



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN ENMASCARADOR
ANÓDICO PARA REDUCIR LOS COSTOS DEL PROCESO DE ELECTRO
REFINACIÓN REUTILIZANDO EL “ÁNODO SCRAP” SIN TENER QUE
REFUNDIRLO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

JUAN IGNACIO TAPIA CEPEDA

**PROFESOR GUÍA:
TOMÁS VARGAS VALERO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PEDRO AYLWIN GÓMEZ
FRANCISCO GRACIA CAROCA
GONZALO MONTES ATENAS**

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil Químico

POR: Juan Ignacio Tapia Cepeda

Fecha: 18/11/2019

PROFESOR GUÍA: Tomar Vargas Valero

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN ENMASCARADOR ANÓDICO PARA REDUCIR LOS COSTOS DEL PROCESO DE ELECTRO REFINACIÓN REUTILIZANDO EL “ÁNODO SCRAP” SIN TENER QUE REFUNDIRLO

Chile es el principal productor de cobre a nivel mundial con un 25% de la producción total y 1.250.000 toneladas de cobre fino al año. El cobre en Chile se obtiene principalmente por vía pirometalúrgica, y la electrorefinación, que es el proceso final de esta cadena productiva, posee un Scrap o remanente de proceso, que varía entre un 15 a un 25%, debe ser reprocesado. El aumento en los costos de producción asociados con el reproceso del Scrap varía, considerando solo a CODELCO Norte, Potrerillos y Ventanas, entre los 15 y los 46 millones de dólares al año, dependiendo de la tecnología de reprocesamiento. Como una alternativa para reducir o eliminar el costo de reproceso del Scrap, en este trabajo se evaluó, en forma preliminar y a nivel de laboratorio, la tecnología patentada EMT (Electrode Masking Technology).

La evaluación técnica del enmascaramiento del ánodo se realizó simulando las condiciones de operación del proceso de CODELCO Ventanas, realizándose en dos etapas, refinación del ánodo enmascarado y luego la recarga o rellenado de cobre en el marco obtenido de la refinación del ánodo enmascarado.

Los principales resultados obtenidos fueron: **A)** La máscara permite una disolución selectiva del ánodo (solo el centro), obteniéndose una ventana anódica uniforme y concordante con la forma de la apertura de la máscara. **B)** El marco de cobre obtenido posee entre 15 y 17% de la masa inicial del ánodo, masa de cobre equivalente a la contenida actualmente en el Scrap. **C)** La ventana anódica obtenida es 4 cm más grande que apertura de la máscara, con un doble biselado desde las caras del ánodo y una cúspide en el centro. La zona inferior del ánodo sufre disolución debido al proceso (2cm Aprox.), por lo que se propone extender la máscara para evitarlo. **D)** El depósito de cobre en los cátodos es homogéneo y sin nodulación. **E)** marco anódico recargado exhibe buena resistencia mecánica y resistencia eléctrica, entre el marco anódico y el relleno de 0,13 Ohm, muy similar a la resistencia de 0,11 Ohm medida en el marco de cobre.

Los resultados del análisis económico realizado para CODELCO Ventanas son los siguientes: **A)** El costo de reprocesamiento del Scrap tiene un valor nominal de 12 millones \$USD/año. Este puede variar al utilizar el Scrap como carga fría en el proceso. **B)** El costo de uso de la tecnología asciende a 7,2 millones \$USD/año para compra de máscaras o 10,5 millones \$USD/año en contratación de servicios. **C)** la implementación de la tecnología resulta rentable para la creación de una empresa, entregando un VAN a 5 años de aprox. 2,1 millones \$USD y una TIR de 52% para la compraventa de máscaras y un VAN de aprox. 2 millones \$USD y una TIR de 39% para la prestación de servicios.

Dado lo promisorio de los resultados se propone una prueba piloto para validar dichos resultados a escala industrial.

Dedico mi trabajo con mucho amor y cariño a mis padres, Paola Cepeda y Juan Tapia, quienes con su amor, paciencia y sacrificio me permitieron cumplir mis sueños y llegar donde hoy me encuentro. Por forjarme como la persona que soy e inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y superación que me ha permitido superar todas las adversidades. Siempre han sido mi mayor inspiración, los amo.

Agradecimientos.

En primer lugar, agradezco a mis padres, quienes son y han sido siempre mi pilar y fortaleza en la vida. Muchas gracias por sacrificar mucho en sus vidas por apoyarme y ayudarme a alcanzar mis sueños, por llenarme siempre de amor, soportarme en mis peores momentos y por ser un ejemplo a seguir como persona. Gracias también a toda mi familia, mi abuela, tíos y primos que siempre me apoyaron e impulsaron a ser un profesional. Todos ustedes son lo que más quiero en el mundo y daré siempre lo mejor para que estén orgullosos de mí.

Agradezco a mi segunda familia, Quiñinao Cepeda, quienes me acogieron en su hogar y me brindaron un ambiente de contención y cariño que me permitió sobreponerme al cambio de ciudad. Tenerlos a mi lado fue un punto vital que me permitió alcanzar mis metas, estaré eternamente agradecido y en deuda con ustedes. Su contención y su fe en mí me dieron fuerzas para seguir adelante y terminar esta importante etapa de mi vida.

A mis amigos, gracias por convertir mi paso por la universidad en una de las mejores etapas de mi vida. Sin ustedes no hubiera disfrutado esta etapa. Compartir con ustedes enriqueció mi vida y la mirada que poseía del mundo. A los de Bachillerato, por acompañarme en los difíciles primeros años de universidad. A los de IQBT, por abrirme los brazos y permitirme ser parte de esta linda comunidad. A mi grupo más cercano, porque con ustedes puedo ser quien soy realmente, son personas increíbles en quienes deposito toda mi confianza.

A la sra. Gloria Crisostomo, quien fue más allá de sus obligaciones y me brindó un apoyo y ayuda fundamental para realizar todos mis experimentos. Sin su ayuda, sus consejos y sus palabras se me hubiese hecho muy difícil terminar mi trabajo y por ello le agradezco de todo corazón.

Al sr. Pedro Bustamante, gracias por confiar en mí para desarrollar la validación de su patente, por todo su apoyo y sabiduría. De usted aprendí que debo ampliar mi visión y “no dejar que los árboles me impidan ver el bosque”, muchas gracias por todo.

A mis profesores de comisión, gracias por el apoyo brindado durante el trabajo, por su comprensión con cada uno de los altibajos que se dieron a lo largo de esta experiencia. En especial, gracias al prof. Pedro Aylwin, por estar a mi lado durante todos estos meses de trabajo, por confiar en mí y apoyarme cada vez que lo necesitaba. Gracias a todos por enseñarme que puedo labrar mi propio camino en la carrera y en la vida profesional.

A los sres. David Gazzari, Daniel González, Juan y Manuel del taller de Ing. Civil, Eugenio Lizama y Marcos Cáceres, quienes sin conocerme y sin pedir nada a cambio me ayudaron cada vez que lo solicite. Todos son unos grandes profesionales y personas, me llevo un pedacito de cada uno que me permitirá ser una mejor persona y profesional.

Finalmente, gracias a todas y cada una de las personas que compartí en la vida, todos me han forjado y guardan un lugar en mis recuerdos y mi corazón.

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Antecedentes Generales.....	1
1.2.	Marco Teórico	2
1.2.1.	Obtención Pirometalúrgica del Cobre	2
1.2.2.	Proceso de Electrorefinación	3
1.2.3.	Producción del Scrap.....	7
1.2.4.	Parámetros Operacionales.....	9
1.3.	Desafíos	11
1.4.	Descripción del proyecto	14
2.	Objetivos	17
2.1.	General:	17
2.2.	Específicos:.....	17
2.2.1.	Técnico	17
2.2.2.	Económico.....	17
3.	Metodología	17
4.	Resultados y Discusiones	18
4.1.	Cálculo de Ancho mínimo del marco.....	18
4.2.	Escalamiento, enmascarado y puesta en marcha	19
4.3.	Otros desafíos encontrados	26
4.4.	Balance de Masa y Eficiencia de Corriente.....	29
4.5.	Formación de la ventana y Undercut anódico.....	34
4.6.	Calidad Catódica.....	42
4.7.	Rellenado del marco de cobre	49
4.8.	Elección del material para enmascaramiento industrial	55
4.9.	Análisis Económico.....	60
5.	Conclusiones.....	71
6.	Bibliografía	73
7.	Anexos	76
	Anexo 1: Calculo del espesor mínimo del marco de cobre	76
	Anexo 2: Balance de masa del sistema	78
	Anexo 3: Corriente promedio	79
	Anexo 4: Costos Refinerías Chilenas	80
	Anexo 5: Costos Refinerías en el mundo	81

Índice de Figuras

Figura 1:Diagrama de la obtención de cátodos de cobre por vía pirometalúrgica [1].....	2
Figura 2: Diagrama del proceso de electrorefinación de cobre [1]	3
Figura 3: Distribución de campo eléctrico.	4
Figura 4: proceso de electrorefino de cobre en celda electroquímica	5
Figura 5: Manejo de ánodos y cátodo en las refinarias.....	6
Figura 6: Cosecha de Cátodos de Cobre.	7
Figura 7: secuencia de formación del Scrap por disolución del ánodo de cobre [13].....	8
Figura 8: Scrap resultante del proceso de electrorefinación[6][12].....	8
Figura 9: Nodulación en cátodos industriales[10].....	12
Figura 10: Medio colgador y ánodo de geometría optimizada propuesto en patente industrial 2307-11[16].....	13
Figura 11: Sistema de ánodo reutilizable propuesto en patente industrial 447-13[17] ...	13
Figura 12: Barra colgadora de ánodo y ánodo de geometría optimizada propuesto en patente industrial 1810-14 [17][18]	13
Figura 13: Enmascarado y marco de cobre obtenidos con la tecnología de enmascaramiento anódico propuesto en patente industrial 633 [13]	14
Figura 14: Escenarios de alzamiento por una fuerza F	18
Figura 15: Planos escalados para la fabricación de los componentes del experimento.	21
Figura 16: Enmascarado anódico vista frontal y en perspectiva	22
Figura 17:Ánodo enmascarado, vista frontal y lateral	22
Figura 18: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda de electrorefino.....	23
Figura 19: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda con agitación y tapa antievaporante.....	24
Figura 20: Tapa antievaporante y distribución de componentes en la celda.....	25
Figura 21: Distribución de equipos y componentes del experimento	25
Figura 22: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda y tapa optimizada ...	26
Figura 23: Homogenización del electrolito.	27
Figura 24: Disposición de los electrodos en la celda durante la operación	28
Figura 25:Sistemas de medición de corriente de alimentación.	28
Figura 26: Gráfico de variación másica a lo largo del proceso de electrorefinación.....	30
Figura 27: Gráfico de corriente promedio suministrada al sistema.....	31
Figura 28:Comparación disolución anódica real versus disolución anódica teórica	32
Figura 29: Gráfico deposición catódica a lo largo del proceso	32
Figura 30: situación inicial del ánodo previo al proceso.	34
Figura 31: Ánodo en primera cosecha (Día 5), se aprecia el inicio de la formación de la ventana en el ánodo.....	35
Figura 32: Progresión de la disolución selectiva de la ventana del ánodo al día 7 del proceso	36
Figura 33: Avance de la ventana en el ánodo, día 13 del proceso. se aprecia una marcada formación de la ventana que sigue la forma de la apertura en el enmascaramiento.....	36

Figura 34: Progresión de la disolución selectiva en la formación de la ventana, día 21 de proceso.	37
Figura 35: avance de la disolución del ánodo, día 28 del proceso.	38
Figura 36: Apertura de la ventana en el ánodo como resultado del enmascaramiento, día 35 de proceso.	39
Figura 37: Disolución de la zona inferior del ánodo.	40
Figura 38: Ejemplos de medición del undercut, Cosecha día 28.	42
Figura 39: Cátodo del proceso de electrorefino.	43
Figura 40: Cátodos primera cosecha, día 5.	44
Figura 41: Cátodos cosecha día 13.	45
Figura 42: Cátodos correspondientes a la cosecha del día 16.	45
Figura 43: Cátodos cosecha día 21.	46
Figura 44: Cátodos correspondientes a cosecha día 28.	46
Figura 45: Cátodos correspondientes a la cosecha final, día 35 de proceso.	47
Figura 46: Variación del tamaño de grano en el proceso.	48
Figura 47: Viruta de cobre utilizada para rellenar el marco de cobre.	49
Figura 48: Proceso de fundición del cobre.	50
Figura 49: Secuencia de vaciado y solidificación del cobre en el marco.	51
Figura 50: Ánodo rellenado con cobre fundido, Cara inferior del molde.	53
Figura 51: Ánodo rellenado con cobre fundido. Cara superior del molde.	54
Figura 52: Microfisuras presentes en el interior del enmascarado.	55
Figura 53: Modelo de enmascarado superior.	58
Figura 54: Modelo de enmascarado lateral.	59

Índice de Tablas.

Tabla 1: Parámetros operacionales de las refinerías de CODELCO[6][16].....	9
Tabla 2: Parámetros operacionales de diversas refinerías del mundo[16].....	9
Tabla 3: Parámetros operaciones de diversas refinerías del mundo[16].....	10
Tabla 4: Inventario de recursos minerales CODELCO 2017[3].....	11
Tabla 5: Inventario de Reservas minerales CODELCO 2017 [3].....	11
Tabla 6: Eficiencia de corriente anódica.....	33
Tabla 7: Eficiencia de corriente catódica.....	33
Tabla 10: Evolución del undercut y la profundidad de la ventana a lo largo del proceso.	41
Tabla 11: propiedades del HDPE y el PP.....	56
Tabla 12: Capacidad de producción de Scrap de las refinerías chilenas.....	60
Tabla 13: Trabajadores necesarios para la compraventa de máscaras para el primer año de operación.....	63
Tabla 14: Trabajadores requeridos para la prestación de servicios en el primer año de operación.....	64
Tabla 15: Flujo de Caja del proyecto para el escenario de Compraventa de máscaras.....	65
Tabla 16: Flujo de caja del proyecto en escenario de prestación de servicios.....	66
Tabla 17: Pesaje ánodo a lo largo del proceso.....	78
Tabla 18: Pesaje Cátodos a lo largo del Proceso.....	78
Tabla 19: Decantación de barros anódicos a lo largo del proceso.....	78
Tabla 20: Corriente promedio a lo largo del proceso y disolución teórica a la fecha indicada.....	79
Tabla 21: Estimación de costos para 3 refinarías chilenas.....	80
Tabla 22: Estimación de costos de 10 refinerías a lo largo del mundo.....	81
Tabla 23: estimación de costos de 12 refinarías del mundo.....	81

1. Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El cobre ha sido uno de los elementos metálicos más importantes en la historia de la humanidad. Este se encuentra en la naturaleza en estado metálico, principalmente en compuestos sulfurados (aprox. 80%)[1] y por ello fue uno de los primeros metales conocidos y utilizados por el hombre para fabricar adornos, utensilios y armas, incrementando enormemente su uso en el siglo XIX con la masificación a nivel mundial del uso de la electricidad. Los usos del cobre se remontan a miles de años en la antigüedad, existen vestigios de hace más de 6.000 años en Anatolia y desde el 4.000 A.C. en Mesopotamia [2].

Existen diversos métodos para la obtención del cobre, algunos como el endurecimiento por deformación son conocidos desde los primeros tiempos. Estudios indican que pocos siglos antes de cristo el cobre se obtenía a partir de una mata por medio de repetidas tostaciones y fundiciones con lo que es conocido como el método de forjas. Desde el año 500, los Incas conocieron las técnicas de colada del cobre y en el XV sabían cómo extraer metal a partir de menas sulfuradas[2]. En el último siglo, las técnicas en la industria han hecho inmensos progresos, un ejemplo de ello es la creación de la tecnología de fusión *flash* en Finlandia después de la segunda guerra mundial, posteriormente, buscando la obtención de cobre de mayor pureza se desarrolló la electrolisis industrial, método con el cual se obtiene cobre de alta pureza, superando el 99,9% de cobre[2].

Con el paso de los años, la producción de cobre aumentó de manera significativa, alcanzando una producción de 18.000 toneladas en el año 1800, un total de 450.000 toneladas en el año 1900, 2.500.000 toneladas en 1950, superando finalmente las 12.000.000 toneladas en la actualidad. Este aumento de producción ha venido acompañado de diversos cambios en los principales países productores a lo largo del mundo, a principios de 1800 la producción fue liderada por Inglaterra quien explotaba minas propias y minas de sus colonias, en 1852 Chile paso a ser el principal productor de cobre del mundo, manteniendo su posición actualmente[2][3].

Chile alcanzo el primer lugar del ranking entregado por la International Copper Study Group en 2017 abarcando un 26,6% de la producción mundial, seguidos de Perú y China[4]. La producción de cobre en el país se encuentra liderada por la Corporación del Cobre (CODELCO), institución creada 1976 con la nacionalización del cobre, donde se constituye como empresa productiva del estado. En 2017 CODELCO totalizo una producción de 1,84 millones de toneladas métricas de cobre fino, representando el 9% de la producción mundial total y un 33% de la producción nacional[3].

En la actualidad CODELCO cuenta con 7 divisiones mineras más la fundición y refinería Ventanas, esta última, se encuentra en operación desde 1964 (adquirida en 2005 por CODELCO[5]) y en conjunto con refinería El Salvador son las principales productoras de cobre electrolítico del país superando las 1.250.000 Ton/año[3].

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Obtención Pirometalúrgica del Cobre

El cobre primario en el mundo proviene principalmente de menas de sulfuros de baja ley y es procesado normalmente por vía pirometalúrgica. Los concentrados de cobre provenientes de la mina pasan por el siguiente proceso para la obtención de cobre catódico: primero son sometidos a una fusión para mata, luego una conversión, posteriormente un afino térmico y afino electrolítico[2]. A continuación, se presenta un diagrama del proceso de tratamiento pirometalúrgico del cobre:

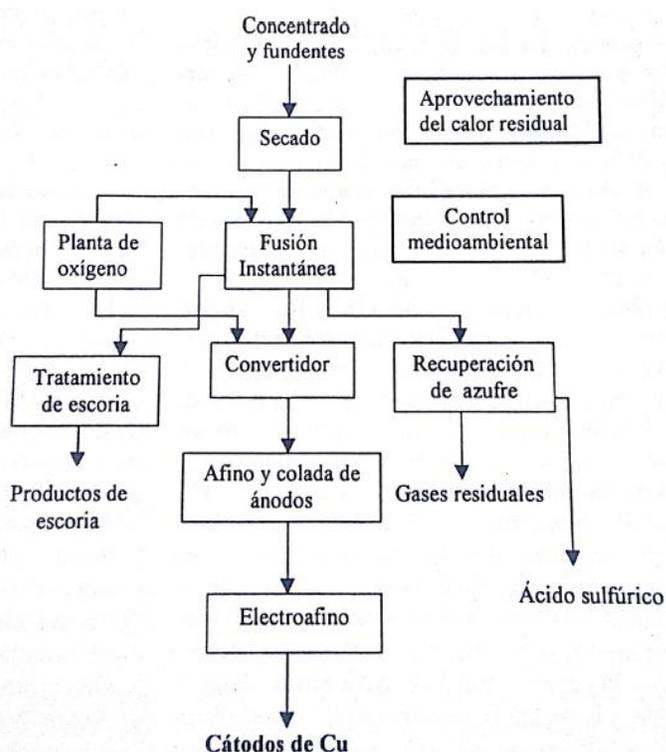
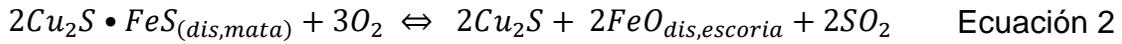


Figura 1: Diagrama de la obtención de cátodos de cobre por vía pirometalúrgica [1]

La *fusión* es un proceso de oxidación parcial de los concentrados de sulfuro, en él se utiliza sílice como fundente, la diferencia de densidades (cerca de 1 g/cm³ en estado fundido) y la diferencia de enlaces (covalente e iónico) para formar y separar dos fases, la primera, una mata densa rica en cobre y metales preciosos de densidad 4,9 gr/cm³ aproximadamente, la segunda, una escoria menos densa rica en óxidos de hierro (30-40%) y silicatos de hierro (25-40%)[2], la reacción química principal que ocurre en la fusión es la siguiente:



La *conversión* es el proceso que trata la mata por soplado con aire, oxidando el hierro y azufre contenido en la mata para formar el llamado metal blanco, que es nuevamente soplado para obtener el denominado Cobre Blíster, en este paso se reduce el contenido de sulfuro de hierro a menos de un 1%[2]. Las ecuaciones de formación del metal blanco y cobre blíster son las siguientes:



El *Afino térmico o pirometalúrgico* es el proceso mediante el cual se desoxida el óxido de cobre contenido en el cobre blíster, con lo cual se alcanza una pureza del orden de la décima porcentual, usualmente alcanzando el 99,7% de cobre. El cobre obtenido de esta etapa es moldeado, obteniéndose ánodos de cobre[2].

El *afino electrolítico o electrorefinación* es el paso final del proceso productivo, en él purifica el cobre contenido en los ánodos alcanzando la centésima o milésima porcentual (mayor a 99,99%), obteniendo dos cátodos de cobre de alto valor comercial por cada ánodo procesado[2].

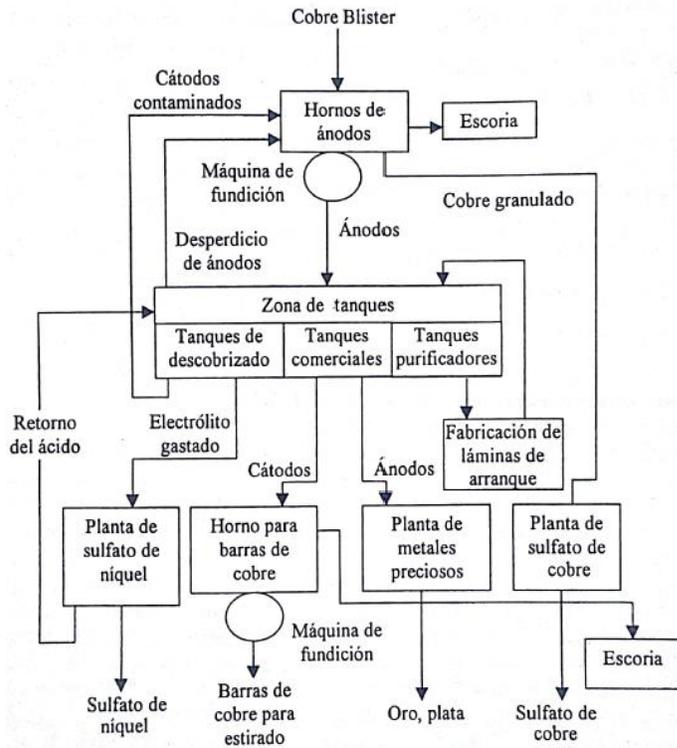


Figura 2: Diagrama del proceso de electrorefinación de cobre [1]

resultantes del proceso, donde se precipitan adicionalmente los metales nobles contenidos en el ánodo. Este proceso puede tardar de 12 a 14 días y genera un remanente de cobre de los ánodos llamado "Scrap", que puede alcanzar el 15-25% del cobre contenido en el ánodo y que debe ser refundido y reprocesado[2][6].

1.2.2. Proceso de Electrorefinación

La electrorefinación de cobre es un proceso antiguo en la historia del hombre, demostrado experimentalmente en 1847 por Von Leuchtenber, patentado en 1865 por Elkington e introducido a la industria en 1869 con la primera planta industrial en Pembrey, Wales [7].

Este proceso consiste en la disolución electroquímica de ánodos de cobre mediante el método de *Electrolisis*, mediante el cual se obtiene el depósito de un metal (en este caso Cobre) desde una solución que lo contiene por medio de la aplicación de corriente eléctrica. Este Proceso se realiza *Celdas Electrolíticas*, las que se encuentran llenas con

una Solución Conductora denominada *Electrolito*, en ellas se ubican de forma alternada Ánodos provenientes de fundición y Cátodos (placas de cobre delgadas) fabricados previamente en el proceso. El flujo eléctrico en el sistema se lleva a cabo por el movimiento dirigido de electrones libres a través de los electrodos y el electrolito[7][8].

Al sumergir dos terminales de corriente continua en la solución, cada uno interacciona con las cargas positivas y negativas de la solución. El electrodo cargado positivamente (ánodo) tiene propensión por electrones libre, mientras que el electrodo cargado negativamente (cátodo) tiene afinidad por las cargas positivas contenidas en el electrolito [7]. A medida que la difusión acerca iones de la solución a los electrodos, se presenta un proceso de neutralización continua y el efecto resultante es la conducción de electricidad, con ello se establecen las líneas de campo eléctrico entre los electrodos, las cuales rigen el desplazamiento los iones desde un polo a otro, tal como se muestra en la siguiente figura

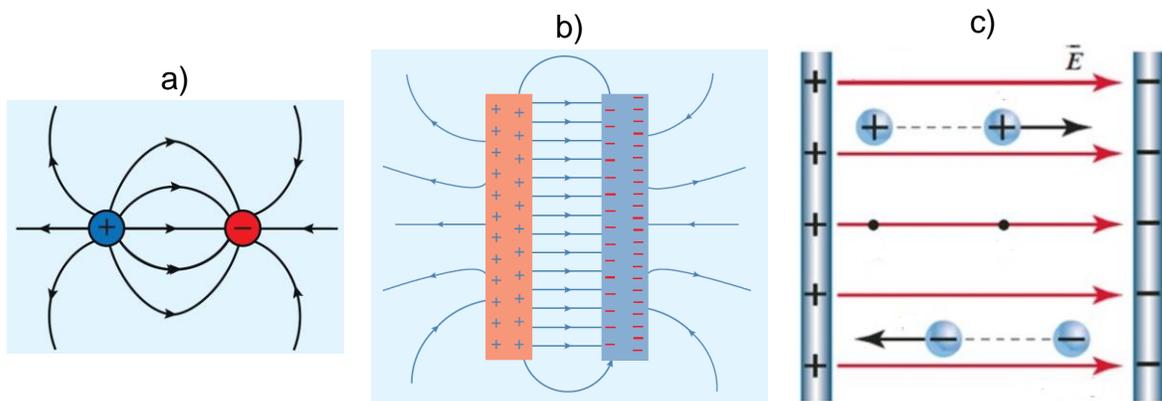


Figura 3: Distribución de campo eléctrico a) Dos cargas puntuales de carga opuesta[9]. b) Dos placas paralelas con carga opuesta[9]. c) Desplazamiento de partículas cargadas en campo eléctrico entre dos placas[10].

De la figura 3 se desprende que las zonas de mayor actividad son los bordes del electrodo pues concentran un mayor número de líneas de campo al sumar las líneas exteriores (curvas) a las líneas interiores que se generan al enfrentar ambas caras. En la celda se produce la oxidación del cobre contenido en el ánodo convirtiéndolo en Cu^{+2} , generando que este ingrese a la solución y por efecto del campo eléctrico se desplace hasta el cátodo donde se reduce y se deposita como Cu^0 . A continuación se presenta un esquema del proceso, seguido de las reacciones antes mencionadas[7]

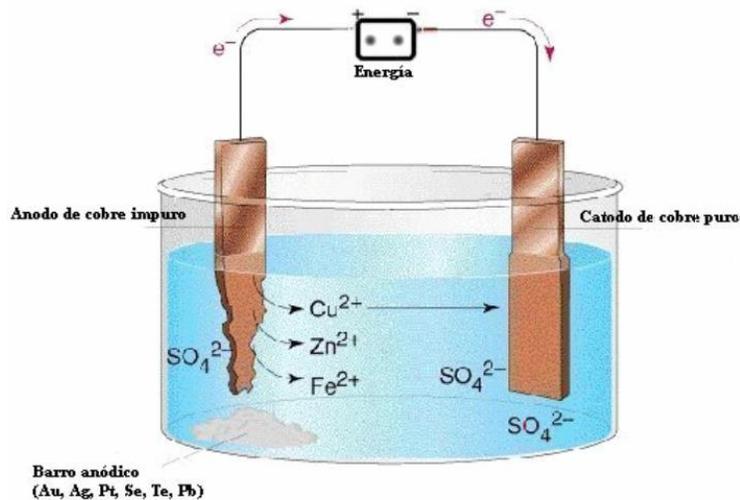
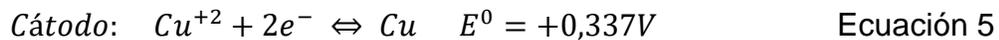
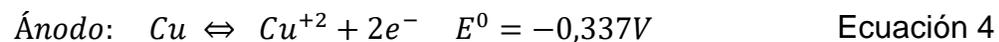


Figura 4: proceso de electrorefino de cobre en celda electroquímica

Las reacciones químicas de media celda que ocurren son las siguientes:



Las impurezas contenidas en el ánodo se oxidan y decantan al fondo de la celda, acumulándose en el fondo de las celdas generando el barro anódico, residuo del proceso que es tratado posteriormente para recuperar metales de interés (oro, plata, entre otros) [7].

Michael Faraday (1791-1867), Químico y físico Inglés, estudio los fenómenos electroquímicos y postulo en sus leyes que la masa depositada de un metal en un electrodo es proporcional a la “cantidad de corriente” suministrada, al peso equivalente del metal de interés y al tiempo de duración de la electrolisis. Sus postulados se resumen en la siguiente ecuación [7]:

$$M = \frac{P.M. \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: M = Material que reacciona (Gramos)

PM = Peso Molecular de la especie

I = Corriente que circula (Ampere)

t = Tiempo que la corriente circula (Segundos)

n = Electrones transferidos

F = Constante de Faraday (96.500 Culombios)

Operacionalmente la electrorefinación de cobre comienza con los ánodos provenientes de fundición que normalmente son acopiados de forma ordenada en el patio de las refinерías y luego dispuestos en racks para ser introducidos a la celda por medio de las grúas de carga de la nave de electrorefino. Los cátodos se generan como placa madre dentro de la misma refinерía, se agrupan y ubican en racks para asegurar su espaciamiento y ser puestos en la celda una vez que se encuentran ubicados los ánodos. En la siguiente figura se presenta el acopio de ánodos y la colocación de cátodos en la celda



Figura 5: Manejo de ánodos y cátodo en las refinерías a) ánodos acopiados. b) Ánodos acopiados en patio refinерía Ventanas. c) Placas Madre Catódicas ubicadas en Rack, Refinería Ventanas d) Cátodos Saliendo de la celda de electrorefino

Como resultado del proceso se obtienen cátodos de cobre de alta pureza de 100-165 Kg, con una composición de cobre superior al 99,99% que están en condiciones de ser comercializados. Durante el proceso se realizan inspecciones constantes del sistema para detectar la aparición de cortocircuitos y remediarlos. Finalmente, al momento de

realizar la cosecha se realiza un lavado de los cátodos para evitar la aparición de cristales de sulfatos provenientes del electrolito y desprender cualquier impureza que pueda estar adherida a la superficie, posteriormente son apilados y agrupados en paquetes para su despacho y comercialización. La figura 6 presenta la cosecha de los cátodos de cobre



Figura 6: Cosecha de Cátodos de Cobre. a) Celdas de electrorefino cargadas con los electrodos[11]. b) cátodos retirados desde celda de electrorefino[12]. c) Cátodos apilados dentro de las Instalaciones[13]

1.2.3. Producción del Scrap

El Scrap anódico generado en el proceso de electrorefino se produce por la incompleta disolución del ánodo de cobre, debido a que las orejas y el lomo no se sumergen en el electrolito para mantenerlas como soporte del ánodo durante todo el proceso, y a los trozos de cobre que se desprenden del ánodo durante la electrorefinación que caen al fondo de la celda. Así, el Scrap está compuesto por las orejas, el lomo del ánodo y los restos desprendidos, tal y como se plantea en la figura 7. Los ánodos se retiran antes de lograr una disolución completa debido a que a medida que se adelgaza el ánodo la resistencia mecánica de la lámina colgante disminuye y aumenta la posibilidad de desprendimiento de trozos de cobre que podrían dañar la celda o que complican su extracción de la celda dado que se sumergen hasta el fondo de esta [6]

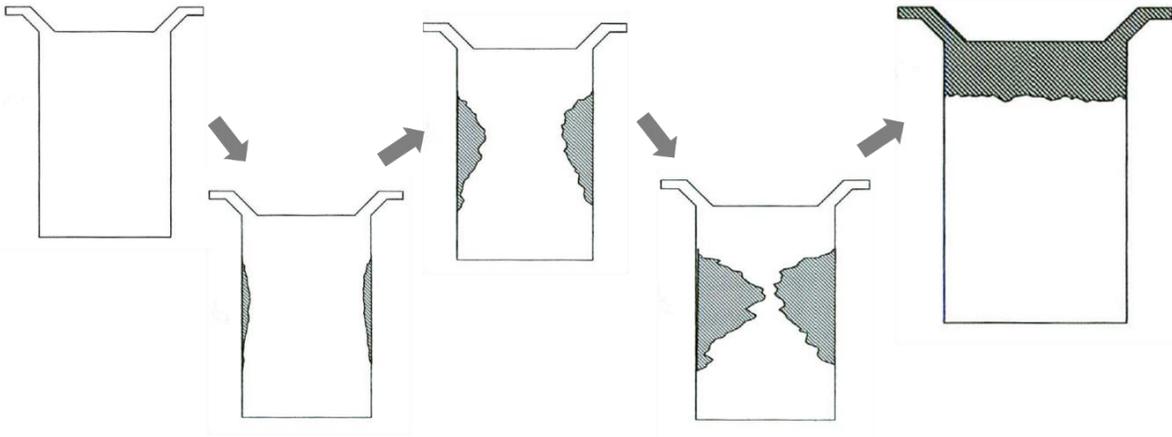


Figura 7: secuencia de formación del Scrap por disolución del ánodo de cobre [14]

Tal como se indica en la Figura 7 el adelgazamiento del ánodo comienza por los bordes, debido a su mayor actividad por el mayor número de líneas de campo eléctrico que confluyen a esas zonas, pese a ello el ánodo se adelgaza homogéneamente en el eje transversal a la cara, obteniéndose un Scrap con un lomo y orejas de espesor igual al original y una lámina delgada en su sección inferior tal como se presenta a continuación

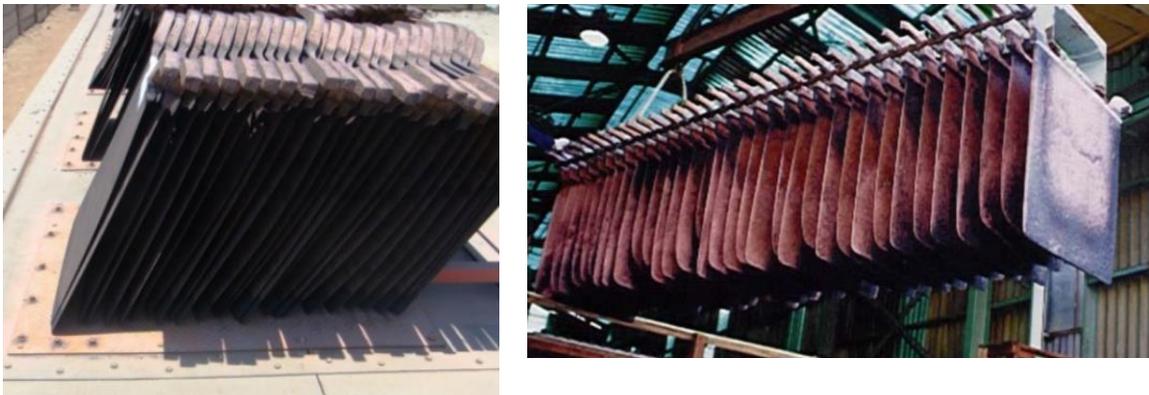


Figura 8: Scrap resultante del proceso de electrorefinación[7][13]

El Scrap generado en el proceso es acopiado, al igual que los despuntes del mecanizado de ánodos y cátodos, y reprocesado para ser utilizados en conjunto con la alimentación para producir nuevos ánodos. Los niveles actuales de Scrap producen que aproximadamente 20% de la alimentación destinada a la fabricación de ánodos sea material reincorporado al proceso [6].

1.2.4. Parámetros Operacionales.

En el proceso los parámetros más importantes son la densidad de corriente y la distancia entre los electrodos[15], pues estos parámetros permiten el establecimiento del campo eléctrico, que permite que los iones de cobre que se disuelven en el ánodo ingresen a la solución, migren y se depositen en el cátodo. Estos valores varían de una refinera a otra, según sus necesidades operacionales de acuerdo con la composición de los ánodos tratados, ya que estos cambian de composición (contenido de impurezas, pureza, entre otros) según la procedencia de los concentrados con que se produjeron[6]. Pese a ello existen valores promedio dentro de los que operan las diferentes refineras alrededor del mundo, algunos de estos valores de operación son[15]:

Densidad de corriente de alrededor de 210-250 A/m², pudiendo alcanzar o superar los 300 A/m² en ciertas circunstancias, dependiendo del nivel tecnológico de la planta y el uso de aditivos que permitan mejorar el tamaño de grano de cobre y la deposición de impurezas. En cuanto al Voltaje de celda, este varia (dependiendo de la densidad de corriente) entre los 250 y 400 mV. La eficiencia de corriente en el sistema bordea actualmente el 95-98%, con una temperatura de operación que varía entre los 55-60°C. Finalmente, la composición del electrolito, normalmente, contiene 35-50 mg/L de cobre y 175-200 mg/L de ácido sulfúrico, el cual circula a través de la celda con un flujo de 10-30 L/min.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los parámetros operacionales de algunas refineras del país y refineras alrededor del mundo

Tabla 1: Parámetros operacionales de las refineras de CODELCO[6][16]

Refinería	Cap. [Ton/Año]	Dens. Cte [A/m ²]	Espac. [mm]	Scrap [%]	Cte. [kA]	Eff. Cte. [%]	Conc. Cu [g/L]	Conc. H ₂ SO ₄ [g/L]
Ventanas	420.000	315	100	17	21,5	93-94	50-55	165-180
Potrillos	155.000	290/234	100	23	13/10,2	94-95	45	210
Codelco Norte	855.000	320	102	17	39,5	93,3	45±3	190±10

Tabla 2: Parámetros operacionales de diversas refineras del mundo[16]

Data	Refinería	Tecn	Cap t/año	Prod t/año	Dens. Cte A/m ²	Espac mm	MPA kWh/t Cu	E.E. %	Scrap %	Corriente kA	Eficiencia		[Cu] g/L	[H ₂ SO ₄] g/L
											Cte	Tpo		
2005	Ilo, Southern Copper, Perú	HM	285.00	262.000	277,6	100	si 317	14	29,5	98	97,8	40 - 43	169 - 174	
2005	Tamano, Japón	HM	228.00	227.270	317	100	si 377	17,4	30,4 y 35,2	92,3	97	51,2	181	
2006	Amarillo, USA	HM	500.000	188.745	234	108	si -	15	20	94	97	50	170	
2005	El Paso, Freeport	HM	455.000	295.018	274	102	si 290	15	17,5	94	96	40 - 50	170 - 200	
2005	Sverdorsk, Rusia	HM	300.000	260.000	260	100	no 490	18	16	95	94	48	160	
2005	Norilsk, Rusia	HM	300.000	306.000	340	100	no 310	19	20	90	75	54	130	
2005	Onahama, Japón	HM	258.000	242.800	205 y 185	110 y 65	si -	12 y 24	18,5	98 y 94	-	49 y 40	175 y 177	
2003	Saganoseki, Japón	HM	235.000	-	283	100	si 337	17,1	18 a 26,8	93	-	45 - 50	175 - 185	
2005	Glogow II, Polonia	HM	233.000	196.385	190 - 230	110	no 280	10,2	20,8	98,68	90,26	45 - 50	170 - 175	
2006	Caraiba, Brasil	HM	225.000	199.041	278	110	si -	21	22	92,7	93,2	40 - 45	150 - 180	

Tabla 3: Parámetros operaciones de diversas refinerías del mundo[16]

Data	Refinería	Tecnología	Cap t/año	Prod t/año	Dens. Cte A/m ²	Espac mm	MPA	E.E. kWh/t Ct	Scrap %	Corriente kA	Eficiencia		[Cu]	[H ₂ SO ₄]
											Cte	Tpo	g/L	g/L
2005	Aurubis Hamburg, Alemania	Cat Pte (ISA)	380.000	373.000	347	95	si	347	10 a 12	-	94 a 97	97	45 - 49	170 - 200
2005	CCR, Canada	Cat. Pte (Kidd)	375.000	280.000	280	101,6	Aisco	250	18	23,5	95	95	44	170
2006	Olen, Bélgica	Cat Pte (ISA)	340.000	341.000	325	100	si	-	14	39	96	95	45	175
2005	Onsan Ref #1, Corea	Cat. Pte (Kidd)	320.000	297.600	308	98	si	317	11,8	30,1	98,8	98,8	45	175
2009	Townsville, Australia	Cat Pte (ISA)	300.000	277.320	331	95	si	410**	16,2	27,1	93,3	96	48	160
2005	Balkash, Kazakstan	Cat. Pte	300.000	90.000	250	104	no	420	18	14	94	92	42	120
2005	Mexicana de cobre	Cat. Pte (Kidd)	300.000	117.135	260	105	si	350	15,8	29,6	96,7	-	44,7	176
2005	Kennecott, Utah, USA	Cat. Pte (Kidd)	281.000	274.200	272	98	si	325	18	24,7	94,5	83	45	165
2005	Huelva, España	Cat Pte (ISA)	263.000	257.100	344	98	si	-	16	24,6	95	96,8	48	175
2005	Boliden, Suecia	Cat Pte (ISA)	255.000	223.000	310	100	si	428	18	25	97 - 98	97,9	48	175
2005	Onsan Ref #2, Corea	Cat. Pte (Kidd)	240.000	221.600	316	98	si	331	11	36	99,3	99,3	45	175
2005	Norddeutsche, Alemania	Cat Pte (ISA)	220.000	197.000	342	98	si	342	10,5	24,5	97	98	45	180

El Estudio Realizado se enfocará en la operación de Refinería Ventanas de CODELCO, esto debido a que ellos han facilitado el cobre y el electrolito necesario para realizar los experimentos. Los parámetros operacionales de ventanas son los siguientes [6]:

- Ánodo:
- Peso 275 Kg.
 - Dimensiones 915 mm x 895mm x 40 mm (largo x ancho x espesor)
 - Temperatura de Vaciado en Rueda de moldeo 1140-1180°C.
 - Rechazo de ánodos por rotura de orejas, ampollamiento u otro defecto físico
- Cátodo:
- Dimensiones 985mm x 965 mm x <1mm (Largo x ancho x espesor).
 - Se cosechan a los 8 días y se realizan 2 cosechas de cátodos por cada cosecha de ánodos
- Celda:
- Temperatura de operación 65-70°C.
 - Se dejan 3-4 Cm del ánodo fuera del electrolito para evitar la disolución del lomo.
 - Densidad de Corriente de 315 A/m².
 - Distancia Catódica (centro a centro) 100mm.
 - Volumen 8 m³
- Operación:
- Capacidad productiva de 33.000 Toneladas/mes, equivalentes al 83% de la alimentación. Hay aproximadamente 2000 celdas con capacidad para 40 ánodos cada una.
 - Scrap generado en ánodos comerciales 17%. Scrap en ánodos de producción de hoja madre 30% (ánodos hoja madre poseen un peso de 342Kg).
 - Costo de Reprocesamiento del Scrap de 150 Dólares/Tonelada
 - Eficiencia de corriente 93-94%
- Electrolito:
- Flujo alimentación 18L/min
 - Cobre: 50 gr/L.
 - Ácido Sulfúrico: 210-215 gr/L.

1.3. Desafíos

Actualmente, Chile cuenta con las mayores reservas de cobre del mundo y muchos de sus megayacimientos cuentan con una proyección de explotación superior a los 100 años[3]. Con el pasar de los años los yacimientos han reducido sus leyes de cobre y actualmente presentan leyes promedio inferiores al 1% de cobre, lo que supone nuevos desafíos para la industria minera, enfocados principalmente en la reducción de costos de producción, sujeto a una mayor productividad, instalaciones más limpias y seguras[2][6]. En la tabla 4 y tabla 5 se pueden apreciar los recursos y reservas de cobre de cada una de las minas de Codelco y sus respectivas leyes de cobre.

Tabla 4: Inventario de recursos minerales CODELCO 2017[3]

Inventario de recursos minerales (I)												
División	Recursos minerales medidos			Recursos minerales indicados			Recursos minerales inferidos			Recursos minerales		
	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt
Radomiro Tomic	1,205	0.49	6.0	1,245	0.45	5.6	1,170	0.44	5.2	3,619	0.46	16.8
Chuquicamata	848	0.85	7.2	378	0.73	2.8	645	0.50	3.2	1,871	0.70	13.2
Ministro Hales	132	1.11	1.5	80	0.91	0.7	840	0.86	7.2	1,052	0.89	9.4
Gabriela Mistral	318	0.35	1.1	62	0.31	0.2	8	0.26	0.0	388	0.34	1.3
Salvador	284	0.60	1.7	101	0.49	0.5	192	0.44	0.9	577	0.53	3.1
Andina	1,197	0.83	9.9	873	0.78	6.8	1,830	0.80	14.7	3,899	0.81	31.4
El Teniente	1,447	0.97	14.1	676	0.81	5.5	1,768	0.74	13.1	3,891	0.84	32.6
Total	5,432	0.76	41.4	3,416	0.65	22.2	6,452	0.69	44.2	15,299	0.70	107.7

Tabla 5: Inventario de Reservas minerales CODELCO 2017 [3]

División	Reservas minerales probadas			Reservas minerales probables			Reservas minerales totales		
	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt	Mineral Mt	Ley CuT %	Cu Fino Mt
Radomiro Tomic	738	0,50	3,7	1.305	0,47	6,2	2.043	0,48	9,9
Chuquicamata	860	0,84	7,2	476	0,52	2,5	1.336	0,72	9,7
Ministro Hales	142	1,06	1,5	52	0,91	0,5	194	1,02	2,0
Gabriela Mistral	281	0,36	1,0	71	0,30	0,2	351	0,34	1,2
Salvador	25	0,52	0,1	505	0,65	3,3	530	0,64	3,4
Andina	246	0,75	1,8	921	0,70	6,5	1.167	0,71	8,3
El Teniente	744	0,99	7,4	563	0,67	3,8	1.307	0,86	11,2
Total	3.037	0,75	22,8	3.891	0,59	22,9	6.928	0,66	45,7

En la industria minera se presentan diversos desafíos que son de alto interés para las empresas, dentro de ellos resalta el desafío de reducción de los costos de operación en el proceso de obtención de cobre comercial, el cual ha tenido diversos focos, uno de ellos es la optimización del proceso, principalmente mejorando los sistemas de conexiones eléctricas para mejorar el rendimiento de corriente del sistema o simplemente reemplazando los hornos de reverbero por hornos modernos que reducen el consumo de combustible, reduciendo su gasto hasta aproximadamente un 30% del consumo de un horno de reverbero[15] [6]. Sumado a esto, son de alto interés mejorar los problemas de

equiespaciamiento de los electrodos, impacto de los problemas de verticalidad, nodulación, entre otros. La nodulación es un problema particularmente importante, ya que es un parámetro de control de calidad que puede generar el rechazo de un cátodo, además de requerir un retiro de los nódulos de forma mecánica (fuertes impactos de martillo provocados por un operario), arriesgando la integridad del cátodo, del operario y, sobre todo, genera nuevos remanentes de cobre que deben ser reprocesados. En la figura 9 se presenta un cátodo con una alta tasa de nodulación



Figura 9: Nodulación en cátodos industriales[11]

Adicionalmente se presenta como un punto de relevante a abordar son los altos costos que genera dentro de la producción de cobre la presencia y el reprocesamiento del Scrap anódico proveniente del proceso de electrorefino, dado que el Scrap anódico representa un 15-25% del cobre que ingresa al electrorefino, es decir, aproximadamente 1 de cada 5 ánodos procesados está constituido enteramente por material recirculante[6][2], y los costos asociados a su tratamiento oscilan entre los 50 y 170 \$/ton de Scrap, si bien no pareciera ser un gran costo, al considerar las miles de toneladas procesadas por las refinerías, este gasto puede bordear o superar el millón de dólares al mes por refinería[6]. Por ejemplo, considerando solo la capacidad productiva Ventanas y su Scrap (Tabla 1) y el costo de reprocesamiento del Scrap (150 US\$/Ton), la eliminación del reprocesamiento generaría un ahorro de aprox. 1 millón Dólares/mensuales[6].

Como se aprecia en el caso de ventanas, y extrapolando a las demás refinerías a lo largo del mundo, el gasto en reprocesamiento del Scrap anódico es significativo para las empresas, esto sin mencionar los costos en transporte para aquellas que no son capaces de tratar el total de Scrap producido en sus instalaciones, costos en horas hombre, entre otros que poseen las empresas.

El abordaje de este problema ha llevado a diversas soluciones, las que principalmente se enfocan en modificar el sistema de colgado de los ánodos en la celda o modificar su parte superior para reducir la cantidad de cobre contenida en el lomo y las orejas, ya que estas no ingresan al electrolito y por ende no se disuelven ni depositan en el cátodo, o evitar que los fragmentos que se puedan desprender del cátodo caigan dentro

de la celda, de esta manera se contienen adheridas al ánodo para permitir su disolución. En las figuras 10, 11 y 12 se presentan 3 tecnologías desarrolladas para reducir el Scrap que utilizan el enfoque mencionado



Figura 10: Medio colgador y ánodo de geometría optimizada propuesto en patente industrial 2307-11[17]

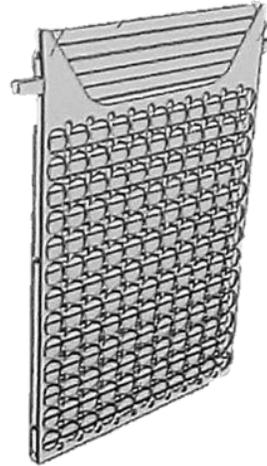


Figura 11: Sistema de ánodo reutilizable propuesto en patente industrial 447-13[18]

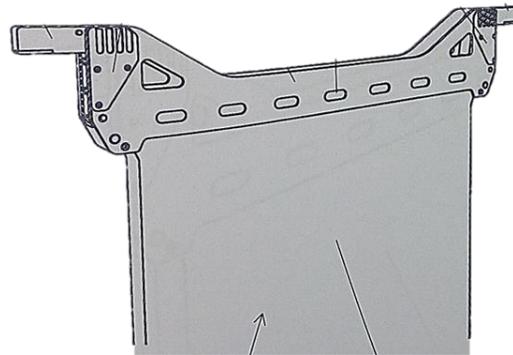
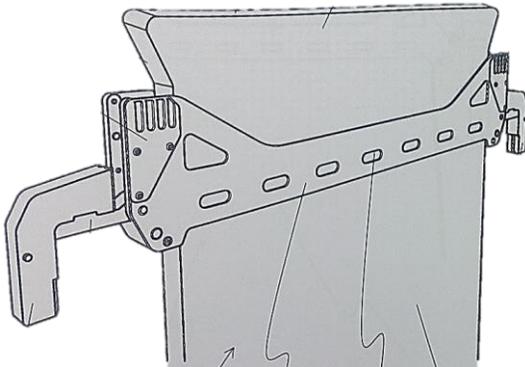


Figura 12: Barra colgadora de ánodo y ánodo de geometría optimizada propuesto en patente industrial 1810-14, ensamblaje (Izquierda) y configuración de uso en celda (Derecha)[18][19]

Si bien estas tecnologías que atacan un punto base de la formación del Scrap han logrado reducir sus niveles a un 12% aproximadamente, no eliminan el problema del reprocesamiento y tienen problemas económicos, principalmente elevados costos de instalación de equipos o de operación, por lo que no han logrado hacerse de un lugar dentro de las refinerías porque la reducción de costos que consiguen no se condice con los costos de inversión u operación[6], o han afectado la eficiencia de corriente al integrar metales adicionales al proceso como es el caso de las barras colgadoras de acero.

1.4. Descripción del proyecto

El proyecto busca abordar como desafío la reducción de los costos de refundición y reprocesamiento del Scrap resultante de la incompleta disolución del ánodo durante el proceso de electro refinación, el cual bordea el 17-20% de la masa del ánodo inicial.

Se busca conseguir lo anterior con la implementación de un proceso de enmascaramiento del contorno del ánodo, previo al proceso de electrorefinación, con la finalidad de modificar la acción del campo eléctrico sobre el ánodo de modo que el cobre contenido en los bordes quede aislado y no se logren establecer las líneas de campo eléctrico con su par electrodico, de esta manera se evita su disolución electroquímica, dejando un marco de cobre listo para rellenarse con cobre fundido y volver a ingresar al proceso de electrorefino, con su respectivo enmascaramiento, sin la necesidad de reprocesarlo. En la figura 13 se aprecia lo planteado por esta tecnología.

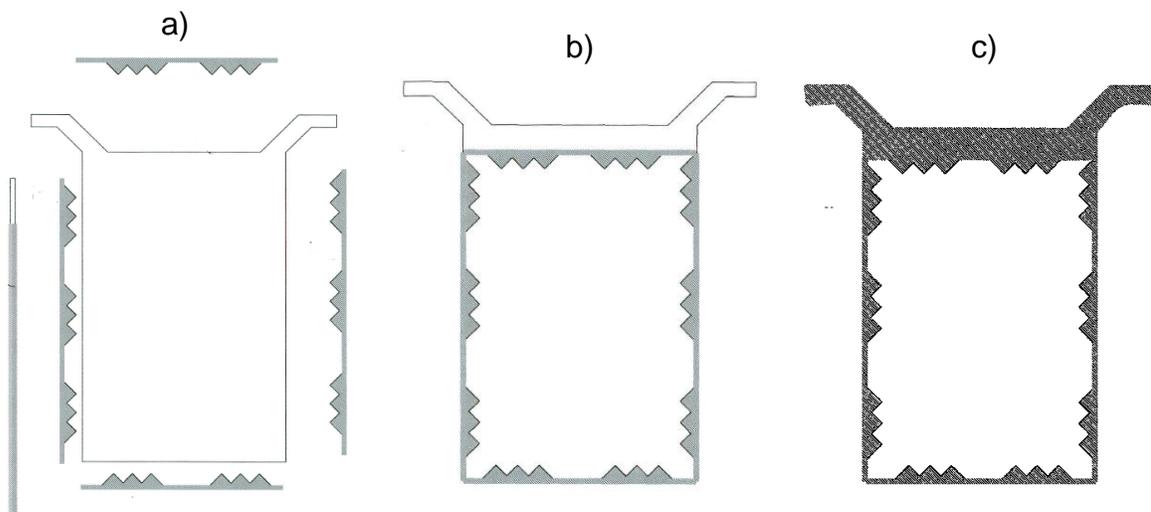


Figura 13: Sistema de disolución del ánodo con el enmascaramiento propuesto en patente industrial 633 [14] a) Máscara anódica b) Ánodo enmascarado antes de la Electrorefinación. c) Ánodo después de la electrorefinación una vez retirada la máscara.

Este Enmascaramiento debe ser colocado antes de comenzar con el proceso de electrorefino y retirado una vez que se cosecha el ánodo, para poder realizar el lavado correspondiente a fin de evitar la formación de cristales de sulfatos provenientes del electrolito. Una vez que el marco de cobre que se obtiene una vez refinado el ánodo se encuentra limpio y libre de posibles contaminantes, se procede a rellenar con cobre fundido, para posteriormente volver colocarle el enmascarado y reingresar al proceso.

Para Construir la máscara es necesario el uso de un material aislante, esto es un material con baja presencia de electrones libres lo que se traduce en una alta resistencia a la corriente eléctrica, es decir, todos sus electrones están estrechamente ligados al núcleo atómico, de esta manera se evita el paso de corriente eléctrica[20]. Los materiales

aislantes más utilizados son las cerámicas y los plásticos, la aplicación de ellos depende de las condiciones y el uso que se les desee dar, por ejemplo, el Polietileno (PE) es utilizado en instalaciones de alta frecuencia, el Mylar es empleado en condensadores eléctricos. El teflón (PTFE) es utilizado en sistemas de alta temperatura (175-230°C). Las condiciones mecánicas o químicas también pueden restringir el uso del material, por ejemplo, el Nylon posee una excelente resistencia a la abrasión, por otro lado, el Neopreno, los Poliésteres de Poxi, el Polipropileno (PP) y los Poliuretanos (PU) pueden proteger contra productos químicos y las condiciones de humedad. Otro aislante comúnmente utilizado es el Polimetilmetacrilato (PMMA) o Acrílico por sus propiedades ópticas, dado que presenta un alto nivel de transparencia (Índice de transmitancia de 93%[21]) permite su uso en monitoreo visual del componente aislado[20].

Esta característica, sumada a su resistencia al ácido (no afectado hasta una concentración de 30%[22]), su temperatura máxima de operación continua (80°C[21]), su alta resistividad tanto interna como superficial (10^{15} Ohm•cm y 10^{16} Ohm respectivamente[21]), la disponibilidad y facilidad de procesamiento para fabricar la máscara llevan a elegir el Acrílico como material de enmascaramiento para las pruebas de laboratorio, para poder monitorear el Undercut generado en el ánodo, ver de mejor manera las variaciones que pueda el ánodo a lo largo del proceso y porque se encuentra en el rango de operación de las condiciones del electrorefino.

La disolución selectiva del ánodo otorgada por el enmascaramiento, generara que la disolución sea inicialmente perpendicular a las caras del ánodo presentando un adelgazamiento homogéneo del cobre proyectado dentro de la ventana del enmascarado, posteriormente a medida que esto avanza se producirán paredes laterales en la zona interior de la ventana que ,por distribución del campo eléctrico, se verán afectadas por las líneas de campo generando una disolución lateral desde el interior de la ventana. Esta disolución lateral se dará por debajo del enmascarado generando el llamado “Undercut”, esto es, la expansión de la ventana anódica más allá de la ventana de la máscara a medida que avanza la disolución. Es necesario considerar el undercut al momento de diseñar el escalamiento a nivel industrial pues el enmascarado deberá abarcar no solo el ancho del marco mínimo para que este sea resistente estructuralmente y no se desarme, sino también debe considerar el undercut para asegurar que pese al efecto de esta disolución lateral de las caras interiores de la ventana se asegure la obtención de un marco estructuralmente resistente.

El marco de cobre solo puede ser utilizado si es estructuralmente estable, es decir, siempre y cuando cuente con la suficiente resistencia mecánica para soportar el manejo de material que se realiza dentro de las instalaciones, principalmente el alzamiento que realiza el puente grúa o las grúas horquillas.

Para ello se cuenta con el apoyo del Sr. Daniel González Lagos, Ingeniero Civil Mecánico con vasta experiencia en la industria minera, para desarrollar un modelo que

permita encontrar el ancho mínimo del marco de cobre tal que pueda resistir la situación planteada. En este caso se considera el marco de cobre como un sistema de 4 vigas unidas y con ello se estudia el comportamiento de las barras laterales unidas al lomo del ánodo y de la barra inferior que soporta el peso del cobre fundido que se vierte en el interior de la ventana del marco generando tracción en las barras laterales.

2. Objetivos

2.1. General:

Evaluar la prefactibilidad técnica y económica de la implementación de la tecnología de enmascaramiento de ánodos en el proceso de electrorefinación de cobre, basado en el contexto de operación de la refinería Ventanas de CODELCO

2.2. Específicos:

2.2.1. Técnico

- Diseñar y construir una celda de electrorefinación a escala que replique las condiciones de operación de las celdas de refinería Ventanas de CODELCO, para realizar los estudios experimentales.
- Determinar el ancho mínimo que debe tener el marco para asegurar el correcto funcionamiento del proceso de electrorefinación, analizando los esfuerzos a los que se verá sometido durante la operación.
- Evaluar el impacto que tiene sobre el proceso de electrorefinación la implementación de esta tecnología, enfocándose en que no afecte negativamente la calidad del cátodo obtenido y/o la eficiencia de corriente.

2.2.2. Económico

- Evaluar los costos que conlleva la aplicación del enmascaramiento anódico, desde el punto de vista de reducción de la refundición y reprocesamiento del Scrap del ánodo y comparar con los costos del proceso actual.

3. Metodología

- Realizar el enmascaramiento de los ánodos de estudio con la configuración deseada.
- Realizar los estudios de electrorefinación, verificando la correcta formación del cátodo de cobre.
- Verificar el nivel de Undercut generado en el proceso y proponer un margen de seguridad para la formación del marco.
- Evaluar la incidencia que tiene el enmascaramiento en la eficiencia de corriente de la celda.

4. Resultados y Discusiones

4.1. Cálculo de Ancho mínimo del marco

El marco de cobre si llega a formarse con la disolución de la ventana, deberá poseer la suficiente resistencia mecánica para poder ser manipulado sin problemas por los equipos de la refinería, esto es el puente grúa que lo alza para sacarlo de la celda y las grúas horquillas que los transportan dentro de las instalaciones.

Para ello se considera el marco de cobre como un sistema de Barras de cobre de espesor y largo equivalentes al espesor del ánodo y del lado correspondiente a la barra que se analiza. Para ello, se cuenta con la ayuda del sr. Daniel González, con quien se desarrolla un modelo en base a dos probables escenarios de operación, presentados en la Figura 14. El primer escenario es el alzamiento del marco una vez realizada la electrorefinación, en esta situación las barras laterales deben soportar el peso de si mismas y la barra inferior sin sufrir deformación o desprenderse del lomo. El segundo escenario propuesto es el marco relleno con cobre fundido, en esta situación se considera que el cobre del relleno no se adhiere al marco al solidificarse, por tanto, la barra inferior debe soportar su peso y el del relleno, ejerciendo tracción en las barras laterales, evitando desprenderse y deformarse

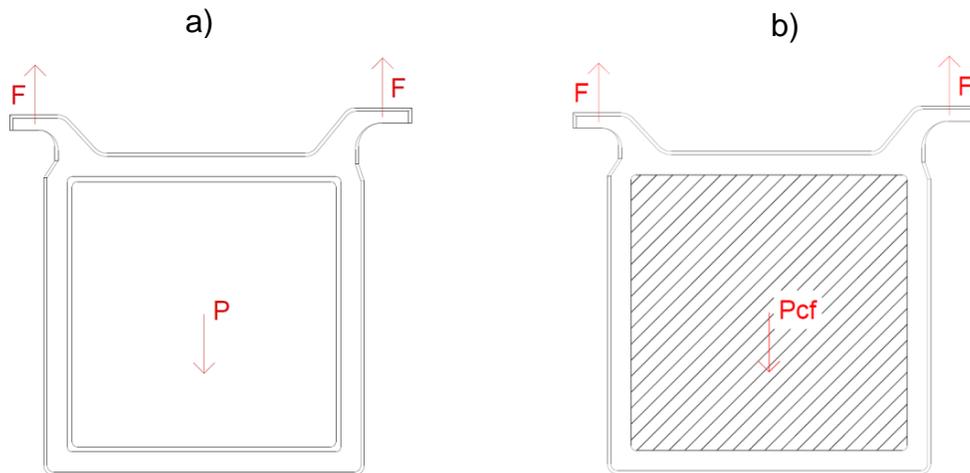


Figura 14: Escenarios de alzamiento por una fuerza F a) alzamiento vertical del marco vacío, P es el peso del marco de cobre. b) alzamiento vertical con relleno de cobre sin fusión, P_{cf} es el peso del cobre fundido.

Resolviendo los modelos planteados por medio de un software de análisis mecánico del sr. Daniel Gonzales, se obtiene que los anchos mínimos para el caso del alzamiento vertical y el alzamiento con relleno son 0.2cm y 3cm respectivamente. Dado que se desea resistir todos los posibles escenarios, se escoge el mayor ancho determinado. Por ello, el ancho mínimo del marco que debe asegurarse para mantener una resistencia estructural adecuada es de 3cm.

4.2. Escalamiento, enmascarado y puesta en marcha

Se considera como ancho del ánodo la dimensión de la línea que va a través de la cara del ánodo y es paralela a aquella que une las orejas del ánodo. El largo del ánodo se considera como la dimensión de la línea que cruza a través de la cara del ánodo y que es perpendicular a la línea del ancho del ánodo y a la línea que une las orejas del ánodo. Finalmente, el espesor del ánodo se considera como la dimensión del ánodo perpendicular a las caras del ánodo (la línea que une las caras del ánodo y que es perpendicular a ambas caras).

Considerando las dimensiones entregadas por refinería Ventanas, se decide escalar el ancho y largo, a fin de escalar el área expuesta de las caras del ánodo con la intención de mantener el tiempo de duración del proceso, dado que el proceso visto de una forma simplificada, es el adelgazamiento del espesor del ánodo producto del retiro de láminas de un espesor igual al tamaño de una partícula de cobre desde las caras del ánodo, tal como deja entrever el Scrap generado en el proceso (Figura 8). En este escalamiento se debe considerar el ancho del enmascarado, el cual debe ser de un ancho máximo de aproximadamente 5 cm, según lo indicado como atractivo por el jefe de planta de la división Codelco Ventanas en conjunto con su gerente encargado de la reducción de costos, dado que consideran que una cobertura mayor pasivaría demasiada área de las caras del ánodo.

Se escala en un factor de 1 a 10 las dimensiones de las caras del ánodo para obtener el área expuesta de estas al enmascarar, obteniéndose un ancho de 89,5 mm y un largo de 91,5 mm. Posteriormente se ajustan las dimensiones para trabajar con números enteros y obtener un área expuesta que pueda ser analizada de mejor manera en términos porcentuales, con ellos se obtiene una ventana de máscara de 100 cm².

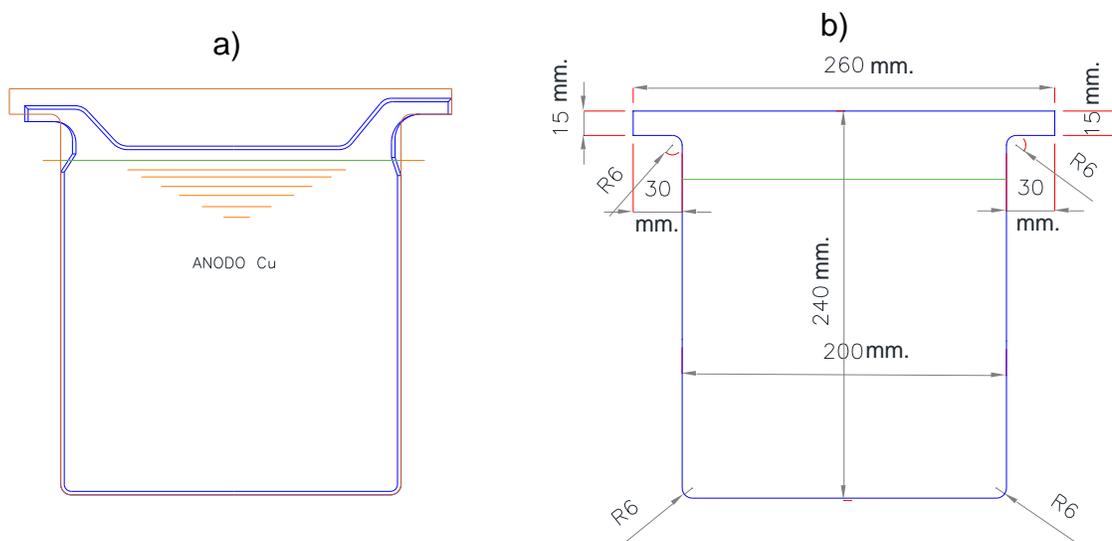
Una vez obtenido el tamaño de la ventana de la máscara, se adiciona el ancho máximo aceptado sugerido por el Jefe de Planta de refinería Ventanas, es decir, 5cm de enmascarado en cada lado, obteniendo un ánodo de trabajo de 200mm de ancho y 200mm de largo. Se decide modificar el lomo del ánodo, extendido el largo del ánodo a fin de unir las orejas de este, esto no afectara el experimento al considerar que el objetivo es estudiar la apertura de la ventana anódica. Esta modificación se aprecia en la Figura 15.

Se escala la celda de electrorefino de Ventanas en un factor de 1:10 en su dimensión de alto y ancho. El Largo de la celda se estima en función del espaciamiento catódico (100mm) y los equipos de control que se utilizarán para mantener las condiciones operacionales (termóstato, calefactor y agitador).

En Cuanto al cátodo, se escala de igual manera al ánodo, utilizando un factor de 1:10, optimizando las dimensiones en función de las modificaciones del ánodo, quedando

de 200mm de ancho x 240mm de largo (esta extensión del largo del cátodo es porque se considera el largo adicionado por los tirantes en la planta, los cuales fijan la placa cuadrada a la barra de sujeción. El espesor de la placa es 0,1mm, si bien es aproximadamente 10 veces más delgada que el cátodo industrial, es la placa comercial de mayor espesor encontrado en el mercado local. El cátodo experimental mantiene mejor su forma frente al manejo (no se pliega fácilmente al manipularla), pero pese a estar fabricado con la placa de cobre más gruesa encontrada presenta problemas de verticalidad, curvándose al entrar al electrolito, por lo que es necesaria la utilización de barras guían en los costados para evitar este inconveniente y prevenir un posible contacto de los electrodos que desencadene un cortocircuito. Dichas barras son construidas con una barra de acrílico delgada con una acanaladura en su sección central donde es introducido el borde del cátodo, manteniendo su posición recta durante todo el proceso.

A continuación, se presentan los planos optimizados del ánodo y la celda con sus respectivas medidas expresadas en milímetros. No se presentan los planos originales por expresa petición de Codelco Ventanas.



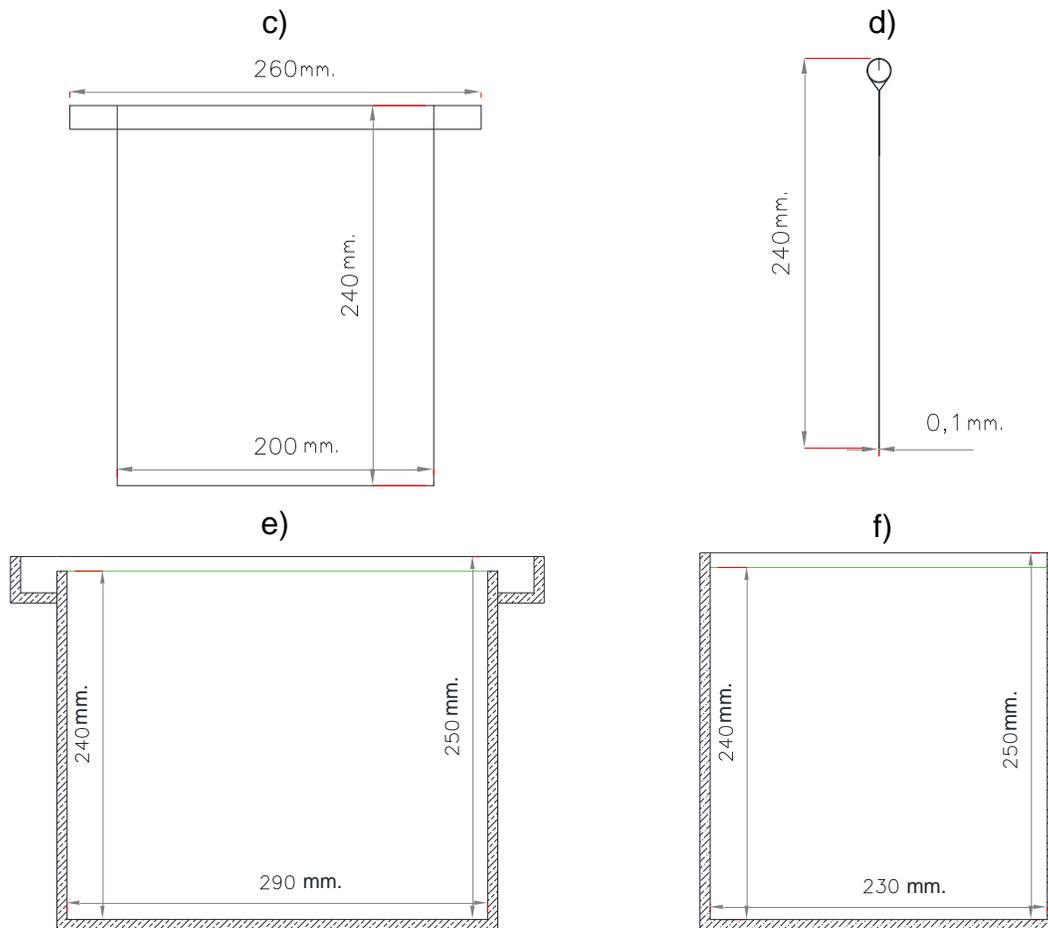


Figura 15: Planos escalados para la fabricación de los componentes del experimento. a) Superposición del ánodo experimental y el ánodo escalado de refinería Ventanas. b) dimensiones del ánodo optimizado. c) cátodo optimizado vista frontal d) Cátodo optimizado vista lateral. e) Celda escalada vista frontal f) Celda escalada vista lateral

Para el enmascarado, tal como se mencionó en la descripción del proyecto, se utilizó el Acrílico para su fabricación. Las dimensiones internas del enmascarado son de aproximadamente 200mm de ancho, 260mm de alto (para que pueda sujetarse desde la parte superior del ánodo) y un ancho interior de aprox. 40mm, se utilizan medidas interiores de la máscara cercanas a las dimensiones del ánodo para que esta quede lo más ajustada posible al ánodo. El enmascarado cubre ambas caras del ánodo (dejando una apertura de 100mm x 100mm en el centro) y recubre ambos costados con la finalidad de asegurar que el sistema proteja las dimensiones exteriores del ánodo, la sección inferior queda abierta para asegurar la salida de los barras anódicas, La sección superior es abierta y cuenta solo con pasadores para evitar que el enmascarado llegue a caerse del ánodo, esto no implica daños para el ánodo ya que la sección superior no se sumerge en el ácido. A continuación, se presenta el enmascarado y su aplicación al ánodo.

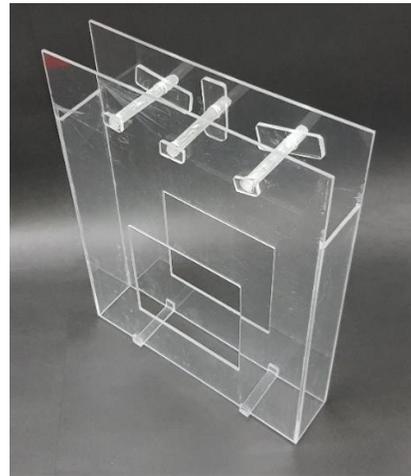


Figura 16: Enmascarado anódico vista frontal y en perspectiva



Figura 17: Ánodo enmascarado, vista frontal y lateral

La puesta en marcha del sistema considera pruebas de funcionamiento del sistema de calefacción para asegurar que la temperatura de operación se mantenga en el rango operacional de refinería Ventanas (65-70°C). La primera prueba de funcionamiento del sistema de calefacción se realiza con la celda abierta al ambiente tal como ocurre en la operación real y con una temperatura fijada en el termostato de 68°C. Los resultados son los siguientes

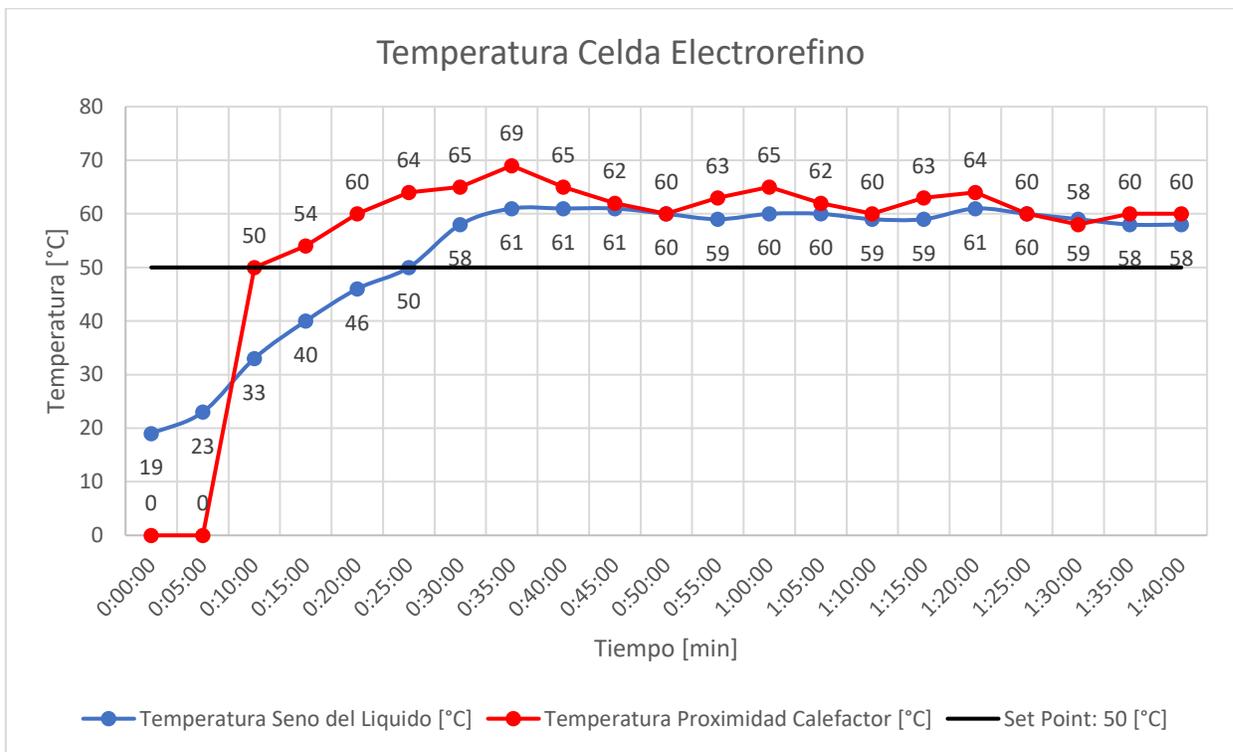


Figura 18: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda de electrorefino

De este estudio se logra concluir que el termóstato tiene un Offset (desfase con el setpoint) de aproximadamente 10°C. Adicionalmente se aprecia que sin utilizar agitación en el sistema hay un delta de temperatura de 4-5°C entre el seno del líquido y el próximo al calefactor, por lo que se propone el uso de un sistema de agitación con un número bajo de revoluciones (<100R.P.M.) para no afectar la transferencia de masa entre los electrodos y mantener el sistema lo más similar a la operación de Ventanas (no afectar la decantación del barro anódico). Un punto importante en este estudio es que hubo una evaporación de 1L de líquido en tan solo 1 hora, por lo que se procedió a utilizar una tapa antievolaporación en la celda. Si bien esto último aleja el estudio de las condiciones de operación de ventanas. Realizadas estas modificaciones se obtienen los siguientes resultados

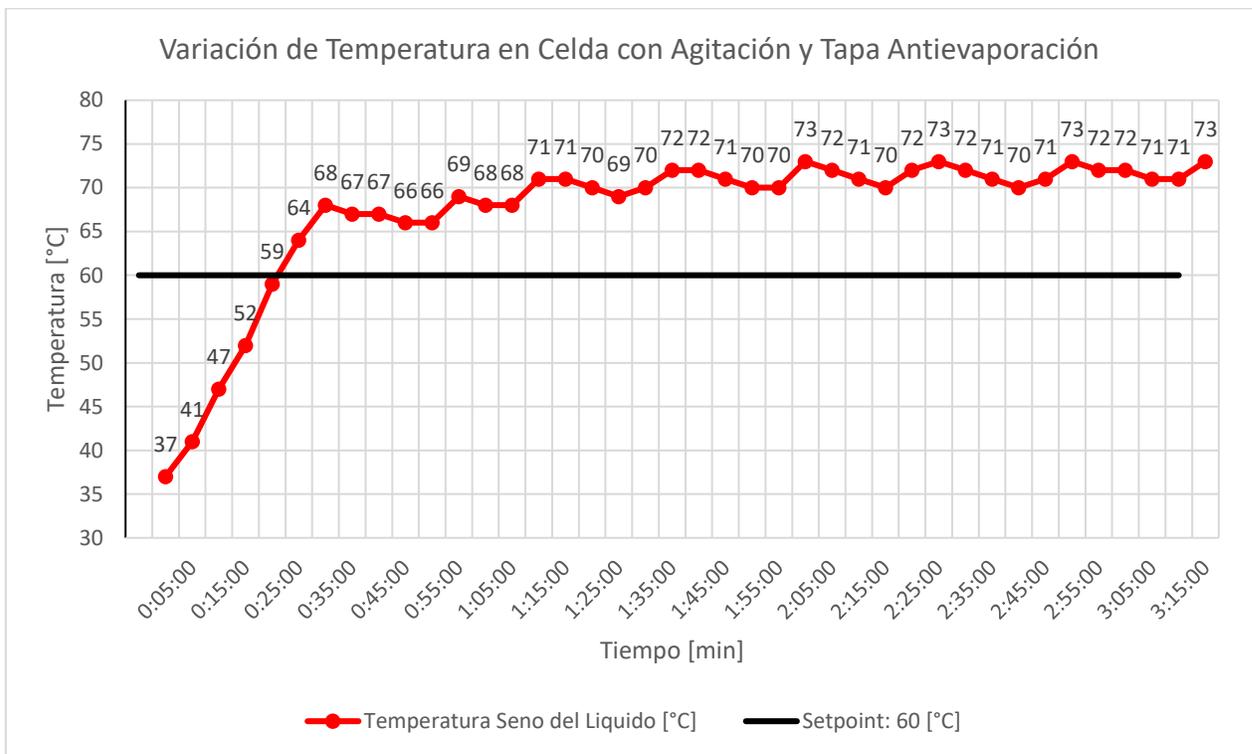


Figura 19: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda con agitación y tapa antievolaporante

Con las modificaciones realizadas se reafirma el Offset del sistema de aproximadamente 10°C y la temperatura del sistema se homogeniza sin generar turbulencia con el sistema de agitación fijado aproximadamente a 100 R.P.M. Si bien se presentaron mejoras en el sistema, igual se presenció evaporación en el sistema, pero muchísimo menos que antes, aproximadamente 80ml de líquido en la primera hora y media, y una estabilización posterior que fijo la evaporación total en aproximadamente 110ml en 3 horas. Si bien la operación mejora al disminuir la evaporación, se presenta un nuevo problema al operar a 68°C (temperatura de operación de Ventanas, la tapa antievolaporación se pandea al ser muy delgada (espesor 3mm, acrílico), al igual que la celda que se pandea en menor medida, pero genera filtraciones en las esquinas de la celda.

Por ello se modificó la celda y la tapa antievolaporación, construyendo ambos en acrílico de 10mm de espesor para evitar la deformación de las placas. Además, se adiciona un sistema de rellenado de electrolito para reponer lo perdido por evaporación, este sistema trabaja con el principio de rellenado por nivel, una vez que el electrolito se evapora baja el nivel dejando abierta la boca de la manguera, el aire asciende por la manguera, reduciendo el vacío, lo que permite que el relleno baje hasta la celda, esto continua hasta que el aumento del nivel de electrolito en la celda detiene el ingreso de aire a través de la manguera y las presiones se equilibren, manteniendo así el nivel de electrolito en la celda.

A continuación, se presenta la nueva tapa antievolaporación con sus espaciadores para equipos y electrodos, la disposición de la celda y los resultados de la prueba del sistema de control de temperatura.

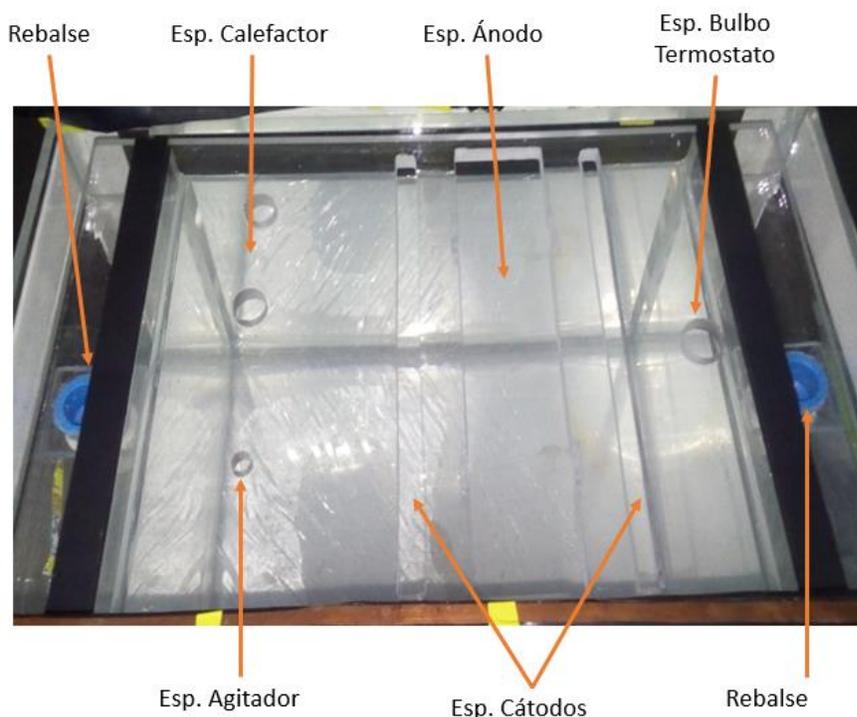


Figura 20: Tapa antievolaporante y distribución de componentes en la celda

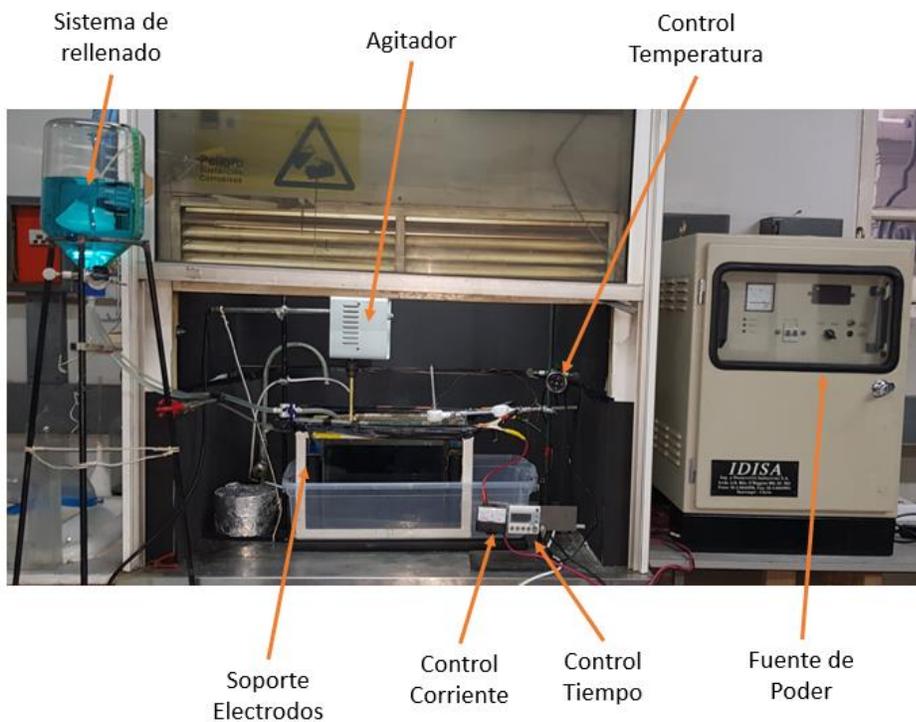


Figura 21: Distribución de equipos y componentes del experimento

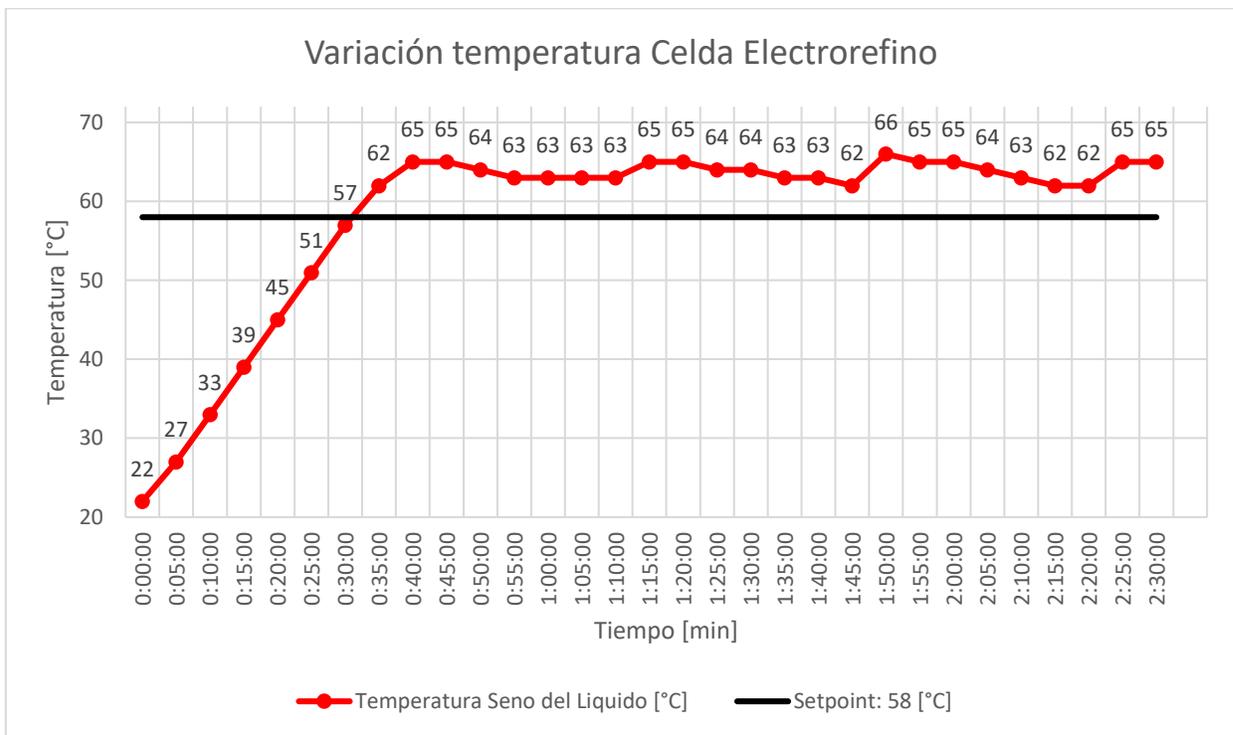


Figura 22: Gráfico evolución temporal de la temperatura en celda y tapa optimizada

4.3. Otros desafíos encontrados

- Cristalización del sulfato de cobre durante la noche

Con esta prueba se estima que el Offset se redujo a aproximadamente 6°C y el sistema es suficientemente estable térmicamente para iniciar el proceso de electrorefino. Para ello se procede a homogenizar el electrolito entregado por refinería Ventanas disolviendo los cristales de sulfato de cobre contenidos en la solución. A medida que se realiza la disolución se nota la importancia de la temperatura en el proceso pues al disminuir la temperatura durante la noche (el proceso completo de homogenización tomo más de 24 horas) reaparecieron los cristales depositándose sobre el agitador, tal como se muestra en la figura 23. Considerando este inconveniente se procede a construir un aislamiento para la celda de electrorefino con placas de Poliestireno Expandido y Goma E.V.A., para poder emular la aislación que poseen las celdas al estar construidas con gruesas placas de hormigón polimérico.

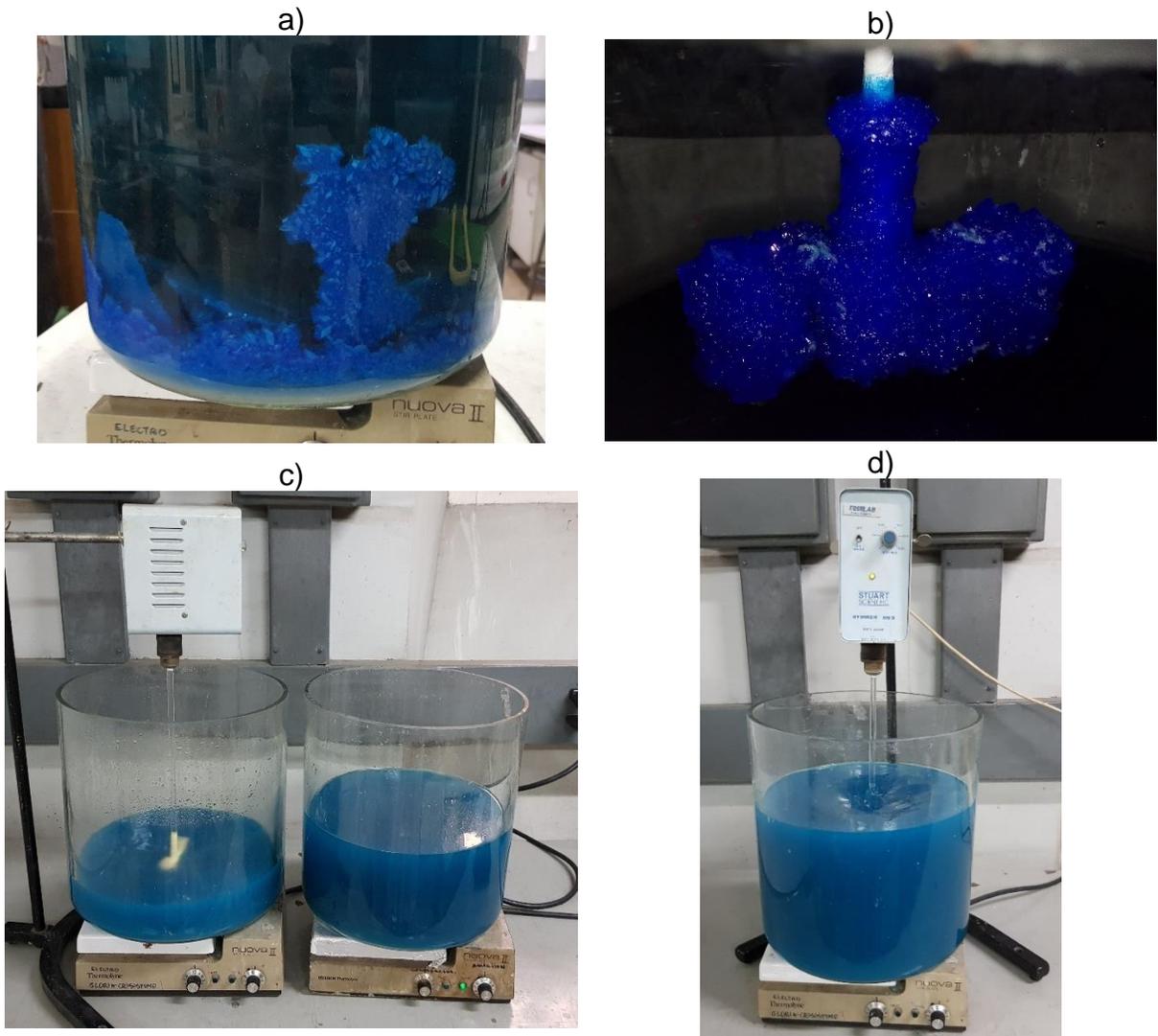


Figura 23: Homogenización del electrolito. a) cristales formados en recipiente con electrolito. b) Cristales formados en la superficie del agitador. c) sistema de disolución de cristales en ambas muestras de electrolito. d) Homogenización de volumen final destinado a uso en celda

Una vez solucionado el Problema del recristalizamiento del sulfato de cobre con el sistema de aislación térmica, se procede a comenzar con el proceso de electrorefino de cobre con la previa ambientación del sistema manteniendo solo electrolito dentro de la celda para que el control de temperatura establezca el rango de operación. Una vez hecho esto, se procede a ubicar los electrodos en el sistema respetando la distancia catódica (100mm) para comenzar con el proceso.

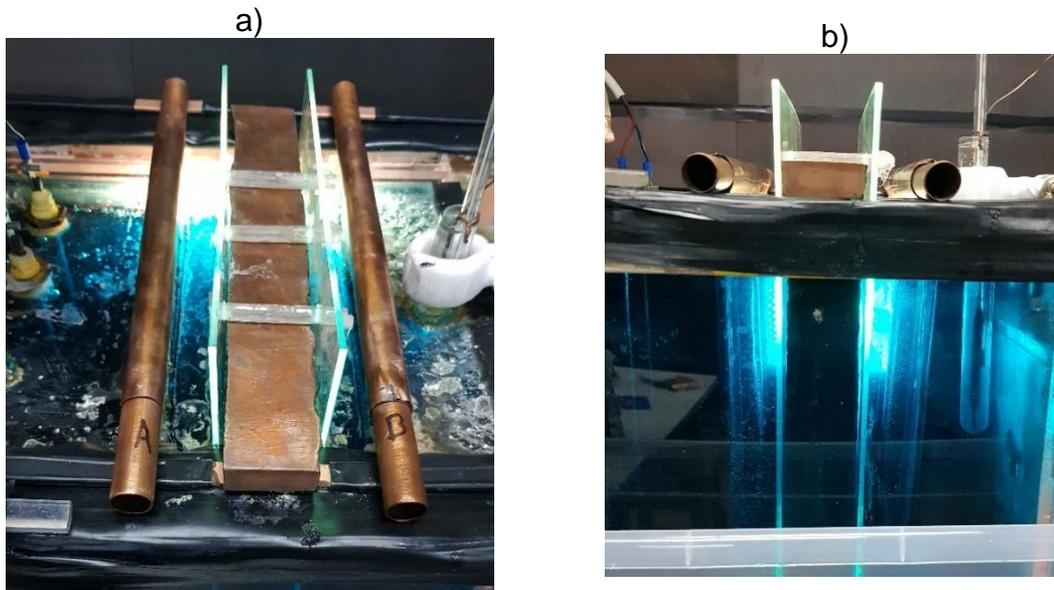


Figura 24: Disposición de los electrodos en la celda durante la operación a) vista superior b) vista frontal

La densidad de corriente utilizada en planta es de 315A/m^2 , escalando este parámetro a los $0,02\text{m}^2$ de área expuesta total del cátodo utilizado (ventanas de ambas caras), se obtiene que la corriente que debe ser alimentada al sistema debe ser de 6,3 A. Para monitorear que este suministro sea constante y no haya mayores variaciones se cuenta con un sistema de doble seguimiento de la corriente por medio de un medidor digital incorporado en la fuente de poder y un medidor analógico conectado al sistema de cableado que alimenta la celda de poder. Ambos medidores son monitoreados por un sistema de cámaras que registran el valor en una fotografía cada 5 min. Los medidores de corriente se presentan en la siguiente figura

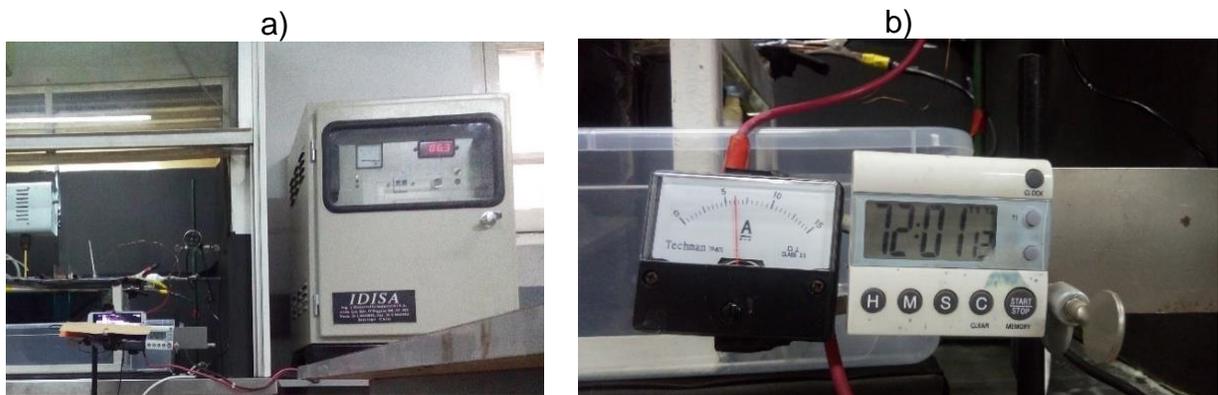


Figura 25: Sistemas de medición de corriente de alimentación. a) Medidor digital incorporado en la fuente de poder. b) Medidos analógico instalado en el cableado de alimentación

4.4. Balance de Masa y Eficiencia de Corriente

Inicialmente se aprecia al momento de pesar el ánodo que este se encuentra bajo el peso esperado producto de su volumen. Dada su dimensión de 240 mm de largo, 200 mm de ancho y 40 mm de espesor, además del peso de las orejas de dimensiones 30 mm de largo, 15mm de ancho y 40 mm de espesor. Considerando estas dimensiones y la densidad del cobre ($8,96 \text{ gr/cm}^3$) el peso del ánodo debiese ser 17.5 Kg. Pese a ello, la balanza registra que el peso del ánodo es de tan solo 15.5 Kg. Esto se debe al alto nivel de porosidad que presenta el ánodo, con lo que se calcula que la densidad aparente del cobre es un 11,35% menor, dando una densidad aparente de $7,94 \text{ gr/cm}^3$.

La ley de conservación de masa nos indica que la suma de la masa depositada en los cátodos y la masa de barro anódico es equivalente a la masa disuelta del ánodo según la siguiente ecuación

$$M_{dis. \text{ ánodo}} = M_{Dep. \text{ Cátodos}} + M_{Barro \text{ Anodico}} \quad \text{Ecuación 7}$$

No se consideran las especies disueltas en el electrolito dada la dificultad para determinarlas, por ello se considera que la diferencia entre la masa disuelta y depositada corresponde únicamente al barro anódico. Utilizando esta ecuación podemos calcular la masa de barro anódico generada a lo largo del proceso, pues son los electrodos los únicos parámetros que podemos medir directamente. El cálculo del balance de masa se encuentra detallado en el anexo 2. En el siguiente gráfico se presenta un resumen del balance de masa del sistema.

Desde este punto comenzamos a denominar “Cátodo A” al cátodo ubicado entre el ánodo y el calefactor, y “Cátodo B” al cátodo ubicado entre el ánodo y el bulbo del termostato.

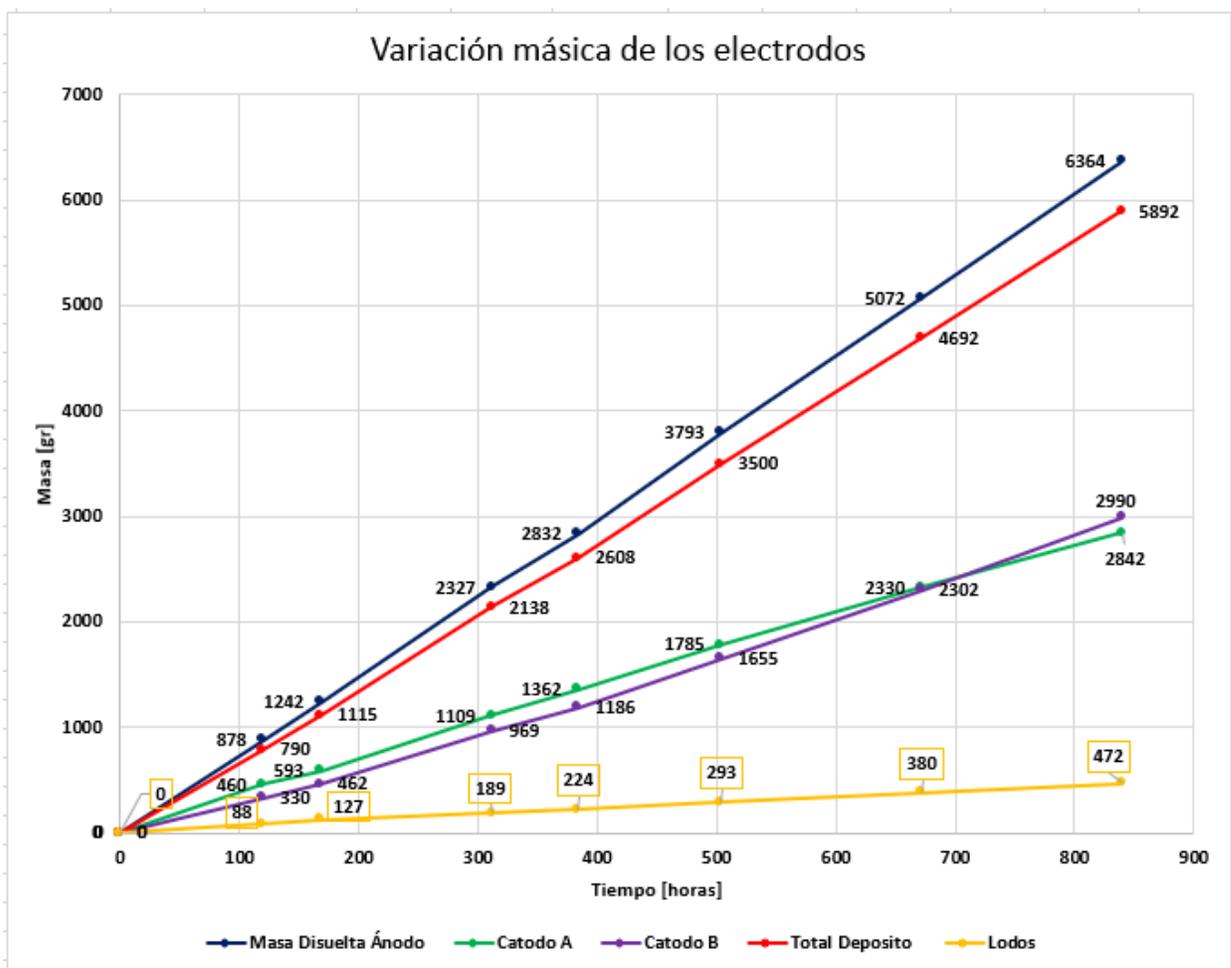


Figura 26: Gráfico de variación másica a lo largo del proceso de electrorefinación

El balance masico está construido en base a los datos experimentales obtenidos del pesaje de los ánodos a completar una cosecha. Se aprecia que tanto la disolución como el depósito y la producción de barras mantienen una tendencia estable durante todo el proceso. Saber el nivel de eficiencia que tuvo cada proceso es necesario calcular la masa disuelta del ánodo y la masa depositada en los cátodos, por medio de la aplicación de la ley de Faraday planteada en la ecuación número 6, para ello es necesario conocer el valor de la corriente suministrada a lo largo del tiempo. Utilizando los datos obtenidos por las cámaras de monitoreo de los sistemas de medición de corriente, se calcula la corriente promedio suministrada cada día, los datos se presentan a continuación. En el anexo 3 es posible encontrar la tabla con los valores de corriente promedio diario y los valores promedio acumulados de corriente a lo largo del proceso completo de electrorefino.

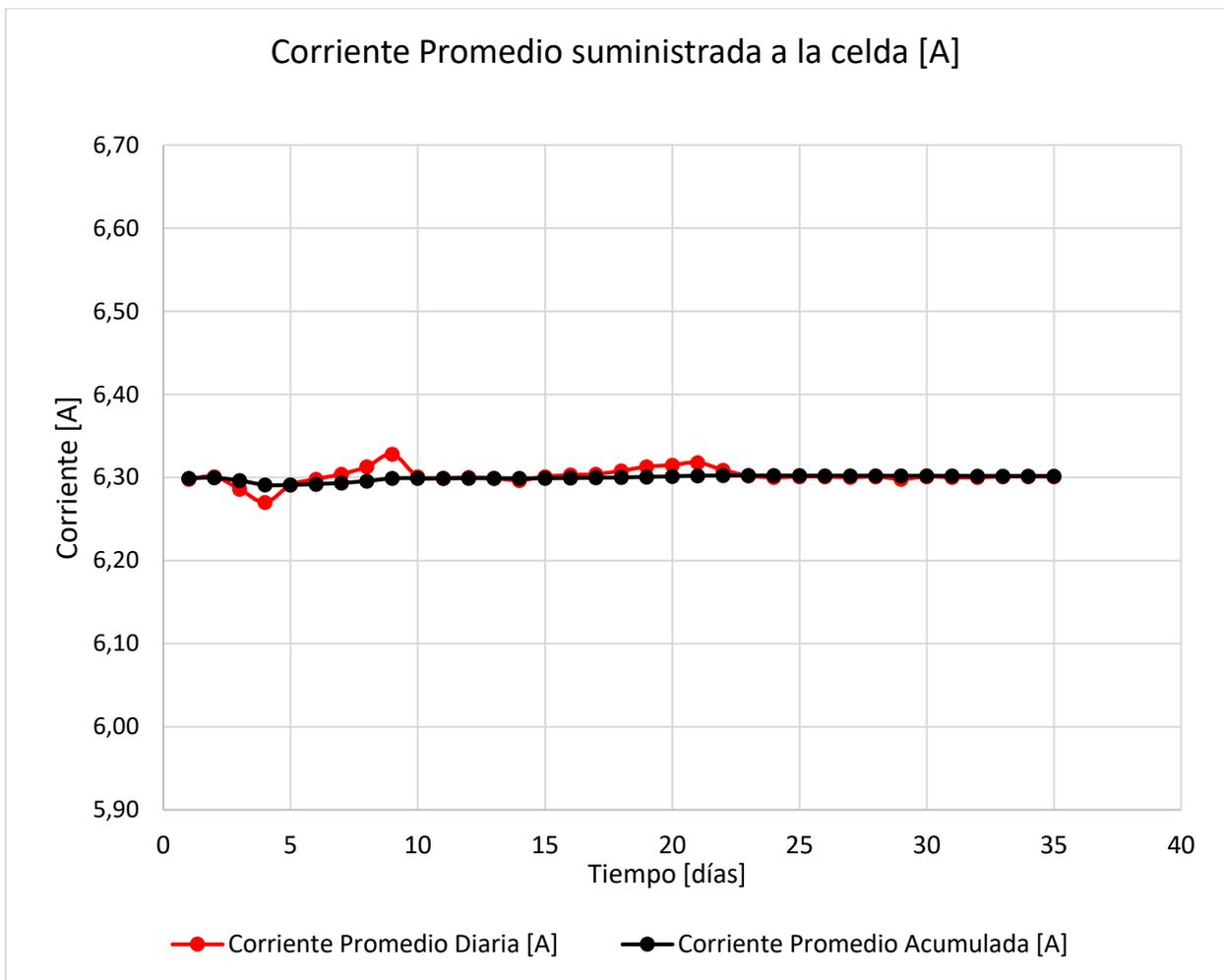


Figura 27: Gráfico de corriente promedio suministrada al sistema

De la Figura 27 se concluye que la corriente promedio a lo largo del proceso es de 6,3A respetando las condiciones operacionales de refinería Ventanas. Utilizando estos datos y la ley de Faraday (ecuación 6) se calcula la masa disuelta del ánodo y la masa depositada en los cátodos respectivamente. En este caso, considerando que la corriente en cada electrodo es la misma (6.3A en el ánodo y 6,3A como de ambos cátodos). Con ello se obtienen los siguientes resultados:

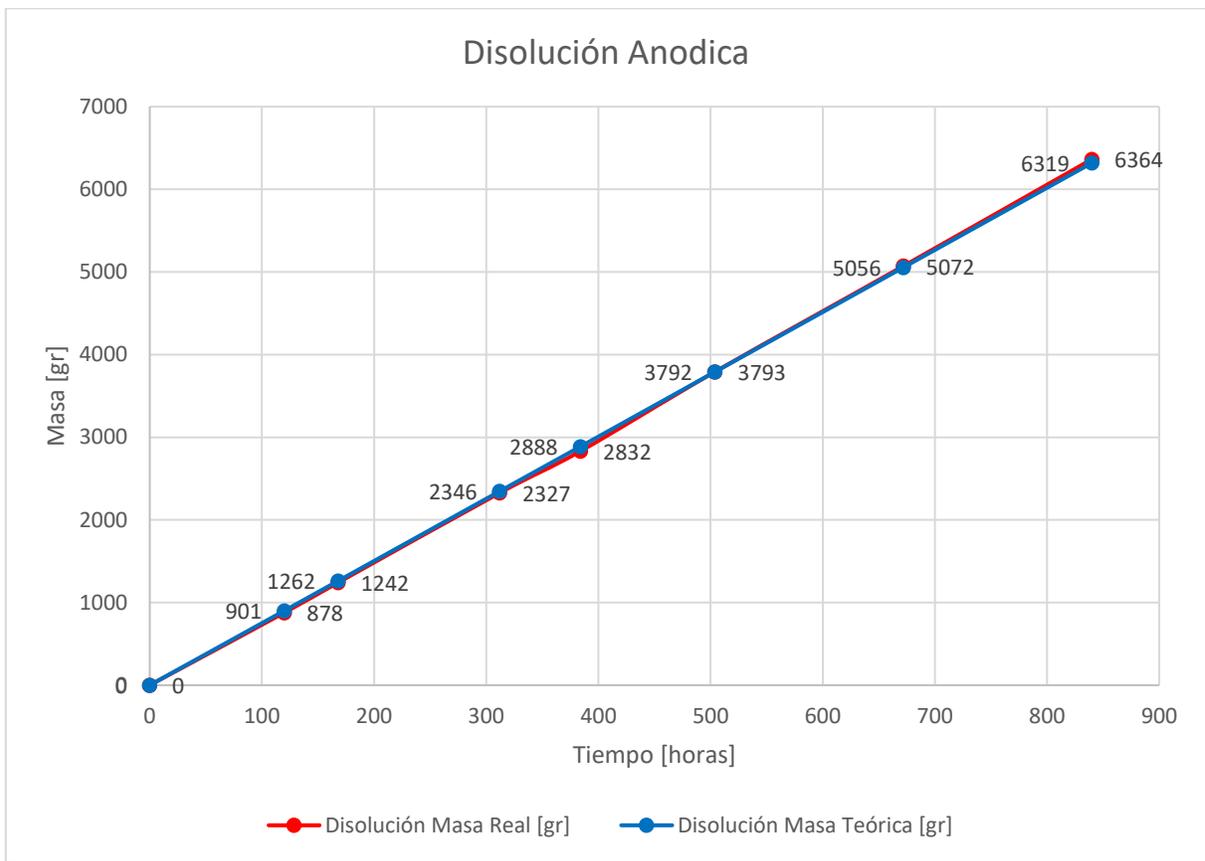


Figura 28: Comparación disolución anódica real versus disolución anódica teórica

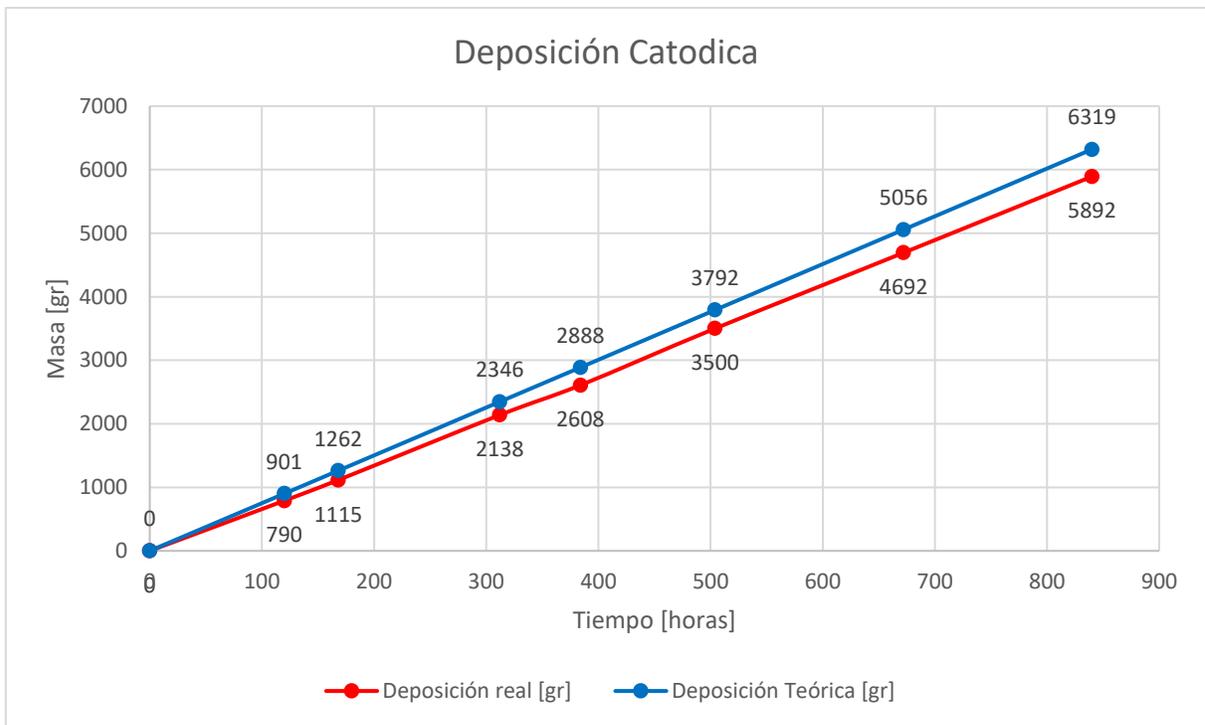


Figura 29: Gráfico deposición catódica a lo largo del proceso

Se puede apreciar en la Figura 28 una inversión en el final de las curvas, posicionándose la deposición real por sobre la teórica. Esto puede deberse posiblemente a pequeños desprendimientos de cobre que van a parar a los barros anódicos y que no necesariamente se disuelven por electroquímica, sino que se separan del ánodo por razones mecánicas, principalmente por un debilitamiento de la adhesión de la partícula de cobre al ánodo por la disolución de las partículas colindantes con ella, esto se deduce por la presencia de pequeñas partículas de cobre avistadas en los barros anódicos una vez culminado el proceso. Con ello en mente se procede a calcular la eficiencia de corriente anódica y catódica como la razón porcentual entre la masa real y la masa teórica disuelta y depositada respectivamente. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 6: Eficiencia de corriente anódica

Tiempo [horas]	Disolución Masa Real [gr]	Disolución Masa Teórica [gr]	Eficiencia Corriente Anódica [%]
0	0	0	-
120	878	901	97,4
168	1242	1262	98,4
312	2327	2346	99,2
384	2832	2888	98,1
504	3793	3792	100,0
672	5072	5056	100,3
840	6364	6319	100,7

Tabla 7: Eficiencia de corriente catódica

Tiempo [horas]	Deposición Masa Real [gr]	Deposición Masa Teórica [gr]	Eficiencia Corriente Catódica [%]
0	0	0	-
120	790	901	87,7
168	1115	1262	88,3
312	2138	2346	91,1
384	2608	2888	90,3
504	3500	3792	92,3
672	4692	5056	92,8
840	5892	6319	93,2

Al analizar los datos de eficiencia de corriente a lo largo del proceso es posible apreciar que la eficiencia de corriente anódica bordea el 98-99% y se eleva sobre el final más allá del 100% (cosa que no puede ocurrir), explicándose por la inversión de las curvas de la Figura 28 antes mencionadas. Adicionalmente se aprecia que la eficiencia catódica promedia 91%, muy próximo al 93-94% con que opera Refinería Ventanas, esta variación se puede deber a la diferencia en los cátodos, ya sea en espesor o en contacto, o a la pasivación del ánodo y de los bordes del cátodo, producto que al agregarle el aislante se evita el establecimiento de las líneas de campo que se forman normalmente. Sumado a ello, la baja en la eficiencia catódica puede deberse a las diferencias del cátodo industrial con el cátodo, el cual posee una barra de sujeción sólida con una sección inferior curva y una placa inicial de aprox. 1mm de espesor, que en conjunto suman una masa mucho mayor y un contacto bastante mejor que el obtenido en el experimento con una barra de sujeción formada por una tubería de cobre de forma circular que brinda un pequeño apoyo en el contacto de cobre que energiza el sistema y la placa inicial es de solo 0,1mm de espesor, lo que no genera una fuerza descendente suficiente para obtener el mejor contacto entre la barra y el contacto producto del peso del cátodo. Pese a estas

diferencias con la operación se consigue apreciar que la diferencia en eficiencias es menor al 3%, considerándose un éxito la prueba desde el punto de vista de la eficiencia y emulación de las condiciones de operación.

4.5. Formación de la ventana y Undercut anódico.

Un punto sumamente importante en este estudio es la validación del concepto de disolución selectiva que plantea la patente industrial 633-2018 que indica que el enmascarado permite disolver el centro del ánodo acorde a como lo permita la forma de la ventana utilizada, sin dañar los bordes del ánodo. La formación de la ventana en el ánodo es apreciable desde la primera semana, donde se aprecia que la disolución sigue la forma de la apertura de que posee el enmascaramiento y a medida que este fenómeno avanza a el proceso, comienza a apreciarse el Undercut anódico con la disolución de la cara del ánodo en la sección cercana a la ventana y que se encuentra próxima a la ventana. En las siguientes figuras se aprecia la evolución temporal de la formación de la ventana en el ánodo a lo largo de cada cosecha.

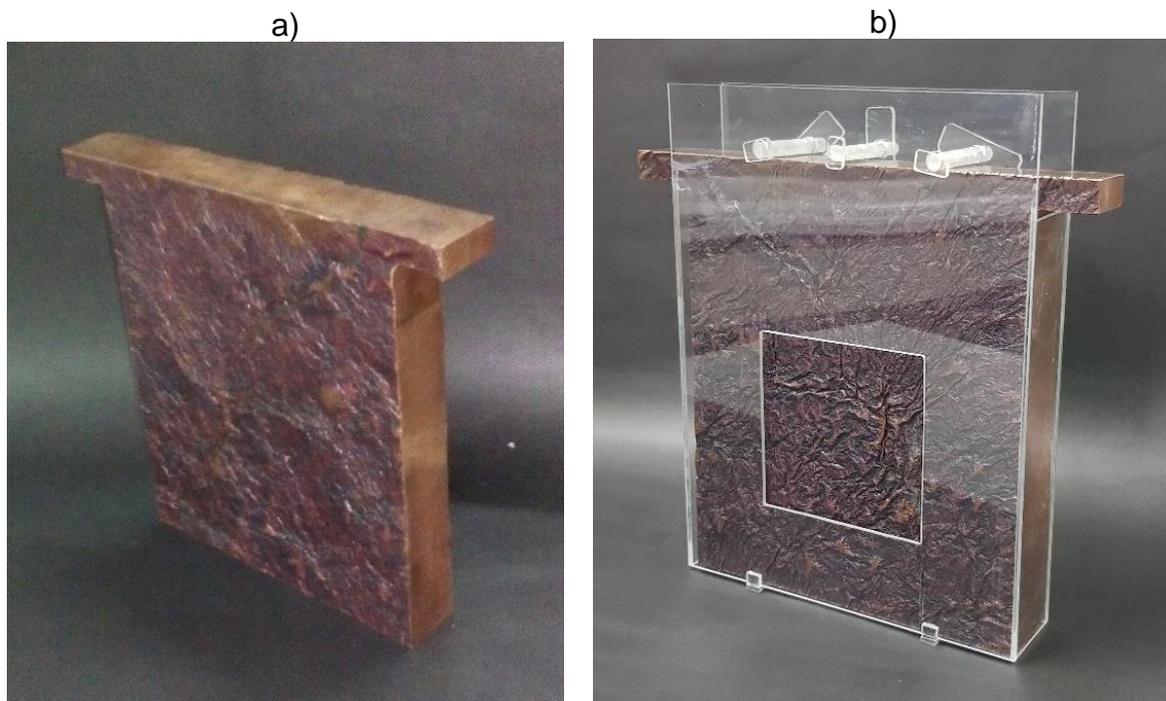


Figura 30: situación inicial del ánodo previo al proceso. a) ánodo b) ánodo enmascarado

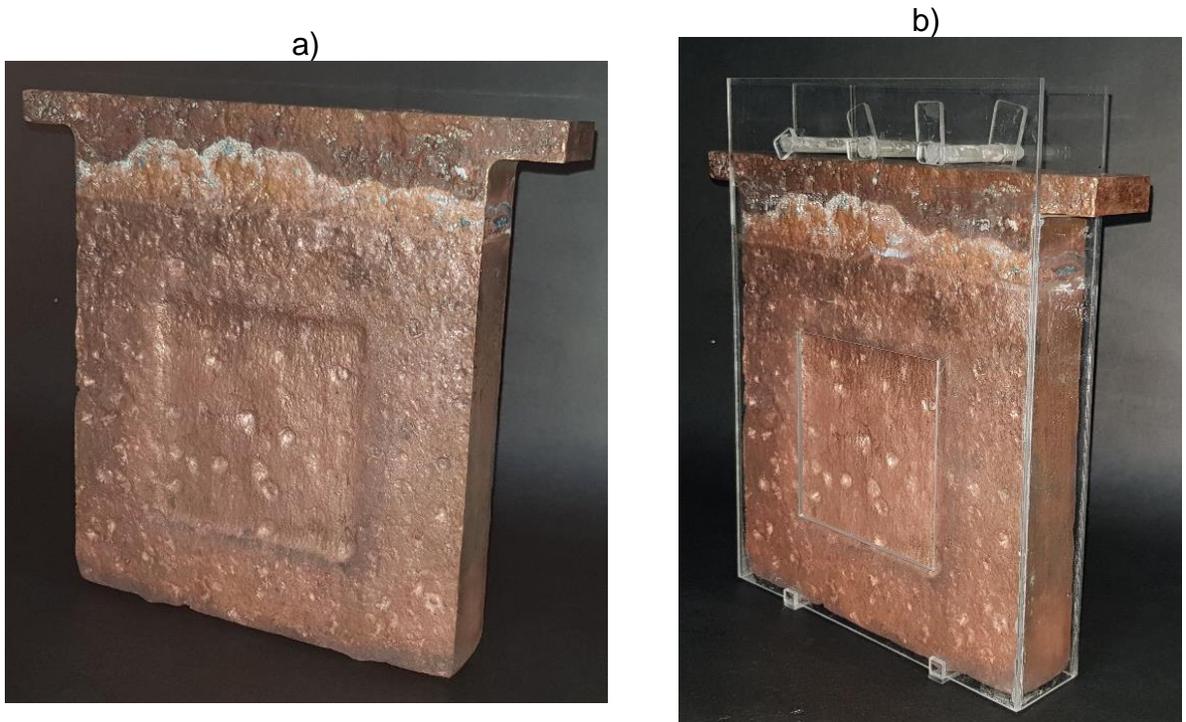


Figura 31: Ánodo en primera cosecha (120 horas), se aprecia el inicio de la formación de la ventana en el ánodo. a) ánodo b) ánodo enmascarado

En Figura 31 se aprecia la formación de la ventana inicia siguiendo casi a la perfección la forma de la apertura del enmascarado, conservando una forma cuadrada definida. Adicionalmente se aprecia que la zona inferior comienza a redondearse desde las esquinas, producto del establecimiento de las líneas de campo eléctrico entre la parte inferior del ánodo y su homólogo en los cátodos, dejando en evidencia que, si el enmascarado se deja abierto en uno de sus costados, no se podrán mantener las dimensiones exteriores del ánodo, afectando su posterior continuidad en el proceso al no encajar en la a la perfección en la rueda de moldeo para un eventual relleno.



Figura 32: Progresión de la disolución selectiva de la ventana del ánodo a las 168 horas del proceso. a) ánodo con enmascaramiento b) ánodo enmascarado cara posterior

a)



b)



Figura 33: Avance de la ventana en el ánodo, 312 horas de proceso. se aprecia una marcada formación de la ventana que sigue la forma de la apertura en el enmascaramiento a) ánodo sin enmascarar b) ánodo enmascarado

Se aprecia en la Figura 33 que la ventana en el ánodo mismo comienza a redondearse en sus esquinas y que se expande más allá de los límites de la apertura del enmascaramiento, reflejando la formación del Undercut anódico. Adicionalmente se aprecia un redondeamiento de las esquinas inferiores del ánodo y una oxidación de dicha zona, reflejando la disolución electroquímica que está ocurriendo.

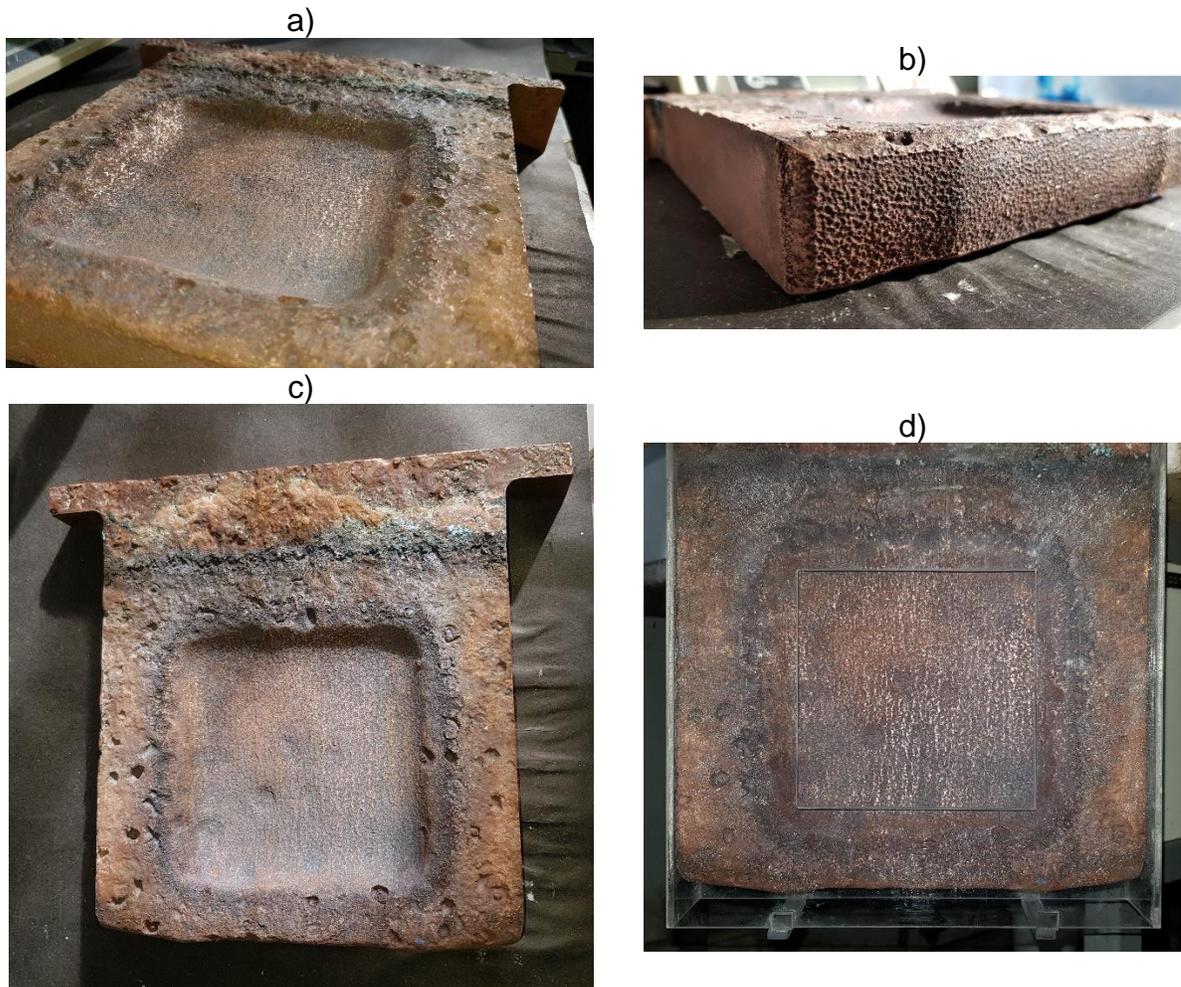


Figura 34: Progresión de la disolución selectiva en la formación de la ventana, 504 horas de proceso. a) vista en perspectiva de la ventana. b) vista de los efectos de la disolución de la zona inferior del ánodo por la apertura interior del enmascarado. c) Vista frontal del avance de la ventana en el ánodo. d) Ánodo enmascarado, se aprecia el efecto de la disolución de la zona inferior del ánodo

En la Figura 34.b). se aprecia el avance de la disolución de la zona inferior del ánodo, donde en conjunto con la imagen d) se visualizan dos líneas de disolución retrasada, esto se debe a la presencia de los tirantes inferiores del enmascaramiento, los que tienen por finalidad evitar el pandeo de la máscara producto de la alta temperatura alcanzada por el ánodo al estar inmerso en el electrolito. Además de ello, se aprecia la aparición de nuevos poros en el ánodo a medida que avanza la disolución del cobre en la sección central del ánodo, esto se condice con la reducción en la densidad aparente del ánodo.

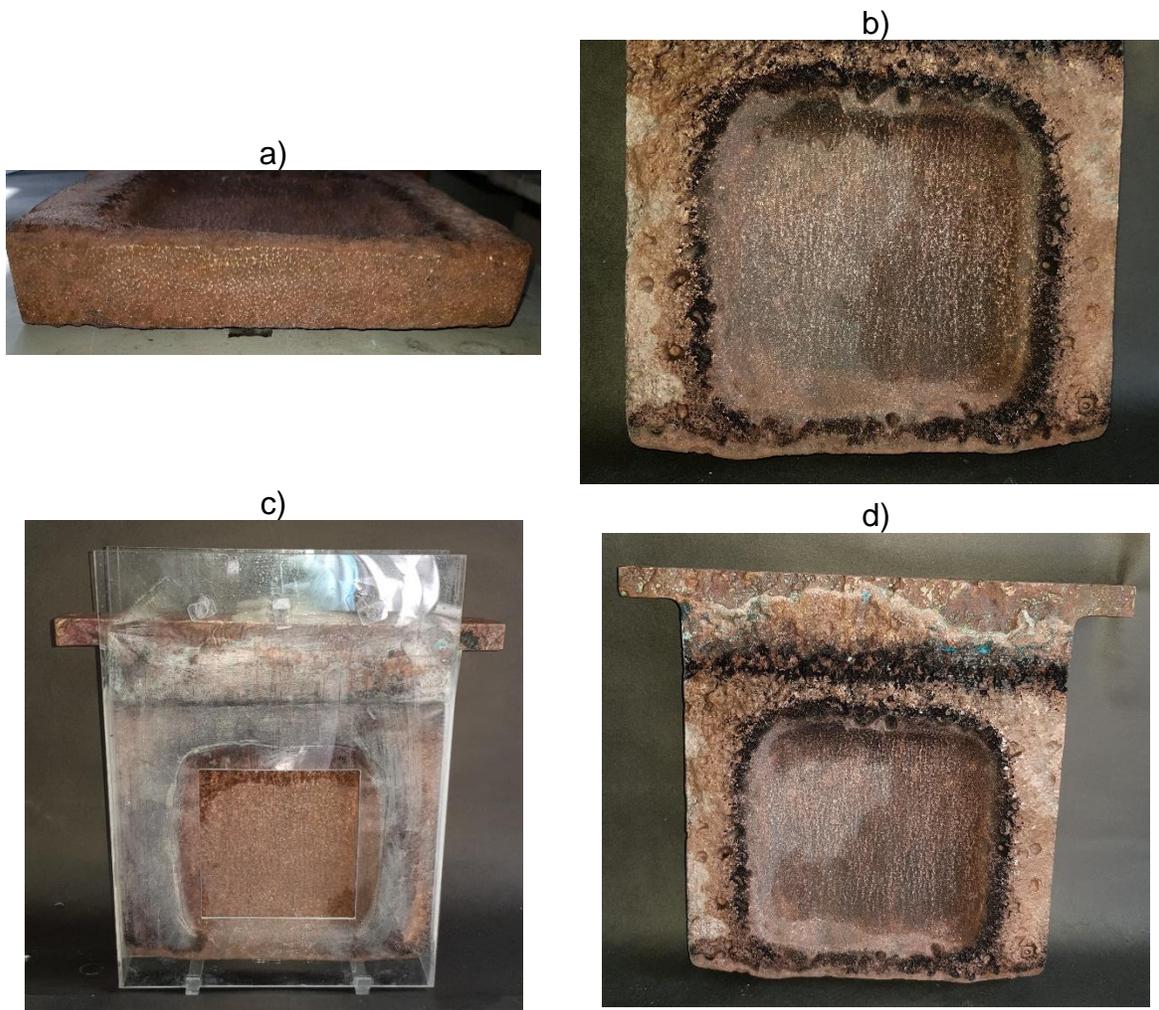


Figura 35: avance de la disolución del ánodo, 672 horas del proceso. a) avance de la disolución de la zona inferior del ánodo. b) avance de la disolución de la ventana del ánodo, se aprecia que se ajusta a la forma de la apertura del enmascarado. c) ánodo enmascarado d) vista frontal de la ventana en el ánodo.

Tras 672 horas de procesamiento se aprecia una estabilización del Undercut, el cual no progresa significativamente en comparación con el avance de la profundidad de la ventana. Un punto relevante en a estas alturas del proceso es la disolución de la sección inferior del ánodo, pues como se estimó antes, el ancho mínimo del marco para mantenerse estructuralmente estable es de 3cm de ancho, pero se aprecia que la sección inferior del marco que se está creando ya posee un ancho inferior a ese mínimo, por lo que se propone tomar medidas respecto al enmascaramiento de esta zona como por ejemplo, extender la máscara hacia abajo para evitar la disolución, pues como se mencionó en su momento, no es posible cerrar la parte baja del enmascarado pues es necesario tener abierto un paso para el barro anódico y las demás impurezas que puedan decantar desde el ánodo, de lo contrario sería necesario rediseñar el enmascarado para formar las impurezas a salir por la ventana y posteriormente decantar, lo que dificultaría la fabricación de la máscara según lo indicado por SisteMold, empresa que cotiza su fabricación.



Figura 36: Apertura de la ventana en el ánodo como resultado del enmascaramiento, 840 horas de proceso. a) ánodo sin enmascarar con ventana en su centro. b) ánodo con ventana enmascarado. c) Vista frontal del ánodo sin enmascarar. d) vista frontal ánodo enmascarado. Se aprecia la relación entre la ventana del enmascarado y la ventana formada en el ánodo. e) vista interior de la ventana, se aprecia que sigue la forma de la apertura del enmascarado f) vista interior de la ventana, se aprecia un biselado en el centro de la ventana que resulta en una "cresta" central que rodea la ventana.

Después de 840 horas de electrorefinación se logró alcanzar la apertura de la ventana, la cual tiene una forma homogénea (regular en función de la apertura del enmascaramiento) y presenta doble biselado desde ambas caras del ánodo con una cúspide en el centro, que a largo plazo puede ser beneficiosa para el relleno, pues entrega una capa delgada en el interior de la ventana que eventualmente tiene mayores opciones de alcanzar el punto de fusión del cobre cuando el marco sea relleno con cobre fundido debido a ser una pequeña masa de cobre que expone una gran área superficial para la transferencia de calor. Este punto será retomado en la sección de Rellenado.

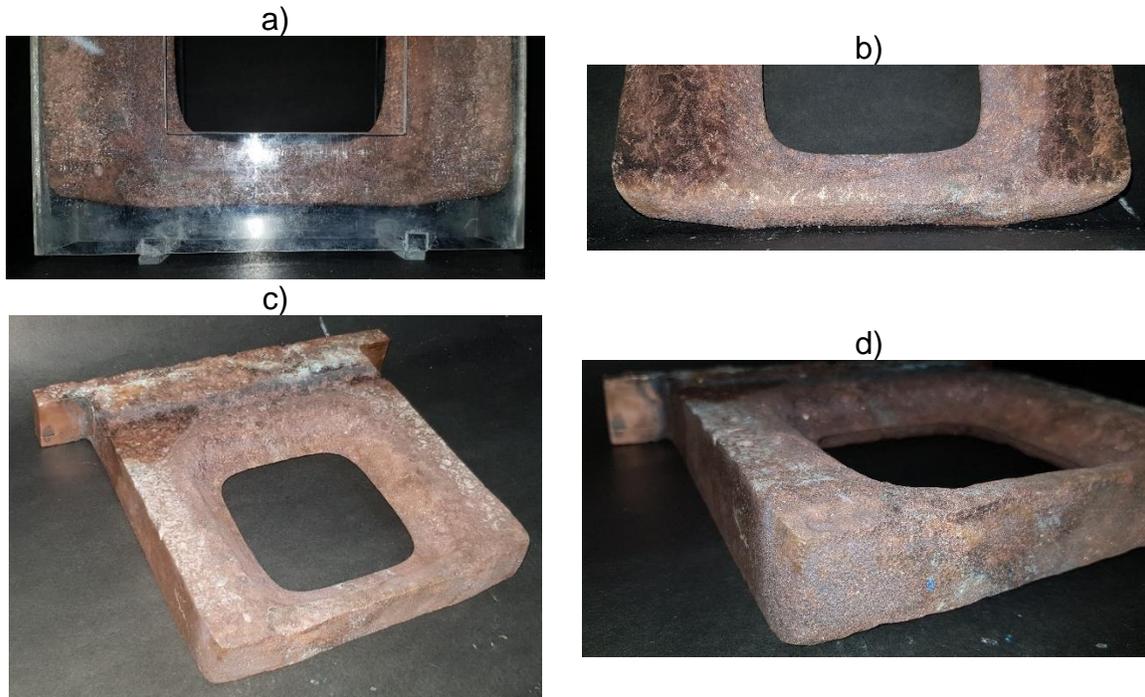


Figura 37: Disolución de la zona inferior del ánodo. a) Avance de la disolución del ánodo dentro del enmascaramiento. b) Adelgazamiento de la barra inferior del ánodo producto de la disolución de la zona inferior y del Undercut. c) Ánodo sin enmascarar vista perspectiva d) Ánodo sin enmascarar vista inferior.

Al finalizar el proceso de electrorefino se puede apreciar no solo la formación de la ventana sino también el adelgazamiento de la barra inferior que conforma el marco de cobre producto de la disolución generada en la parte inferior del ánodo. Esto reduce el ancho de la barra, evitando que se asegure el ancho mínimo estimado para mantener la estructuralidad del marco, quedando una barra de un ancho de aproximadamente 1 cm que cuenta además con el biselado interior de la ventana.

La disolución de la zona inferior logró reducir el Largo del ánodo en 2,2cm. por ello se plantea como solución, ya que no puede cerrarse la sección inferior del enmascarado por la caída de las impurezas por esa zona, extender el enmascaramiento en la sección inferior generando una pestaña aisle eléctricamente de forma indirecta la cara inferior del ánodo. De esta manera se consigue mantener las dimensiones interiores del ánodo sin

alterar la liberación de las impurezas contenidas en el. De forma coincidente, la disolución inferior alcanza la misma dimensión que el undercut registrado en la última cosecha, lo que sugiere que el alcance del campo eléctrico por detrás del material aislante es de 2cm aproximadamente, por lo tanto para prevenir la disolución de la sección inferior del ánodo es necesario extender el enmascaramiento más de dos centímetros hacia abajo, para asegurar la integridad del marco se ha de aplicar un factor de seguridad que duplique esta medida para al cien por ciento que no se generara disolución de cobre, por lo que se sugiere extender el enmascaramiento en al menos 4,5cm en su sección inferior.

La apertura de la ventana se alcanzo tras 840 horas de procesamiento, lo que dista de lo esperado, pues si se analiza el contenido de cobre presente en el volumen utilizado por la ventana, esto es un volumen de 400 cm³, que utilizando la densidad del cobre da un total de 3.584 gr. Si se considera un Undercut equivalente a un 20% adicional en masa, es necesario disolver una masa total de 4.300gr. Utilizando la ley de faraday (ecuación 6) para despejar el tiempo de operación necesario para disolver esta masa con una corriente de alimentación de 6,3 A, se obtiene que el tiempo requerido es aproximadamente de 23 días y 20 horas. Esto es un 32% menos del tiempo real que tomo alcanzar la apertura. Esto se debe a que parte de la corriente alimentada para lograr la disolución del cobre en la ventana del anodo se utilizo en disolver la parte inferior del anodo. Considerando que el total de la masa disuelta se condice con lo planteado en la ley de faraday tal como muestra la figura 28, una vez que se modifique el sistema de enmascaramiento para evitar la disolución de la sección inferior del anodo, se podrá disolver el cobre de la ventana en el tiempo estimado para ello.

A medida que el proceso avanzaba se vio la disolución del cobre contenido bajo el enmascaramiento, con el nivel de avance de la disolución de esta zona se determino el undercut y el nivel de profundidad que presentaba la ventana a medida que se formaba hasta abrirse. La tabla 8 presenta el resumen de las mediciones del undercut y la profundidad de la ventana a lo largo del proceso.

Tabla 8: Evolución del undercut y la profundidad de la ventana a lo largo del proceso.

Tiempo [horas]	Profundidad Ventana [mm]	Undercut [mm]
120	3	-
168	4	6
312	8	10
384	10	14
504	13	15
672	17	17
840	Apertura	19

Se puede apreciar que el undercut se extiende a lo largo del proceso hasta fijarse en 19mm, esto implica que para asegurar la obtención del marco de 3cm para que sea

estructuralmente estable, se debe utilizar un enmascarado de al menos 50mm, de esta manera si se repite el undercut del proceso aún se aseguraría el ancho mínimo necesario.

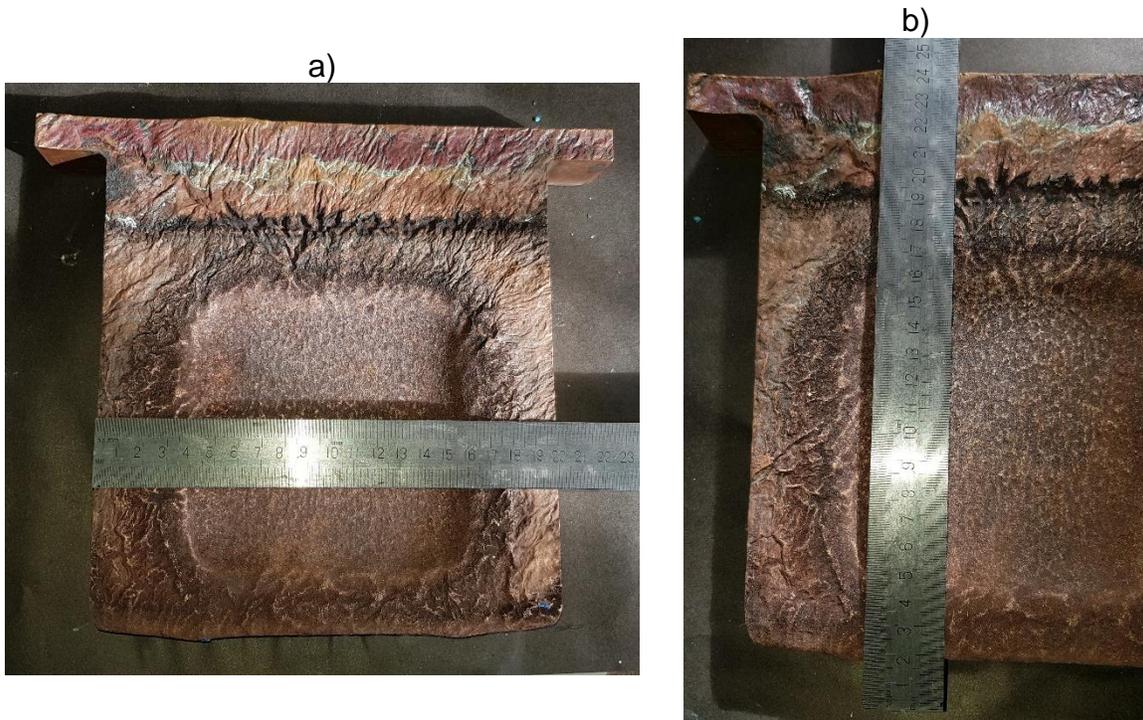


Figura 38: Ejemplos de medición del undercut, Cosecha 672 horas

4.6. Calidad Catódica

La calidad Catódica es un parámetro importante para la validación de la tecnología de enmascarado, puesto que, si disminuye la calidad del producto obtenido, se traduce en pérdidas económicas para la empresa, ya sea por devolución de productos, pérdidas de ventas o en el peor escenario pérdidas de clientes. Por lo tanto, la calidad del cátodo no debe verse mermada por la implementación del enmascarado. Para saber si se ha visto afectada la calidad catódica se siguen los parámetros de calidad de Refinería Ventanas, donde se aprueban los cátodos si [6]:

- Posee menos de un 30% de nodulación del cuerpo
- Está libre de defectos físicos (trizaduras, fracturas, entre otros).
- Químicamente se busca obtener cátodos de Grado A, es decir, cuentan con una concentración de impurezas inferior a 50ppm[23]

A continuación, se presentan los cátodos obtenidos con cada cosecha a lo largo del proceso.

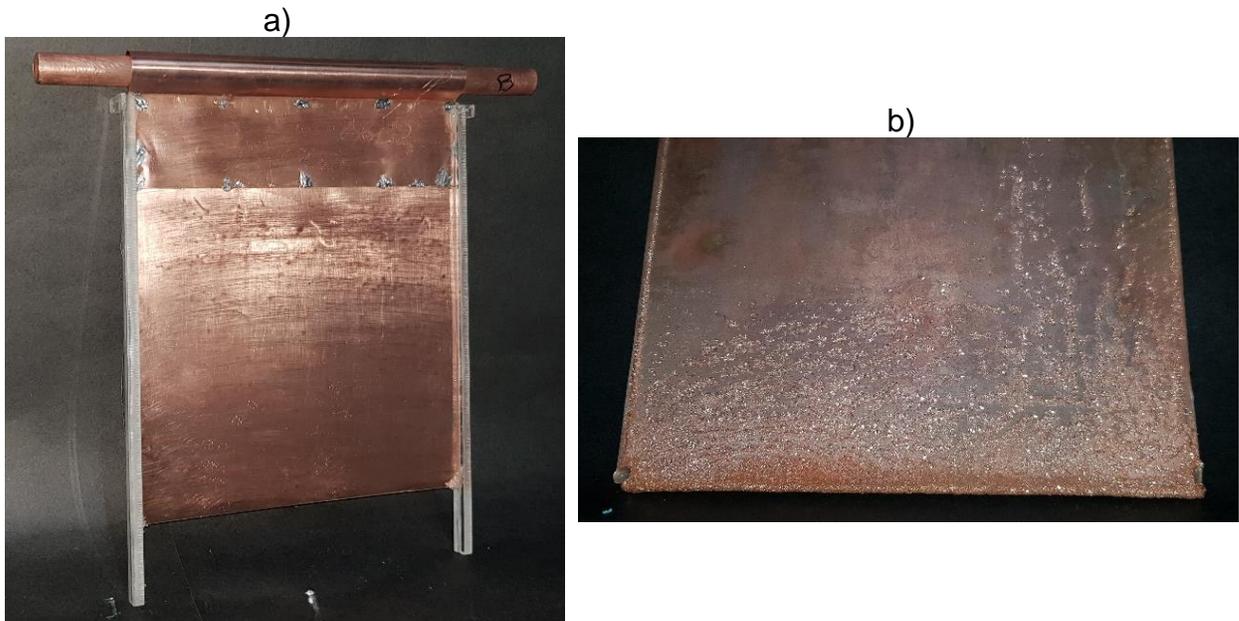


Figura 39: Cátodo del proceso de electrorefino a) cátodo listo para ingresar al proceso, se muestran a los costados las barras guías ya ubicadas en el electrodo. b) Deposito en el reverso del cátodo, todos los cátodos presentan un depósito en la sección inferior

La Figura 39 presenta la configuración de los cátodos utilizados en la electrorefinación. Estos están contruidos por una lámina de cobre comercial, envuelta en un extremo a una tubería de cobre, en la parte superior llevan una segunda lámina de cobre recubre unión de la primera lamina y que cubre los primeros 5 centímetros de cátodo, esto para reforzar esta zona que queda ubicada en la interfaz del electrolito y el ambiente, para evitar el corte ocurrido en las primeras cosechas. En los costados lleva adosadas dos barras de acrílico que actúan como guías para mantener la verticalidad del cátodo, estas barras se unen al electrodo en dos puntos con silicona liquida, un punto en la parte más próxima a la barra de sujeción y otro en el vértice inferior del cátodo, de esta forma se asegura que el cátodo se mantenga dentro de la acanaladura de las barras y mantenga su posición recta.

En el caso de los cátodos, todos presentan un depósito en la zona posterior inferior y un engrosamiento del borde inferior, esto debido al cobre proveniente de la sección inferior del ánodo. El depósito se realiza hasta la zona posterior debido a que las líneas de campo inferiores se curvan y conectan con la cara posterior. Este deposito permite apreciar el alcance que tienen las líneas de campo inferiores al establecerse desde el cátodo al ánodo.

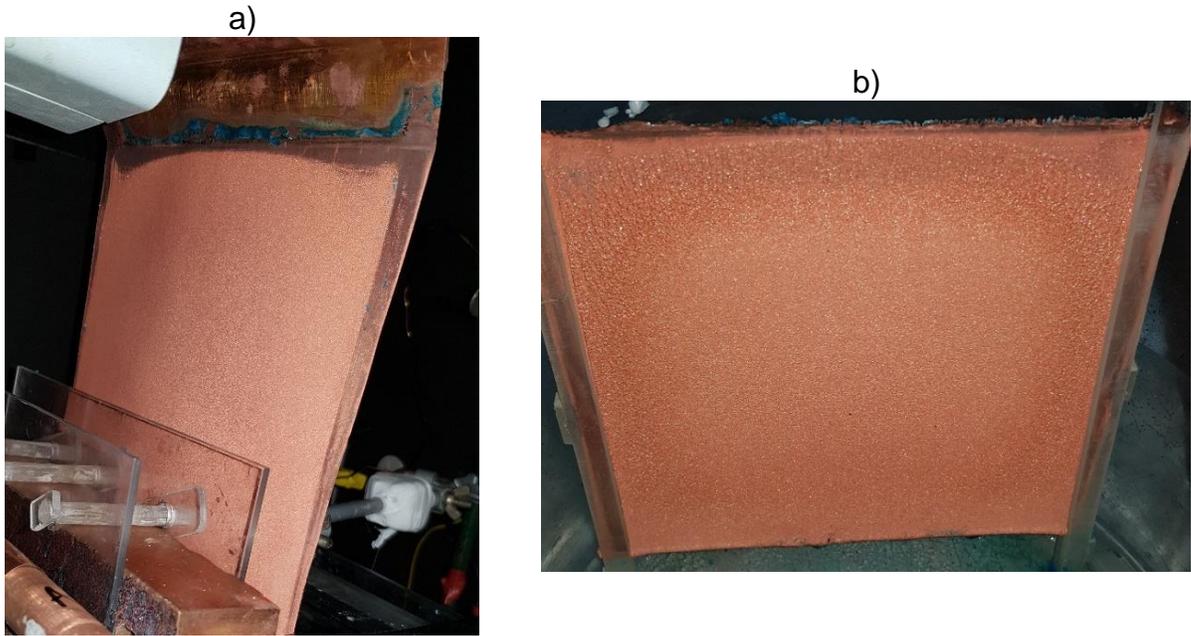


Figura 40: Cátodos primera cosecha, 120 horas. a) Cátodo durante el proceso de electrorefino b) Cátodo Cosechado, se aprecia que el cátodo sufre el corte de su sección superior.

De la Figura 40 se observa que el depósito de cobre es homogéneo en la totalidad del área sumergida del cátodo, pese a que el ánodo solo tiene como área expuesta su sección central con un área expuesta aproximadamente 4 veces menor a la del cátodo. En los bordes del cátodo no se presenta depósito debido al aislamiento eléctrico que generan las barras guías que previenen el pandeamiento del cátodo.

Adicionalmente se aprecia que la zona del cátodo que queda en la interfaz entre el electrolito y el ambiente presenta un depósito de cristales de sulfato de cobre y presenta corrosión en esta zona. Esto puede deberse a distintos factores dado que en esta zona interactúan los cristales de Sulfato de cobre, el ambiente, el electrolito y el cobre. Para prevenir el corte del ánodo se propone recubrir la zona superior del cátodo con una lámina de cobre adicional con tal de engrosar dicha sección y evitar que el corte pueda desencadenar un cortocircuito.

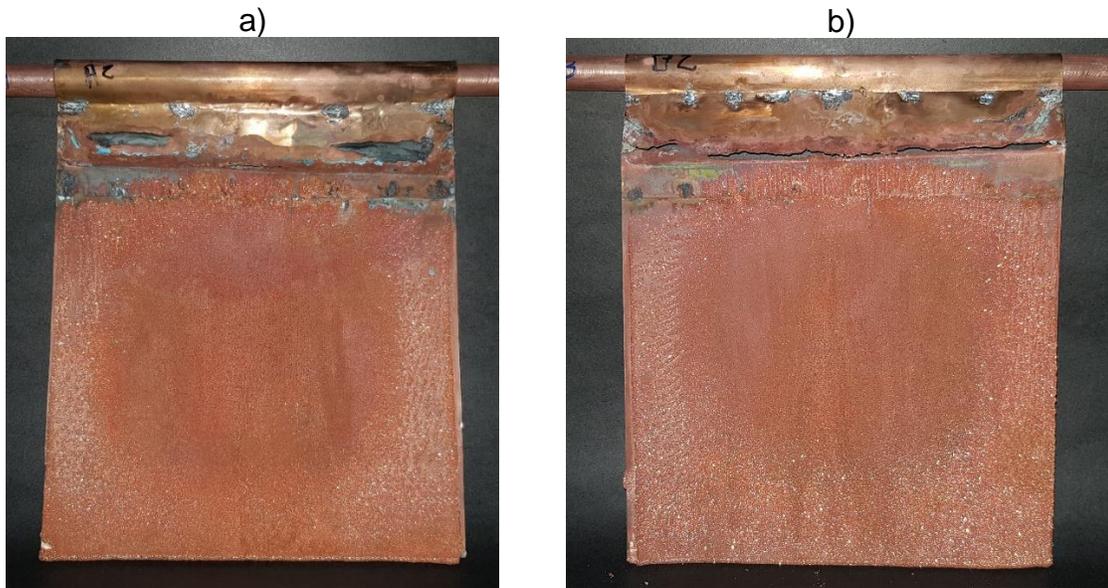


Figura 41: Cátodos cosecha 312 horas. a) Cátodo A con recubrimiento a la barra de sujeción y zona de interfaz b) Cátodo B con recubrimiento solo en sección de interfaz de la placa del cátodo

En la cosecha correspondiente a las 312 horas, se logra apreciar que el cátodo B sufre corte parcial en su línea de electrolito mientras que el cátodo A no presenta los mismos daños, La diferencia entre ambos cátodos radica en que el cátodo A extiende su recubrimiento por sobre la barra de sujeción mientras que el cátodo B solo recubre la zona de la interfaz de la placa catódica. Esto conlleva la conclusión de que dicho fenómeno tiene relación con el espesor de la placa catódica. El estudio de este fenómeno escapa de los objetivos de este trabajo de memoria, por lo que se considerara solo como una medida a evitar para poder operar sin complicaciones, es decir, los cátodos para las siguientes cosechas se construirán de manera tal que se evite el corte catódico con el recubrimiento de la barra de sujeción.



Figura 42: Cátodos correspondientes a la cosecha de las 384 horas. a) Cátodo A b) Cátodo B

De la cosecha de las 384 horas se saca en limpio que la nueva configuración de los cátodos evita la corrosión provocada en la interfaz. Por otro lado, deja en evidencia que es necesario un correcto lavado de los cátodos al momento de la cosecha, dado que un lavado deficiente deja rastros de electrolito en la superficie del depósito, generando la aparición de manchas en el cátodo producto de la oxidación del sobre, tal como se puede apreciar en la figura 42 b).

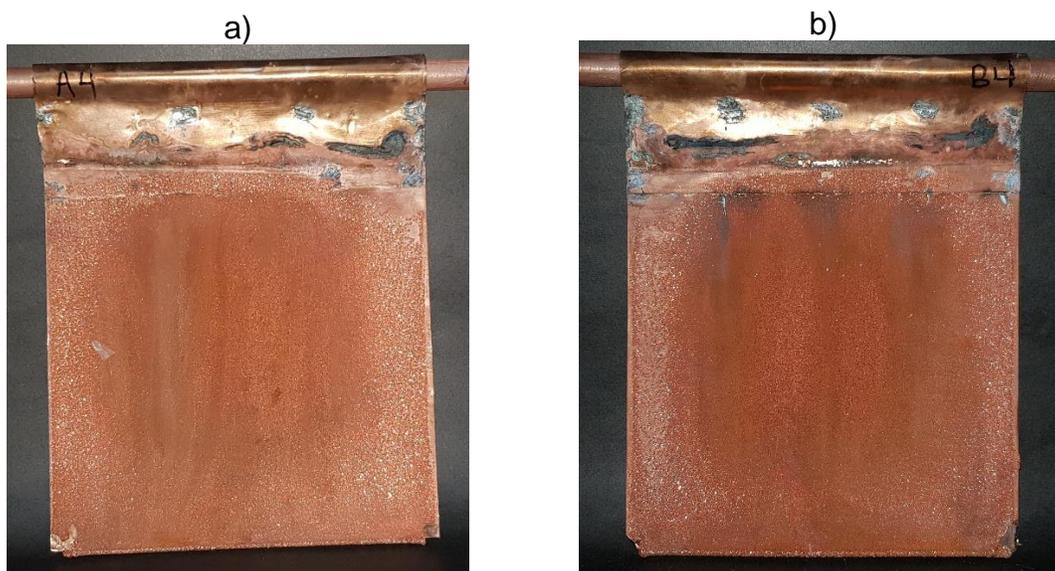


Figura 43: Cátodos cosecha 504 horas a) Cátodos A b) Cátodo B

A raíz de la cosecha de las 504 horas se obtiene que el correcto lavado del cátodo permite mantener el depósito sin oxidación. Además, se aprecia un crecimiento del grano del depósito de cobre y un mayor engrosamiento del borde inferior del cátodo, esto se debe a la posible evaporación o inactivación de los compuestos afinadores de grano contenidos en el electrolito.

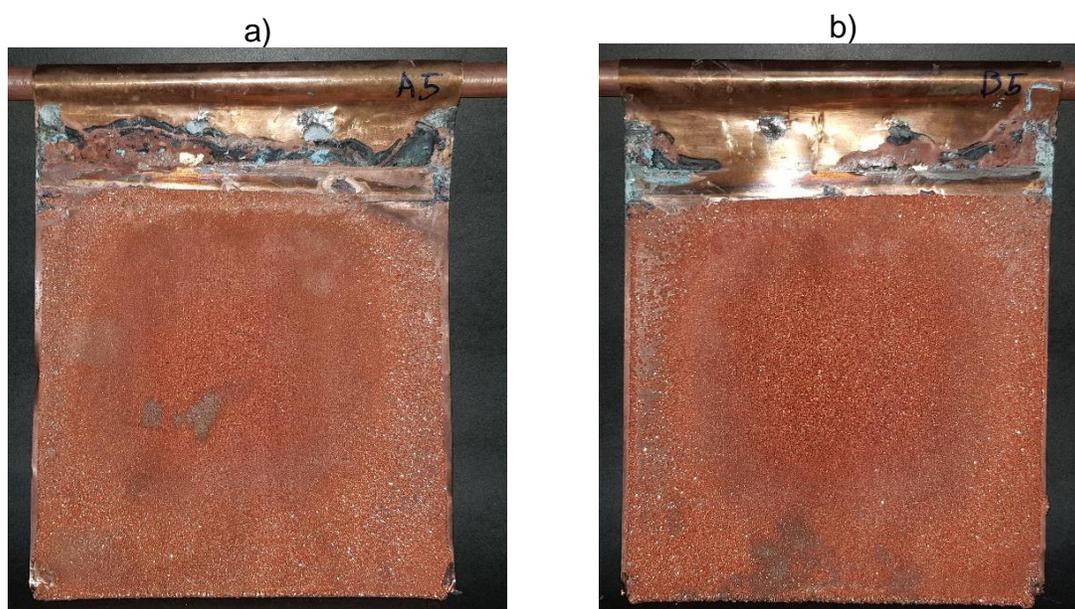


Figura 44: Cátodos correspondientes a cosecha, 672 horas. a) Cátodo A. b) Cátodo B

Los cátodos de la cosecha del día presentan evidencias de corrosión en la zona superior de la placa catódica, que corresponde a la sección que queda fuera del electrolito, esto se debe a la presencia de un depósito salino en dicha posición, el cual está compuesto por pequeños cristales, de tamaño menor a 1mm, que asemejan una pasta en lugar de cristales bien definidos. Para evitar este ataque químico por parte de los cristales contenidos en el electrolito, se procede a lavar regularmente la zona afectada para evitar la adhesión de estos compuestos a la superficie.

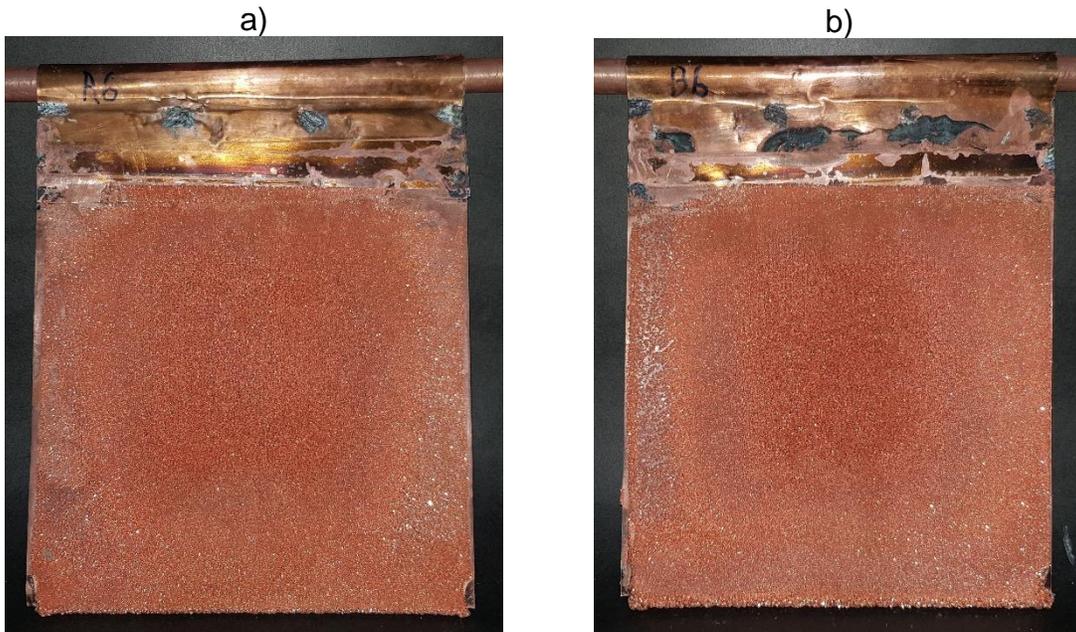


Figura 45: Cátodos correspondientes a la cosecha final, 840 horas de proceso. a) Cátodo A. b) Cátodo B

Luego de completar las cosechas se concluye que el sistema de enmascarado no afecta la deposición del cobre en el cátodo al continuar realizándose de forma homogénea en la totalidad del área sumergida de los cátodos, sumado al hecho de que ningún cátodo presentó nodulación, por lo que estos cátodos entrarían en la categoría de alta calidad o categoría premium. Un detalle importante dentro del refinado es el engrosamiento del grano a lo largo del proceso, esto se debe en cierta medida a la presumible pérdida del afinador de grano (tiourea) por evaporación o arrastre del vapor. Si bien el tamaño del grano aumenta, esto no es impedimento para tener un depósito homogéneo, la figura 45 compara el tamaño de grano al inicio del proceso con el grano final obtenido.

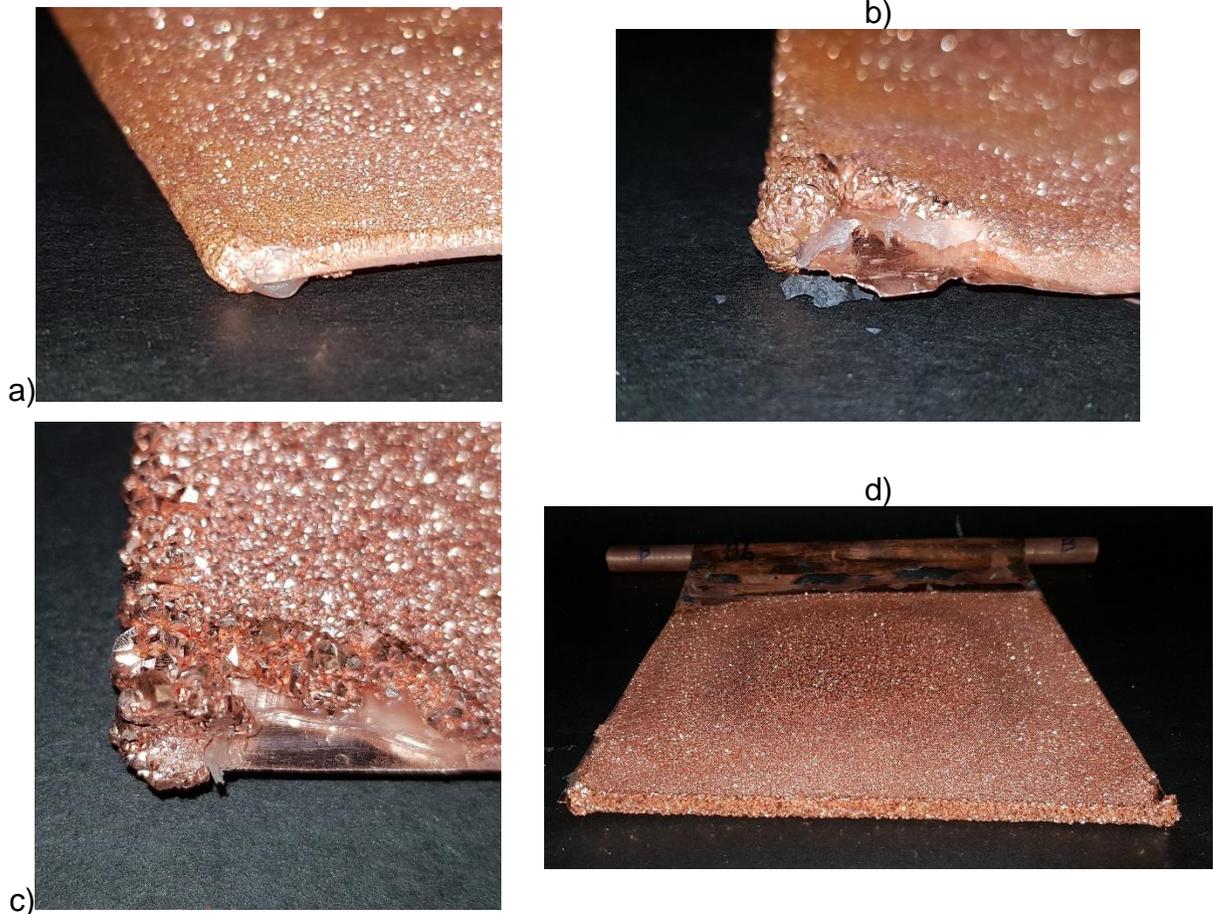


Figura 46: Variación del tamaño de grano en el proceso. a) Cátodo cosecha 312 horas. b) Cátodo cosecha 204 horas. c) Cátodo cosecha 840 horas. d) Cátodo cosecha 840 horas vista inferior

Resulta significativo el aumento del tamaño de grano, pasando de un tamaño aproximado inferior a 0,5 milímetros o menos a un tamaño (en algunos casos) superior a 1mm de diametro, notadonse a simple vista la forma de algunos cristales del deposito. En proyección esto no ocurrirá a nivel industrial, pues para asegurar la calidad de los catodos y el resultado del proceso se genera una inyección constante de aditivos al electrolito que aseguren mantener las condiciones de operación lo mas estable posible a lo largo del tiempo y los catodos lo mas homogéneos entre si, es decir, el deposito no varíe mayormente entre cosechas y el cliente que compre los catodos tenga a su disposición siempre un producto igual calidad.

4.7. Rellenado del marco de cobre

Posterior a la realización de la disolución electroquímica del ánodo de cobre se procede a llevar a cabo el relleno del marco con cobre fundido. Para realizar esta operación se cuenta con el apoyo del profesional del área de pirometalurgia del departamento de Ingeniería en Minas de La universidad de Chile, sr. Marcos Cáceres, para realizar la fusión del cobre y el posterior vaciado en el molde.

Para la realizar el relleno es necesario fundir aproximadamente 6Kg de cobre, el equivalente a la masa total de cobre disuelto del ánodo, si bien este incluye la masa disuelta de la sección inferior del ánodo, se contabiliza de igual manera en el cobre requerido con la finalidad de no quedar con falta de material al momento del relleno, pues si falta material al momento del vaciado, un relleno parcial posterior dejaría una placa adherida a la sección central del ánodo por solo una cara, sin dar mayor soporte mecánico al cobre añadido.

Para esta maniobra se cuenta con 6Kg de viruta de cobre resultante del proceso de mecanizado del ánodo escalado. El cobre será fundido en un crisol de grafito para no contaminar la muestra (no reacciona con el cobre) y permite retirarla sin presentar adherencia a sus paredes, lo que facilita el vaciado en el molde. Se fundió el cobre a 1.200°C para asegurar que se encuentra totalmente en estado líquido (punto de fusión del cobre 1085°C) para poder realizar el vaciado sin el inconveniente de comenzar la solidificación antes de que el cobre se encuentre ubicado en la ventana del marco. El molde de cobre que emula la rueda de moldeo es un bloque de grafito sobre el cual se dispone el cobre, sellando los costados con arcilla caolín para que el cobre fundido no se filtre por los espacios dejados por la rugosidad de la cara del ánodo. La temperatura del molde y del marco se elevan hasta alrededor de 600-800°C dado que es similar a la temperatura que maneja la rueda de moldeo. A continuación, se presenta registro visual de la maniobra realizada:



a)



b)

Figura 47: Viruta de cobre utilizada para rellenar el marco de cobre a) Viruta de Cobre b) viruta cargada para fundido en el crisol

Dado que el cobre se encuentra como viruta, ocupa mucho más espacio que un bloque de cobre sólido, debido al ordenamiento que esta toma, dejando entre los trozos de viruta, por ello se debe hacer una carga secuencial del crisol debido a que no logra entrar la totalidad del cobre en el crisol. Este proceso debe realizarse con cuidado, puesto que al estar trabajando a 1.200°C se corre el riesgo de sufrir quemaduras por contacto o por propulsión de cobre fundido fuera del horno por la evaporación casi instantánea de la humedad contenida en la viruta, por ello este procedimiento lo realizan los profesionales del taller.

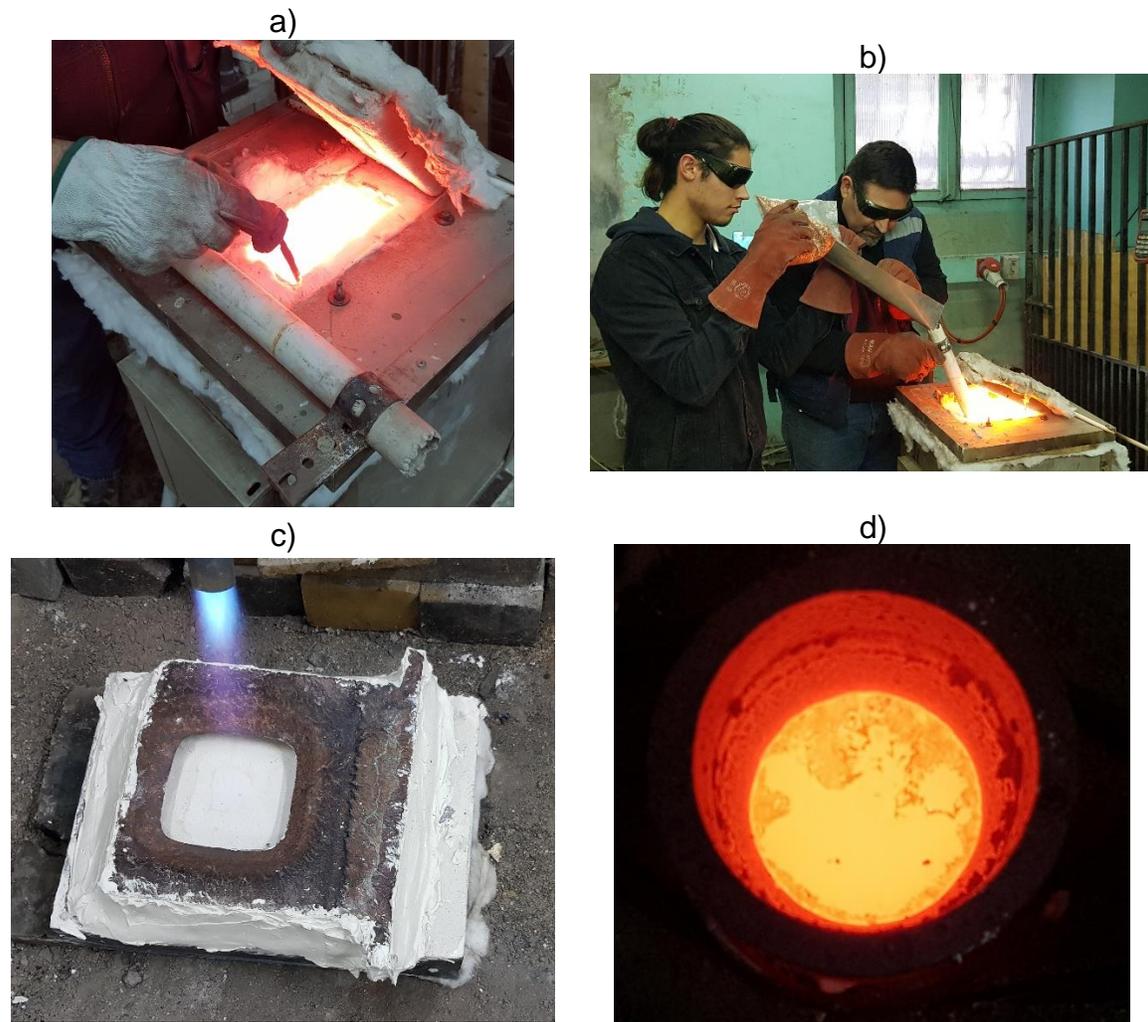


Figura 48: Proceso de fundición del cobre a) Horno cargado operando b) recarga de material al crisol c) Molde calentándose para recibir el fundido d) Cobre fundido dentro de crisol de grafito

Una vez que el cobre se encuentra en estado líquido se procede rápidamente a realizar el vaciado en el molde, ya que este tiende a solidificarse (en planta) en aproximadamente 2 minutos [6], debido a que se funde a una temperatura cercana al punto de fusión del cobre. Momentos antes de realizar el vaciado se procede a recubrir las laterales del molde con arcilla húmeda, debido a que mientras se calienta el molde la arcilla inicial pierde toda su humedad y comienza a agrietarse.

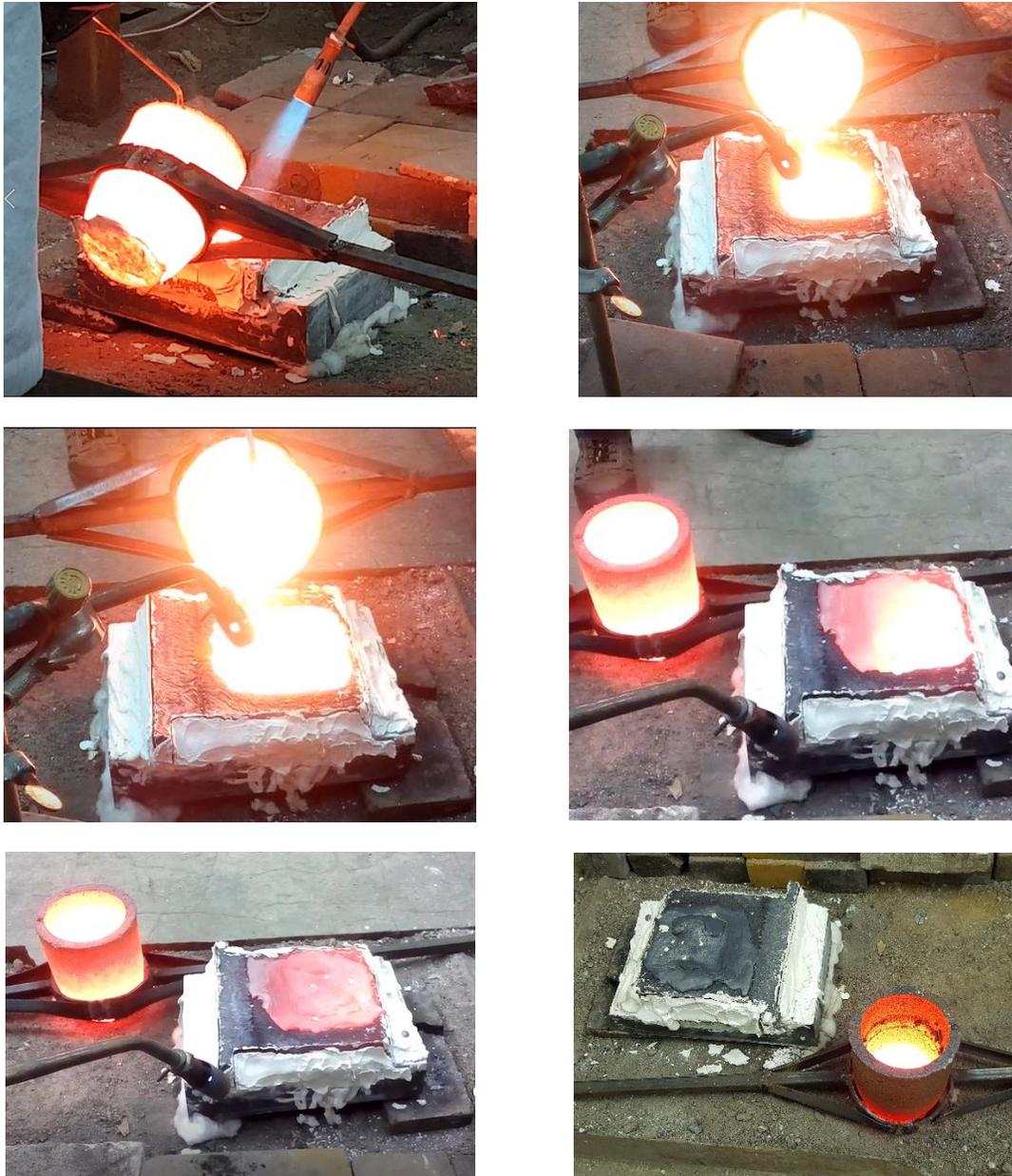


Figura 49: Secuencia de vaciado y solidificación del cobre en el marco.

Se realizó exitosamente el vaciado de cobre en el molde consiguiéndose el relleno de la ventana del ánodo. Pese al gradiente de temperatura entre el marco y el cobre fundido (400-600°C de diferencia) el molde soporta bien el vaciado sin fisurarse por la presencia de del metal a alta temperatura que genera que nivel microscópico el cobre sufra una expansión en el volumen de cobre inmediatamente próximo a la pared interna. A medida que el cobre solidifica comienza a darse el escape de gases que genera un ampollamiento en la cara superior del relleno y un alto nivel de porosidad con el escape de las burbujas de gas que se encuentran atrapadas en el cobre al momento del vaciado.

Se procedió a medir la resistencia eléctrica que presentaba el marco de cobre y el relleno. Como referencia se tomó la resistencia a una barra de cobre comercial, esta presentó una resistencia de 0,1 Ohm. Posteriormente se procede a medir la resistencia en 5 puntos del marco, para tomar como resistencia basal del ánodo, estas mediciones arrojan una resistencia promedio de 0,11 Ohm, Posteriormente se mide la resistencia eléctrica entre el marco de cobre y el cobre del relleno, obteniéndose una resistencia eléctrica promedio de 0,13 Ohm.

Este valor cercano al referencial entregado por la barra de cobre permite inferir que la conductividad eléctrica del ánodo es similar al cobre comercial, por lo que puede considerarse como un muy buen conductor. Adicionalmente se aprecia que la resistencia eléctrica entre el marco y el relleno es prácticamente la misma que la resistencia del marco, esto sugiere que es altamente probable que la pestaña generada en el marco producto del doble biselado, alcanzo su punto de fusión y se adhirió con el marco de cobre, por lo que se puede explicar su continuidad eléctrica. Para determinar el nivel de fusión entre ambas partes se propone realizar una segunda etapa de electrorefinación, para monitorear a lo largo del proceso la unión del marco y relleno y si se observa alguna variación en la disolución del cobre producto del relleno. Esta segunda etapa está mas allá del alcance de esta memoria de titulación.

Posterior a la electrorefinación a escala de laboratorio, se propone realizar un estudio a escala piloto que muestre el real funcionamiento de la tecnología de enmascaramiento anódico y el efecto del relleno sobre el marco de cobre, pues al incrementar la escala de trabajo pueden presentarse factores no apreciados anteriormente que modifiquen en cierta medida los resultados obtenidos.

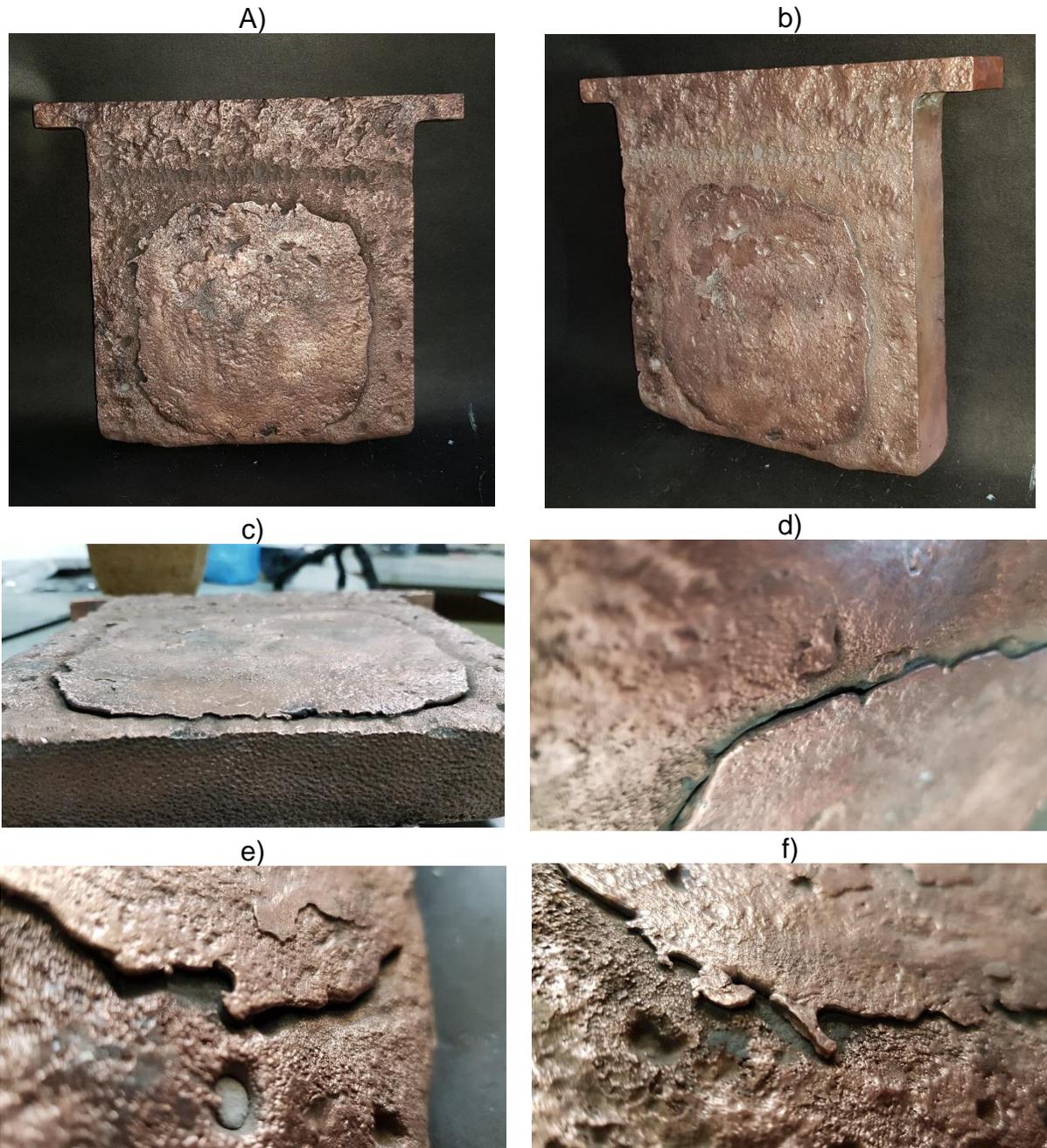


Figura 50: **Ánodo relleno con cobre fundido, Cara inferior del molde.** a) Vista frontal. b) Vista Perspectiva. c) Vista inferior. d) Zona de contacto de cobre fundido y el molde. e) Zona de contacto de cobre fundido y el molde e) Zona de contacto de cobre fundido y el molde

Se aprecia en la Figura 50 que el relleno se mantiene parejo en la cara inferior del ánodo dado que adopta la forma del molde que contiene debajo de él. En esta cara no se aprecia porosidad como en cara opuesta similarmente a lo observado en el ánodo original.

A pesar de que en la Figura 51 c), d), e) y f) se observa una diminuta separación entre el ánodo y el cobre fundido la resistencia eléctrica entre estas indica que hay buena

conductividad entre estas dos regiones. La separación observada puede ser reducida optimizando las temperaturas del molde y del cobre fundido al momento de realizar el vaciado de este último.

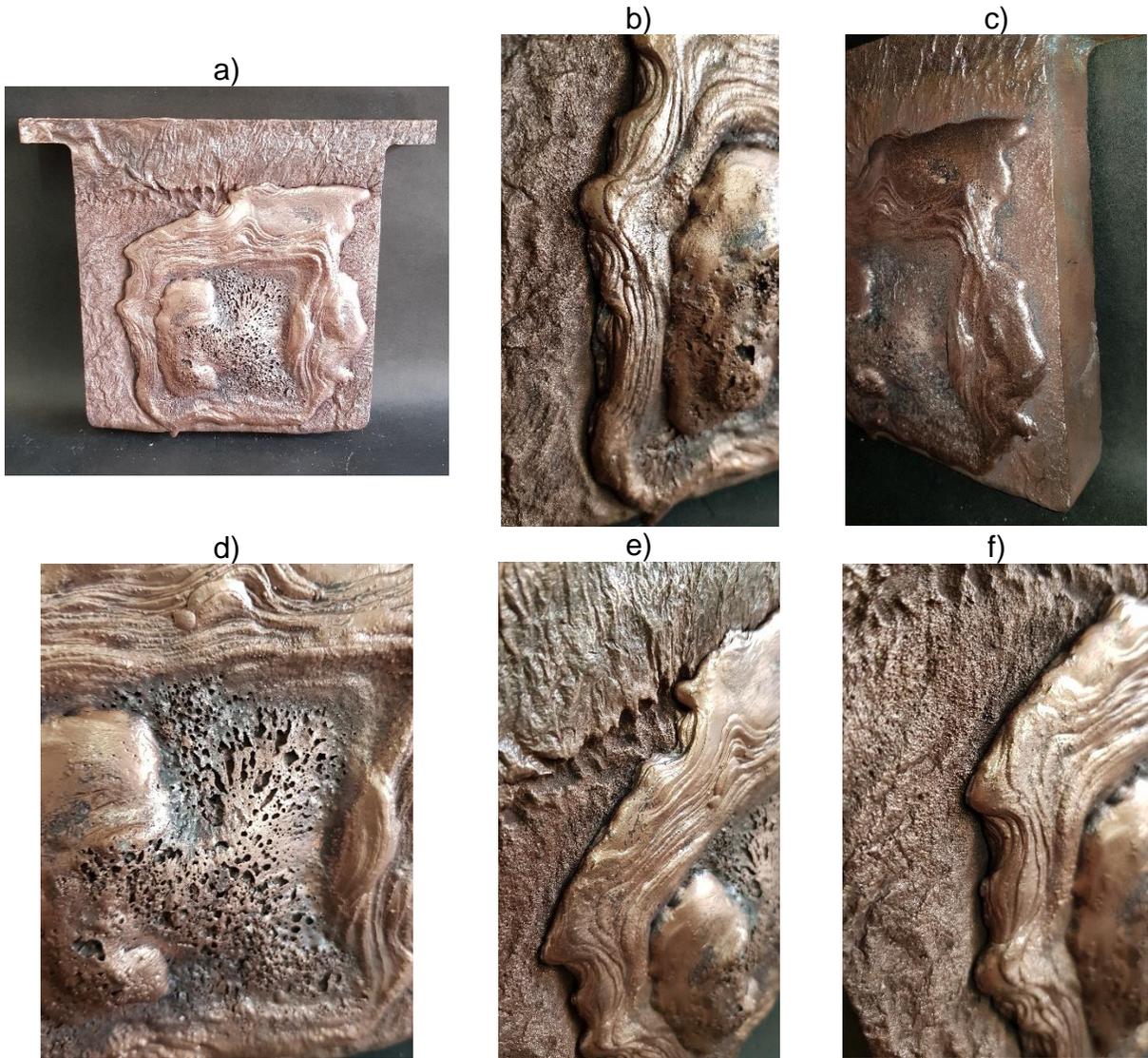


Figura 51: Ánodo relleno con cobre fundido. Cara superior del molde. a) vista frontal. b) ampollamiento y zona de contacto del cobre con el molde. c) zona de contacto del cobre fundido con el marco d) vista frontal, se presenta una alta porosidad en la zona central del relleno. e) zona de contacto del cobre fundido con el marco. f) zona de contacto del cobre fundido con el marco

En este caso se presenta una distribución no uniforme del cobre en la cara del ánodo, esto se debe al desplazamiento de los gases que escapan del interior del fundido una vez que este es depositado en el marco y comienza a solidificar, sumado al exceso de cobre vertido en el molde al momento de rellenar. En la imagen 51 d) se presenta el alto nivel de porosidad que posee esta cara por el escape de gas en forma de burbujas.

4.8. Elección del material para enmascaramiento industrial

Al finalizar el proceso de electrorefino se procedió a revisar el enmascarado, encontrándose que las placas de acrílico contaban con micro fisuras internas, las que pueden apreciarse en la figura 52, por lo tanto, no es un material adecuado para construir el enmascarado debido a que con un impacto durante la operación este podría quebrarse dejando fragmentos en la celda o golpeando a algún operador. Si bien resiste el ataque del ácido el riesgo de sufrir una rotura, su rigidez y su bajo coeficiente de elongación de ruptura (8%[21]) generan que este no sea un buen material para construir el enmascarado, dado que un golpe con el ánodo durante la manipulación del ánodo generaría la rotura del enmascaramiento, teniendo que fabricar uno nuevo y realizar su reemplazo.



Figura 52: Microfisuras presentes en el interior del enmascarado.

Dado que el material de la máscara utilizado en el estudio para el estudio no resulta ser un buen candidato para la aplicación industrial del enmascarado, se procede a analizar otros materiales ya establecidos en la industria minera.

Dentro de los materiales utilizados en la industria minera, se analizan las propiedades del Polietileno de alta densidad (HDPE), Teflón (PTFE), Polipropileno (PP) y el policloruro de vinilo clorado (CPVC) para la construcción del enmascarado. el polímero que presenta mejores propiedades químicas y físicas[24][25] es el Teflón pues

posee la mayor temperatura de servicio (260°C), posee gran resistencia al impacto y sobre todo tiene una resistencia al ácido excelente, pese a esto su procesamiento y reciclado es complejo al ser inerte y resistente a la mayoría de los químicos conocidos, por lo cual no se considera el mejor material para la construcción del enmascarado en comparación con los otros materiales. Todos los materiales evaluados son excelentes aislantes, presentando resistividades eléctricas superiores a 10^{13} [Ohm·cm] [26][27][28][29]. En cuanto a su temperatura de máxima de servicio el HDPE y el PP se presentan como mejores opciones pues tienen temperaturas máximas de uso cercanas a los 100°C, mientras que el CPVC (dependiendo de su composición) presenta temperaturas máximas de uso cercanas a los 70-80°C, el CPVC no se visualiza como la mejor opción por presentar su temperatura máxima de uso cercana a la temperatura de operación del electrorefino [26][27][28][29].

Esto deja como mejores opciones el HDPE y el PP, los cuales tienen la ventaja de ser totalmente reciclables y fáciles en producción y manejo, pudiendo procesarse por métodos de moldeo por inyección y por extrusión. Esto es sumamente relevante pues al ser reciclables permiten a la empresa productora de los enmascaramientos reutilizar no solo los restos de material liberados por los equipos de procesamiento, sino que también es posible reutilizar los enmascarados deficientes (rotos, trizado, deformados), utilizándolos como materia prima para la producción de nuevos enmascarados. A continuación, se presenta una tabla resumen con las propiedades de ambos materiales

Tabla 9: propiedades del HDPE y el PP

Propiedad	HDPE[26]	PP[27]
Temperatura máxima de uso [°C]	100	90-100
Resistividad eléctrica [Ohm*cm]	10^{15} - 10^{18}	10^{13}
Resistencia a ácidos	Buena	Buena
Resistencia al impacto [Kj/m ²]	No rompe	10
Módulo de elasticidad [N/mm ²]	1.000	1.300
Reciclable	si	Si
Alargamiento a la rotura [%]	300	650
Método Moldeo	Inyección/ extrusión	Inyección/ extrusión

Para la fabricación se propone realizarla por medio de inyección en un molde definido para obtener la forma y el tamaño deseado, y obtener una sola pieza estructural que permita trabajar el enmascaramiento de mejor manera, empresas como SisteMold construyen y comercializan matrices de moldeo y pueden operar como vendedores de piezas una vez que se les compra la matriz. Si se recurre al uso de la técnica de extrusión se debe extruir una placa del polímero deseado y luego mecanizarla para la construcción

de la forma del enmascarado final. Otra opción es comprar directamente las placas deseadas y luego mecanizarlas, pero esto debe incluir de igual manera un equipo de reprocesamiento del material sobrante.

En cuanto al diseño del enmascarado, se apreció durante las pruebas de laboratorio un problema importante, realizar el enmascaramiento anódico por la parte inferior del electrodo genera riesgos de daños a los equipos y más importante aún a los operadores, pues se corre el riesgo de caídas de placas con un peso aproximado de 275Kg cada una, además se presenta el riesgo de daño al enmascarado en el caso de un mal posicionamiento del ánodo en la parte superior, pues al intentar ubicarlo en el enmascarado se generara una gran presión que puede dañar o romper el enmascarado. Por lo tanto, se evalúan 3 opciones para realizar el enmascaramiento.

- Posicionamiento por la parte inferior

Esta opción considera el trabajo tal como se realizó en el estudio de laboratorio, es decir, construir la máscara a modo de escuche con apertura en la zona superior e inferior, esto para ubicarlo en el Rack e introducir los ánodos en su interior a medida que estos se ubican en el Rack. La ventaja de esta opción es que puede ser construida como una pieza integral por medio de inyección o extrusión, o como unión de placas que pueden ser mecanizadas y utilizadas como una sola pieza (al igual que en el experimento), manteniendo cubiertas las caras y los bordes con una sola pieza, sin el riesgo de aperturas y desprendimientos de piezas. Tiene el riesgo de ubicarse debajo del ánodo durante la instalación y una caída de este puede destruir la máscara o herir a un operario, este riesgo se reduce al instalarlos en el rack pues no requiere de un operario que este cerca de la máscara.

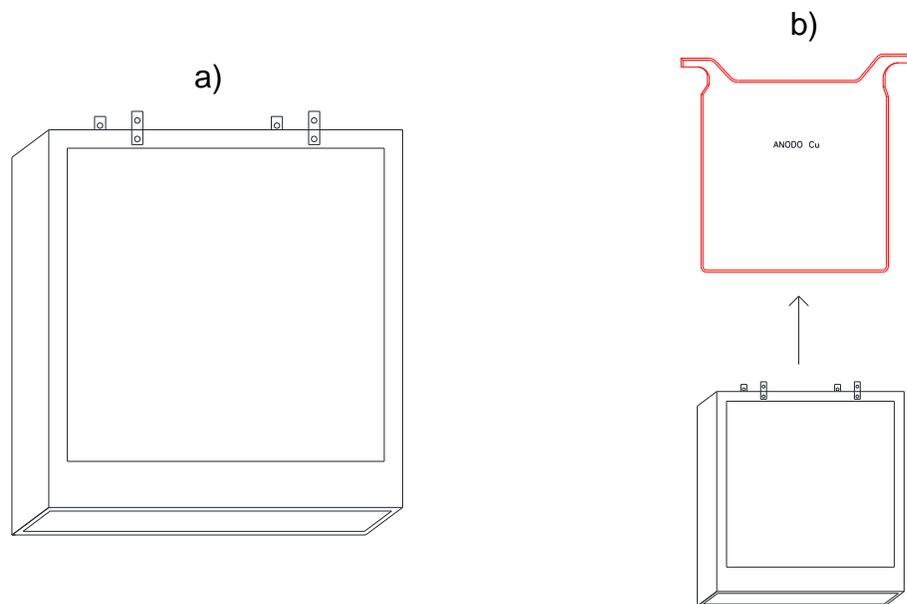


Figura 53: **Modelo de enmascarado inferior** a) Máscara tipo escuche b) Instalación del enmascarado

- Posicionamiento por la parte superior del ánodo

Esta opción considera la construcción de una pieza estructural consistente en dos placas destinadas a cubrir las caras del ánodo unidas en su sección superior, con la finalidad que esta pieza pueda ser plegada e instalada por la parte superior del ánodo, quedando soportada en el lomo del ánodo por la unión de ambas placas que recubren las caras del ánodo. Este modelo requiere la instalación de sujetadores laterales que protejan los bordes del ánodo y a su vez mantengan las caras del enmascaramiento unidas a la superficie de la cara del ánodo. Estos sujetadores con básicamente una barra acanalada que permite la sujeción por presión al poseer un angulamiento de sus paredes hacia el interior. Un esquema de este modelo se presenta en la siguiente figura

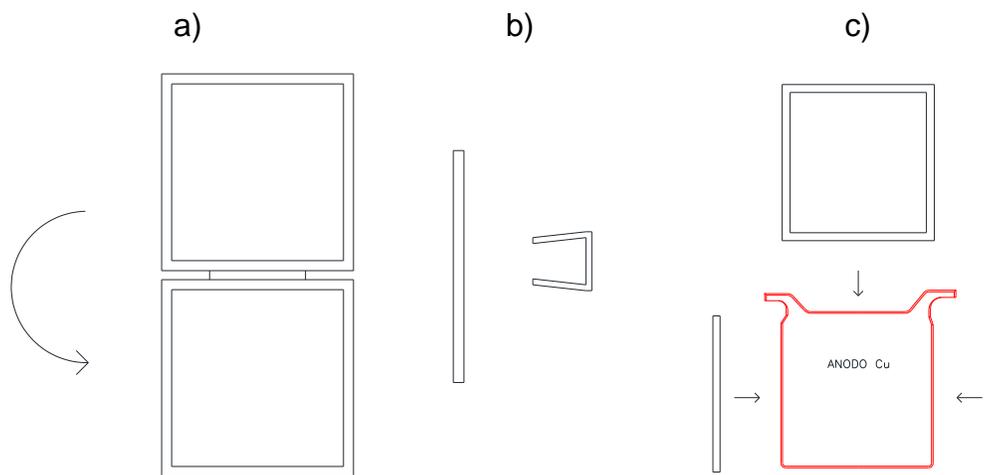


Figura 54: **Modelo de enmascaramiento superior.** a) armado del enmascaramiento. b) soporte lateral, vista lateral y superior respectivamente. c) Instalación del enmascaramiento

Este modelo tiene la ventaja de eliminar el riesgo de daño a los equipos y a los operarios al no tener que posicionarse por debajo del ánodo, además de brindar la posibilidad de instalarlos fácilmente cuando los ánodos están ubicados en el Rack.

- Posicionamiento por la parte lateral

Esta opción al igual que el caso anterior considera la creación del enmascaramiento con un diseño de 2 placas cobertoras para las caras del ánodo, esta vez unidas por su borde lateral. Este modelo permite ser instalado por el costado del ánodo plegando la pieza sobre el ánodo, realizando su fijación con un soporte lateral que cierra el enmascaramiento por el otro extremo. Adicionalmente necesita un sistema de tirantes o correas que lo sujeten al lomo del ánodo para evitar su caída durante la manipulación o procesamiento. En la siguiente figura se muestra el concepto de este modelo.

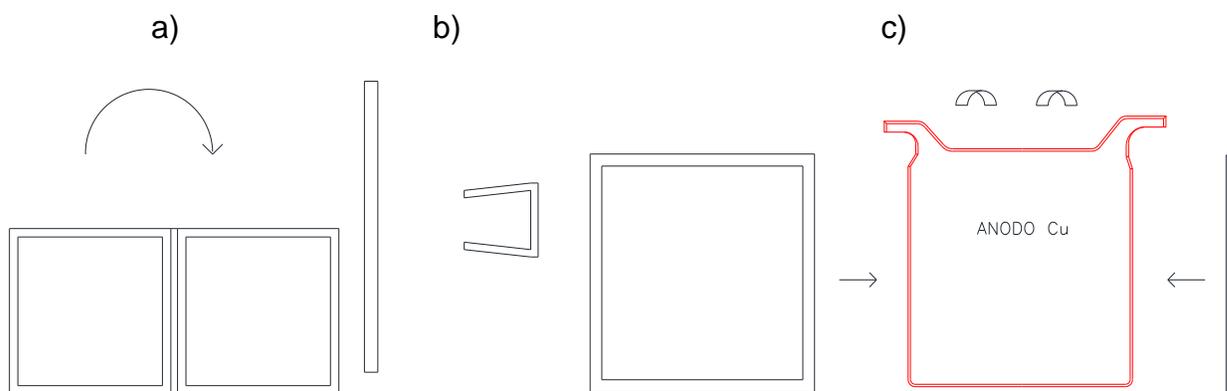


Figura 55: **Modelo de enmascarado lateral.** a) armado del enmascaramiento. b) soporte lateral, vista lateral y superior respectivamente. c) Instalación del enmascarado

Este modelo tiene la ventaja de asegurar la protección de un borde del ánodo al recubrirlo con la pieza principal del enmascarado y no proteger ambos bordes con sujetadores como el caso del modelo anterior. Pese a ello requiere la instalación adicional de correas de sujeción por la parte superior, corriendo el riesgo de caída del enmascarado en caso de no quedar bien fijadas dichas correas. Además, presenta la desventaja de no poder instalarse directamente en el rack debido a que estos usualmente presentan paredes o tirantes de metal en sus costados para dar soporte y resistencia al rack por lo que deberían ser instalados previo al posicionamiento en el rack o en el posicionamiento en la celda.

- Rack enmascarador en celda

Este modelo considera la creación de un rack polimérico con aperturas en forma de ventanas, que se instala dentro de la celda y se mantiene fijo en esta, similar a la tecnología SELE. Este modelo tiene la ventaja de no requerir de la instalación del enmascarado en cada uno de los ánodos, sino que todos ellos se instalan en el enmascaramiento una vez que son ubicados en la celda, esto permitiría adicionalmente mantener la verticalidad de los electrodos al entregar la posibilidad de modificar el enmascaramiento para dejar un espacio determinado para el cátodo. La desventaja de este modelo es que al instalar un rack dentro de la puede afectar la fluidodinámica de esta, por lo que es necesario realizar un estudio de del impacto que tendría un rack en el flujo de electrolito dentro de la celda.

4.9. Análisis Económico.

Para comprender el nivel de incidencia que tiene esta tecnología en el mundo minero, es necesario comprender los gastos en que incurren las empresas para reprocesar su Scrap o las pérdidas que tienen por la baja productividad que tienen por poseer un proceso que genera demasiado remanente.

- Costos de Reprocesamiento de Scrap en Chile y el Mundo

Primero se realiza un análisis de la situación del país, utilizando la información de la Tabla 1 se obtiene que el total de Scrap Generado entre las 3 Refinerías Chilenas es de 307.443 Toneladas al año. Dado que las empresas a lo largo del país y del mundo tienen distintos tipos de hornos y procesamientos para el Scrap, se tiene que el costo de reprocesamiento puede oscilar entre los 50 y 150 dólares por tonelada[6]. Si bien es un costo que a primera vista no parece significativo, al considerar la cantidad de toneladas de Scrap que se deben de reprocesar se convierte en un gasto considerable para las empresas. En la Tabla 9 se presenta el detalle de producción de Scrap Anual de las 3 Refinerías Chilenas Consideradas.

Tabla 10: Capacidad de producción de Scrap de las refinerías chilenas

Refinería	Capacidad	Scrap	Scrap
	[Ton/año]	[%]	[Ton/año]
Ventanas	420.000	17	86024
Potrerillos	155.000	23	46299
Codelco Norte	855.000	17	175120
		Total:	307443

Si se consideran 3 posibles escenarios de acuerdo con el costo de reprocesamiento del Scrap anódico tenemos un caso favorable donde se desembolsa un total de US\$50/Ton. Un escenario desfavorable donde el gasto en reprocesamiento asciende a \$150/Ton. Y un caso promedio en que el gasto es de US\$100/Ton. En el caso particular de Refinería Ventanas, se encuentran actualmente operando en el caso desfavorable, lo que significa para ellos un gasto de US\$ 12.903.614 anuales, esto se debe a que aun utilizan un horno de reverbero para reprocesar su Scrap anódico, pero se proyecta un cambio a un horno de mayor eficiencia que reducirá sus costos al mejor escenario, por lo que desembolsando US\$50/Ton, su gasto anual ascenderá a US\$4.301.205 anuales. Si bien el gasto se reduce a un tercio del gasto actual sigue siendo una suma considerable para cualquier empresa.

Si consideramos que las 3 refinерías se encuentran en el mismo escenario a la vez, el gasto en reprocesamiento varia de US\$ 15.372.164 Anuales en el mejor escenario a US \$46.116.492 anuales en el caso desfavorable.

En el caso de las otras 22 refinерías del mundo el total del Scrap anual generado es de 1.221.376 toneladas, esto se traduce bajo los mismos parámetros anteriores en un gasto anual de US\$61.068.791 en el mejor escenario y de US\$183.206.374 en el peor escenario. Los cálculos de todos estos costos se encuentran detallados en los anexos 4 y 5.

Como se puede ver en términos económicos, el gasto de las 3 refinерías chilenas es el equivalente a $\frac{1}{4}$ del gasto de las otras 22 empresas, reflejando el privilegiado lugar que tiene Chile a nivel mundial en la producción de cobre. Con ello se puede ver que el gasto en retratamiento del Scrap es un factor relevante para las empresas productoras de cobre en el país al ser los principales productores a nivel mundial. Actualmente el gasto en retratamiento del Scrap se lleva una parte considerable del destino destinado a gastos operacionales de las refinерías, sobre todo considerando que las leyes de cobre en el país son cada vez más bajas y el margen de ganancias se reduce cada vez más. Al tener que tratar un mayor volumen de estériles para conseguir la misma producción de cobre[3][16]. Con esto en mente las empresas mineras están buscando métodos de reducción de costos para mejorar las ganancias que generan, en este punto es que la implementación de la tecnología de enmascaramiento anódico ingresa como una solución a estos problemas.

El ingreso de la tecnología de enmascaramiento a la industria permitiría eliminar la mayor parte del gasto en reprocesamiento de Scrap, ya que la disolución selectiva brindada por la ventana del enmascaramiento permite obtener un marco de cobre que puede ser rellenado inmediatamente sin la necesidad de un reprocesamiento lo único que requiere es retirar el enmascarado para que no se vea afectado por el por el cobre fundido y luego vuelva a ser colocado para poder realizar nuevamente la disolución electroquímica formando el marco nuevamente.

- Estimación de la masa contenida en el marco de cobre

Se determina la densidad aparente del ánodo, pues como se vio con el ánodo experimental, este presenta un alto grado de porosidad. Considerando las dimensiones del ánodo se estima que su peso debiese ser de 302Kg, en lugar de ello, los ánodos comerciales tienen un peso de 275Kg, esto representa una reducción en la densidad del ánodo de un 9%.

Tal como se calculó anteriormente, el marco de cobre debe poseer un ancho de 3cm para poder mantener su estructura sin sufrir deformaciones ni rupturas. Esto implica que el marco estará compuesto por un recuadro de 3cm de ancho, 4cm de espesor y

medidas exteriores de 91,5cm de largo y 89,5cm de ancho total. Adicionalmente cuenta con las orejas de ánodo que sostienen el marco y se considera el caso de una apertura total de la ventana y la no apertura de la ventana quedando con una lámina de 1 mm de espesor en su centro dado el desgaste desde ambas caras. Bajo estos criterios, la masa contenida en el marco de cobre representa entre un 15 y un 17% de la masa inicial del ánodo, es decir, es equivalente al cobre contenido actualmente en el Scrap recirculante en planta, manteniendo la producción neta de cobre y eliminando los gastos de reprocesamiento y transporte del Scrap.

- Costos de Producción de la máscara, trabajadores e ingresos.

Para estimar el costo de producción de la máscara, se solicitó una cotización de fabricación a diferentes empresas, obteniéndose el menor costo de producción por parte de SisteMold. La máscara esta confeccionada en polipropileno de 4mm de espesor y es fabricado por medio de inyección. Las medidas referenciales de la máscara se presentan a continuación

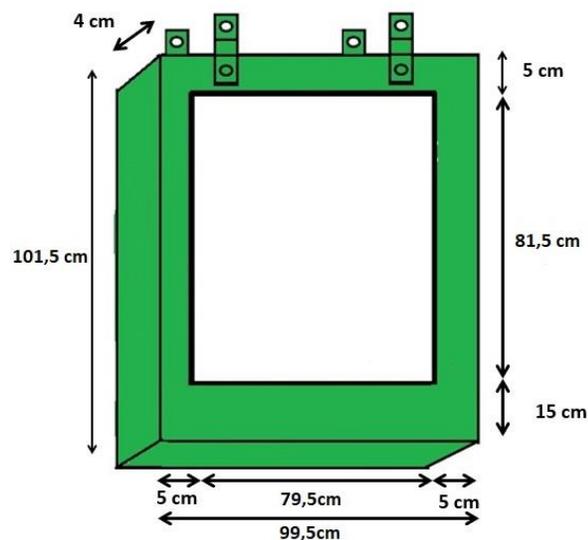


Figura 56: Dimensiones de Máscara cotizada en SisteMold. Las dimensiones presentadas son dimensiones interiores.

La máscara cotizada es la correspondiente al diseño de posicionamiento inferior utilizado en el estudio de laboratorio. Según este diseño la construcción de la máscara tiene un costo de 22.680 pesos por unidad y un costo de producción de la matriz de inyección de 16.420.000 pesos. Con una capacidad de producción de 7500 mascarar mensuales por matriz [30].

Considerando que Ventanas cuenta con 2000 celdas con capacidad para 40 ánodos cada una, se obtiene que la cantidad de ánodos que estará en proceso de electrorefino a la vez (si todas las celdas estuviesen cargadas al mismo tiempo) será de 80.000 ánodos. Esta será la demanda basal de Ventanas y se considerará como la demanda anual de la refinería, si bien Ventanas no opera con todas sus celdas cargadas, se considerará este número como base, permitiendo que la diferencia con la operación

permita tener un recambio inmediato de las máscaras que se dañen durante la operación. Se plantea como proyecto, el ingreso paulatino de la tecnología al proceso, iniciando con una cobertura del 20% de la demanda de Ventanas, aumentando un 20% cada año, alcanzado en recambio de total en la operación al 5 año.

Utilizando la información entregada por David Ruiz, en conjunto con los datos de la Tabla 10, se estima que CODELCO Ventanas tiene un gasto en reprocesamiento de Scrap de 12 millones \$USD/año. Este es el monto máximo disponible para desembolsar por Ventanas para el uso de esta tecnología, esto porque el Scrap recirculante debiese mantenerse dado que el peso del marco es equivalente al del Scrap generado actualmente. Sin embargo, con el proceso de enmascaramiento anódico la refinería no tiene los costos adicionales de manejo y refundición del Scrap, ni tampoco el mecanizado de los nuevos ánodos (dado que el marco conserva las dimensiones exteriores del ánodo). Utilizando el valor promedio del dólar en el mes de octubre de 2019 (\$722)[31], y considerando una tasa de utilización promedio de 1 año, el precio máximo a cobrar es de aproximadamente 100mil pesos. Si las máscaras tienen una duración mayor en términos de ciclos de cosecha, su precio de venta puede subir de acuerdo con los márgenes de ganancia deseados por la empresa, mientras se mantengan en valores atractivos para los clientes.

Para analizar el personal de trabajo necesario para la empresa, se cuenta con la ayuda del Sr. David Gazzari Aliste, Ingeniero de Ejecución en Administración de empresas, con quien se evalúan dos posibles escenarios de operación, por un lado, la compraventa de máscaras haciendo uso del derecho de compra exclusiva otorgado por la patente industrial, y la venta con prestación de servicios, lo que incluiría la instalación, inspecciones, retiro, lavado y reparación. Para el primer escenario propuesto se considera la presencia de, al menos, los siguientes trabajadores (Los sueldos son estimados en base a la información presentada por Laborum[32]).

Tabla 11: Trabajadores necesarios para la compraventa de máscaras para el primer año de operación.

	Cargo	Cantidad	Sueldo Bruto Unitario	Sueldo Bruto Referencial
Oficinas	Asesor Comercial	1	\$ 660.000	\$ 660.000
	secretaria	3	\$ 500.000	\$ 1.500.000
	Secretaria ejecutiva	1	\$ 660.000	\$ 660.000
	Responsable Administración y Finanzas	1	\$ 1.650.000	\$ 1.650.000
	Auditor interno.	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
	Jefe recursos humanos	1	\$ 1.380.000	\$ 1.380.000
	Jefe de Compras	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
	jefe abastecimiento y logística	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
	contador	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
		Total Oficinas		

Bodegas	Supervisor Bodega	1	\$ 700.000	\$ 700.000
	Auxiliar de bodega	2	\$ 400.000	\$ 800.000
	guardia	3	\$ 450.000	\$ 1.350.000
	Chofer	4	\$ 600.000	\$ 2.400.000
	Carga y Descarga	8	\$ 380.000	\$ 3.040.000
			Total Bodegas y despacho	\$ 8.290.000
			Total	\$ 18.640.000

A medida que aumente la capacidad de cobertura a lo largo de los años, se considerará el incremento solamente en personal de bodega, al menos hasta cubrir la demanda total de Ventanas (5to año), donde se reevaluará el método de trabajo de la empresa. Se destaca que este es un análisis simplificado dada la alta incertidumbre de las variables y del acceso restringido a información.

En el caso de realizar prestación de servicios, además del personal antes mencionado, se requiere la contratación de personal de planta. Se considera una jornada de trabajo de 12 horas, con turnos de 7 días trabajados por 7 días de descanso. Adicionalmente, se estima que un operario tiene la capacidad de inspeccionar y/o instalar 100 máscaras por jornada. Se desea realizar al menos 2 inspecciones a cada máscara durante cada cosecha de cátodos (8 días), por lo tanto, se requiere el trabajo de 20 personas por jornada, considerando que se trabaja en una doble jornada diaria, se inspeccionarán 4.000 máscaras por día. Además de los operarios se requiere un líder de cuadrilla que supervise el trabajo de 4 operarios, por lo que se requieren 10 supervisores. Es necesario el trabajo de un administrador de contrato que coordine el trabajo del personal de planta y establezca el nexo con los trabajadores de la refinería. Finalmente, se necesita un encargado del transporte de los trabajadores de cada jornada, los cargos y sueldos se presentan a continuación: (Los sueldos son estimados en base a la información presentada por Laborum[32])

Tabla 12: Trabajadores requeridos para la prestación de servicios en el primer año de operación.

	Cargo	Cantidad	Sueldo Bruto Unitario	Sueldo Bruto Referencial
Servicios	Administrador de Contratos	1	\$ 1.800.000	\$ 1.800.000
	Supervisores	10	\$ 1.000.000	\$ 10.000.000
	Operarios	40	\$ 600.000	\$ 24.000.000
	Transportes pasajeros	2	\$ 480.000	\$ 960.000
			Total	\$ 34.960.000

A medida que aumente la cobertura se requerirá aumentar el número de trabajadores de planta. Se considerará un incremento lineal en base a lo expuesto en la Tabla 12, aumentando los trabajadores a excepción del administrador de contrato.

A raíz del incremento en las compras y un posible reciclaje del material de las mascarás ya utilizadas, se plantea una reducción del precio unitario de las mascarás, alcanzando un costo de 20.000 pesos el año 2 y un precio de 18.000 pesos el año 4.

En cuanto a los costos de la empresa, además del costo de compra de las mascarás a una empresa externa, por ejemplo, SisteMold, se considera el arriendo de un complejo de oficinas de 765 m² en providencia (cotizado en www.nuroa.cl) y un galpón industrial de 1300 m² para almacenamiento de los productos comprados (cotizado en www.todogalpon.cl), adicionalmente se considera la compra de 1 montacargas, 4 camiones de carga destinados a despacho de producto y elementos de protección personal. Una vez estimados todos los costos se calcula el costo final de producción de cada mascarás, el cual bordea los 42.000 pesos al año 5 (esto es, sumando un proporcional del costo total al costo de operación al precio de venta de Sistemold), fijando una ganancia de aproximadamente 35% para cada producto, sugerido por David Gazzari en base al mercado de compraventa de productos, se establece un precio de venta de \$65.000 por unidad. Considerando el precio anterior y los costos adicionales de la prestación de servicios, se fija un precio de 95.000 pesos por unidad en prestación de servicios. Con todo lo anterior se establecen los flujos de caja del proyecto, el cual se presenta a continuación

Tabla 13: Flujo de Caja del proyecto para el escenario de Compraventa de mascarás.

Compraventa Mascarás						
Parámetro/Año	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
(+) Ingresos por venta	\$ 0	\$ 1.040.000.000	\$ 2.080.000.000	\$ 3.120.000.000	\$ 4.160.000.000	\$ 5.200.000.000
(+) Otros ingresos	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(+) Ganancias/ (-) Pérdidas de capital	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 39.660.428
(-) Costos Fijos	\$ 0	-\$ 219.232.000	-\$ 438.352.000	-\$ 657.472.000	-\$ 876.592.000	-\$ 1.095.712.000
(-) Costos variables	\$ 0	-\$ 611.040.000	-\$ 1.004.660.000	-\$ 1.441.160.000	-\$ 1.749.660.000	-\$ 2.154.160.000
(-) Depreciaciones legales	\$ 0	-\$ 11.688.746	-\$ 23.045.499	-\$ 34.402.251	-\$ 45.759.004	-\$ 57.115.757
(-) Pérdidas del ejercicio anterior	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Utilidades antes del impuesto	\$ 0	\$ 198.039.254	\$ 613.942.501	\$ 986.965.749	\$ 1.487.988.996	\$ 1.932.672.671
(-) Impuestos de primer categoría	\$ 0	-\$ 53.470.599	-\$ 165.764.475	-\$ 266.480.752	-\$ 401.757.029	-\$ 521.821.621
Utilidades después del impuesto	\$ 0	\$ 144.568.656	\$ 448.178.026	\$ 720.484.996	\$ 1.086.231.967	\$ 1.410.851.050
(+) Depreciaciones legales	\$ 0	\$ 11.688.746	\$ 23.045.499	\$ 34.402.251	\$ 45.759.004	\$ 57.115.757
(+) Pérdidas del ejercicio anterior	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Ganancias/(+) Perdidas del Capital	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	-\$ 39.660.428
FLUJO OPERACIONAL	\$ 0	\$ 156.257.401	\$ 471.223.525	\$ 754.887.248	\$ 1.131.990.971	\$ 1.428.306.379
(-) Inversión	-\$ 841.960.746					
(+) Valor Residual de los activos						\$ 14.977.765
(-) IVA de la inversión		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Capital de trabajo	-\$ 84.000.000					
(+) Recuperación del capital de trabajo						\$ 84.000.000
(+) Préstamo		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Amortizaciones		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
FLUJO DE CAPITALES	-\$ 925.960.746	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 98.977.765
FLUJO DE CAJA	-\$ 925.960.746	\$ 156.257.401	\$ 471.223.525	\$ 754.887.248	\$ 1.131.990.971	\$ 1.527.284.144

Tabla 14: Flujo de caja del proyecto en escenario de prestación de servicios.

Prestación de Servicios Máscaras						
Parámetro/Año	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
(+) Ingresos por venta	\$ 0	\$ 1.520.000.000	\$ 3.040.000.000	\$ 4.560.000.000	\$ 6.080.000.000	\$ 7.600.000.000
(+) Otros ingresos	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(+) Ganancias/ (-) Pérdidas de capital	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 39.660.428
(-) Costos Fijos	\$ 0	-\$ 219.232.000	-\$ 438.352.000	-\$ 657.472.000	-\$ 876.592.000	-\$ 1.095.712.000
(-) Costos variables	\$ 0	-\$ 1.057.860.000	-\$ 1.872.900.000	-\$ 2.730.820.000	-\$ 3.460.740.000	-\$ 4.286.660.000
(-) Depreciaciones legales	\$ 0	-\$ 17.686.746	-\$ 35.041.499	-\$ 52.396.251	-\$ 69.751.004	-\$ 87.105.757
(-) Pérdidas del ejercicio anterior	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Utilidades antes del impuesto	\$ 0	\$ 225.221.254	\$ 693.706.501	\$ 1.119.311.749	\$ 1.672.916.996	\$ 2.170.182.671
(-) Impuestos de primer categoría	\$ 0	-\$ 60.809.739	-\$ 187.300.755	-\$ 302.214.172	-\$ 451.687.589	-\$ 585.949.321
Utilidades después del impuesto	\$ 0	\$ 164.411.516	\$ 506.405.746	\$ 817.097.576	\$ 1.221.229.407	\$ 1.584.233.350
(+) Depreciaciones legales	\$ 0	\$ 17.686.746	\$ 35.041.499	\$ 52.396.251	\$ 69.751.004	\$ 87.105.757
(+) Pérdidas del ejercicio anterior	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Ganancias/(+) Perdidas del Capital	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	-\$ 39.660.428
FLUJO OPERACIONAL	\$ 0	\$ 182.098.261	\$ 541.447.245	\$ 869.493.828	\$ 1.290.980.411	\$ 1.631.678.679
(-) Inversión	-\$ 1.294.778.746					
(+) Valor Residual de los activos						\$ 14.977.765
(-) IVA de la inversión		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Capital de trabajo	-\$ 129.000.000					
(+) Recuperación del capital de trabajo						\$ 129.000.000
(+) Préstamo		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
(-) Amortizaciones		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
FLUJO DE CAPITALES	-\$ 1.423.778.746	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 143.977.765
FLUJO DE CAJA	-\$ 1.423.778.746	\$ 182.098.261	\$ 541.447.245	\$ 869.493.828	\$ 1.290.980.411	\$ 1.775.656.444

Se procedió a calcular el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para evaluar la rentabilidad del proyecto. Para el primer escenario se obtiene un VAN de \$1.529.060.624 y una TIR de 52%, mientras que en el segundo escenario se obtiene un VAN de \$1.444.046.867 y una TIR de 39%. En ambos casos los indicadores son positivos, por lo que se considera que ambos escenarios son rentables para quien ejecute el proyecto en los escenarios planteados. El escenario más rentable resulta ser el de Compraventa de máscaras pues posee mayores valores en sus indicadores económicos.

Estos escenarios presumen un costo para ventanas por uso de la tecnología en su totalidad de ánodos en proceso de 5.200 millones de pesos al año (7,2 millones de dólares aprox.) en el escenario de compraventa y de 7.600 millones de pesos al año (10,5 millones de dólares aprox.) con el sistema de prestación de servicios. Resultando atractivo para ventanas el modelo de compraventa pues actualmente no gastan necesariamente los 12 millones de dólares requeridos para refundir la totalidad de su Scrap, pues una parte es utilizada como carga fría en sus hornos de refino y otra parte es enviada a las fundiciones de origen o simplemente es vendido para reducir costos, por ello el modelo que genera un menor gasto para ellos resulta mejor, pues aumentan su ahorro en costos y da la posibilidad de mantenerse dentro de sus márgenes actuales de gastos aún cuando las máscaras no duren 1 año como se propuso en el análisis.

Por otro lado, si se desea ingresar a la industria como productores y vendedores de máscaras, es necesario un equipo de fabricación de enmascarado, es decir, un equipo de moldeo por inyección del polímero o un equipo de extrusión de placas poliméricas con un sistema de mecanizado capaz de hacer la ventana en el centro de la placa extruida.

Si se elige construir el enmascarado con Polipropileno o con Polietileno de Alta densidad, es posible utilizar la tecnología de moldeo por inyección[33][34], lo que requiere la compra de una máquina de inyección que tiene un precio de mercado que va desde los US\$2.500 a los US\$39.000[35]. Otro método de producción es el de Extrusión de placas de polímero, donde se encuentran precios de extrusoras desde US\$20.000 a los US\$70.000[36]. Además del equipo principal que sería uno de los dos mencionados, es necesaria la inversión en un lugar físico para instalar la planta (un edificio o taller), uno o más vehículos de transporte de material y el pago de personal para la puesta en marcha. Estos gastos variarán en función de la ubicación que quiera darse a la planta y al nivel productivo de la empresa que buscara como primer cliente pues es distinto comenzar con potrerillos que comenzar con Codelco norte porque la demanda del segundo es 3 veces mayor dada su capacidad productiva.

El gran valor de esta tecnología radica en la generación de un marco de cobre capaz de reutilizarse en el proceso de electrorefinación sin la necesidad de retratar el cobre contenido en él, el cual contiene entre un 15 y un 17% del cobre inicial del ánodo, de esta forma se elimina el concepto de chatarra resultante del proceso de electrorefino, pues el cobre remanente de los ánodos puede ser utilizado inmediatamente, teniendo un corto tiempo de reinserción al proceso pues solo requiere de su ubicación en la rueda de moldeo y el relleno con cobre fundido. Los marcos de cobres son reutilizables, pues si el enmascarado se realiza correctamente las dimensiones exteriores del ánodo no se ven alteradas y mantienen sus propiedades estructurales, por lo que pueden reingresar al proceso sucesivamente mientras no se genere una falla mecánica que obligue a retratarlos (una rotura de orejas, un fisuramiento, una deformación por impacto, entre otros).

De esta forma la empresa reduce sus gastos operacionales al no necesitar refundir el cobre que sale del electrorefino, mecanizado de los ánodos para conseguir verticalidad y contacto, y no tener que disponer de sus trabajadores para operar el horno de fundición del Scrap, pudiendo redistribuirlos en otras labores o en el mismo proceso de manejo de los marcos, lo que traduce en una reubicación efectiva de los trabajadores en puestos que aportan a generar valor y ganancias para su empresa.

Adicionalmente para el caso de refinerías como Ventanas que tratan no solo los ánodos producidos por sí mismos, sino que también reciben alimentación de otras fundiciones del país, se presenta la posibilidad de reducir sus gastos operacionales en transporte, dado que, si bien utilizan una parte del Scrap como carga fría y otra es reprocesada, aún cuentan con un excedente que debe ser transportado, ya sea por devolución o venta a las fundiciones de origen.

Como punto valorable, esta vez para quien esta en el lugar del generador de la tecnología de enmascaramiento, está el hecho de poseer un producto de bajo costo de producción (menos de 23 mil pesos por unidad), que puede dejar un gran margen de

ganancia basado en los márgenes de otras tecnologías mineras y al costo de oportunidad que poseen las refinerías, esto sumado a la posibilidad de trabajar con un sistema de compra-venta exclusiva de máscaras amparado en la protección entregada por la patente industrial que restringe el uso de la tecnología, esto disminuye la rivalidad con nuevos competidores pues no pueden vender el mismo producto y/o prestar el servicio que entrega esta empresa, brindando exclusividad a quien tenga los derechos de uso de la patente. De esta forma se restringe la oferta en el mercado permitiendo a la empresa obtener una mayor cantidad de clientes, lo cual es importante considerando que en Chile la explotación minera a gran escala con electrorefinación de cobre se restringe a un pequeño número de empresas.

Como atractivo adicional, la patente de esta tecnología cuenta con posibles variaciones al dejar los puntos de la máscara abiertos a los requerimientos del usuario, por ejemplo, la posibilidad de hacer la ventana de la máscara dentada o sin dientes, esto permite ajustarse a las necesidades de los clientes, quienes pueden tener peticiones propias según sus condiciones operacionales. Las empresas que cuenten con un cobre que no logre una buena adhesión en el marco y que requieran generar mayor agarre mecánico en la ventana pueden solicitar que el enmascarado sea dentado para dar más puntos de sujeción al relleno o pueden utilizar un fundente en el marco que facilite la fusión del relleno y el marco. Además de poseer la opción de cambiar el material del enmascarado según los parámetros operacionales del cliente, pues se puede decantar por el uso de uno u otro material en el enmascarado según sea la composición del electrolito, la densidad de corriente utilizada o simplemente por el espaciado que utilice entre sus electrodos. Esto permite adaptar la máscara a las solicitudes del cliente interesado en el uso de la tecnología, brindándole una atención personalizada que tome en cuenta sus requerimientos al momento de diseñar el producto que finalmente entrará a su proceso.

Dado que la máscara está compuesta de placas poliméricas, se facilita el contacto y entrega al cliente pues, de ser necesario, puede solicitarse un sistema de entrega subcontratado para hacer llegar los productos de forma expedita y segura al usuario. Esto permite llegar a un mayor número de clientes potenciales al tener múltiples opciones de entrega, quienes al encontrarse capacitados para hacer uso de la tecnología o contar con un especialista en el uso de esta en sus instalaciones (miembro de la empresa que proporciona el uso del enmascaramiento), pueden solicitar máscaras a modo de repuesto sin la necesidad de concertar una reunión o visita en terreno de los profesionales prestadores del servicio.

Desde este punto los recursos claves para la empresa dueña de los derechos de uso de patente son las matrices de inyección y/o equipos de extrusión o mecanizado, además de los materiales poliméricos para la fabricación de las máscaras, ya sean pellets capaces de tratarse por medio de un equipo de extrusión o un sistema de inyección, o el caso de placas que se usen como materia prima para el mecanizado de enmascarado.

Por ello si se establece la empresa como productora y comercializadora de máscaras, requiere establecer relaciones estratégicas con empresas productoras de polímeros para asegurar la disponibilidad de proveedores con Stock suficiente para atender los requerimientos de la empresa. Un ejemplo de estas empresas es el caso de polymerland, quienes manejan un amplio stock de plásticos con un fácil acceso al tener sus instalaciones en la región metropolitana, esto permite tener mayores canales de distribución al estar establecida en la metrópolis del país, además de poseer una amplia variedad de materiales, establecer una red de trabajo con ellos permite tener un mismo distribuidor para los materiales requeridos para cubrir las distintas necesidades de los clientes sin tener que recurrir a nuevos distribuidores. A la vez, es importante concretar acuerdos con empresas de suministros y mantenciones a equipos que permitan mantener en operación constante las instalaciones donde se produzcan los enmascarados, para así poder responder con la mayor rapidez a los pedidos que puedan surgir de nuevos clientes.

Dentro de las actividades claves se debe contemplar el acercamiento con los clientes por medio de las nuevas tecnologías, por lo que es vital tener especialistas en atención al público que se manejen con las nuevas herramientas de acceso a la información, es decir, dado el gran avance que ha tenido internet y otros medios de comunicación, es necesario que las personas encargadas de captar clientes y responder a sus inquietudes puedan establecer una comunicación eficaz y certera, tanto con los clientes como con los trabajadores de terreno que llevaran a cabo el trabajo según las especificaciones solicitadas por el usuario.

Finalmente, en cuanto a los ingresos y costos, estos quedarán sujetos a las especificaciones técnicas requeridas para operar en el proceso del usuario, es decir, se presentarán costos variables de acuerdo con el tipo de cliente que se esté abordando, por ejemplo, pueden darse variaciones en la interacción del entre los electrodos y el enmascarado al utilizar cátodos permanentes de acero inoxidable. Para el caso de Ventanas se sugiere utilizar la máscara cotizada (polipropileno de 4mm de espesor) con una ventana no dentada, dado que ya se probó que el cobre trabajado por ellos es compatible con la disolución y relleno (presenta buena adherencia) y el electrolito no logró afectar el acrílico ni el HDPE utilizados en el laboratorio. Los costos de producción son los entregados en la cotización y los ingresos se determinarán en función del costo de oportunidad de Ventanas que dictará el precio de venta y al sistema de trabajo que a ellos les interese, es decir, la compra de las máscaras o el pago por el servicio mencionado anteriormente (instalación, lavado, reparación, etcétera).

Estos planteamientos realizados se basan en el éxito de la tecnología de enmascaramiento anódico y relleno del marco, es decir, si la tecnología funciona a nivel industrial puede llevarse a cabo el establecimiento de una empresa que se ciña a lo expuesto para operar e implantarse en el mercado, lo que hasta el momento es apoyado por los resultados favorables obtenidos a escala de laboratorio. Dado que la extrapolación

de los resultados de escala de laboratorio no es directa a escala industrial, se propone la realización de una prueba a escala piloto para verificar el funcionamiento de la tecnología y permitir la validación del funcionamiento de la tecnología de enmascaramiento anódico u obtener las correcciones operacionales que deban llevarse a cabo para su ingreso a la industria.

5. Conclusiones

Se llevó a cabo la construcción de una celda a tamaño escala que replica las condiciones de operación de la celda de electrorefinación de Refinería Ventanas, principalmente el rango de temperatura de operación y el electrorefino con su respectivo espaciado catódico.

Se determinó analíticamente que el ancho mínimo necesario para que el marco posea la suficiente resistencia mecánica para poder resistir la manipulación de equipos en la planta es de 3cm.

La tecnología de enmascaramiento anódico logra una disolución focalizada del ánodo, permitiendo que los bordes del ánodo permanezcan intactos mientras se disuelve la sección central, creando una ventana en el centro del ánodo que puede ser rellenada en la rueda de moldeo para obtener un nuevo ánodo y reingresar así al proceso de electrorefino. Los materiales tentativos para construir el enmascaramiento en base a sus propiedades son el HPDE y PP.

El enmascaramiento no afecta la eficiencia de corriente anódica, obteniéndose en el estudio valores de 98-100% de eficiencia. La eficiencia de corriente catódica se ve levemente mermada, disminuyendo en promedio a 91% a lo largo del proceso, pero se mantiene cerca del 93-94% de eficiencia que presenta el proceso industrial de Ventanas, por lo que se puede considerar que el impacto es mínimo. La calidad Catódica no se ve afectada, pues los resultados experimentales indican que la deposición de cobre se realiza homogéneamente en la totalidad del área sumergida del cátodo, además de no apreciarse nodulación en la superficie de los cátodos obtenidos.

La ventana anódica se extiende por debajo de la máscara alcanzando un Undercut de 2cm, lo que sugiere que para asegurarse el ancho mínimo del marco de cobre es necesario realizar un enmascarado de al menos 5cm de ancho. Dado que es necesario mantener abierta la zona inferior del enmascarado para permitir el decantado de las impurezas que salen del ánodo, es necesario extender el enmascarado en la zona baja para evitar que el borde inferior del ánodo se disuelva por acción del campo eléctrico.

La masa contenida en el marco de cobre de 3 cm de ancho representa entre un 15-17% de la masa inicial del ánodo y es equivalente al cobre contenido actualmente en el Scrap recirculante de CODELCO Ventanas. Esto es sumamente importante pues elimina los gastos de reprocesamiento del Scrap sin alterar la producción neta de cobre.

El rellenado del marco de cobre resultó ser un éxito, al obtenerse una buena adherencia del relleno al marco y una buena conductividad eléctrica, deducible de la baja resistencia eléctrica del ánodo (0,13 Ohm entre el marco y el relleno). Adicionalmente se apreció que el relleno se adapta a la forma del molde y no escurre por sobre el marco,

permitiendo que el ánodo recupere el espesor original y esté en condiciones de reingresar al proceso.

El ingreso de la tecnología de enmascaramiento anódico a la industria permite reducir los costos operacionales de las refinerías al eliminar los costos de reprocesamiento y transporte del Scrap, y el costo de mecanizado de los ánodos al mantener las dimensiones exteriores originales del ánodo de cobre.

Para el proyecto de ingreso planteado para la tecnología, una cobertura de la totalidad de la operación de ventanas en un plazo de 5 años, se obtuvo un VAN de aprox. 1.500 millones de pesos y una TIR de 52% para el caso de compraventa de máscaras, resultando en un costo para Ventanas de 5.200 millones de pesos anuales (aprox. 7,2 millones de dólares), resultando ser un escenario atractivo para ambas partes considerando el gasto actual que posee ventanas en tratamiento de Scrap y la rentabilidad para la empresa dueña de la patente industrial. Los escenarios analizados aún pueden ser ajustados en base al gasto real o exacto de ventanas y al precio de venta de las máscaras según las pretensiones de ganancias que tenga la empresa.

La empresa a cargo de la venta de esta tecnología debe centrar su valor en la reducción de costos operacionales de las refinerías al eliminar el Scrap y los gastos asociados a él, además de existir la posibilidad de brindar un servicio personalizado a los clientes al poder variar el material del enmascaramiento moviéndose en un abanico de materiales poliméricos según las condiciones operacionales del usuario o modificar la forma de la ventana del enmascarado según sus necesidades, en base al cambio en la matriz de inyección, y la posibilidad de brindar un proceso exclusivo protegido por una patente industrial que no podrán encontrar en otras empresas. Adicionalmente se identifican como socios claves a las empresas de matricería, inyección y mecanizado, como por ejemplo SisteMold en Santiago, quienes pueden construir las matrices necesarias para el proceso de inyección y/o pueden vender las máscaras construidas permitiendo establecer un proceso de compraventa de máscaras. En caso de autoproducir las máscaras, se vuelven socios claves las empresas proveedoras de materiales poliméricos, pues establecer una red de trabajo con ellos permite tener un abastecimiento seguro de materias primas y mantener la variedad de materiales para dar un servicio personalizado a los clientes. Además del modelo de compra venta, se puede extender el proceso brindado la opción de prestar servicios por medio de la instalación, mantención, y reparación de máscaras en las refinerías.

6. Bibliografía

- [1] Wayback Machine, “Curso Minería Capitulo 7: Cobre y sus aleaciones”, *Internet Archive Wayback Machine*, 2004. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20080514055032/http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap7/71/>. [Accedido: 08-oct-2019].
- [2] A. Ballester, L. F. Verdeja González, y J. S. M. Sancho, *Metalurgia extractiva*. Síntesis, 2000.
- [3] CODELCO, “MEMORIA ANUAL 2017 CODELCO MEMORIA ANUAL 2017 Nuevo Nivel Mina El Teniente”, 2017.
- [4] R. Minero, “Informe situó a Chile como el mayor productor de cobre en el 2017”, 2018.
- [5] CODELCO, “CODELCO - Corporación Nacional del Cobre, Ventanas , Chile”, *Codelco*, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.codelco.com/division-ventanas/prontus_codelco/2016-02-25/165525.html. [Accedido: 19-dic-2018].
- [6] D. Ruiz, “Reunión: Operación Refinería CODELCO”, 2018.
- [7] D. de I. M. Universidad de Santiago de Chile, “Electrometalurgia”. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Santisgo, Chile, p. 12.
- [8] Consejo de Competencias Mineras, “Proceso de Refinación Electrolítica”. [En línea]. Disponible en: <http://www.ccm.cl/refinacion-electrolitica/>. [Accedido: 07-sep-2019].
- [9] H. Rediansyah, Khairurrijal, y S. Viridi, “Static electric field mapping using a mosquito racket and baby oil”, *Phys. Educ.*, vol. 50, n° 6, pp. 690–693, 2015.
- [10] R. Usma B., “Electricidad y Magnetismo”, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/4036176/>. [Accedido: 07-sep-2019].
- [11] J. R. Beltran Postigo, “Control de Impurezas en refinación electrolítica del cobre”. II Encuentro Internacional Metalurgia, Plantas y Procesos, Perú, p. 36, 2013.
- [12] C. Chile, “ELECTROREFINACIÓN: Ánodos y cátodos se encuentran”. Chile, p. 7, 2019.
- [13] R. Beltrán, “Curso de Refinación Electrolítica de Cobre”, *Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco*, 2014. [En línea]. Disponible en: https://es.slideshare.net/richard_270593/electrorefinacion-de-cobre-r-beltran-ilo. [Accedido: 07-sep-2019].
- [14] E. O. LIZAMA MORENO, “Dispositivo de enmascaramiento para los bordes de los ánodos usados en la electro refinación de metales. Que permite la reutilización de las cabezas de los ánodos.”, 633, 2018.
- [15] C. L. (Charles L. Mantell y J. Fernández Ferrer, *Ingeniería electroquímica: información exhaustiva de la teoría y práctica de los procesos electroquímicos industriales, de sus aplicaciones y productos*. Reverté, 1980.
- [16] CODELCO, “CODELCO - La Empresa en el negocio del cobre refinado”.

CODELCO, PUCHINCAVÍ, CHILE, 2016.

- [17] A. I. LABRA VARGAS, “UN SISTEMA COMPUESTO POR UN MEDIO COLGADOR DE ANODOS Y UN ANODO DE GEOMETRIA OPTIMIZADA, QUE POSIBILITA REUTILIZAR DICHO MEDIO COLGADOR DE ANODOS MINIMIZANDO LA PRODUCCION DE ‘SCRAP””, 2307, 2011.
- [18] F. LÓPEZ JAIBA, “UN SISTEMA DE ÁNODO REUTILIZABLE PARA PROCESOS DE ELECTRO-REFINACIÓN”, 447, 2013.
- [19] F. LÓPEZ JAIBA, “BARRA COLGADORA PARA ÁNODOS SIN OREJAS”, 1810, 2014.
- [20] EcuRed, “Aislante eléctrico”, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Aislante_eléctrico. [Accedido: 08-sep-2019].
- [21] Polymerland, “Propiedades físicas del acrílico”. Santiago, p. 1, 2016.
- [22] Polymerland, “Chemical Resistance PMMA Sheets”, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.polymerland.cl/contenido.php?id_articulo=127&id_categoria=0. [Accedido: 08-sep-2019].
- [23] Emilio Fernández Hurtado, “PROPUESTA PARA MEJORAR LA CALIDAD CATÓDICA EN EL PROCESO DE DESCOBRIZADO EN CODELCO DIVISIÓN VENTANAS”, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO , 2015.
- [24] Polymershapes Chile S.A., “TKGR FLON (PTFE)”. [En línea]. Disponible en: https://polymerland.cl/pdf/plasticos_ingenieria/SABIC_CHILE_PTFE_HOJA_TECNICA.pdf. [Accedido: 11-sep-2019].
- [25] Elaplas, “Propiedades Físicas Politetrafluoroetileno”. [En línea]. Disponible en: <http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/ptfe.pdf>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [26] Plastiductos, “Polietileno de Alta Densidad (HDPE)”. [En línea]. Disponible en: <https://plastiductos.com.mx/specs/tabla-de-resistencias-mecanicas.pdf>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [27] Corneplas s.l., “Polipropileno”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://corneplas.com/materiales/polipropileno/>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [28] CORZAN Industrial Systems, “Compatibilidad de Corzan CPVC con productos químicos”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.corzan.com/es-mx/corzan-tabla-de-resistencia-quimica-de-cpvc?hsCtaTracking=d820c9c0-eb81-490e-a59c-8937593c9dbf%7C1ad478ad-f969-4e42-80d5-b14b4efeb417>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [29] CORZAN Industrial systems, “Policloruro de vinilo clorado (CPVC)”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.corzan.com/es-mx/que-es-el-policloruro-de-vinilo-clorado>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [30] SisteMold, “SisteMold: Solucionamos sus problemas técnicos”. Santiago, p. 1, 2019.
- [31] SII, “Servicio de Impuestos Internos: Dolar Observado”, 2019. [En línea]. Disponible en: http://www.sii.cl/valores_y_fechas/dolar/dolar2019.htm. [Accedido: 10-oct-

2019].

- [32] Laborum, “Sueldos Pretendidos en Chile”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.laborum.cl/salarios/>. [Accedido: 10-oct-2019].
- [33] MAQUICLICK, “maquinas de inyección de plásticos”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/maquinas-de-inyeccion-de-plastico/>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [34] MAQUIBLOW DE OCCIDENTE, “Inyectoras de plástico Maquinas para inyección de plástico”, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.inyectorasplastico.com/>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [35] Mercado Libre, “Maquina Inyectora Plástico”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://listado.mercadolibre.cl/industrias-oficinas/maquina-inyectora-plastico>. [Accedido: 11-sep-2019].
- [36] Alibaba, “Maquinas extrusoras de plastico”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/g/plastic-wood-machine.html>. [Accedido: 11-sep-2019].

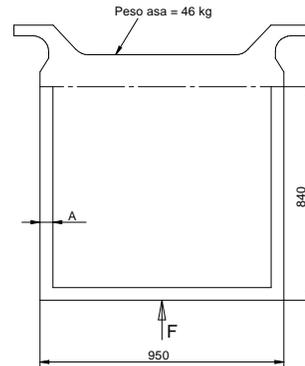
7. Anexos

Anexo 1: Calculo del espesor mínimo del marco de cobre

Los Sigüientes Cálculos se realizan con ayuda del Sr Daniel González Lagos.

- Apoyo del marco, en posición vertical, sin bloque, descansando todo su peso sobre el centro de la barra inferior a un punto protuberante en el suelo:

Se considera el Asa o lomo como el resultante del proceso al mantener los 4cm superiores fuera del electrolito. Considerando la densidad del cobre igual a $8960 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, se estima un peso de 46Kg



Reconoce denomina el ancho del marco como A y se considera una fluencia del cobre de $560 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$.

El peso del marco estará determinado por:

$Peso = (0,95[m] * 0,84[m] - (0,95[m] - 2 * A) * (0,84[m] - A)) * 0,04[m] * 8960[kg/m^3]$; A en metros

Peso Total: $F = (Peso\ asa + Peso\ marco) \text{ [Kg]}$

El esfuerzo de flexión esta dado por:

$$\sigma_{flex} = \text{Momento Flector} / \omega_0$$

Con un momento flector de igual a: $(95[cm] - 2 * A) * F / 4 \text{ [kgcm]}$; F en kg

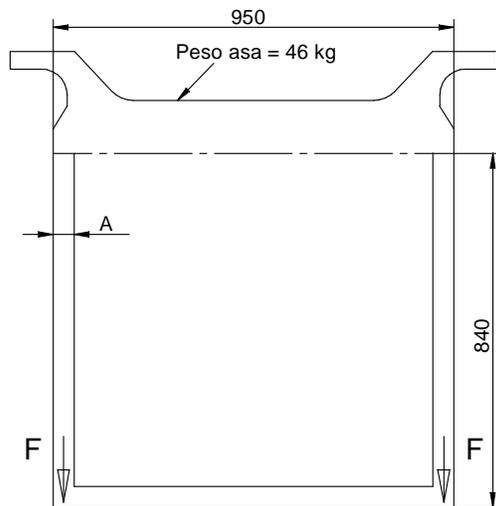
Y un ω_0 igual a: $4 * A^2 / 6 \text{ [cm}^3\text{]}$; A en cm

Fijando un factor de seguridad de 2, sugerido por Daniel según lo utilizado en la industria, se tiene que el esfuerzo admisible es:

$$\text{Sigma admisible} = \text{Fluencia cobre} / \text{Factor de seguridad} = 280 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Resolviendo este sistema en un software computacional se estima que el ancho mínimo admisible es de 30mm

- Marco colgando desde asas, con bloque sin soldar sostenido sobre barra inferior, traccionando barras laterales:



Se considera bajo este escenario que el bloque de cobre no ha soldado y el marco de cobre se pone en posición vertical apoyado sobre la viga inferior, esto porque si el cobre no funde, por temas de seguridad no se levantara del piso y se debe destinar al refundido. Se considera que hay de tracción sobre las vigas laterales por acción del peso del relleno sobre la viga inferior

Con esto calcula el peso del cobre y del asa igual que el escenario anterior. Al considerar el peso total que ejerce presión sobre la viga se estima que esta dado por: $F = (\text{peso asa} + \text{Peso marco} + \text{Peso del relleno})/2$ [kg]

El peso total se divide en dos dado que el esfuerzo de tracción se ejerce en ambos extremos de la viga inferior. Con ello se calcula el esfuerzo de tracción como

$$\text{Sigma tracción} = F/A_0[\text{kg/cm}^2]$$

Con A_0 el área de unión de las vigas, el cual está dado por $A_0 = 4 * A$ [cm²], con A en cm, determinando el mismo factor de seguridad e igual esfuerzo admisible que el caso anterior, se resuelve el sistema en un programa computacional, resolviéndose que el ancho mínimo en esta situación es de 2mm.

Dado que espera operar en ambos casos evitando el rompimiento del marco de cobre, se escobe el máximo ancho determinado, esto es un ancho necesario de 3cm

Anexo 2: Balance de masa del sistema

Las siguientes tablas presentan los pesajes de los electrodos en cada cosecha. Cada valor denominado como “acumulado” se estima realizando la operación indicada tomando como punto inicial el primer día de operación. La disolución relativa del ánodo y deposición relativa en los cátodos se calcula restando el peso inicial de la cosecha y el peso final de la cosecha y viceversa respectivamente.

Tabla 15: Pesaje ánodo a lo largo del proceso

Ánodo					
Tiempo [Días]	Peso [Gr]	Disolución relativa [Gr]	Disolución Acumulada [Gr]	Disolución Promedio [Gr]	Disol. Prom. Acumulada [Gr]
0	15536	0	0	0,0	0,0
5	14658	878	878	175,6	175,6
7	14294	364	1242	182,0	177,4
13	13209	1085	2327	180,8	179,0
16	12704	505	2832	168,3	177,0
21	11743	961	3793	192,2	180,6
28	10464	1279	5072	182,7	181,1
35	9172	1292	6364	184,6	181,8

Tabla 16: Pesaje Cátodos a lo largo del Proceso

Deposición Total Cátodos						
Tiempo [días]	Peso Inicial [Gr]	Peso Final [Gr]	Deposición relativa [Gr]	Deposición Acumulada [Gr]	Depos. Promedio [Gr]	Depos. Prom. Acumulada [Gr]
0	0	0	0	0	0,0	0,0
5	284	1074	790	790	158,0	158,0
7	7125	7390	325	1115	162,5	159,3
13	404	1427	1023	2138	170,5	164,5
16	396	866	470	2608	156,7	163,0
21	423	1315	892	3500	178,4	166,7
28	419	1611	1192	4692	170,3	167,6
35	422	1622	1200	5892	171,4	168,3

La masa de lodos decantados se estima restando la masa depositada a la masa disuelta del ánodo.

Tabla 17: Decantación de barras anódicas a lo largo del proceso

Lodos				
Tiempo [Días]	Deposición relativa [Gr]	Deposición Acumulada [Gr]	Decantación Promedio [Gr]	Decan. Prom. Acumulada [Gr]
0	0	0	0,0	0,0
5	88	88	17,6	17,6
7	39	127	19,5	18,1
13	62	189	10,3	14,5
16	35	224	11,7	14,0
21	69	293	13,8	14,0
28	87	380	12,4	13,6
35	92	472	13,1	13,5

Anexo 3: Corriente promedio

La corriente promedio diaria se calcula promediando todos los datos tomados durante dicho día (datos tomados con un intervalo de 5min.) y la disolución relativa se calcula reemplazando el valor de la corriente promedio acumulada y el tiempo en la ecuación de 6 (ley de Faraday).

Tabla 18: Corriente promedio a lo largo del proceso y disolución teórica a la fecha indicada

Ánodo			
Tiempo [Días]	Corriente promedio diaria [A]	Corriente Promedio Acumulada [A]	Disolución teórica [Gr]
0	6,30	6,30	0
1	6,30	6,30	180
2	6,30	6,30	361
3	6,29	6,30	541
4	6,27	6,29	721
5	6,29	6,29	901
6	6,30	6,29	1082
7	6,30	6,29	1262
8	6,31	6,30	1443
9	6,33	6,30	1624
10	6,30	6,30	1805
11	6,30	6,30	1985
12	6,30	6,30	2166
13	6,30	6,30	2346
14	6,30	6,30	2527
15	6,30	6,30	2707
16	6,30	6,30	2888
17	6,30	6,30	3068
18	6,31	6,30	3249
19	6,31	6,30	3430
20	6,32	6,30	3611
21	6,32	6,30	3792
22	6,31	6,30	3973
23	6,30	6,30	4153
24	6,30	6,30	4334
25	6,30	6,30	4514
26	6,30	6,30	4695
27	6,30	6,30	4875
28	6,30	6,30	5056
29	6,30	6,30	5236
30	6,30	6,30	5417
31	6,30	6,30	5597
32	6,30	6,30	5778
33	6,30	6,30	5958
34	6,30	6,30	6139
35	6,30	6,30	6319

Anexo 4: Costos Refinerías Chilenas

Tabla 19: Estimación de costos para 3 refinerías chilenas

Refinería	Capacidad	Scrap	Scrap	Peor Escenario (150[US\$/Ton])	Escenario Promedio (100[US\$])	Mejor Escenario (50[US\$])
	[Ton/año]	[%]	[Ton/año]	[\$]	[\$]	[\$]
Ventanas	420.000	17	86024	\$ 12.903.614	\$ 8.602.410	\$ 4.301.205
Potrillos	155.000	23	46299	\$ 6.944.805	\$ 4.629.870	\$ 2.314.935
Codelco Norte	855.000	17	175120	\$ 26.268.072	\$ 17.512.048	\$ 8.756.024
		Total:	307443	\$ 46.116.492	\$ 30.744.328	\$ 15.372.164

El nivel de Scrap generado en Toneladas por año se calcula multiplicando la capacidad productiva por el porcentaje de Scrap, dividiendo por el porcentaje de alimentación que representa esa capacidad productiva (debido a que representa solo la capacidad de producción de cátodos y el Scrap está referido a porcentaje de alimentación).

Posteriormente se calculan los costos de cada refinería en cada escenario multiplicando el Scrap por el costo de procesamiento planteado en cada caso.

Anexo 5: Costos Refinerías en el mundo

Los Costos en este caso se calculan igual que en el anexo anterior.

Tabla 20: Estimación de costos de 10 refinerías a lo largo del mundo

Refinería	Capacidad	Scrap	Scrap	Peor Escenario (150[US\$/Ton])	Escenario Promedio (100[US\$])	Mejor Escenario (50[US\$])
	[Ton/año]	[%]	[Ton/año]	[\$]	[\$]	[\$]
Southern Cooper, Perú	285.000	14	46395	\$ 6.959.302	\$ 4.639.535	\$ 2.319.767
Tamano, Japón	228.000	17,4	48029	\$ 7.204.358	\$ 4.802.906	\$ 2.401.453
Amarillo, USA	500.000	15	88235	\$ 13.235.294	\$ 8.823.529	\$ 4.411.765
El Paso, Freeport	455.000	15	80294	\$ 12.044.118	\$ 8.029.412	\$ 4.014.706
Sverdorsk, Rusia	300.000	18	65854	\$ 9.878.049	\$ 6.585.366	\$ 3.292.683
Norilsk, Rusia	300.000	19	70370	\$ 10.555.556	\$ 7.037.037	\$ 3.518.519
Onahama, Japón	258.000	18	56634	\$ 8.495.122	\$ 5.663.415	\$ 2.831.707
Saganoseki, Japón	235.000	17,1	48474	\$ 7.271.110	\$ 4.847.407	\$ 2.423.703
Glogow II, Polonia	233.000	10,2	26465	\$ 3.969.822	\$ 2.646.548	\$ 1.323.274
Caraiba, Brasil	225.000	21	59810	\$ 8.971.519	\$ 5.981.013	\$ 2.990.506
Total:			590562	\$ 88.584.249	\$ 59.056.166	\$ 29.528.083

Tabla 21: estimación de costos de 12 refinarías del mundo

Refinería	Capacidad	Scrap	Scrap	Peor Escenario (150[US\$/Ton])	Escenario Promedio (100[US\$])	Mejor Escenario (50[US\$])
	[Ton/año]	[%]	[Ton/año]	[\$]	[\$]	[\$]
Aurubis, alemania	380.000	11	46966	\$ 7.044.944	\$ 4.696.629	\$ 2.348.315
CCR, Canada	375.000	18	82317	\$ 12.347.561	\$ 8.231.707	\$ 4.115.854
Olen, Bélgica	340.000	14	55349	\$ 8.302.326	\$ 5.534.884	\$ 2.767.442
Onsan Ref#1, Corea	320.000	11,8	42812	\$ 6.421.769	\$ 4.281.179	\$ 2.140.590
Townsville, Australia	300.000	16,2	57995	\$ 8.699.284	\$ 5.799.523	\$ 2.899.761
Balkash, Kazakstan	300.000	18	65854	\$ 9.878.049	\$ 6.585.366	\$ 3.292.683
Mexicana de Cobre	300.000	15,8	56295	\$ 8.444.181	\$ 5.629.454	\$ 2.814.727
Kennecott, USA	281.000	18	61683	\$ 9.252.439	\$ 6.168.293	\$ 3.084.146
Huelva, España	263.000	16	50095	\$ 7.514.286	\$ 5.009.524	\$ 2.504.762
Boliden, Suecia	255.000	18	55976	\$ 8.396.341	\$ 5.597.561	\$ 2.798.780
Onsan Ref#2, Corea	240.000	11	29663	\$ 4.449.438	\$ 2.966.292	\$ 1.483.146
Norddeutsche, Alemania	220.000	10,5	25810	\$ 3.871.508	\$ 2.581.006	\$ 1.290.503
Total:			630814	\$ 94.622.125	\$ 63.081.417	\$ 31.540.708