclos de 8 días de depósito, lo que evita la formación de corto circuitos.

En las pruebas 7 a 10, la eficiencia de corriente decae por debajo del 98%, debido principalmente a que se utiliza ciclos de 12 días de depósito, en los cuales se tiene el problema de despegado de las hojas de cobre por falta de adherencia según se describe en el punto 3.2.1.

Finalmente, las pruebas 11 a 18, que se desarrollan con el diseño mejorado de los cátodos inoxidables se logra obtener eficiencias de corriente > 98%, manteniendo el ciclo de depósito en 12 días.

5. Conclusiones:

Las pruebas metalúrgicas han demostrado la viabilidad técnica de implementar la tecnología de “cátodos permanentes” en reemplazo de la tecnología actual de “láminas de arranque de cobre”.

Los cátodos producidos con la nueva tecnología mantienen la misma calidad química que los cátodos que actualmente produce la Refinería de Ilo. Los cátodos tienen mejor apariencia física y mejor presentación.

El perfeccionamiento del diseño del cátodo inoxidable en busca de mejorar la calidad física de los cátodos ha permitido conocer la nueva tecnología y desarrollar nuevas estrategias de control que han permitido mantener la eficiencia de corriente sobre >98%, logrando mantener el ciclo de cosecha en 12 días y producir cátodos de 188 Kg.

Referencias

[1] Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport, Extractive Metallurgy of Copper, Fifth edition, 2011, pp 251, 258.

Agradecimientos

A la alta dirección por el apoyo y la confianza en el staff de ingenieros y operadores de la Refinería de Ilo para desarrollar este proyecto que permitirá colocarla a la vanguardia de la tecnología y continuar con el legado y la promesa de *“Hacer de la Refinería un hermoso gigante para orgullo y ejemplo de las nuevas generaciones”*

Henry Choque Huyhua
 Metalurgista
 Southern Perú
 Hchoque@Southernperu.com.pe
 Teléfono: 053 584010, Anexo 64365 / Celular 959684669

Manuel Munguía
 Director de Operaciones Ilo
 Southern Perú

MMunguia@Southernperu.com.pe
Teléfono: 053 584010, Anexo 64020

Flavio Begazo
Gerente Refinería Ilo
Southern Perú
FBegazo@Southernperu.com.pe
Teléfono: 053 584010, Anexo 64354

Angel Villanueva
Superintendente Técnico, Refinería Ilo (e)
Southern Perú
AJVillanueva@Southernperu.com.pe
Teléfono: 053 584010, Anexo 64362