

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor(es) Patrocinante(s)
Eugenia Araneda Hernández
Ingeniero(s) Supervisor(es)
Rolando Tardon Sepulveda
Julián Ravanal Ravanal

**ESTUDIO DE ALTERNATIVAS OPERACIONALES PARA EL
AUMENTO DE CALIDAD CATODICA GRADO A EN NAVE EW DE
DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC, CODELCO**

VICENTE ALEJANDRO MÁNQUEZ ORREGO

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril, 2026

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rosa y Ariel, por inculcarme valores que me han guiado en cada paso y por estar siempre a mi lado, en las buenas y en las malas. Gracias por su amor incondicional, su confianza en mí y su apoyo constante en cada proyecto que me propongo. Este logro no es solo mío, también es de ustedes y de los abuelos Charo (QEPD), Pedro (QEPD), Tomas (QEPD) y Adriana producto de sus enormes esfuerzos que hoy se ven reflejados a largo plazo.

A Margarita “mimi” Herrera, un miembro más de la familia, por todas las anécdotas que han ocurrido durante estos 23 años, y siempre sacarme una sonrisa independiente el momento.

A Josefa Espinoza, mi compañera de vida y amor, con quien ya he compartido más de la mitad de mi vida, por soportarme en cada locura y por enseñarme lo que significa amar de verdad.

A mis amigos de la universidad, Gonzalo Mella, Aylin Soto, Sebastián San Martín, Agustín Jara, Jonatan Fernández, por recordar que la vida no es individual. Su compañía durante este camino hizo de la vida universitaria una experiencia muy agradable.

A Rolando Tardón y Julián Ravanal, quienes depositaron su confianza en mí desde el primer minuto en la superintendencia LX-SX-EW y me integraron en cada una de las situaciones reales de la operación. Gracias por confiar en mí y sus valiosos consejos, por motivarme a mirar más allá de los procesos.

A Oscar Caro, Arturo Órdenes, Ernesto Castro, Rodrigo Riquelme, Gabriel García, Luis Palma, Gonzalo Pizarro por su valiosa colaboración y disposición durante el desarrollo de mi trabajo de memoria. Su orientación y aportes durante mi estadía fueron fundamentales para el avance de este trabajo.

Un agradecimiento especial para mi profesora guía y Dra., Eugenia Araneda por su sabio conocimiento, paciencia y constante disposición durante mi periodo de memoria de título.

A quienes están, a quienes se irán y a quienes ya no están. Gracias por formar parte de este camino, en presencia, en recuerdo y en legado

Resumen

II

División Radomiro Tomic (DRT) de CODELCO opera actualmente la nave de electro obtención más grande el mundo y se encuentra enfrentando el crítico desafío de asegurar la mayor cantidad de producción de cátodos grado A bajo los estándares de la London Metal Exchange (LME). Adicionalmente, DRT se encuentra en un periodo de transición desde una producción históricamente de óxidos de cobre, en transición a una lixiviación clorurada. En este contexto, dada la mayor disponibilidad de soluciones con las que se contará, resulta crítico incrementar la producción catódica grado A y, por tanto, se espera que la nave opere en su total capacidad de modo de maximizar la producción manteniendo altos niveles de calidad catódica.

En este sentido, se plantea en una primera etapa, un estudio que permita identificar las variables operacionales de mayor relevancia en la calidad catódica y con ello, evaluar alternativas de mejora operacional para aumentar el nivel de aceptación de cátodos grado A. Para ello, se realizó un levantamiento de data histórica para evaluar las correlaciones entre la calidad y variables de proceso se aplicaron herramientas estadísticas como la correlación de Pearson sobre variables de proceso determinantes.

De acuerdo con la calidad catódica de DRT, la calidad química no se ve perjudicada en gran parte, ya que un 91,5% corresponde a calidad química grado RT, mientras que el objetivo por aumentar la calidad catódica está en minimizar los defectos físicos para aumentar el 79,0% de calidad física global de la nave de EW.

Concluyendo que, de 10 variables de proceso seleccionadas, tan solo 4 son estadísticamente significativas. Los resultados muestran que el desempeño operativo de la nave de EW entre Febrero 2024 a Julio 2025, se ve influenciado principalmente por las siguientes relaciones estadísticas entre calidad física y variables de proceso en orden de importancia decreciente, (1) Dosificación de DXG, (2) Dosificación de Guar, (3) Densidad de corriente, (4) Concentración de cobre en avance. Generando un plan de mejora con foco en los aditivos e identificando que la calidad catódica depende de una gestión precisa no solo de variables de proceso, sino también de la disciplina operacional.

Abstract

Radomiro Tomic Division (DRT) of CODELCO currently operates the largest electrowinning plant in the world and is facing the critical challenge of securing the highest possible production of Grade A cathodes under London Metal Exchange (LME) standards. Additionally, DRT is in a transition phase from a historically oxide-based copper production to chloride leaching. In this context, given the greater availability of solutions that will be processed, it is critical to increase Grade A cathode production; therefore, the electrowinning plant is expected to operate at full capacity in order to maximize production while maintaining high cathode quality standards.

In this regard, a first-stage study is proposed to identify the most relevant operational variables affecting cathode quality and, based on this, to evaluate operational improvement alternatives to increase the acceptance rate of Grade A cathodes. For this purpose, historical data were compiled to assess correlations between cathode quality and process variables, applying statistical tools such as Pearson correlation to key process variables.

According to DRT's cathode quality performance, chemical quality is largely not compromised, as 91.5% of production meets RT-grade chemical quality. Consequently, the main objective for improving cathode quality is to minimize physical defects in order to increase the current 79.0% overall physical quality of the EW plant.

It is concluded that, out of 10 selected process variables, only 4 are statistically significant. The results show that the operational performance of the EW plant between February 2024 and July 2025 is mainly influenced by the following statistically significant relationships between physical quality and process variables, in decreasing order of importance: (1) DXG dosage, (2) guar dosage, (3) current density, and (4) copper concentration in the advance solution. Based on this, an improvement plan focused on additives was developed, and it was identified that cathode quality depends on precise management not only of process variables, but also of operational discipline.

Glosario:

DRT: División Radomiro Tomic

LX: Lixiviación

SX: Extracción por Solventes

EW: Electrowinning (electro obtención)

PLS: Pregnant Leach Solution o solución de lixiviación cargada

Ánodo: Placa de aleación Pb-Ca-Sn, utilizado en celdas de EW para la ocurrencia electroquímica del depósito de cobre.

Batería: Conjunto de celdas dispuestas en serie.

Cátodo permanente (blank): Placa de acero inoxidable sin cobre en su cuerpo, lista para ser ingresada a una celda del banco.

Cátodo: Placa de acero inoxidable 316L más depósito de cobre adherido en su cuerpo.

Celda: Dispositivo que consta de electrodos sumergidos en una solución ácida llamada electrolito.

Cortocircuito: Se llama así al contacto que se produce entre dos conductores de polos opuestos (ánodo-cátodo).

Electrolito pobre o spent: Solución acuosa altamente ácida con bajo contenido de cobre, que resulta de la reacción electroquímica.

Electrolito rico: Solución rica en cobre, que ingresa como avance a celdas comerciales.

MDC: Máquina despegadora de cátodos.

Celda Scavenger: Celdas de sacrificio, que recupera orgánico por arrastre de SX.

GRMD: Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Producción de cobre en Chile.....	4
2.2 División Radomiro Tomic.....	4
2.3 Producción	5
2.4 Descripción general del proceso en División Radomiro Tomic, CODELCO	6
2.4.1 Área seca	6
2.4.2 Área húmeda.....	6
3. MARCO TEORICO	8
3.1 Electro obtención del cobre	8
3.2 Cinética del proceso de EW.....	9
3.1 Corriente límite de difusión	12
3.2 Estructuras de crecimiento cristalino.....	12
3.3 Ley de Faraday	14
3.4 Calidad catódica	15
3.4.1 Calidad física	15
3.4.2 Calidad química	16
3.5 Clasificación de calidad catódica en División Radomiro Tomic	17
3.5.1 Calidad química en DRT.....	17
3.5.2 Calidad física en DRT	17
3.6 Diseño de planta	19
3.6.1 Celda de electro obtención	19

3.6.2	Ánodo.....	19
3.6.3	Cátodo	21
3.6.4	Barra equipotencial	22
3.6.5	Aisladores anódicos	23
3.6.6	Ánodos con rigidizadores	23
3.6.7	Capping board.....	24
3.6.8	Cubre bordes de electrodos	24
3.6.9	Nuevas tecnologías	24
3.7	Valores de diseño de variables de proceso en nave de EW de DRT.....	25
3.8	Variables de proceso	25
3.8.1	Composición del electrolito	25
3.8.2	Flujo volumétrico.....	29
3.8.3	Temperatura del electrolito.....	29
3.8.4	Densidad de corriente.....	30
3.8.5	Sólidos en suspensión (TSS).....	31
3.8.6	Adición de reactivos	31
3.9	Variables operacionales.....	33
3.9.1	Housekeeping	33
3.10	Rango de operación en División Radomiro Tomic	34
4.	METODOLOGÍA	34
4.1	Recolección de datos	35
4.2	Preparación de datos	38
5.	RESULTADOS	39
5.1.1	Análisis estadístico de calidad química.....	39
5.1.2	Análisis estadístico de calidad física.....	42
5.2	Descripción de datos de variables de proceso	44
5.3	Porcentaje de días de producción grado A físico	44
5.4	Correlación de Pearson.....	45
5.4.1	Análisis estadístico descriptivo para calidad física grado A sobre 80%	45
5.4.2	Análisis estadístico descriptivo para calidad física grado A bajo 80%	46

5.5	Coeficiente de correlación de Pearson	47
5.6	Interpretaciones fenomenológicas de los resultados	54
5.7	Calidad química	54
5.8	Calidad física	55
5.8.1	Correlación entre cobre en avance y calidad física.....	55
5.8.2	Correlación entre densidad de corriente y calidad física.....	55
5.8.3	Correlación entre dosificación de DXG y calidad física	55
5.8.4	Correlación entre dosificación de Guar y calidad física	55
6.	PROPUESTAS DE PLAN DE MEJORA	56
7.	CONCLUSIONES	57
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	59
9.	ANEXOS.....	61
9.1	Anexo I.....	61
9.1.1	AREA SECA	61
9.1.2	AREA HUMEDA.....	63
9.2	Anexo II.....	84
9.3	Anexo III.....	85
9.4	Anexo IV.....	86
9.5	Anexo V.....	86
9.5.1	Pegado de placas y despegue manual de cobre	86
9.5.2	Reposición de electrodos (ánodos/cátodos).....	87
9.5.3	Desborre de celda	88
9.5.4	Mantenimiento de parrillas de aireación	89
9.5.5	Distancia inter-electrodos (alineamiento)	90
9.5.6	Lavado de contactos eléctricos	91
9.5.7	Detección de cortocircuitos	92
9.5.8	Mantenimiento electrodos	92
9.6	Anexo VI.....	93
9.6.1	Distribuidor de flujo de electrolito	93
9.6.2	Sistema de parrillas de aireación	95

Índice de figuras

Figura 1: Registros históricos de producción y calidad catódica desde 1999 a 2023 en DRT ...	5
Figura 2: Diagrama de flujo de proceso productivo vía tradicional hidrometalúrgica de la división.....	6
Figura 3: Celda electroquímica (diseño propio, 2026)	9
Figura 4: η vs i (Vergara, 2006)	10
Figura 5: Esquema de polarización para EW	11
Figura 6: Diagrama de Winand (Winand, 1992)	13
Figura 7: Desglose de calidad catódica (Diseño propio, 2026)	15
Figura 8: Esquema de celda de EW de DRT	19
Figura 9: Ánodo de Pb-Ca-Sn de DRT (Imagen propia, 2025).....	20
Figura 10: Corrosión anódica producto de celda des energizada (Imagen propia, 2025)	21
Figura 11: Cátodo permanente de INOX AISI 316L de DRT (Imagen propia, 2025).....	22
Figura 12: Ánodo con aislador anódico tipo delta (Imagen propia, 2025)	23
Figura 13: Ánodos con rigidizadores en rack (Imagen propia, 2025)	24
Figura 14: Efecto del guar sobre la superficie catódica (Costella, 2024)	32
Figura 15: Visualización de layout de flujos y temperaturas en PI ProcessBook.....	35
Figura 16: Visualización de dato concentraciones de cobre y cloruro en PI ProcessBook	36
Figura 17: Parte superior de PI ProcessBook.....	36
Figura 18: TAG en PI ProcessBook	36
Figura 19: Pictograma de maquina despegadora de cátodos (MDC) 1 (Castro, 2025)	37
Figura 20: Contenido de hierro en cátodos nave EW	39
Figura 21: Contenido de plomo en cátodos nave EW	40
Figura 22: Contenido de azufre en cátodos nave EW.....	40
Figura 23: Calidad química global de nave EW durante periodo de estudio.....	41
Figura 24: Calidad química grado RT mensual.....	42
Figura 25: Defectos físicos global en nave EW durante periodo de estudio.....	42
Figura 26: Calidad física grado A por banco durante periodo de estudio	43
Figura 27: Calidad física grado A mensual.....	43
Figura 28: Porcentaje de días de producción cátodos grado A físico	44
Figura 29: Interpretación de coeficientes de correlación.....	50
Figura 30: Correlación 1: Grado A físico vs. Cobre en avance	50
Figura 31: Correlación 2: Grado A físico vs. Densidad de corriente	51
Figura 32: Correlación 3: Grado A físico vs. Dosificación de DXG	52
Figura 33: Correlación 4: Grado A físico vs. Dosificación de Guar	52

Figura 34: CAEX descargando mineral en chancador primario (Chilemineria)	61
Figura 35: Líneas de alimentación a chancador secundario	62
Figura 36: Vista área de stock pile (Costella S.A, 2025)	62
Figura 37: Distribución de semi módulos en pilas dinámicas	63
Figura 38: Vista área de pila 1 y pila 2 (Costella S.A, 2025)	64
Figura 39: Piscinas de PLS (Imagen propia, 2025)	65
Figura 40: Diagrama de flujo de proceso de lixiviación (Imagen propia, 2025)	66
Figura 41: Diagrama de proceso LX-SX-EW para plantas de hidrometalurgia (Ruiz, 2023)	67
Figura 42: Disposición general de planta SX (Imagen propia, 2025)	68
Figura 43: Decantador de planta SX (Castro, 2024)	69
Figura 44: Imagen bomba DOP (Outokompu, 1998)	70
Figura 45: Imagen spirok (Outokompu, 1998)	70
Figura 46: Spirok y bomba DOP en planta de SX (Manual de operaciones SX, 2024)	70
Figura 47: Estanque decantador típico (Costella S.A, 2024)	71
Figura 48: Picket-Fence y distribuidor de flujo en decantador S2 en tren D	72
Figura 49: Coalescedor Chuquicamata (Imagen propia, 2025)	73
Figura 50: Estanque de almacenamiento TK-401 de orgánico cargado (Castillo, 2024)	73
Figura 51: Diagrama de flujo para tren A, B, C en planta de SX (CODELCO, 2024)	74
Figura 52: Diagrama de flujo para tren D en planta de SX (CODELCO, 2024)	75
Figura 53: Columnas de flotación y estanque de almacenamiento de electrolito TK- 406 (Imagen propia, 2025)	75
Figura 54: Columnas de flotación DRT (Ruiz, 2023)	76
Figura 55: Filtro Chuquicamata DRT (Ruiz, 2023)	76
Figura 56: Estanque de recirculación de electrolito TK-408 (Imagen propia, 2025)	77
Figura 57: Diagrama de flujo de patio de estanques planta SX (CODELCO, 2024)	78
Figura 58: Interior nave EW de DRT (Imagen propia, 2025)	79
Figura 59: Disposición de celdas al interior de nave EW	79
Figura 60: Circuito de electrolito en nave EW (CODELCO, 2024)	80
Figura 61: Distribución de líneas corriente en par ánodo - cátodo (Imagen propia, 2025)	81
Figura 62: Layout nave EW DRT (Araneda, 2024)	81
Figura 63: Lingada de cátodos previo ingreso a cuba de lavado (Imagen propia, 2025)	82
Figura 64: Lavado de cátodos con agua a presión (Imagen propia, 2025)	82
Figura 65: Cátodo pintado por rechazo físico en inspección de lingada (Imagen propia, 2025)	83
Figura 66: Actividad de lavado de ánodos (Imagen propia, 2025)	87
Figura 67: Herramienta para medición espesor de ánodo (Imagen propia, 2025)	88
Figura 68: Desborre de celda con borra anódica en su interior (Imagen propia, 2025)	89
Figura 69: Mantención de parrilla de aireación (Imagen propia, 2025)	90

Figura 70: Electrodo alineado en celda (Imagen propia, 2025).....	90
Figura 71: Operador de COBRA realizando actividad de lavado de contactos (Imagen propia, 2025).....	91
Figura 72: Flujo volumétrico a celda por manifold (Imagen propia, 2025)	94
Figura 73: Flujo volumétrico a celda por distribuidor de flujo (Imagen propia, 2025).....	94
Figura 74: Sistema de parrilla de aireación en celda en mantención (Imagen propia, 2025) ..	95

Índice de tablas

XI

Tabla 1: LME Special Contract Rules for Copper Grade A Quality: ASTM B115-10 (2021)	
Estándar Specification for Electrolytic Copper Cathode (Cathode Grade 1)	16
Tabla 2: Contenidos máximos de impurezas para cátodos en DRT	17
Tabla 3: Clasificación de productos de División Radomiro Tomic	18
Tabla 4: Variables de diseño de planta de EW en DRT	25
Tabla 5: Rangos de operación de las variables de proceso durante el periodo de estudio	34
Tabla 6: Variables de estudio	38
Tabla 7: Calidad química global de nave EW durante periodo de estudio	41
Tabla 8: Análisis descriptivo para calidad grado A física sobre 80%	45
Tabla 9: Análisis descriptivo para calidad grado A física bajo 80%	46
Tabla 10: Calidad grado A física bajo y sobre 80%	47
Tabla 11: Coeficientes de correlación de Pearson para variables de proceso	48
Tabla 12: Correlación de Pearson en parejas	49
Tabla 13: Correlaciones entre variables de proceso	53
Tabla 14: Clasificación de Fisher	84
Tabla 15: Defectos físicos de cátodos en DRT	96

1. INTRODUCCIÓN

La industria del cobre en Chile, especialmente las plantas hidrometalúrgicas enfrentan un desafío crítico para mantener su competitividad global, centrado en la producción de cátodos de alta pureza electro obtenidos. Este reto se agrava por la transición mineralógica de los yacimientos, que ha pasado de óxidos de cobre a sulfuros secundarios y la implementación de lixiviación clorurada. En este contexto, la etapa de electro obtención (EW) se convierte en el proceso determinante de la cadena de valor hidrometalúrgica, donde la interacción de fenómenos electroquímicos y variables operacionales define la clasificación del producto bajo los estándares del manual de calidad de la división para ser comercializados en London Metal Exchange (LME). El objetivo fundamental de este proceso es obtener depósitos de cobre del tipo FT dado que presentan un depósito sin dendritas y más uniforme, que cumplen con las especificaciones requeridas para alcanzar la máxima calidad.

La División Radomiro Tomic, con una capacidad de diseño de 300.000 toneladas por año, se enfrenta a dificultades debido al agotamiento de mineral oxidado. Para suplir la demanda operacional, se ha optado por mezclar minerales de sulfuros secundarios con mineral oxidado en las pilas dinámicas. Esta estrategia introduce variabilidad en la composición del electrolito, complicando la estabilidad del proceso y dificultando el cumplimiento de los estándares requeridos para la producción de cátodos de grado A y prolongar la vida útil de la planta de EW. A pesar de un buen desempeño en calidad química, se han identificado desviaciones en la calidad física, como nodulación y contaminación, que impactan negativamente en la clasificación final de los cátodos electro obtenidos.

En este sentido, el presente estudio propone identificar alternativas operacionales que impacten positivamente en la calidad física y química de los cátodos, analizando un extenso periodo de datos históricos entre Febrero de 2024 y Julio de 2025.

1.1 Problemática

Dado el agotamiento de mineral oxidado, la División Radomiro Tomic se ve enfrentada a la dificultad de suplir la demanda operacional. Para ello, en sus pilas dinámicas se está realizando mezcla de minerales de sulfuros secundarios con mineral oxidado en los semi módulos. Esta condición trae como consecuencia una mayor variabilidad composicional, lo que obliga a modificar continuamente las variables de operación en función de la composición del electrolito, no solo en la etapa de EW sino también en lixiviación y extracción por solventes, como lavado deficiente del PLS en planta de SX. En consecuencia, se dificulta mantener una operación estable que permita cumplir de manera consistente con las exigencias y resultados requeridos para obtener un cátodo grado A.

La calidad catódica considera calidad química y calidad física, la División Radomiro Tomic ha mantenido un buen desempeño en términos de calidad química, las principales causas por las cuales algunos cátodos no alcanzan la clasificación grado A se asocian a desviaciones en la calidad física, asociado a nodulación, parche, presencia de orgánico y contaminación por plomo, entre otras no conformidades. En este contexto, el incremento de defectos físicos, es decir, aumento de cátodos rechazados, impacta directamente la calidad catódica global de la división, aún cuando los parámetros de calidad química se mantengan dentro de especificación de acuerdo con manual de calidad de la división.

La calidad catódica determina el éxito del negocio, también impacta directamente en la reputación de la división. Una mejora en la calidad catódica no sólo asegura mejores resultados comerciales, sino que fortalece la confianza de clientes con el desempeño de la operación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Identificar oportunidades de mejora para un aumento en la calidad catódica que impacten de manera positiva en la producción de cátodos de cobre de calidad grado A, considerando el impacto en la calidad química y calidad física durante el proceso de electro obtención (EW) en División Radomiro Tomic de CODELCO.

1.2.2 Objetivos específicos

- Reconocer los estándares físicos y químicos del producto catódico, según su clasificación, peso y embalaje de acuerdo con el manual de calidad de la división.
- Analizar el comportamiento histórico del resultado de calidad catódica del proceso electro obtención (EW).
- Identificar y analizar variables operacionales críticas en proceso de electro obtención (EW) que impactan directamente en la producción de calidad grado A.
- Establecer e interpretar correlaciones entre variables de proceso y la calidad física.
- Elaborar un plan de mejora de acuerdo con recomendaciones operacionales que impacten en mejorar la calidad física y química en el proceso de electro obtención.

2. ANTECEDENTES

2.1 Producción de cobre en Chile

De acuerdo, a información entregada por COCHILCO, la producción de cobre total en 2024 fue de 5.506.000 toneladas de cobre fino. De este total, 4.283.000 toneladas de cobre fino provinieron del procesamiento de minerales sulfurados, lo que representó el 77,8% de la producción nacional. Esto significa que solo 1.223.000 toneladas de cobre fino se produjeron a partir de minerales oxidados por la vía tradicional hidrometalúrgica SX-EW, equivalente a 22,2%. Esto refleja la grave problemática que están viviendo las plantas hidrometalúrgicas en Chile por la baja producción de cátodos vía SX-EW debido al agotamiento de minerales oxidados y la transición hacia un mayor procesamiento de minerales sulfurados.

2.2 División Radomiro Tomic

La División Radomiro Tomic se localiza en la provincia de El Loa, de la Región de Antofagasta, al pie de la cordillera de los Andes, a 45 kilómetros de la ciudad de Calama, a una altura de 3.000 metros sobre el nivel del mar. Este yacimiento, clasificado como pórfido de cobre y molibdeno, fue descubierto en la década de 1950, sin embargo, su caracterización y delineamiento se intensificaron en las últimas décadas del siglo XX, lo que permitió una comprensión más profunda del modelo geológico-estructural del depósito. La explotación del rajo comenzó en 1997 y continúa hasta la fecha, enfocándose en la obtención de minerales oxidados para producir cátodos electro obtenidos, que son placas de cobre de un metro por un metro con un porcentaje de cobre de 99,99% de pureza y un peso aproximado de 70 kilogramos cada una.

El yacimiento cuenta con reservas de 1.390 millones de toneladas de sulfuros (primarios y secundarios), con una ley promedio de 0,5%. Este mineral sulfurado calcopirítico y/o bornítico es enviado a División Chuquibambilla a través de una correa overland, directamente desde la mina rajo abierto de División Radomiro Tomic, que tiene una extensión de 7 kilómetros aproximadamente. Con la implementación de la lixiviación clorurada en DRT, se ha iniciado el procesamiento de los sulfuros secundarios como calcosina y covelina.

Durante el año 2024, el yacimiento produjo un total de 270.419 toneladas de cobre fino, entre la producción vía tradicional hidrometalúrgica y procesamiento de mineral sulfurado.

2.3 Producción

La División Radomiro Tomic constituye un hito dentro de CODELCO en comparación con sus otras siete divisiones, al ser la primera en desarrollarse integralmente desde las etapas de exploración, construcción y explotación, hasta la comercialización de cátodos electro obtenidos a través del puerto de Antofagasta. El yacimiento lleva el nombre de Radomiro Tomic en homenaje al parlamentario y diplomático nacido en Calama, quien durante la década de 1960 manifestó una constante preocupación por asegurar que el cobre fuese un recurso de los chilenos, reconocimiento otorgado en agradecimiento a su labor y compromiso con la industria nacional del cobre. La División Radomiro Tomic concentra su actividad en la producción de cátodos electro obtenidos desde su inicio de operaciones en 1997, recién en 1999 la planta de electro obtención se mantiene en régimen. Como se observa en la Figura 1 de acuerdo con registros históricos de producción y calidad catódica de DRT, entre 1999 y 2023 la calidad catódica presenta un promedio de 68%. En 2011, año en que la división alcanza su récord histórico de producción con 319.886 toneladas de cobre fino, la calidad fue de 74%. Por otra parte, en 2014 se registró el porcentaje histórico de calidad catódica de la división, con 85%. Desde 2014 a 2023, la producción ha disminuido de manera considerable debido al agotamiento de mineral oxidado y predominio de mineral sulfurado, con ello llevando una disminución en la calidad catódica. En respuesta a esta problemática, se encuentra en ejecución el proyecto de lixiviación clorurada, orientada a tratar mineral sulfurado y prolongar la vida útil de la vía tradicional hidrometalúrgica de la división más allá de 2028, mediante el uso de lixiviación con alta concentración de ion cloruro. Asimismo, avanza un proyecto estructural de la división que permitirá extender el procesamiento de sulfuros más allá de 2045, este proyecto contempla la construcción de una planta concentradora en DRT y abastecerse de agua de mar para su operación.

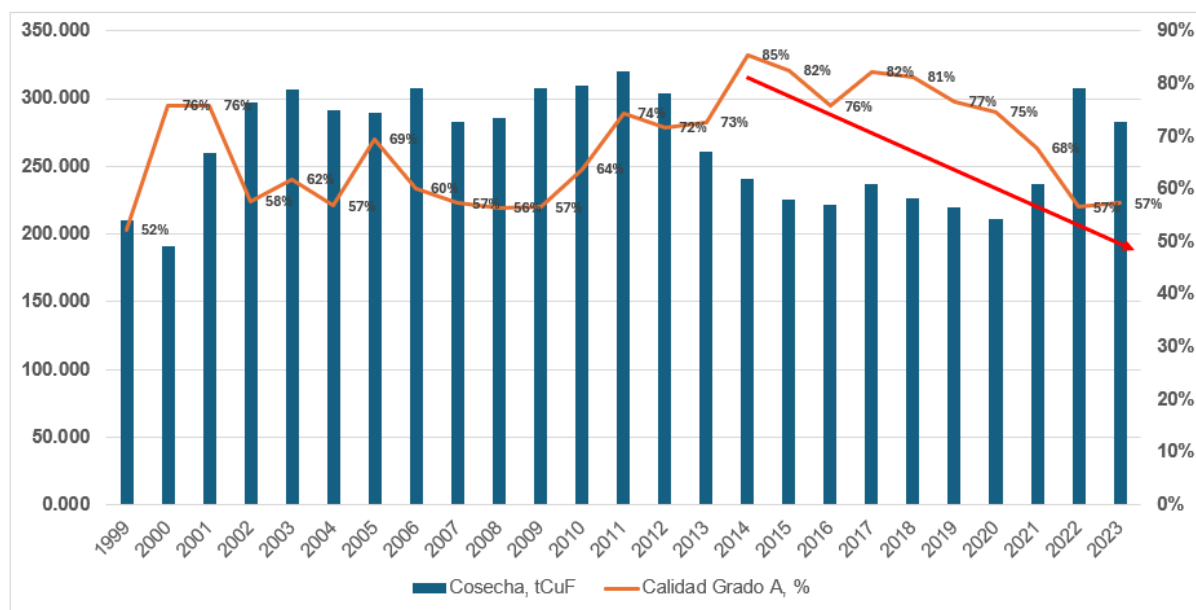


Figura 1: Registros históricos de producción y calidad catódica desde 1999 a 2023 en DRT

2.4 Descripción general del proceso en División Radomiro Tomic, CODELCO

La División Radomiro Tomic se basa en la vía tradicional hidrometalúrgica de minerales oxidados de cobre como se observa en el diagrama de flujo del proceso productivo en la Figura 2 , cuenta con dos áreas en su gerencia planta.

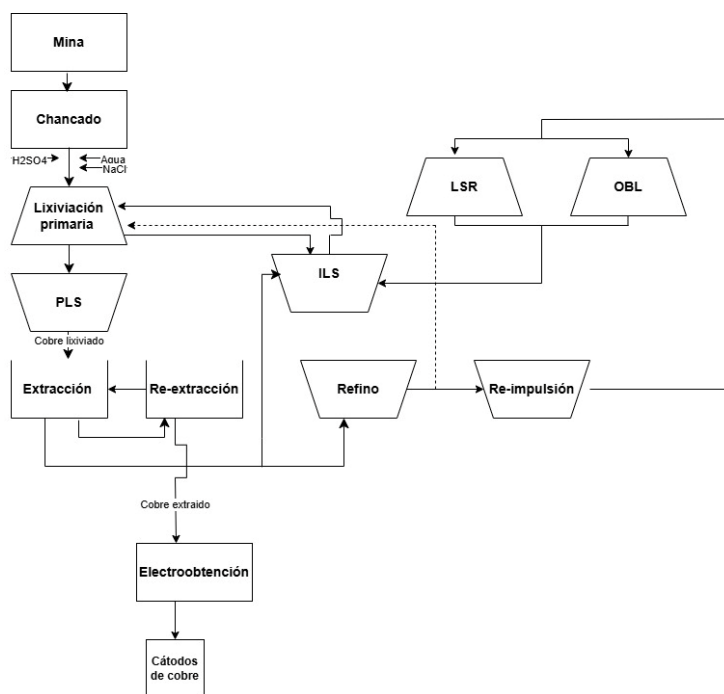


Figura 2: Diagrama de flujo de proceso productivo vía tradicional hidrometalúrgica de la división

2.4.1 Área seca

El área seca que consta de tres etapas de chancado y clasificación. Chancado primario, secundario y terciario, el objetivo fundamental es obtener un mineral con un tamaño promedio de $\frac{3}{4}$ ", este mineral se acondiciona a través de la correa transportadora para ser llevado finalmente a las pilas primarias.

2.4.2 Área húmeda

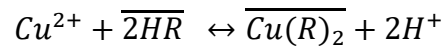
2.4.2.1 Lixiviación

Posteriormente, el área húmeda se conforma por LX-SX-EW, en la etapa de lixiviación el proceso es de gran importancia, ya que conforma el punto principal del tratamiento hidrometalúrgico, así, una buena operación de este proceso permite maximizar el beneficio obtenido en toda la planta, mediante el aumento de las recuperaciones de cobre obtenidas en esta primera etapa de lixiviación primaria. Como se muestra en el diagrama de flujo del proceso productivo en Figura 2, la piscina de ILS es el pulmón de la lixiviación ya que es alimentada por óxidos de baja ley y lixiviación secundaria de ripios y estas alimentan el riego de la lixiviación primaria.

2.4.2.2 Extracción por solventes

La planta de extracción por solventes se basa en el intercambio iónico reversible entre dos fases inmiscibles, es decir, fase orgánica (FO) y fase acuosa (FA), como se muestra en la Ecuación 1:

Ecuación 1: Reacción reversible de extracción y re-extracción en su forma iónica:



DRT cuenta con 4 trenes, tren A, B y C conformado por dos etapas de extracción, una de re-extracción y una de lavado, mientras el tren D tiene una etapa adicional de re-extracción. Como se puede observar en la Figura 2, en la etapa de extracción, el PLS se contacta con el orgánico en mezcladores y decantadores, el cobre se transfiere desde la FA a FO, generando orgánico cargado y refino. En la etapa de re-extracción, el orgánico cargado transfiere el cobre a una nueva FA, obteniendo el electrolito rico (cobre extraído) y orgánico descargado.

2.4.2.3 Electro obtención

El proceso de electro obtención es alimentado por el electrolito rico generado en la etapa de re-extracción. La nave de EW cuenta con 1.000 celdas, siendo actualmente la más grande del mundo en la industria hidrometalúrgica del cobre. Cada celda posee 60 cátodos y 61 ánodos, y se organiza en seis bancos. El banco 1 contiene 176 celdas, de las cuales 149 corresponden a celdas scavenger (de sacrificio) que reciben electrolito rico con presencia de orgánico pero alta concentración de cobre y 27 corresponde a celdas comerciales. Los bancos 2, 3 y 4 están compuestos exclusivamente por celdas comerciales, con 176 celdas por banco distribuidas en dos filas de 88; en tanto, los bancos 5 y 6 (ampliación del año 2.000) presentan 148 celdas por banco en dos filas de 74.

A continuación, se describe el proceso de EW en DRT, el electrolito rico filtrado se envía al estanque TK-412 y, mediante las bombas PP-481 a PP-484 (tres en operación y una en stand-by), se impulsa a los intercambiadores de calor (HX) para alcanzar 40 - 44 °C, alimentando luego a las 149 celdas Scavenger del banco 1. La función de estas celdas es remover arrastres de orgánico provenientes de la planta SX que pueden sobrepasar las columnas de flotación y los filtros Chuquicamata. La descarga del circuito Scavenger se dirige al estanque de recirculación TK-408, donde se mezcla con el electrolito pobre descargado desde las celdas comerciales, conformando así el circuito comercial. Esta mezcla se realiza por rebose y mediante una abertura inferior en el muro divisor del TK-408, que permite el paso hacia el otro compartimiento para completar la homogenización del electrolito. El circuito comercial se alimenta desde el TK-408 mediante las bombas PP-454 a PP-459 (cuatro operando y dos en stand-by), que impulsan la mezcla de electrolito rico y pobre hacia las celdas comerciales.

Cada banco es alimentado por rectificadores a través de troncales con corrientes de 18 a 37 kA, alcanzando densidades de corriente entre 150 y 308 A/m², con eficiencia de corriente de 92,3% y un

rechazo del 21% durante el periodo de estudio. La nave dispone de 6 rectificadores, configurados como dos rectificadores por cada par de bancos (bancos 1-2, 3-4 y 5-6), las celdas operan en serie y cada par de bancos en paralelo. El cobre se deposita sobre cátodos permanentes en ciclos de 5 a 7 días, definidos por el flujo másico a celdas y la corriente aplicada. Al finalizar el ciclo catódico, los cátodos se retiran mediante una grúa Femont, capaz de tomar 20 cátodos (un tercio) de cada una de dos celdas adyacentes, totalizando 40 cátodos por cosecha.

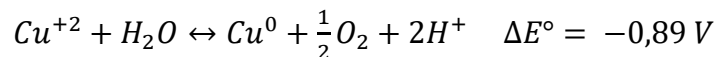
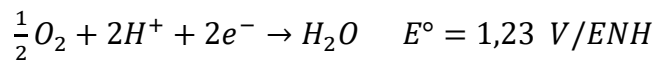
Una descripción más detallada del proceso productivo de la división se presenta en Anexo I.

3. MARCO TEORICO

3.1 Electro obtención del cobre

La electro obtención es la última etapa del procesamiento hidrometalúrgico de minerales oxidados de cobre, es un proceso electroquímico con el objetivo de recuperar el cobre como metal a partir de una sal de cobre disuelta, CuSO_4 , e ingresa a las celdas de electro obtención para ser depositado en el electrodo negativo de acero inoxidable AISI 316L para formar el cátodo de cobre. Este proceso al ser no espontáneo requiere corriente eléctrica para llevar a cabo las reacciones electroquímicas.

En este proceso se requieren de 121 electrodos inmersos en el electrolito tal es el caso de la nave de EW de DRT. En este medio ocurre una reacción óxido-reducción. El electrodo en el cual se lleva a cabo el proceso de oxidación del agua es en el ánodo, mientras que el electrodo donde ocurre la reducción de cobre se denomina cátodo y la reacción global del proceso se representa a continuación.



El potencial de celda estándar al ser un valor negativo con un valor de -0,89 V indica que la reacción es no espontánea. En consecuencia, se requiere la aplicación de energía externa para hacerla avanzar en sentido de la reducción de Cu^{+2} a Cu^0 . La corriente impuesta debe circular a través del circuito para inducir la reducción de cúprico a cobre metálico dado que los electrones circulan por el circuito externo y la corriente eléctrica la transporta los iones en el electrolito. Este ion cúprico se deposita finalmente en ambas caras del electrodo negativo, es decir, el cátodo, como se aprecia en la Figura 3.

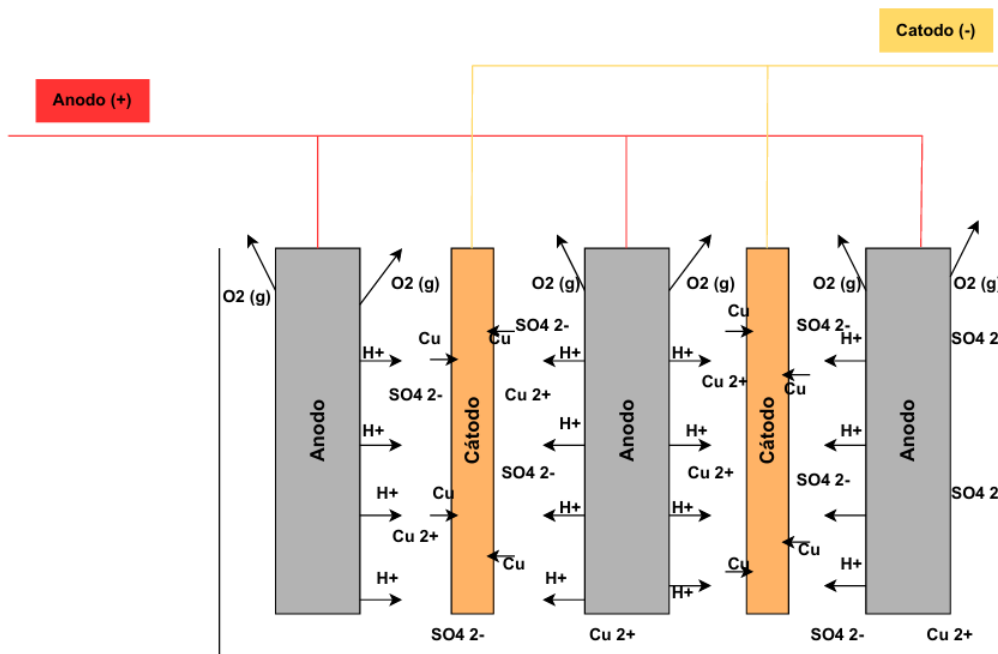


Figura 3: Celda electroquímica (diseño propio, 2026)

3.2 Cinética del proceso de EW

La cinética describe la velocidad de las reacciones electroquímicas en función de sus etapas limitantes. En la EW del cobre, el proceso no ocurre en condiciones de equilibrio, por ello, la semi reacción del cobre debe desplazarse del equilibrio mediante la polarización del electrodo como se dijo anteriormente. Esto significa que, cuando el electrodo es atravesado por una corriente eléctrica, el potencial medido no es igual al valor de equilibrio, bajo esas condiciones se dice que el electrodo se encuentra polarizado y se llama sobrepotencial como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\eta (V) = E - E_{th}$$

Donde,

η : sobrepotencial o sobretensión

E_{th} : Potencial de equilibrio termodinámico

E : Potencial dado corriente i.

Luego, de acuerdo con los valores de sobre potencial:

Si $\eta > 0$, entonces corresponde a polarización anódica y la reacción que ocurrirá será la de oxidación.

Si $\eta < 0$, entonces corresponde a polarización catódica y la reacción que ocurrirá será la de reducción.

En procesos de EW de cobre, el control cinético es en régimen intesiostático, ya que la variable que se controla es la corriente (o densidad de corriente) y como respuesta se registra el potencial del electrodo en función del tiempo. Los diagramas η Vs i , se conocen como curvas de polarización y son representaciones cinéticas que asocian velocidad de reacción i , con la energía involucrada a través de η .

El sobrepotencial depende de los mecanismos que intervienen en el proceso global y del régimen de control que predomine. Entre los posibles controles se incluyen la transferencia de carga, la transferencia de masa, los fenómenos de cristalización y los procesos de adsorción/desorción superficial. El comportamiento del sistema queda determinado por la etapa más lenta, que es la que finalmente define el control global de la reacción.

Para simplificar el mecanismo de control se puede asumir que en el proceso de EW siempre existirán procesos de transferencia de carga y transferencia de masa asociados a un esquema reaccional como etapas determinantes y por lo tanto los mecanismos de control o son electroquímicos asociados a la transferencia de carga o control difusional asociado al mecanismo de transporte de masa. Entonces, esto permite tener la siguiente representación de η Vs i , donde es posible reconocer las distintas zonas de control en la Figura 4 como:

1. Control por transferencia de carga
2. Control mixto
3. Control por transferencia de masa

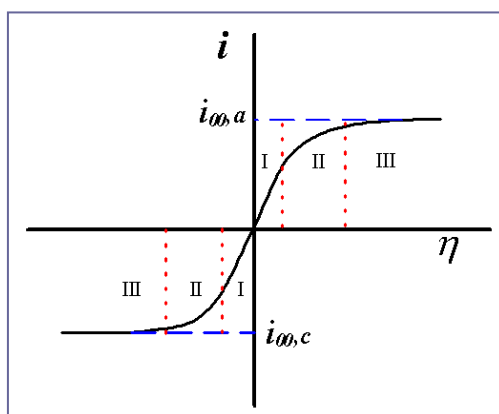


Figura 4: η vs i (Vergara, 2006)

Como se aprecia en la Figura 4, en las zonas donde predomina la transferencia de carga en las cercanías del equilibrio, el comportamiento de los procesos catódicos se describe mediante la siguiente ecuación:

$$i = i_c = i_0 \left[-\exp\left(\frac{-\beta n F \eta_c}{RT}\right) \right]$$

Sin embargo, en el caso de la EW del cobre, lejos del equilibrio la expresión relevante corresponde a la zona dominada por control mixto. Esto ocurre cuando la velocidad con la que los productos difunden hacia el seno de la solución es lenta, entonces el proceso global deja de estar controlado por la transferencia de carga y pasa a estar controlado por la transferencia de masa, como se muestra en la Figura 4.

$$i = nFD \frac{C_s - C_e}{\delta}$$

Bajo estas condiciones se alcanza un valor de densidad de corriente denominada corriente límite la cual se alcanza su valor límite cuando la concentración en la superficie del electrodo es máxima, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$i_{\infty} = nFD \frac{C_s}{\delta}$$

Finalmente, el esquema de polarización para procesos industrial de EW de cobre está dado por la Figura 5.

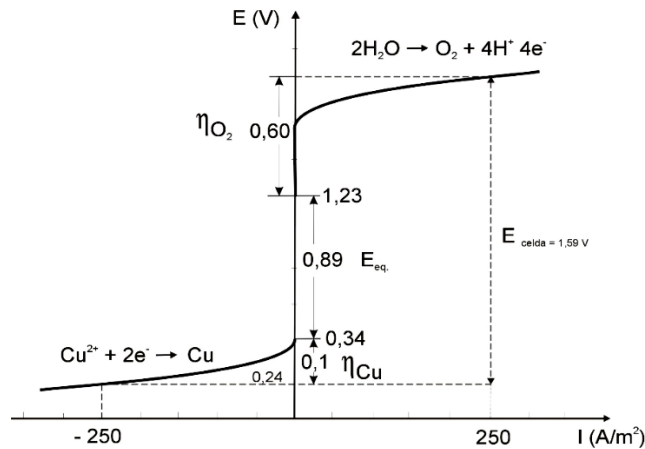


Figura 5: Esquema de polarización para EW

3.1 Corriente límite de difusión

Cuando la concentración de ion cúprico en la superficie del electrodo es igual a cero, es decir, cuando la gradiente de concentración es máxima, la corriente alcanza un valor máximo, ósea, corriente límite de difusión, que en caso de la reducción catódica de cobre está dada por la siguiente expresión:

$$i_{\infty} = -2 * F * D * \frac{[Cu_0^{2+}]}{\delta} \quad (7)$$

Donde:

Cu_0^{2+} : Concentración del ion cúprico en el seno de la solución.

F: Constante de Faraday.

D: Coeficiente de difusión del cobre.

δ : Espesor de la capa de difusión.

El valor máximo de corriente que puede alcanzar la reacción de reducción de cobre es la corriente límite de difusión, su magnitud depende principalmente del flujo de electrolito y la concentración de iones cúpricos en el electrolito.

3.2 Estructuras de crecimiento cristalino

El proceso de EW que involucra el crecimiento de un depósito masivo por medio de la aplicación de una corriente eléctrica, entonces se tiene un proceso de electro cristalización.

Fisher, realizó una clasificación para depósitos metálicos tridimensionales basada en la morfología microestructural de los depósitos obtenidos, agrupándolos en cuatro tipos de texturas.

La clasificación de Fisher se clasifica en cuatro grupos:

- Cristales aislados orientados en el campo (FI)
- Cristales orientados sobre la base (BR)
- Cristales orientados en el campo (FT)
- Cristales sin orientación privilegiada (RD o UD)

El objetivo de la clasificación de Fisher, en relación con la calidad física de los cátodos, es asociar un determinado tipo de morfología de grano con una morfología superficial específica. En este contexto, obtener un depósito del tipo FT suele asociarse con un depósito de cobre con sus cristales más orientados y menos rugoso, lo que se traduce en una superficie visualmente más uniforme y con menor rugosidad.

En general, la calidad física también se relaciona con la calidad química, ya que un depósito más homogéneo y de grano más fino (como el tipo FT) reduce la probabilidad de atrapamiento de electrolito y de incorporación de impurezas.

La descripción de cada clasificación de Fisher es descrita en Anexo II.

En este contexto, René Winand logró clasificar los tipos de crecimiento de los depósitos propuestos por Fisher a partir de dos variables operacionales evaluadas en planta: la densidad de corriente y el grado de inhibición, las cuales se describen a continuación.

1. La razón j/CM_z^+ , donde J es la densidad de corriente en el electrodo y C es la concentración de la especie en el seno de la solución.
2. El grado de inhibición, según Fischer, es causado por la presencia de aditivos y/o átomos de M_z^+ en la superficie del sustrato, así como en la doble capa o en la capa difusiva.

El diagrama es de carácter cualitativo y representa los campos de estabilidad de las diferentes microestructuras resultantes, en función de las variables de operación mencionados anteriormente, es necesario señalar que la calidad del depósito catódico depende, además, de otros factores entre los que se destacan, la distribución de corriente en electrodos,

la concentración de cobre y el nivel de impurezas en electrolito, el diagrama de Winand se muestra a continuación en la Figura 6:

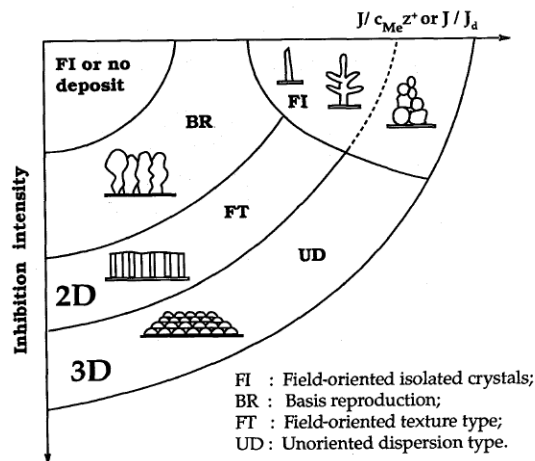


Figura 6: Diagrama de Winand (Winand, 1992)

3.3 Ley de Faraday

En el proceso de EW de cobre, la ley de Faraday permite estimar la masa de cobre que se depositará por celda, o banco en general. Durante el proceso electrolisis de cúprico a cobre metálico, la masa de cobre es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica transferida.

Los cátodos deben ser cosechados de las celdas con un peso mínimo de cobre depositado, con el fin de minimizar problemas posteriores como, dificultad de despegue en máquina despegadora por un exceso o falta de peso.

Los postulados se plantean en la ecuación 5:

$$M = \frac{p_{at} \times I \times A_t \times t \times \eta_c}{n \times F} \quad (5)$$

Donde,

M : Masa de cobre depositado, en g.

p_{at} : Peso molecular del elemento, en gramos por mol.

I : Intensidad de corriente, en Amper.

A_t : Área total expuesta de cátodos para la electrodeposición, en m².

n : Número de electrones equivalentes intercambiados en la reacción, en gramos equivalentes por mol.

F : Constante de Faraday, en Coulomb por gramo equivalente.

η_c : Eficiencia de corriente catódica, en porcentaje.

La ley de Faraday considera condiciones ideales, donde asume que toda la corriente suministrada al proceso es utilizada para depositar cobre en el cátodo, en la práctica esto no es así ya que existen diversos factores que contribuyen al consumo de corriente, tales como:

- Reacciones parásitas.
- Cortocircuitos.
- Fugas de corriente.
- Orden y limpieza de la operación (housekeeping).

En consecuencia, en la operación se emplea el concepto de eficiencia de corriente, clave por su impacto directo en los costos. Una mayor eficiencia indica que la producción de cobre electrolítico se realiza a menor costo, al reducirse las pérdidas de corriente. No obstante, el desempeño también se ve afectado por el consumo de voltaje de las celdas, el cual no necesariamente se origina por las reacciones electroquímicas involucradas sino puede deberse, por ejemplo, mal contacto de electrodos con barra equipotencial.

Ademas, la eficiencia de corriente se calcula:

$$\eta_c = \frac{\text{Masa real depositada}}{\text{Masa teórica a depositar}} = \frac{M_{real}}{M_{th}}$$

En las plantas de electro obtención, este valor de eficiencia de corriente suele oscilar entre 85 - 95% (Schlesinger et al., 2011).

3.4 Calidad catódica

En el proceso de EW la calidad catódica se distingue en calidad física y calidad química, de acuerdo con este criterio se analiza la calidad del producto final como se aprecia en la Figura 7, en EW las impurezas más relevantes a controlar en el cátodo son azufre, plomo y hierro.

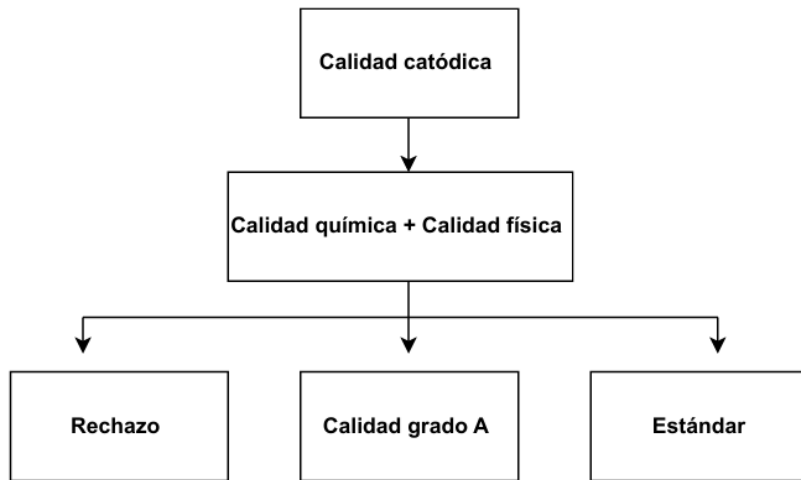


Figura 7: Desglose de calidad catódica (Diseño propio, 2026)

A continuación, se distingue la diferencia entre calidad física y calidad química,

3.4.1 Calidad física

La morfología del depósito es un factor determinante en la calidad del producto final. En particular, una calidad física notable busca obtener cátodos libres de defectos físicos, como dendritas, cuya aparición suele asociarse a condiciones de operación fuera de parámetros, por ejemplo, densidad de corriente elevadas (o bajas), y/o una dosificación inadecuada de aditivos destinados a nivelar el depósito y evitar la formación de estas estructuras. En este contexto resulta fundamental promover la formación de un depósito del tipo FT, de acuerdo con el diagrama de Winand.

La calidad física se relaciona con el aspecto superficial del cátodo, es decir, que no tenga manchas y defectos en su morfología. Se evalúa lo compacto, adherencia y rugosidad del depósito, que tenga un cierto brillo y resistencia mecánica. Los eventos más significativos que se analizan en la calidad

física son presencia de orgánico que viene de la etapa de re-extracción (planta de SX), nodulación (en cantidad y tamaño de grano), cortocircuitos y sulfatación, entre otros.

3.4.2 Calidad química

La calidad química está estrictamente relacionada con la concentración de impurezas que tiene el cátodo de cobre electro obtenido. Se considera la presencia de ciertas impurezas para alcanzar un producto grado A, como se dijo anteriormente las más relevantes son el azufre (S), plomo (Pb) y hierro (Fe) con cantidades que no deben superar los 15, 5 y 10 ppm respectivamente. La bolsa de metales de Londres (LME) define la norma de máxima cantidad de distintas impurezas para ser comercializado como cátodo grado A , Tabla 1.

Tabla 1: LME Special Contract Rules for Copper Grade A Quality: ASTM B115-10 (2021) Estándar Specification for Electrolytic Copper Cathode (Cathode Grade 1)

Elemento	ppm, máximo
Se	2
Te	2
Bi	1
Sb	4
Pb	5
As	5
Fe	10
Ni	10
Sn	5
S	15
Ag	25
Máximo total	65

La calidad catódica constituye una variable de salida fundamental, no sólo por los antecedentes que entrega sobre el desempeño del proceso catódico y anódico, sino también por el beneficio económico asociado. El mercado mundial premia la calidad con un determinado monto extra en US\$/t cuando el cobre es clasificado como grado A, este valor es de 400 US\$/t actualmente.

3.5 Clasificación de calidad catódica en División Radomiro Tomic

En División Radomiro Tomic, mediante el manual de calidad se aplica un estándar de clasificación a los cátodos en los cuales se toma en cuenta la calidad química y física. La clasificación de los cátodos en DRT son:

- Grado RT (Grado A)
- Grado estándar 1 (STD1)
- Grado estándar 2 (STD2)
- Grado estándar 3 (STD3)
- Off grade

3.5.1 Calidad química en DRT

Se refiere a la cantidad mínima de impurezas de elementos químicos que puede afectar negativamente la calidad, incluso cuando dichos valores son inferiores a los porcentajes exigidos por la London Metal Exchange (LME).

Las principales impurezas en el proceso de EW son plomo, azufre y hierro. En la Tabla 2. se muestra el criterio de calidad química, de acuerdo con el máximo permisible por grado de calidad.

Tabla 2: Contenidos máximos de impurezas para cátodos en DRT

Elemento	Grado RT	STD 1	STD 2	STD 3	Off grade
Plomo	3	5	25	70	70
Azufre	9	15	34	50	50
Hierro	5	10	25	30	30

3.5.2 Calidad física en DRT

Hace referencia a los requisitos morfológicos del sustrato (depósito) que debe cumplir un cátodo en la división. Un cátodo con buena calidad física presenta una superficie compacta y uniforme, sin defectos visibles. Entre los defectos comunes se encuentra la nodulación, generalmente asociada a altas concentraciones de sólidos en suspensión (TSS) y/o densidades de corriente variables, también se asocian otros defectos físicos que alteran el aspecto físico del cátodo e influyen directamente en la calidad final, en la Tabla 3 se presenta la clasificación de la calidad física de acuerdo con los estándares establecidos por la División Radomiro Tomic.

Tabla 3: Clasificación de productos de División Radomiro Tomic

Clasificación de calidad física		Grado RT	STD 1	STD 2	STD 3
Superficie de la placa		- Sin cortocircuitos - Sin orgánico - Border regulares y placas totalmente verticales - Sin sulfato - Sin plomo	- Sin cortocircuito - Sin orgánico - Mínimas irregularidades en los bordes - Sin sulfato - Sin plomo	- Con cortocircuitos - Sin orgánico - Bordes irregulares - sulfatación en menor grado - Presencia de plomo	- Con cortocircuitos - Sin orgánico - Bordes irregulares - sulfatación en menor grado - Presencia de plomo
Nodulación	Internos	- Nódulos $\leq 15\%$ - $h \leq 5$ mm	- $15\% < \text{Nódulos} \leq 50\%$ - $h \leq 6$ mm	- $50\% < \text{Nódulos} \leq 70\%$ - $6 \text{ mm} \leq h \leq 9 \text{ mm}$	- Nódulos $> 70\%$ - $h > 9$ mm
	Superficiales	- Nódulos $\leq 10\%$ - $h \leq 5$ mm	- $10\% < \text{Nódulos} \leq 30\%$ - $h \leq 8$ mm	- $30\% < \text{Nódulos} \leq 60\%$ - $8 \text{ mm} \leq h \leq 20 \text{ mm}$	- Nódulos $> 60\%$ - $h > 20$ mm
Falta deposito		Exento	Sin pérdida de rigidez	Moderada pérdida total de rigidez $\leq 2\%$ en total	Moderada pérdida total de rigidez $\leq 3\%$ en total
Plomo	Diseminado	Exento	Exento	$Pb \leq 15\%$	$Pb > 15\%$
	Laminilla	Exento	Exento	$Pb \leq 15 \text{ cm}$	$Pb > 15 \text{ cm}$
	Ocluido	Exento	Exento	$Pb \leq 6\%$	$Pb > 6\%$
Corto circuito		Exento	Exento	$CC \leq 3\%$	$CC > 3\%$
Parche		Exento	Exento	$\text{Parche} \leq 3\%$	$\text{Parche} > 3\%$
Orgánico		Exento	Exento	Exento	Exento
Sulfato		Exento	Exento	Exento	Sulfato $> 50\%$
Cordon		Espesor $\leq 1 \text{ cm}$ no poroso	$1 \text{ cm} < \text{Espesor} \leq 2 \text{ cm}$ poroso	Espesor $> 2 \text{ cm}$ poroso	No aplica

3.6 Diseño de planta

3.6.1 Celda de electro obtención

El proceso de electro obtención se lleva a cabo en una nave de electro obtención, cuyo interior posee celdas de electro obtención que se compone de n cátodos y $n+1$ ánodos. En el caso de la División Radomiro Tomic la nave cuenta con 1000 celdas, distribuidas en 6 bancos, banco 1, 2, 3 y 4 con 176 celdas cada uno, 88 celdas por fila y banco 5 y 6 con 148 celdas cada uno, 74 por fila. Cada celda por 60 cátodos y 61 ánodos dispuestas en forma back to back, de tal forma que la alimentación y descarga del electrolito se realiza por la misma pared lateral, lo que permite utilizar una técnica simplificada de cosecha de cátodos, que se puede levantar cátodos de dos celdas contiguas, así reduciendo el número de viajes de la grúa.

Los electrodos, es decir, 60 cátodos y 61 ánodos (una celda) se disponen de la siguiente manera como se muestra en la Figura 8.

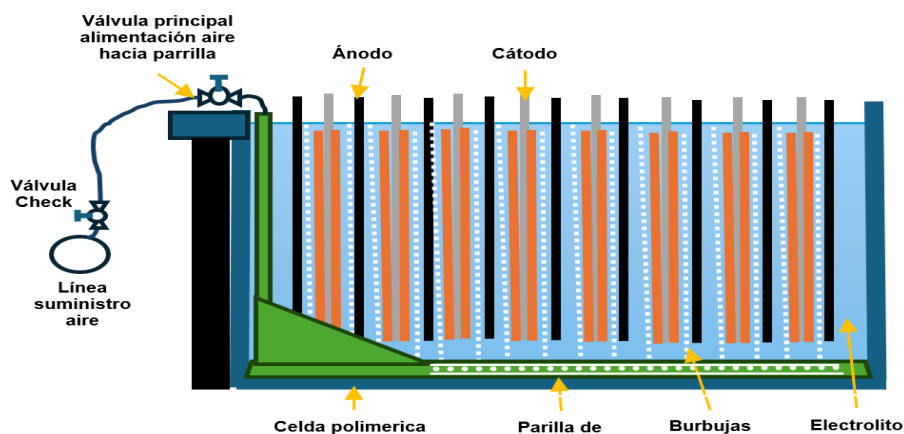


Figura 8: Esquema de celda de EW de DRT

3.6.2 Ánodo

El ánodo corresponde al electrodo positivo de la celda de EW y su función principal es conducir la corriente eléctrica dentro del sistema y cerrar el circuito eléctrico. Está fabricado con una aleación Pb–Ca–Sn, con composiciones típicas de 1,2–1,5% de Sn, 0,06-0,08% de Ca y el balance en plomo (aproximadamente 98,4–98,7% de Pb). Sus dimensiones son 1.192 mm × 936 mm, con un espesor de 7,5 mm (Figura 9), e incorpora una barra de cobre soldada en la parte superior para asegurar el contacto eléctrico.

Está diseñado para resistir ambientes corrosivos, principalmente la descomposición del agua, dando a lugar la reacción de oxidación del agua, liberando oxígeno, además, ocurre en conjunto la reacción anódica propia de la oxidación de plomo.

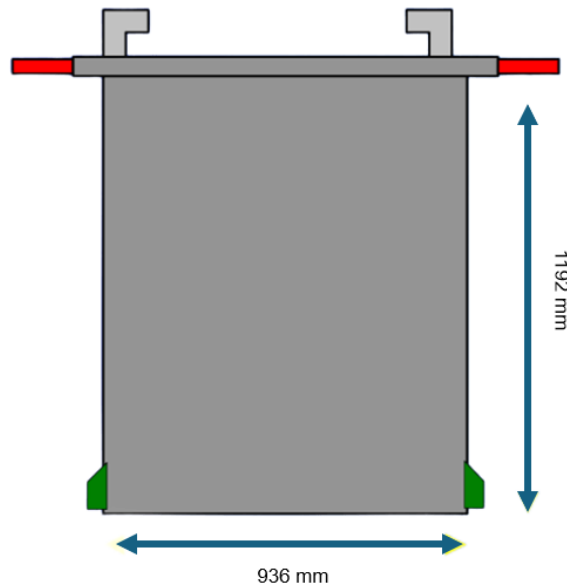
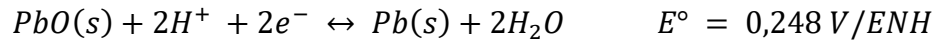
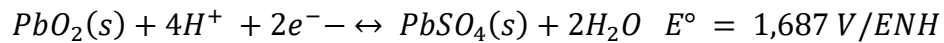


Figura 9: Ánodo de Pb-Ca-Sn de DRT (Imagen propia, 2025)

Existen tres reacciones principales en el ánodo:



En el proceso de EW de cobre, el plomo es una de las principales impurezas en los cátodos de cobre que proviene de los ánodos. La estructura de la película de dióxido de plomo es compleja conteniendo en su interior sulfato de plomo, y dos formas de dióxido de plomo, el α y β . Esta capa tiene cambios en el tiempo debido a que es afectada por la presencia de impurezas como Mn^{2+} , Cl^- , Fe^{2+} y es poco estable. Cada vez que la intensidad de corriente sea cero tiende a reducirse y se desprende en partículas finas de óxido y sulfato de plomo.

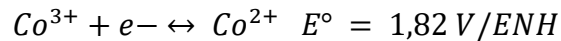
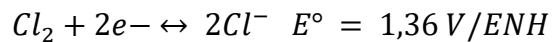
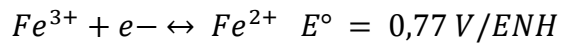
Estas reacciones originan la formación de una capa transformada sobre el ánodo, constituida por una mezcla de óxidos y sulfatos de plomo. Los productos de corrosión presentan características distintas, las cuales determinan la calidad de dicha capa. Idealmente, esta debe ser compacta, conductora y adherente, de modo que no se desprenda. Los productos de corrosión pueden

presentarse como tipo polvo (TSS) o como cascarilla; si se desprenden, pueden permanecer en suspensión y contaminar el cátodo (Figura 10).



Figura 10: Corrosión anódica producto de celda des energizada (Imagen propia, 2025)

Adicionalmente, en el ánodo ocurren reacciones secundarias anódicas, tales como:



3.6.3 Cátodo

El cátodo es el electrodo negativo en la celda de EW, es donde ocurre la reacción de reducción. Durante este proceso, los iones metálicos, como el ion cúprico, migran hacia el electrodo negativo (cátodo) debido a la aplicación de una diferencia de potencial en un tiempo determinado para permitir obtener una masa de cobre determinada en el área del cátodo permanente de 1 m^2 por cara. En general, se utilizan cátodos permanentes de acero inoxidable AISI 316L como electrodo negativo, tal es el caso de DRT en el cual utilizan como electrodos negativos, cátodos permanentes de acero inoxidable AISI 316L.

Los cátodos permanentes de acero inoxidable AISI 316L se obtiene de la aleación metálica de hierro, enriquecido con cromo, níquel y molibdeno. Esta adición de molibdeno incrementa la resistencia a la corrosión y a soluciones clorhídricas, además de mayor resistencia a altas temperaturas. (Sánchez Arcia, Angela Helena, 2022)

Los cátodos permanentes pueden sufrir corrosión por pitting, exceso de adherencia, formación de estrías, deformación de la barra. Las definiciones de problemas de los cátodos permanentes pueden ser leídos en Anexo III.

Actualmente, DRT se abastece de cátodos permanentes de acero Inoxidable AISI 316L por las empresas ICL, CAID y Cobra, las medidas específicas son 1.232 mm x 1.018 mm x 3,10 mm, con $1m^2$ de área de depositación por cara como se muestra en la Figura 11. Los electrodos de ICL y CAID están aprobados pero los de Cobra están en estudio.

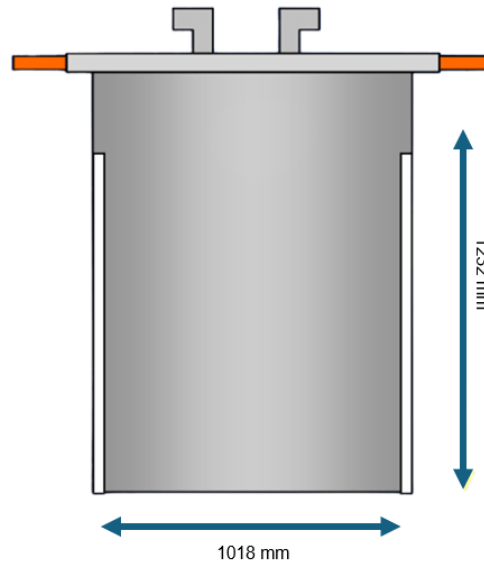


Figura 11: Cátodo permanente de INOX AISI 316L de DRT (Imagen propia, 2025)

La vida útil de los cátodos permanentes varía entre tres y cinco años, dependiendo de factores como las condiciones de operación, el manejo de la nave y la calidad de fabricación. Los aspectos fundamentales a considerar el uso de cátodos permanentes en una nave de EW se muestran en Anexo IV.

3.6.4 Barra equipotencial

La barra equipotencial del tipo asturiana va dispuesta en cada celda de los bancos, esta permite que entre todos los cátodos y ánodos de la celda exista el mismo voltaje (aproximadamente 1.8 a 2.0 V), cabe recordar que el circuito eléctrico de las celdas es en serie y el de los bancos es en paralelo. Por lo que, si existe un mal contacto de sólo un cátodo con la barra equipotencial, la densidad de corriente que circula a través de los cátodos variará en función de la resistencia entre el ánodo y el cátodo. La revisión y/o cambio de esta se realiza cuando hay actividades planificadas de desborde de celdas.

3.6.5 Aisladores anódicos

Son piezas plásticas instaladas en el cuerpo de los ánodos con el objetivo de evitar el contacto físico con los cátodos, es decir, para evitar la existencia de corto circuitos. En DRT, los aisladores anódicos tipo delta son instalados en el extremo inferior del ánodo considerando que es la zona de mayor acercamiento entre los electrodos como consecuencia de la pérdida de verticalidad (pandeo) (Figura 12).



Figura 12: Ánodo con aislador anódico tipo delta (Imagen propia, 2025)

3.6.6 Ánodos con rigidizadores

Los ánodos con rigidizadores, al igual que aisladores anódicos, contribuyen a prevenir la generación de corto circuitos para evitar el contacto entre ánodo y cátodo, también van instalados en la parte inferior de los ánodos. En DRT estos aisladores es una tecnología nueva ya que los aisladores anódicos tienden a caerse al interior de la celda, por lo que los rigidizadores se han vuelto una buena solución al problema de contacto entre ánodo y cátodo, además, de mantener el ánodo rígido con una mínima posibilidad que se genere el fenómeno de la pérdida de verticalidad del ánodo. (Figura 13)



Figura 13: Ánodos con rigidizadores en rack (Imagen propia, 2025)

3.6.7 Capping board

Los capping boards son piezas que se instalan sobre las barras equipo potenciales con el objetivo de aislar eléctricamente los electrodos (ánodo o cátodo), en función la polaridad de las celdas, es decir, en DRT el cátodo siempre será negativo y ánodo positivo, a menos que debido a baja corriente eléctrica se inviertan las polaridades.

Se requiere que los capping boards presenten una alta resistencia a la temperatura, corrosión por el ácido y a la ruptura mecánica del dispositivo. Si bien, existen varios diseños de capping boards, pueden ser fabricados en forma individual, es decir, para un par ánodo-cátodo, para un grupo de electrodos, o en una sola tira para una celda completa. En DRT, el diseño de capping board que se utiliza es individual.

3.6.8 Cubre bordes de electrodos

La función de los cubre bordes en los cátodos es que impiden que el ion cúprico (Cu^{2+}) se deposite en los bordes de los cátodos permanentes, con el objetivo de facilitar el despegue del cobre en la máquina despegadora de cátodos (MDC).

Es importante considerar el housekeeping de los cátodos permanentes, si un cátodo permanente ha pasado varias veces por mantención (especialmente por la etapa de pulido con disco de zircón), pierde grosor y el cubre borde no podrá instalarse correctamente.

3.6.9 Nuevas tecnologías

Las tecnologías existentes son distribuidor de flujo de electrolito y sistemas de parrillas de aireación. Para una mejor comprensión de estas tecnologías, ver Anexo VI.

3.7 Valores de diseño de variables de proceso en nave de EW de DRT

Durante el diseño de la planta de EW de División Radomiro Tomic, se definieron rangos de variables de proceso para asegurar el buen comportamiento del proceso de electro obtención de cobre.

Tabla 4: Variables de diseño de planta de EW en DRT

Variable	Rango de diseño
Temperatura electrolito, °C	43 – 46
Concentración de ácido en spent, g/L	190 – 200
Concentración de cobre en spent, g/L	38 – 41
Concentración de ion cloruro en spent, ppm	20 – 44
Concentración de cobre en avance, g/L	45 – 56
Concentración de sólidos en suspensión, ppm	>30 ppm
Flujo a celdas, m ³ /h	15 – 21
Densidad de corriente, A/m ²	150 – 308

3.8 Variables de proceso

Las variables de proceso en la EW de cobre afectan de manera directa al producto final, es decir, en la calidad del cátodo y la eficiencia del proceso. Por esta razón se debe mantener las variables de proceso en un rango óptimo operacional, es decir, que estén dentro de un límite de control inferior (LCI) y límite de control superior (LCS) para asegurar un producto final con la más alta calidad que califique como cátodo grado A dentro de los estándares de London Metal Exchange (LME).

3.8.1 Composición del electrolito

El electrolito, contiene impurezas no deseadas que interfieren en la calidad catódica, que dependiendo de la concentración en la que se encuentren, genera pérdida de la calidad catódica y en consecuencia en la eficiencia del proceso. Las impurezas que existen en el electrolito pueden ser propias de este debido a la composición mineralógica del mineral lixiviado o pueden ser arrastradas por etapas anteriores al proceso de electro obtención como en extracción por solventes (SX) o generadas en lixiviación por sólidos arrastrados en canaletas de pilas de lixiviación.

El electrolito que ingresa a las celdas de electro obtención contiene distintos iones que afectan de manera negativa a la eficiencia del proceso, obteniendo un depósito catódico de menor calidad.

Por esto, una adecuada composición de electrolito es fundamental para lograr cátodos de la más alta calidad, como la calidad grado A. Aunque en las celdas ingresa tanto electrolito rico como sale

electrolito pobre, la composición de cada uno es crucial para minimizar la presencia de impurezas solubles y sólidos en suspensión y maximizar la eficiencia del proceso.

3.8.1.1 Concentración de cobre

La concentración de cobre en el electrolito de alimentación a la celda incide directamente en el valor de la corriente límite de difusión, ya que una de las variables de proceso de la que depende dicho valor es la concentración de cobre disponible en el electrolito, por lo mismo se debe operar con una concentración de cobre lo más alta posible ya que esto tiene un efecto directo sobre la estructura cristalina y crecimiento del depósito, en consecuencia, sobre la calidad catódica, pero hasta un cierto valor de concentración ya que operar con altas concentraciones de cobre implica el riesgo de cristalizar sulfato en las líneas y estanques de recirculación.

3.8.1.2 Ion cloruro

Su presencia se atribuye a arrastres de fase acuosa en la fase orgánica provenientes de la etapa de re-extracción, como consecuencia de un lavado deficiente en la planta de SX, su principal efecto en el proceso de EW es el impacto en la adherencia del depósito de cobre en los cátodos permanentes, considerando el rol que juega el ion cloruro como afinador de grano, una concentración mayor a 40 ppm genera problemas en la operación como la corrosión por pitting en la zona de la interfase electrolito - ambiente, cuyo efecto repercute directamente en la duración de los cátodos permanentes de INOX AISI 316L, nodulación en el depósito de cobre y dificultad para realizar el despegue del depósito de cobre en la máquina despegadora de cátodos.

El cloro gaseoso generado cuando el electrolito presenta altas concentraciones de ion cloruro y simultáneamente, se opera a elevados valores de densidad de corriente, no sólo afecta a los cátodos permanentes por la generación de “pitting”, sino también genera problemas de corrosión de los ánodos de plomo.

El ion cloruro, en concentraciones inferiores a 30 ppm, actúa como afinador de grano, favoreciendo la formación de depósitos más compactos y de grano fino. Al disminuir la rugosidad superficial, se reduce la probabilidad de atrapamiento de electrolito.

Actualmente, DRT se encuentra en transición desde una lixiviación convencional hacia una lixiviación clorurada, incorporando cloruro de sodio en las soluciones de riego para mejorar la lixiviación de sulfuros secundarios. Esta condición incrementa la probabilidad de ingreso de altas concentraciones de ion cloruro, las que podrían llegar a la nave de EW por lavado deficiente en planta de SX.

Actualmente DRT, se encuentra trabajando con niveles de ion cloruro en electrolito rico entre 22 - 40 ppm, con una tendencia al alza.

3.8.1.3 Concentración de ácido

El pH de las soluciones de riego y de PLS así como la acidez del electrolito en las etapas de SX y EW, cumplen un papel fundamental en todas las etapas del proceso hidrometalúrgico. En la nave de EW en particular, la concentración de ácido tiene un efecto importante ya que determina la conductividad del electrolito por la movilidad iónica de los protones (H^+) y los aniones sulfato (SO_4^{-2}) que componen el electrolito soporte. La conductividad del electrolito es una condición básica para obtener un buen depósito del tipo FT, sin embargo, si la concentración de ácido es excesivamente alta, tiende a favorecer la evolución de hidrógeno en el cátodo, lo que deteriora la calidad catódica. Esto puede manifestarse en una mayor tendencia a la nodulación, un aumento de la rugosidad del depósito de cobre y la formación de depósitos menos uniformes.

En DRT, la concentración de ácido sulfúrico en electrolito rico es del rango 160 -180 g/L, mientras que un rango óptimo bibliográfico de operar plantas de EW se encuentra entre 170 a 190 g/L.

3.8.1.4 Concentración de hierro

La concentración de hierro en el electrólito viene dada por la relación Fe^{3+}/Fe^{2+} . Aunque predomina Fe^{3+} en el electrolito, su reducción a Fe^{2+} constituye una reacción parásita que consume corriente, impactando de manera significativa el consumo específico de energía (CEE) y, en consecuencia, la eficiencia de corriente, además, el ion férrico afecta directamente la calidad catódica, ya que puede oxidar el cobre metálico depositado en el cátodo y provocar su redisolución. Esto ocurre porque Fe^{3+} posee un potencial estándar mayor que el del par Cu^{2+}/Cu , por lo que actúa como agente oxidante, generando depósitos menos uniformes, con mayor rugosidad. Su función principal es incidir en el potencial redox del electrólito, si este valor se eleva demasiado, existe el riesgo de degradación del orgánico en la planta de SX).

En DRT, la concentración de hierro se mantiene bajo control, sin embargo, el hierro total en electrolito debe ser menor a 2 g/L para minimizar el hierro en el cátodo. Cuando aumenta la razón Fe^{3+}/Fe^{2+} , aunque predomina Fe^{3+} , se regula continuamente mediante dos alternativas: la adición de sulfato de hierro y/o descarte de electrólito.

3.8.1.5 Concentración de nitrato

En la EW de cobre, el anión nitrato puede actuar como agente oxidante y, a concentraciones elevadas (por ejemplo, superiores a 100 ppm), favorecer la oxidación del ánodo de plomo. Dado que el electrolito soporte presenta sulfato, el plomo oxidado del ánodo reacciona y precipita como sulfato de plomo, aumentando los sólidos en suspensión al interior de la celda, con un efecto negativo en la calidad catódica del depósito de cobre. Por esta razón se estima prudente no sobrepasar una concentración de 40 ppm de nitrato en el electrolito.

Ademas, el anión nitrato suele ser nocivo para el proceso de re-extracción en la planta de SX debido a la nitración del extractante, lo que inhibe la transferencia de cobre desde el orgánico cargado a la fase acuosa.

3.8.1.6 Concentración de manganeso

El manganeso ingresa al electrolito a la forma de ion manganeso, y se oxida en los ánodos a dióxido de manganeso que permanece adherido sobre la superficie de los ánodos, modificando la estructura del dióxido de plomo y así desprendiéndose, generando un aumento en la cantidad de borra anódica.

La presencia de Mn^{2+} en el electrolito puede oxidarse también a Mn^{7+} formando el anión MnO_4^- . Este anión es un agente oxidante que tiende a reaccionar con el ion cloruro en el electrolito, oxidándolo a Cl_2 , el cual corresponde a un contaminante altamente indeseable.

Lo recomendable es operar aun electrolito de EW de cobre con una concentración de Mn^{2+} menor a 40 ppm.

3.8.1.7 Concentración de azufre (S)

Según las especificaciones técnicas de la LME, la concentración de azufre no debe superar las 15 ppm para que el producto final sea clasificado como cátodo Grado A del más alto estándar. La presencia de azufre en el proceso constituye una impureza inevitable, que requiere un control riguroso. La contaminación del cátodo por azufre se origina por el atrapamiento de electrolito y/o la oclusión mecánica de $PbSO_4$, sin embargo, cuando el depósito de cobre presenta rugosidades es más propenso a atrapamiento de electrolito.

La aparición de azufre en los cátodos depende de:

- Lavado deficiente del cátodo: El control adecuado del lavado del depósito de cobre durante la cosecha (en el puente grúa) se define en función del tiempo de exposición y de la forma de aplicación del operador encargado. El cobre cosechado debe lavarse oportunamente para evitar la cristalización de sulfato de cobre sobre la superficie, ya que su remoción posterior resulta difícil. Adicionalmente, se realiza un segundo lavado en la cámara de lavado, empleando agua a 70°C aproximadamente.
- Disminución de la temperatura del electrolito entrante a celdas: Se debe mantener un control adecuado de la temperatura del electrolito de 45° a 50°C para obtener depósitos de cobre de grano fino.

3.8.1.8 Concentración de plomo (Pb)

Según la tabla de elementos permisibles de la LME (Tabla 1), la concentración de plomo en los cátodos no debe superar 5 ppm. La presencia de plomo se asocia principalmente a la oxidación del ánodo y al desprendimiento de laminillas o partículas desde ánodos de aleación Pb–Ca–Sn, lo que genera borra anódica que se deposita en el fondo de la celda y puede ser levantada por el distribuidor de flujo, contaminando el depósito.

3.8.2 Flujo volumétrico

El flujo volumétrico de electrolito que ingresa a celdas modifica principalmente la corriente límite de difusión, por lo tanto, es una variable que tiene un efecto principal sobre la calidad catódica.

Los problemas asociados a un bajo o alto flujo volumétrico a celdas pueden provocar:

- Baja adherencia del depósito debido a una mala distribución de iones cúpricos en la celda.
- Modificación de la corriente límite.
- Nodulación, por consiguiente, una mala calidad física, este defecto físico se produce al tener un flujo demasiado alto ya que levantará borra anódica, provocando la oclusión de plomo en cátodos.
- Altura del electrolito dentro de la celda: si el flujo permanece muy bajo por un período prolongado y luego aumenta, la zona de depósito se desplaza, generando un doble depósito, considerado un defecto físico.

Se define el flujo volumétrico de dos maneras, primero como flujo de alimentación a celda y flujo específico. En DRT el flujo de alimentación a celda suele estar entre los $15 - 21 \text{ m}^3/\text{h}$ mientras que el flujo específico se encuentra en el rango de $2,2 - 2,9 \text{ L/min} \times \text{m}^2$ dependiendo de los bancos en operación.

Para una mejor distribución de flujo en las celdas de EW en DRT se utilizan los manifolds, que distribuyen el electrolito de alimentación a celdas mediante ductos perforados que se instalan en la base de las celdas, con el objetivo de permitir una distribución más homogénea del electrolito al interior de la celda.

3.8.3 Temperatura del electrolito

La temperatura del electrolito se controla principalmente con intercambiadores de calor, y el uso de calderas para calentar agua, en DRT existen 5 calderas, de las cuales 3 operan durante época de verano y 2 stand-by ante bajas temperaturas.

La temperatura debe ser adecuada en el rango de 41 a 48°C para las concentraciones de Cu^{2+} y H_2SO_4 presentes en la nave de EW, a fin de evitar la cristalización de sulfatos en líneas y estanques. Además, incide en la migración y difusión iónica, en general, la conductividad del electrolito aumenta

al incrementarse la temperatura, debido a la mayor movilidad de los iones en el electrolito, lo que favorece un buen depósito. También modifica, aunque en menor medida, el valor de la corriente límite de difusión. Por otro lado, la viscosidad del electrolito disminuye al elevar la temperatura, trabajar dentro de rangos permisibles asegura una viscosidad tal que los sólidos en suspensión que ingresan a las celdas decanten en el fondo y no generen nodulación en los cátodos de cobre, además, una baja temperatura del electrolito entrante a celdas favorece el contenido de azufre.

Operar con temperaturas sobre 48°C en los circuitos comerciales es costoso y dañino para el proceso ya que:

1. Aumenta notoriamente la emisión de neblina ácida.
2. Aumentan costos de operación (OPEX) por mayor consumo de combustible para poder calentar el electrolito.

En DRT, el rango de temperatura del electrolito a la entrada de las celdas Scavenger es de 40 – 44 °C, mientras que el electrolito que ingresa a las celdas comerciales opera entre 43 – 46 °C. Las temperaturas de ambos circuitos (Scavenger y Comercial) se monitorean en la sala de control (CO3) mediante termocuplas ubicadas en las entradas de las celdas. Estos parámetros pueden ajustarse tanto de forma automática como manual por el operador analista de la sala de control.

3.8.4 Densidad de corriente

De acuerdo con la Ley de Faraday, la corriente de operación (i) define la eficiencia de corriente, la calidad de los cátodos y producción de cobre, lo cual es crucial para el negocio.

En División Radomiro Tomic, la unidad de medida en planta son kilo amper y/o ampere por metro cuadrado.

La densidad de corriente es directamente proporcional a la corriente de operación aplicada y está estrechamente ligada a la cinética del depósito y, por ende, a la ley de Faraday. Con densidades de corriente bajas, el tiempo requerido para alcanzar el peso de cosecha aumenta, provocando cátodos con peso insuficiente que no cumplen al manual de calidad y eventuales problemas en la máquina despegadora de cátodos por bajo peso del depósito.

Por el contrario, densidades de corriente elevadas dependen principalmente de la disponibilidad de iones cúpricos en las celdas.

Si la corriente de operación es excesiva, igual puede generar graves problemas en los cátodos como nodulación en la parte inferior del cátodo.

La teoría dice que la densidad de corriente se define como:

$$J = \frac{I}{S}$$

Donde:

J : Densidad de corriente, en A/m^2 .

S : Superficie del depósito, en m^2 .

I : Corriente aplicada, en ampere.

DRT, opera con densidades de corriente entre 150 y 308 A/m^2 , siendo 150 A/m^2 (18 kA) el mínimo requerido para sembrar y cosechar. Todo esto en función de la intensidad de corriente entregada por el transfo-rectificador para poder lograr un peso del cátodo electro obtenido entre 65 - 85 kg, es decir, 33 - 42.5 kg cada cara.

3.8.5 Sólidos en suspensión (TSS)

Los sólidos en suspensión (TSS) frecuentemente vienen por arrastres de procesos anteriores, por ejemplo, de las pilas de lixiviación que posteriormente llegan a planta de extracción por solventes y terminan en las celdas de la nave de electro obtención (EW). Los sólidos en suspensión tienen un efecto negativo en el electrolito que este contenido en las celdas de EW, ya que aumentan su viscosidad y generan desviaciones en las líneas de campo eléctrico (es decir, una mala distribución de corriente en el cátodo) generando defectos físicos como es la nodulación.

Los sólidos en suspensión en DRT no tienen que superar las 30 ppm, eso se especifica como límite de control máximo, por tal razón se agrega como aditivos floculantes en el electrolito, se añade guar con el objetivo de suavizar la superficie del depósito catódico, disminuyendo la presencia de nódulos, produciendo un grano fino, duro y homogéneo.

3.8.6 Adición de reactivos

La dosificación de reactivos en el electrolito de la nave de electro obtención (EW) debe mantenerse bajo control, ya que su degradación o una adición excesiva sin una dosificación adecuada puede afectar negativamente la calidad catódica.

En DRT, se añaden de acuerdo con el valor de densidad de corriente, la cual debe ser el 30% de la densidad de corriente. Actualmente, se están utilizando 4 reactivos químicos para mejorar las propiedades del depósito, estos son:

3.8.6.1 Guar

Reactivo orgánico del grupo de los polisacáridos que se utiliza para mantener una adecuada concentración de sólidos en suspensión (TSS) y, por lo tanto, aumentar la calidad física y química del depósito de cobre, su característica principal es permitir suavizar la superficie del depósito, disminuyendo la presencia de nódulos, produciendo un grano fino, duro y homogéneo. (Figura 14)

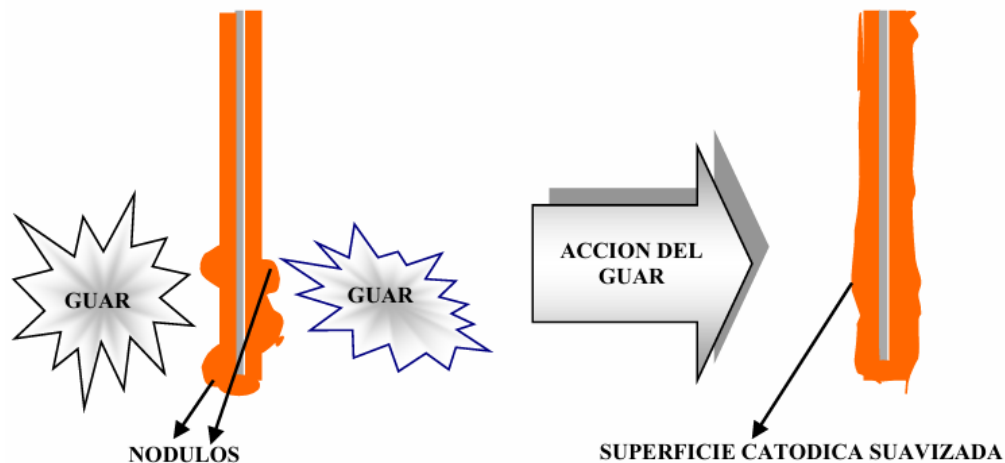


Figura 14: Efecto del guar sobre la superficie catódica (Costella, 2024)

3.8.6.2 DXG-7

Es una dextrina que actúa como afinador de grano incidiendo, directamente, sobre la estructura cristalina del depósito de cobre. Lo que produce este afinador de grano es, aumentar el brillo del depósito al producir una estructura de grano más fina y ordenada, es decir, que el depósito esté libre de rugosidades, poros y dendritas.

Cuando se presenta nodulación en el cátodo, esta se clasifica según el diámetro de la imperfección. La nodulación se origina por la incorporación de sólidos en suspensión (TSS) al depósito, generando esferas de material sólido. Según el manual de calidad de la DRT, la nodulación no debe superar el 10% del cátodo ni exceder los 5 mm de tamaño para ser catalogado como cátodo Grado RT, el de mayor calidad en la división.

Una mezcla entre Guar y DXG-7 parece la fórmula más adecuada para controlar sólidos en suspensión (TSS) y el orgánico degradado en el electrolito, y de esta manera controlar el crecimiento cristalino en los cátodos, la proporción de dosis es 70/30 (Guar/DXG) y esta va cambiando en función de la corriente aplicada.

Por otra parte, es necesario mantener un control adecuado entre la cantidad y dosificación de estos aditivos y el nivel de descarte de electrolito pobre con objeto de evitar la contaminación del electrolito circulante.

3.8.6.3 Sulfato de cobalto

Es un aditivo con la capacidad de alargar la vida útil de los ánodos, inhibiendo la corrosión y disminuyendo la sobretensión anódica, baja el voltaje total de la celda, y por lo tanto, disminuye el consumo de energía específico. La dosificación de sulfato de cobalto actual en DRT es entre 120 - 130 ppm el cual se calcula mediante el volumen de inventario que exista, se deben reponer las pérdidas asociadas a descarte de electrolito.

En resumen, aumenta la resistencia a la corrosión del ánodo, evitando con ello el desprendimiento de plomo en laminillas y su oclusión en el depósito y por tanto aumentando la vida útil de los ánodos.

3.8.6.4 Sulfato ferroso

Aditivo para disminuir el potencial redox del electrolito. La adición del sulfato ferroso es en función del valor del potencial redox, en DRT el valor de potencial redox del electrolito no debe superar los 700 mV.

Los dos problemas fundamentales en la adición de los reactivos químicos orgánicos, es decir, de Guar y DXG-7 es sobre las condiciones de operación del electrolito (acidez y temperatura) son muy agresivas para la estructura de estos reactivos orgánicos, por lo tanto, existe una degradación en el tiempo de residencia que hay de reactivo químico orgánico en el electrolito y equivocadamente se asume que la cantidad adicionada de reactivos orgánicos, se retira en el cobre electro obtenido, pero en la práctica esto no ocurre ya que se ha evidenciado una acumulación de reactivo degradado en el electrolito, el cual impacta negativamente en la calidad catódica del depósito de cobre, este último problema se nota en el circuito comercial, dado que dicho circuito funciona con recirculación a TK-408.

Finalmente, la adición de aditivos en DRT se realiza en la planta de aditivos, ubicada en el patio de estanques. Primero, los aditivos se mezclan en un batch de 7 m³ mediante efecto Venturi, lo que favorece su incorporación y homogeneización inicial. Luego, la mezcla se transfiere a un segundo estanque, un batch de 8 m³, equipado con un mezclador tipo rastras, cuyo propósito es evitar la formación de grumos. Desde la parte inferior de este batch de 8 m³, la solución se dosifica a través de una tubería de 3" con válvula manual, que alimenta principalmente el TK-408 y, en menor medida, el TK-412.

3.9 Variables operacionales

3.9.1 Housekeeping

Las actividades de housekeeping, forman parte de las variables de entrada al proceso de electro obtención (EW) de cobre, dado que el control del housekeeping es más complejo y necesario que el control de las variables de proceso como, el flujo de electrolito, concentración de ion cúprico y temperatura. El housekeeping juega un rol fundamental en los indicadores de gestión del proceso

productivo, por ello, en Anexo V , se describen las actividades principales que deben considerarse para lograr un buen desempeño en el proceso, independiente de las variables de proceso.

3.10 Rango de operación en División Radomiro Tomic

Tabla 5: Rangos de operación de las variables de proceso durante el periodo de estudio

Variable	Media
Cobre en spent, g/L	39,2
Ácido en spent, g/L	195,9
Temperatura electrolito, C°	43,2
Ion cloruro en spent, ppm	40,6
Cobre en avance, g/L	48,4
Solidos en suspensión, ppm	19,5
Flujo a celdas, m^3/h	17,5
Densidad de corriente, A/m^2	220,6
Dosificación de DXG, g/t	75,3
Dosificación de guar, g/t	290,7

4. METODOLOGÍA

Previo al análisis de los datos de las principales variables de proceso de la nave de EW que inciden en la calidad catódica, es necesario presentar la metodología adoptada para dar respuesta a los objetivos de esta memoria. El procedimiento considera el tratamiento de la información operacional de la planta de EW, con el propósito de obtener conclusiones precisas respecto del impacto y las desviaciones en la operación del proceso de EW en DRT. La metodología se fundamenta, principalmente, en la depuración de datos comprendidos entre Febrero de 2024 y Julio de 2025, con el fin de establecer correlaciones entre las variables más relevantes de la base de datos recopilada, para mejorar continuamente la calidad química y física en la división.

Para el análisis de la calidad química, se utilizaron datos históricos de producción de cátodos en la división, los cuales se graficaron para identificar la tendencia y evolución de las principales impurezas presentes en los cátodos.

Para el análisis de calidad física, se consideraron 10 variables de proceso de acuerdo con criterio experto de la operación, utilizando minitab 19 se logró analizar la relación de la variable de salida (calidad física) con las 10 variables de entrada.

4.1 Recolección de datos

Para poder realizar un análisis sobre las variables que más afectan a la producción en la nave EW, con foco en la calidad catódica, se realizó un levantamiento de información de data histórica desde el 01 de Febrero de 2024 hasta 31 de julio de 2025, es decir, 547 días, por lo que se recolectaron datos de 18 meses sobre las principales variables que dependen del porcentaje de calidad grado A, es decir, variables calidad física de cátodos y ánodos, composición del electrolito, dosificación de aditivos, intensidad de corriente (y por consiguiente, densidad de corriente), flujo, temperatura del electrolito, sólidos en suspensión, mantenimiento de batería (cortocircuitos, barras equipotenciales, capping boards, limpieza de contactos, alineamiento de electrodos), además, los análisis químicos de cospelet realizados por laboratorio químico DRT, operador por empresa SGS, se conformó una base de datos adicional sólo para calidad química para identificar los periodos de mayor cantidad de impurezas (Pb, S, Fe) y a partir de datos facilitados por SGS (inspección de lingadas), se elaboró una base de datos adicional para determinar la calidad física de cátodos grado A por banco, presentando las no conformidades (defectos físicos) más incidentes y el porcentaje de grado A por subgrupo.

Para obtener datos de variables de proceso fue necesario el uso del software “PI ProcessBook” (Plant Information ProcessoBook) que utiliza DRT para visualizar variables de proceso en momento instantáneo, gracias a este software y un complemento de Excel, es posible obtener datos desde una fecha específica a otra, además, de información entregada por la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD).

A continuación, en la Figura 15 se muestra cómo se extrajeron los datos software “PI ProcessBook” para poder realizar análisis para la investigación:

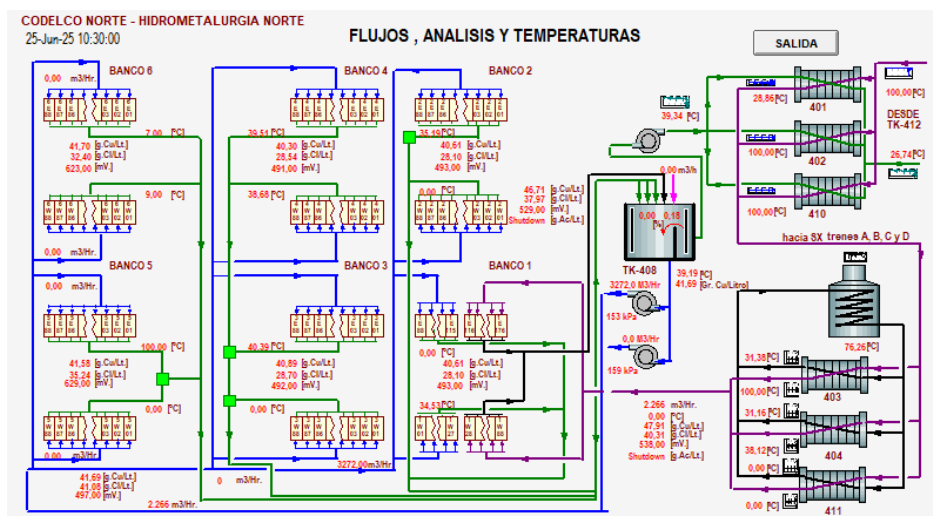


Figura 15: Visualización de layout de flujos y temperaturas en PI ProcessBook

Para empezar a extraer la información es necesario conocer el “TAG” del dato que se requiere. Para ello, se selecciona el dato deseado (Figura 16). Por ejemplo, concentración de cobre en salida de banco 1 con concentración 40,61 g/L.

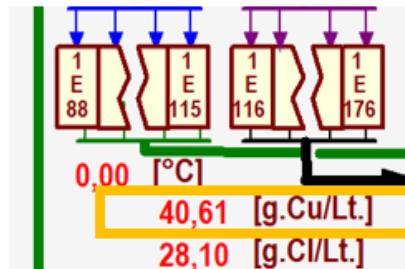


Figura 16: Visualización de datos de concentraciones de cobre y cloruro en PI ProcessBook

En la Figura 17, se indica en cuadro naranja que el dato está siendo considerado, posteriormente hay que dirigirse a la parte superior de la pantalla.

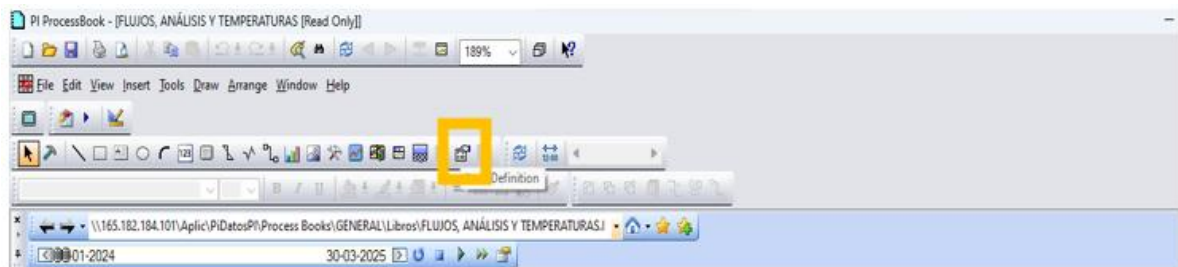


Figura 17: Parte superior de PI ProcessBook

En la parte superior de la ventana “Define value”, es necesario presionar el botón indicador por el recuadro en naranja, se abrirá la siguiente ventana. Esta ventana indica el “TAG” específico de los datos de la variable que se quiere extraer. (Figura 18)

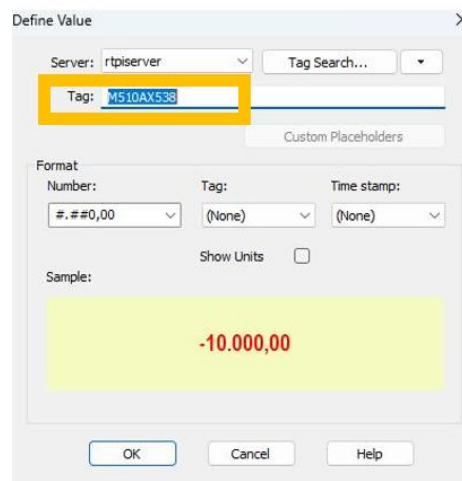


Figura 18: TAG en PI ProcessBook

Una vez obtenidos los “TAG” necesarios para la investigación en el software “Plant Information ProcessBook” es necesario abrir Excel y traspasar los datos.

Para el periodo de estudio se consideraron los bancos en operación durante las determinadas fechas entre Febrero 2024 a Julio 2025, hay que tener consideración ya que banco 3 y 4 estuvo fuera de operación desde el 22 de Enero 2024 hasta 07 de Marzo 2025, es decir, 410 días detenidos.

Para el período de estudio sólo se consideraron los bancos en operación, es decir, banco 1, 2, 5 y 6 de Febrero 2024 a Marzo 2025 y banco 1, 2, 3 y 4 desde Marzo 2025 a Julio 2025 debido que banco 3 y 4 estuvo detenido desde el 22 de enero de 2024 a 07 de marzo de 2025, es decir, 410 días detenido (75%) de los 547 días de período de estudio, además, se considera el período desde los cátodos permanentes son sembrados hasta que grúa deja las lingadas en cadena (o carro de cobre) para realizar inspección física de los cátodos cosechados y ser despegados por las máquina despegadora de cátodos (MDC) de manera esquemática se puede ver en la Figura 19.

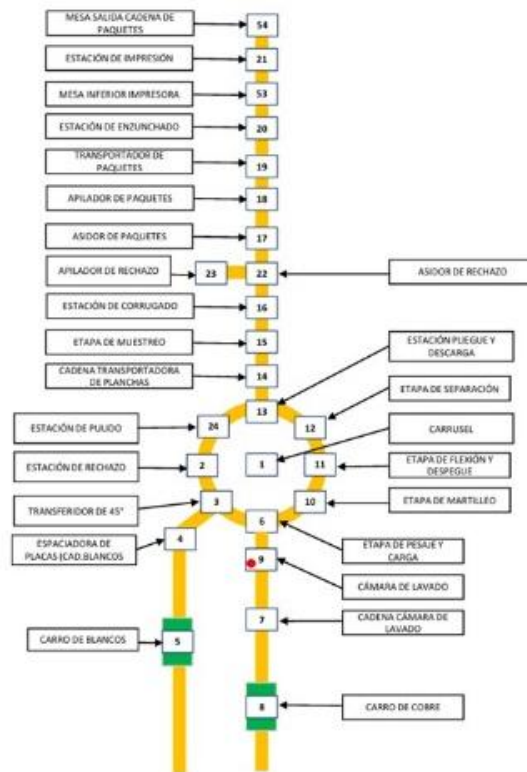


Figura 19: Pictograma de maquina despegadora de cátodos (MDC) 1 (Castro, 2025)

4.2 Preparación de datos

En una primera etapa se intentó desarrollar un modelo predictivo mediante análisis de superficie de respuesta; sin embargo, debido a que las variables de proceso no se mantienen estables durante la operación, esta aproximación no resultó adecuada. Por ello, se optó por realizar un análisis de correlación utilizando Minitab 19. En este software se consolidaron y procesaron las distintas bases de datos a partir de información recopilada en planta. Con el objetivo de identificar los factores que influyen en la producción de cátodos Grado A, se seleccionaron las principales variables de proceso (entradas) y se definieron como variables de salida los indicadores de calidad física y calidad química. La selección se efectuó según criterio experto del área de Operaciones, obteniéndose finalmente 10 variables de entrada y 2 variables de salida, las cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Variables de estudio

Variable	Detalle
Calidad catódica grado A física, %	Características físicas de los cátodos en la inspección de lingadas por SGS
Calidad catódica grado A química, %	Característica química de los cátodos por análisis químico de laboratorio
Cobre en spent, g/L	Concentración de cobre en electrolito pobre
Hierro, ppm	Concentración de hierro en cátodos
Plomo, ppm	Concentración de plomo en cátodos
Azufre, ppm	Concentración de azufre en cátodos
Ácido en spent, g/L	Concentración de ácido en electrolito pobre
Temperatura electrolito, C°	Temperatura de entrada a celdas comerciales
Ion cloruro en spent, g/L	Concentración de ion cloruro en electrolito pobre
Cobre en avance, g/L	Concentración de cobre en electrolito rico
Sólidos en suspensión, ppm	Sólidos en suspensión entrante a celdas
Flujo a celdas, m³/h	Flujo de entrada a celdas
Densidad de corriente, A/m²	Densidad de corriente de operación en nave EW
Dosificación de DXG, g/t	Dosis de afinador de grano DXG
Dosificación de guar, g/t	Dosis de guar

La duración de ciclo entre siembra - cosecha se asumen 7 días y se utiliza la media móvil de las variables de proceso durante esos 7 días. De acuerdo con los 547 días de estudio, se logran 68 ciclos de siembra y cosecha.

5. RESULTADOS

5.1.1 Análisis estadístico de calidad química

A partir de los análisis químicos realizados por laboratorio químico DRT, operado por empresa SGS, se conformó una base de datos para identificar los periodos de mayor cantidad de las principales impurezas en el proceso de EW, tal como contenido de hierro, plomo y azufre debido a su relevancia operativa y su potencial incidencia sobre la calidad catódica.

Esta base de datos permitió identificar los periodos en los que se registran aumentos significativos de dichas impurezas, así como su variabilidad y tendencia durante los 547 días.

El objetivo de este levantamiento de información y análisis es determinar si la presencia y magnitud de las impurezas involucradas en el proceso de EW compromete de manera significativa la calidad catódica.

De acuerdo con lo presentado en la Figura 20, el límite máximo permitido para obtener cátodos grado RT conforme el manual de calidad, corresponde a 10 ppm. El parámetro de control asociado a esta impureza se mantiene dentro del margen establecido, sin registro de excederse durante el período de estudio, lo que indica una operación consistente alineada para satisfacer los requisitos de calidad química por hierro.

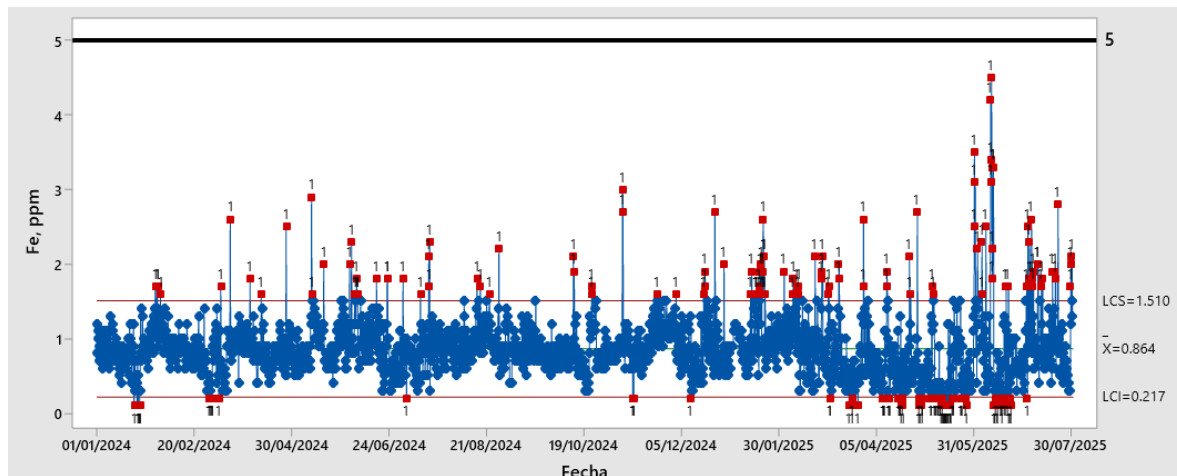


Figura 20: Contenido de hierro en cátodos nave EW

Ahora, para el caso de plomo en los cátodos producidos por DRT, se observa en la Figura 21 que el límite de control permisible es 5 ppm, cuando se supera el límite de control es coincidente con las detenciones de planta debido a la desenergización de los ánodos, favoreciendo la reducción de dióxido de plomo (PbO_2) a sulfato de plomo (PbSO_4) siendo perjudicial para la calidad fisicoquímica.

En la Figura 21, se puede evidenciar el notorio aumento de plomo en cátodos durante Febrero 2025 esto provocado por black out del sistema interconectado provocando la desenergización de

ánodos y llevando a cabo el desprendimiento de plomo en celdas que afecto de manera considerable la calidad química en Febrero 2025.

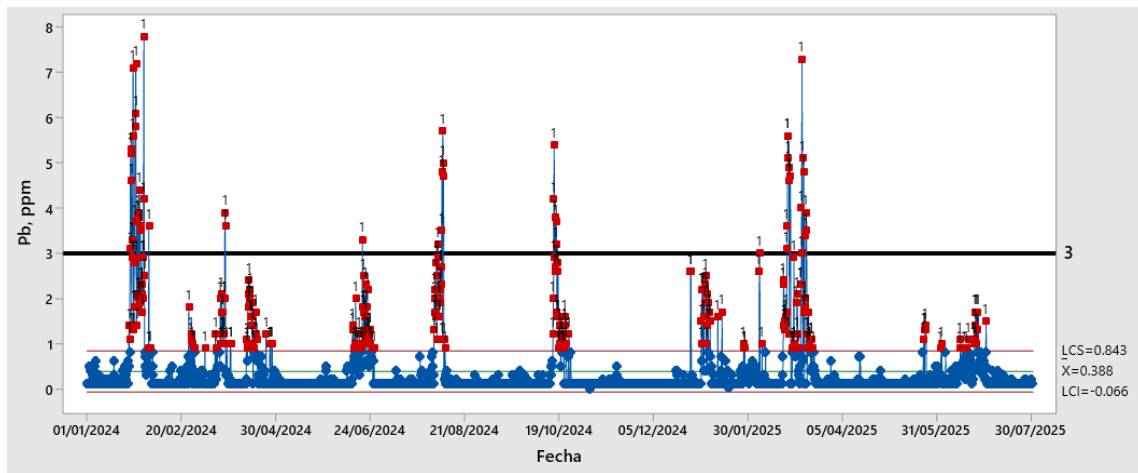


Figura 21: Contenido de plomo en cátodos nave EW

Para la impureza de azufre en los cátodos, de acuerdo con la Figura 22 no existe un patrón para identificar la causa, es un análisis que está en proceso de desarrollo de la causa de raíz.

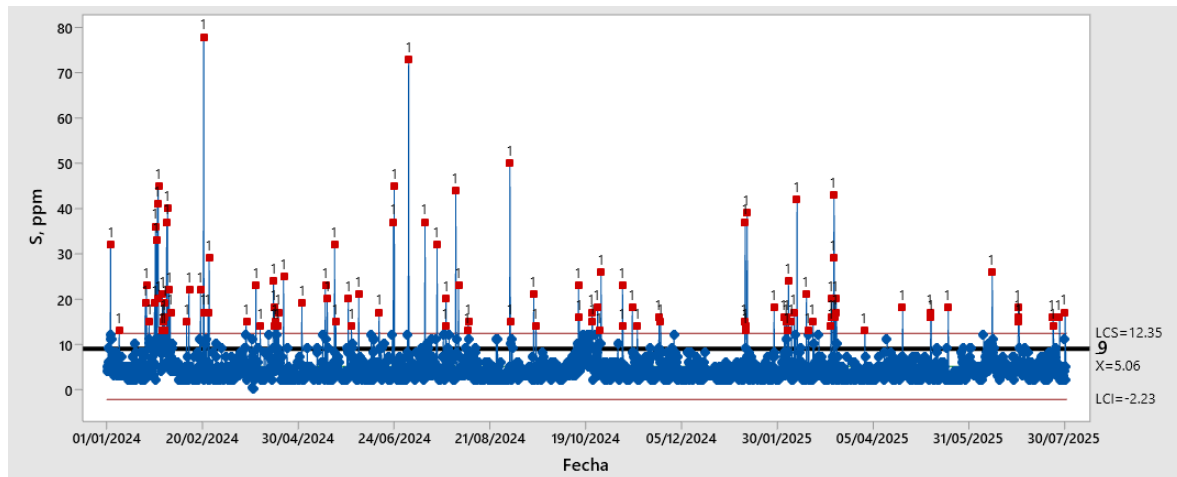


Figura 22: Contenido de azufre en cátodos nave EW

Si bien, no existe una causa de raíz, análisis en planta han verificado que se produce por atrapamiento de electrolito, debido que el electrolito proporciona el azufre por sulfato, esto ocurre cuando se realiza la cosecha. El lavado efectivo debe ser con agua caliente a presión y los operadores mantenedores deben realizar este procedimiento con estricta disciplina operacional para no comprometer el resultado de calidad química.

Finalmente, se muestra un análisis global de la calidad química global de la nave de EW, donde Tabla 7 indica que un 91,5 % corresponde a calidad química grado RT, es decir, sólo un 8,5 % no fue grado RT, ya que análisis químicos se realizan posterior a inspección de lingadas, sólo durante los períodos de Octubre 2024, Febrero 2025 y Marzo 2025 se obtienen los porcentajes de calidad química más bajos como se muestra en la Figura 24.

Tabla 7: Calidad química global de nave EW durante periodo de estudio

Calidad	Porcentaje
RT	91,5 %
STD1	5,0 %
STD2	2,8 %
STD3	0,6 %
Off grade	0,1 %

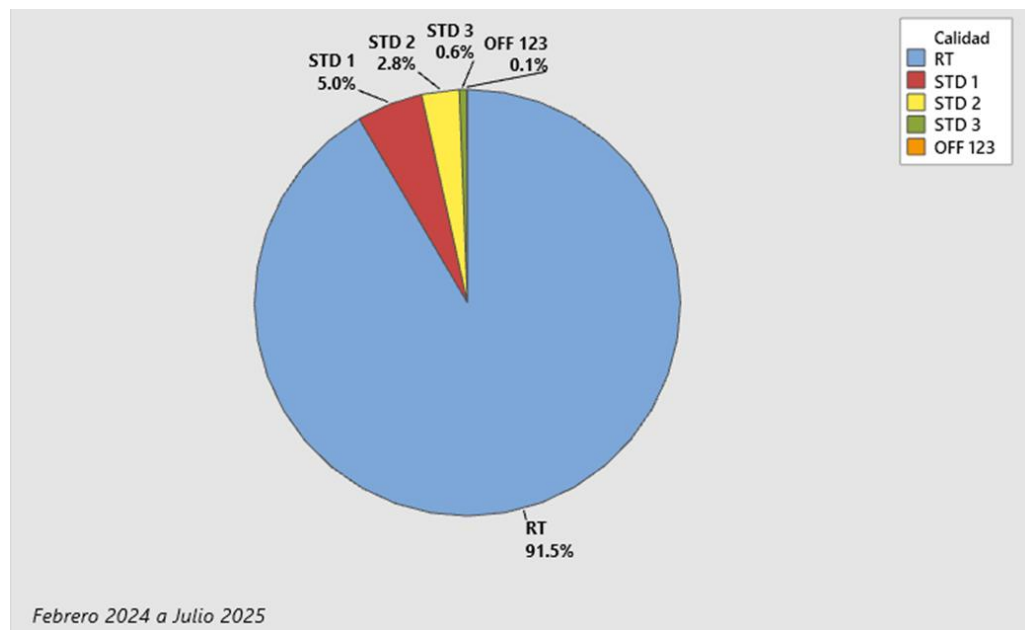


Figura 23: Calidad química global de nave EW durante periodo de estudio

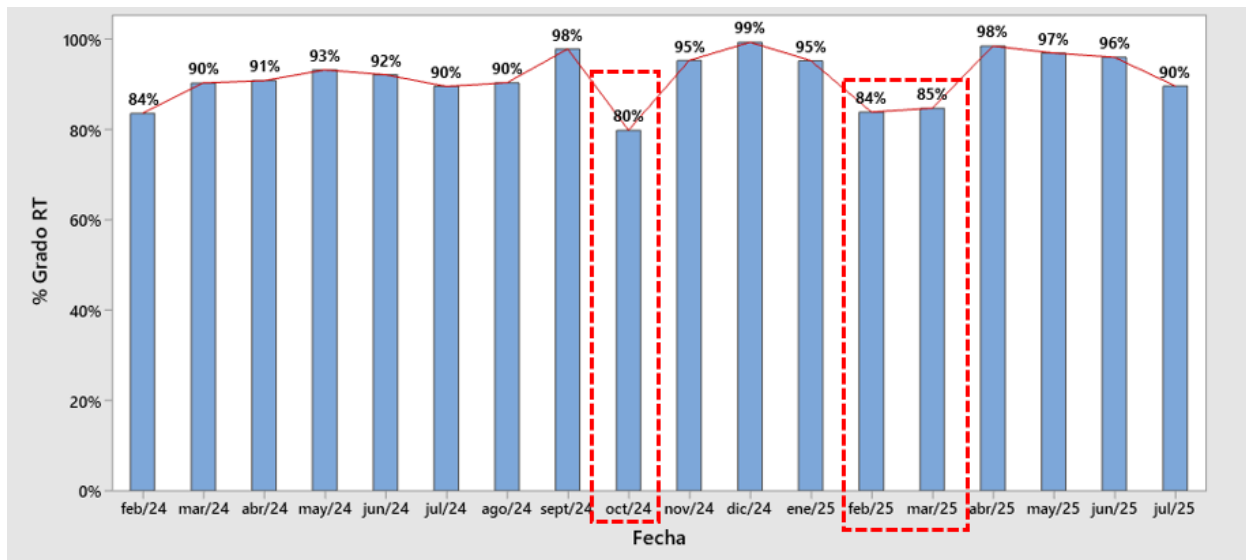


Figura 24: Calidad química grado RT mensual

5.1.2 Análisis estadístico de calidad física

Para analizar la calidad física de los cátodos de cobre en DRT, se considera la base de datos conformada por datos de inspección de lingadas para analizar la calidad física grado A por banco, presentando los defectos físicos (no conformidades) y el porcentaje de grado A por subgrupo. Durante el período de estudio se contabilizaron 656.279 cátodos que levanto la grúa para ser puestos en cadena para el posterior despegue. En la Figura 25, se puede apreciar que el 80% de los defectos físicos se concentra en nodulación (41,9%), parche (24,2%) y orgánico degradado en el cuerpo (13,6%).

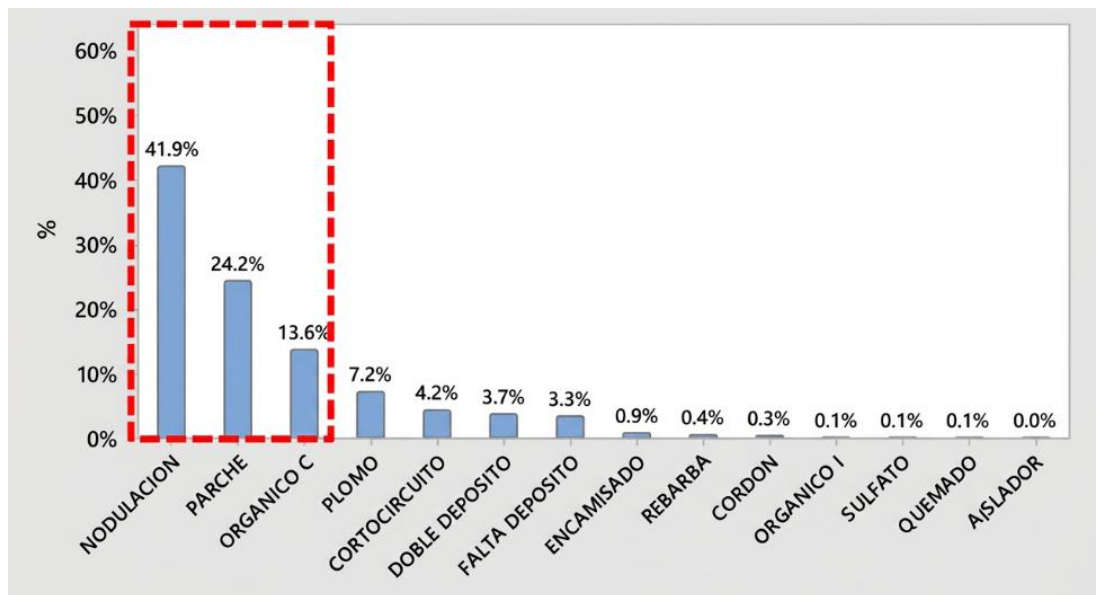


Figura 25: Defectos físicos global en nave EW durante periodo de estudio

Sin embargo, la calidad física grado A por banco, se aprecia en la Figura 26 el banco con mejor calidad física es banco 5 (85,8%), mientras que el banco con menor calidad física es banco 1 (70,8%). Mientras que el promedio general de calidad física de la nave de EW es de 79,0% viéndose afectada por banco 1 (70,8%), banco 2 (78,7%) y banco 4 (73,9%) cuyos valores son inferiores al promedio general de la nave de EW.

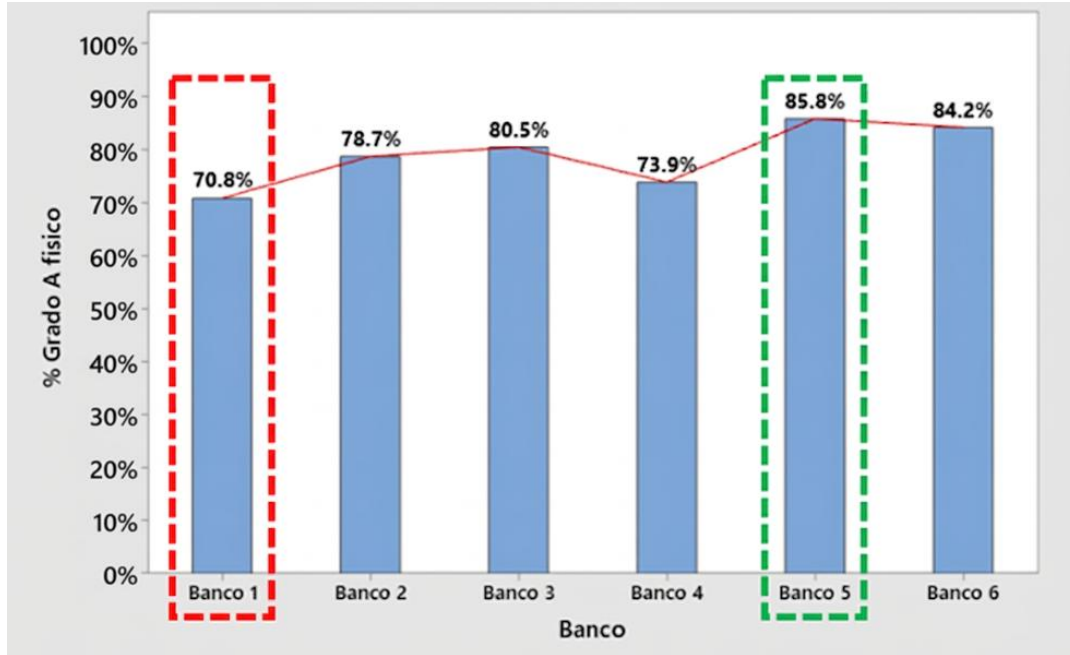


Figura 26: Calidad física grado A por banco durante periodo de estudio

Finalmente, se muestra la calidad física grado A por mes en la Figura 27, desde el inicio de operación de banco 3 y 4 existe un desmedro en calidad física.

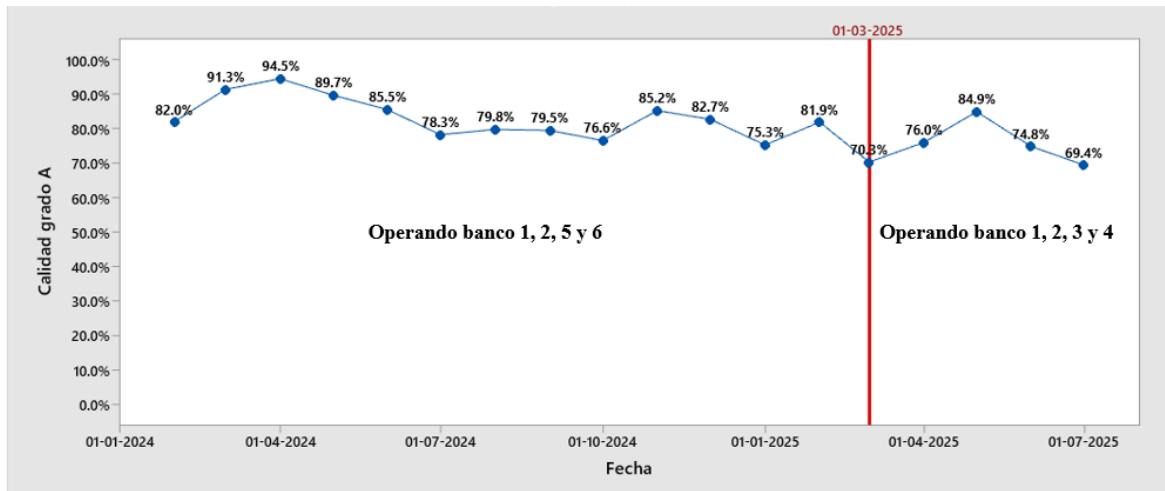


Figura 27: Calidad física grado A mensual

5.2 Descripción de datos de variables de proceso

- Fecha de estudio se considera desde 01 de Febrero 2024 a 31 de Julio 2025.
- 547 datos diarios extraídos desde “PI ProcessBook” y de acuerdo con información entregada por empresas colaboradoras SGS y Cobra.
- Duración de ciclos de ciclos siembra – cosecha se asumen 7 días y se utiliza la media móvil de las variables de proceso durante esos 7 días.
- De acuerdo con los datos diarios, se logran 68 ciclos de siembra y cosecha en el periodo de estudio.
- 64 días se trabajó fuera de rangos de operación, 308 días dentro de rango óptimo de operación (calidad física sobre 80%) y 175 días se trabajó bajo calidad física de 80%.
- Banco 1 y 2 siempre se encuentra en operación, mientras que banco 5 y 6 estuvo en operación desde febrero 2024 a febrero 2025, luego entró en operación banco 3 y 4 desde marzo 2025 a la fecha.

5.3 Porcentaje de días de producción grado A físico

En la Figura 28, se representan los días de operación durante el estudio, 308 días (56,3%) se obtuvo una calidad física grado A superior a 80%, 175 días (32,0%) y 64 días (11,7%) donde los parámetros de operación se desvían de las variables de diseño de la planta de EW.

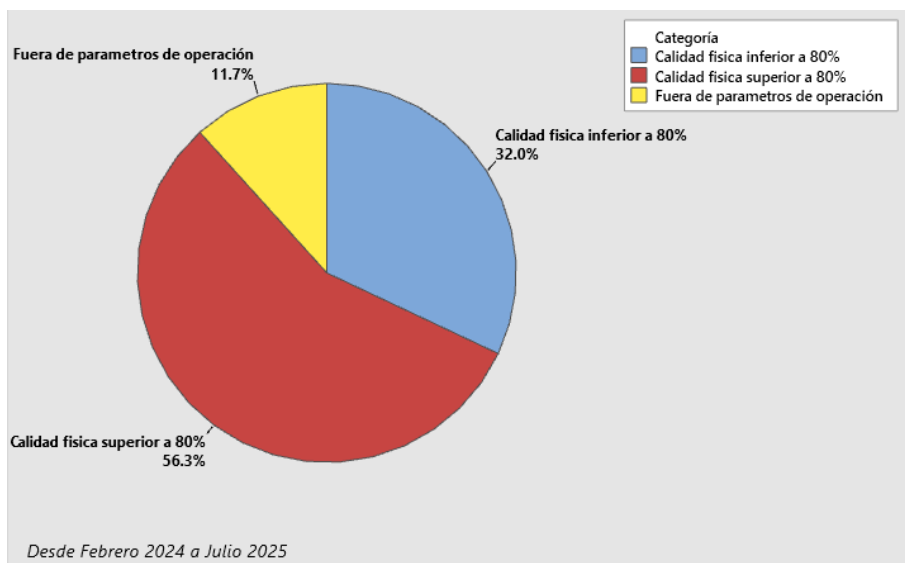


Figura 28: Porcentaje de días de producción cátodos grado A físico

5.4 Correlación de Pearson

5.4.1 Análisis estadístico descriptivo para calidad física grado A sobre 80%

De acuerdo con la Tabla 8, la varianza indica que existe una alta variabilidad y desviación estándar relativa (DSR) principalmente en dosificación de aditivos, es decir, guar y DXG, densidad de corriente, sólidos en suspensión y ion cloruro en spent. Esto no significa que estadísticamente sean las variables que más afectan a la producción de cátodos grado A, sino que podrían ser las que más afecten.

Se analiza la media aritmética de cada variable de proceso, además, como se dijo anteriormente, la desviación estándar relativa (DSR) indica el error relativo permitido y los límites probables de la medición. Cada variable cuenta con una incertidumbre ajustada a una distribución normal.

Tabla 8: Análisis descriptivo para calidad grado A física sobre 80%

Variable	Medida	N	Media	Desv.Est.	DSR	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo
Temperatura a celdas	°C	33	43,57	0,28	4%	2,56	40,00	43,23	46,66
Ácido en spent	g/L	33	196,40	0,31	1%	3,09	191,25	196,53	200,48
Cobre en spent	g/L	33	39,27	0,16	2%	0,86	37,53	39,12	41,66
Ion cloruro en spent	ppm	33	39,66	1,38	20%	62,82	24,35	38,75	58,46
Cobre en avance	g/L	33	48,03	0,35	4%	3,93	44,05	47,84	52,19
TSS entrada a celdas	ppm	33	20,06	1,89	54%	118,25	4,68	17,61	47,85
Flujo a celdas	m ³ /h	33	17,67	0,23	8%	1,77	12,91	18,19	19,03
Densidad de corriente	A/m ²	33	211,67	4,80	13%	760,26	166,43	212,65	265,23
Dosificación de DXG	g/t	33	98,00	10,80	63%	3866,80	5,80	70,00	268,40
Dosificación de Guar	g/t	33	339,20	20,80	35%	14341,20	119,10	328,40	633,10

5.4.2 Análisis estadístico descriptivo para calidad física grado A bajo 80%

De acuerdo con la Tabla 9, en verde se muestra la media óptima de acuerdo con calidad física sobre 80%, se puede apreciar una notable diferencia entre la calidad menor a 80% y mayor a 80% con respecto a variable de sólidos en suspensión, dosificación de Guar, dosificación de DXG y densidad de corriente.

Tabla 9: Análisis descriptivo para calidad grado A física bajo 80%

Variable	Medida	N	Media	Desv.Est.	DSR	Varianza	Mínimo	Mediana	Máximo	Media óptima
Temperatura a celdas	°C	19	42,75	1,85	4%	3,44	39,91	43,01	46,06	43,57
Ácido en spent	g/L	19	195,34	4,73	2%	22,36	176,92	196,29	199,40	196,40
Cobre en spent	g/L	19	39,04	0,78	2%	0,61	38,07	38,88	40,88	39,27
Ion cloruro en spent	ppm	19	41,53	6,85	16%	46,85	29,35	43,31	53,03	39,66
Cobre en avance	g/L	19	48,84	1,35	3%	1,83	47,36	48,23	51,73	48,03
TSS entrada a celdas	ppm	19	18,88	10,88	58%	118,43	5,60	17,40	40,00	20,06
Flujo a celdas	m ³ /h	19	17,30	1,19	7%	1,42	14,36	17,55	18,59	17,67
Densidad de corriente	A/m ²	19	229,57	25,55	11%	652,56	190,83	231,33	278,51	211,67
Dosificación de DXG	g/t	19	52,59	38,48	73%	1480,59	4,13	46,50	127,95	98,00
Dosificación de Guar	g/t	19	242,20	80,30	33%	6454,40	116,50	254,10	382,40	339,20

Sin embargo, para efectos visuales de poder analizar de mejor manera la media de las variables de proceso entre la calidad grado A física sobre 80% y bajo 80% se puede ver en la Tabla 10.

Tabla 10: Calidad grado A física bajo y sobre 80%

Variable	Medida	Calidad grado A física sobre 80%	Calidad grado A física bajo 80%
Temperatura a celdas	°C	43,57	42,75
Ácido en spent	g/L	196,40	195,34
Cobre en spent	g/L	39,27	39,04
Ion cloruro en spent	ppm	39,66	41,53
Cobre en avance	g/L	48,03	48,84
TSS entrada a celdas	ppm	20,06	18,88
Flujo a celdas	m³/h	17,67	17,30
Densidad de corriente	A/m²	211,67	229,57
Dosificación de DXG	g/t	98,00	52,59
Dosificación de Guar	g/t	339,20	242,20

5.5 Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación de Pearson es una medida estadística que cuantifica la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos o más variables cuantitativas. En el caso de estudio se utilizaron las 10 variables de proceso y la variable de salida como calidad grado A física. (Tabla 11)

Se realiza correlación de Pearson con respecto a calidad grado A física con las variables de proceso con el objetivo de identificar las variables más influyentes.

Tabla 11: Coeficientes de correlación de Pearson para variables de proceso

	Temperatura a celdas	Ácido en spent	Cobre en spent	Ion cloruro en spent	Cobre en avance	TSS entrada a celdas	Flujo a celda	Densidad de corriente	Dosificación de DXG	Dosificación de Guar
Ácido en spent	0,359									
Cobre en spent	0,091	-0,098								
Ion cloruro en spent	-0,276	-0,136	-0,027							
Cobre en avance	0,131	-0,179	0,686	-0,095						
TSS entrada a celdas	-0,130	0,024	0,292	-0,074	0,160					
Flujo a celdas	0,245	0,260	0,215	0,191	0,052	0,333				
Densidad de corriente	0,302	-0,095	0,487	-0,080	0,839	0,097	0,304			
Dosificación de DXG	0,422	0,178	0,362	-0,391	0,085	0,244	0,401	0,139		
Dosificación de Guar	0,421	0,014	0,135	-0,428	-0,047	-0,037	0,073	-0,047	0,576	
Calidad grado A físico	0,175	0,203	0,134	-0,134	-0,284	0,067	0,217	-0,350	0,494	0,490

Para obtener correlaciones estadísticamente significativas se debe tomar en cuenta las siguientes dos consideraciones:

- El intervalo de confianza (IC) no debe pasar por el valor 0
- Valor P debe ser menor a 0,05

Entendiendo esto, se analiza la correlación de Pearson en parejas en Tabla 12.

Las variables de proceso más influyentes estadísticamente durante el período de estudio son, cobre en avance, densidad de corriente y dosificación de DXG y guar.

Tabla 12: Correlación de Pearson en parejas

Variable 1	Variable 2	Correlación	IC de 95%	Valor p
Calidad grado A físico	Temperatura a celdas	0,175	(-0,102; 0,428)	0,213
Calidad grado A físico	Ácido en spent	0,203	(-0,074; 0,451)	0,150
Calidad grado A físico	Cobre en spent	0,134	(-0,144; 0,393)	0,343
Calidad grado A físico	Ion cloruro en spent	-0,134	(-0,393; 0,144)	0,343
Calidad grado A físico	Cobre en avance	-0,284	(-0,517; 0,013)	0,041
Calidad grado A físico	TSS entrada a celdas	0,067	(-0,210; 0,334)	0,639
Calidad grado A físico	Flujo a celdas	0,217	(-0,060; 0,462)	0,123
Calidad grado A físico	Densidad de corriente	-0,350	(-0,569; -0,086)	0,011
Calidad grado A físico	Dosificación de DXG	0,494	(0,256; 0,676)	0,000
Calidad grado A físico	Dosificación de Guar	0,490	(0,250; 0,673)	0,000

La interpretación de los coeficientes de correlación en un esquema se muestra en la Figura 29.

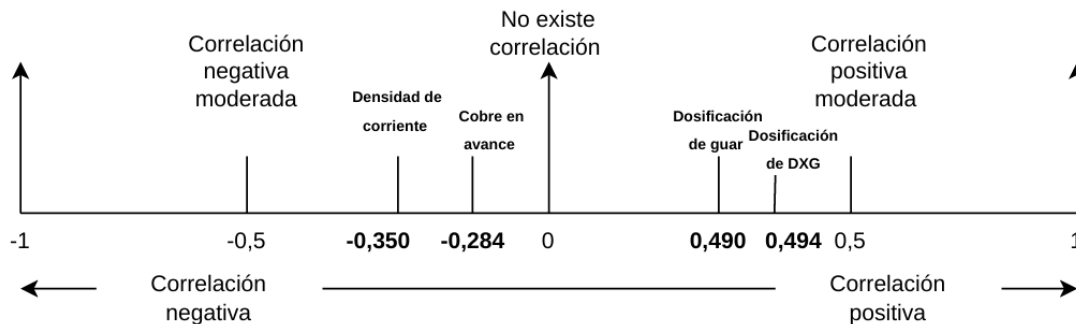


Figura 29: Interpretación de coeficientes de correlación

A continuación, se presentan los gráficos de dispersión correspondientes a las cuatro correlaciones estadísticamente significativas identificadas en el análisis, junto con sus respectivas discusiones.

En la Figura 30, se presenta el gráfico de correlación 1 que relaciona la calidad grado A físico vs. concentración de cobre en avance, de 44 a 53 g/L. Se observa que a medida que aumenta la concentración de cobre en avance, disminuye la probabilidad de obtener cátodos de calidad grado A física altas. Se aprecia en el gráfico de la Figura 30 que el mejor desempeño es por debajo 50 – 51 g/L, con el rango óptimo aproximadamente en 47 – 50 g/L, el cual es donde se obtiene los mejores resultados de calidad física mientras que sobre 50 g/L la calidad física tiende a disminuir.

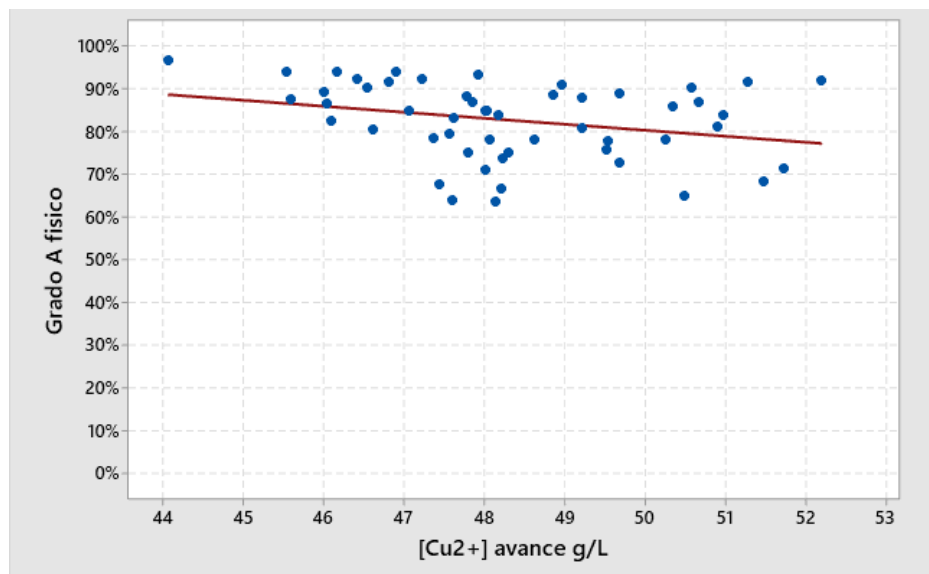


Figura 30: Correlación 1: Grado A físico vs. Cobre en avance

En la Figura 31, sobre grafico de correlación 2 que relaciona la calidad grado A física vs densidad de corriente, sugiere que de 150 a 275 A/m². Se puede notar que a medida que aumenta la densidad de corriente, disminuye la posibilidad de obtener un cátodo de calidad grado A física alta. En el grafico el rango se encuentra entre 210 a 225 A/m², esto quiere decir entre intensidades de corriente de 25,2 kA a 27 kA. Mientras que sobre 225 A/m² la calidad tiene a disminuir de manera marcada, esto depende fundamentalmente de la concentración de ion cúprico disponible que viene desde la etapa de lixiviación.

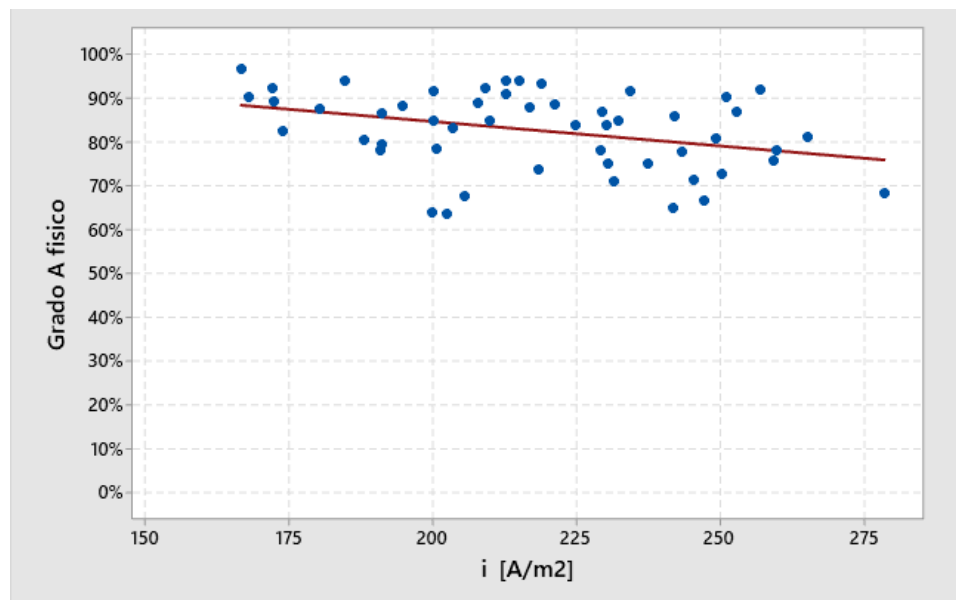


Figura 31: Correlación 2: Grado A físico vs. Densidad de corriente

En la Figura 32, para grafico de correlación 3 cuya relación es calidad grado A físico vs. dosificación de DXG sugiere una relación positiva, aunque débil, entre la dosificación de DXG y la calidad grado A física. Conforme aumenta la dosis (hasta aproximadamente 250 – 300 g/t), el porcentaje de calidad grado A físico muestra un incremento leve, lo que apunta a un efecto beneficioso del DXG. No obstante, la amplia dispersión de los puntos sobre todo en el rango bajo a media dosificación revela una variabilidad importante y la posible incidencia de otros factores no controlados. La línea de tendencia presenta una pendiente suave y, a simple vista, la correlación es de moderada a baja, por ello, el aumento de la calidad grado A física con la dosificación de DXG parece existir, pero su magnitud es baja.

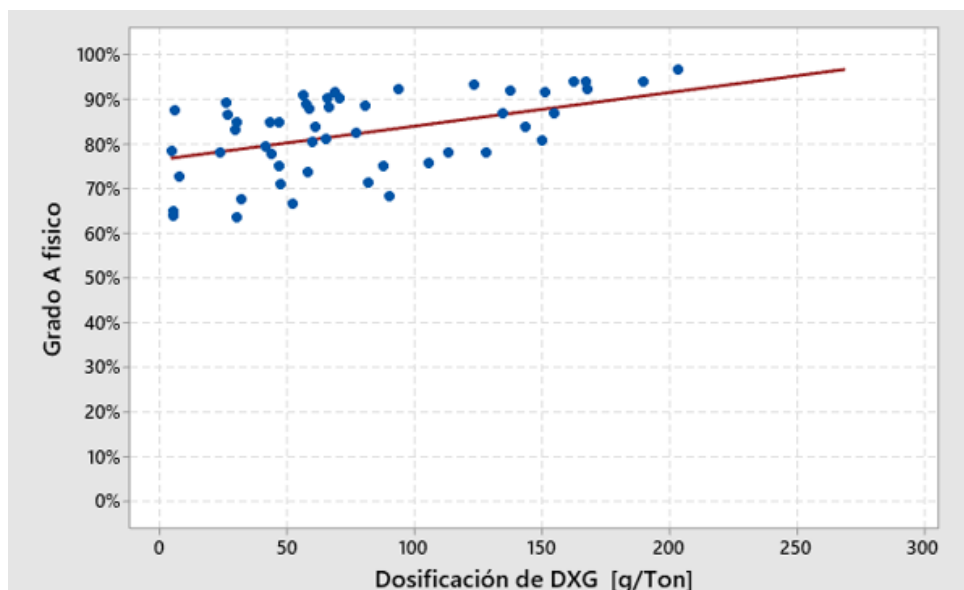


Figura 32: Correlación 3: Grado A físico vs. Dosificación de DXG

En la Figura 33, de acuerdo con la correlación 4 (grado A físico vs. Dosificación de guar) los valores de dosificación de guar que se presentan en el grafico están entre 100 a 650 g/t, de los cuales el punto óptimo se puede visualizar que esta entre el rango de 360 a 380 g/t que es donde se obtiene una mayor calidad grado A física.

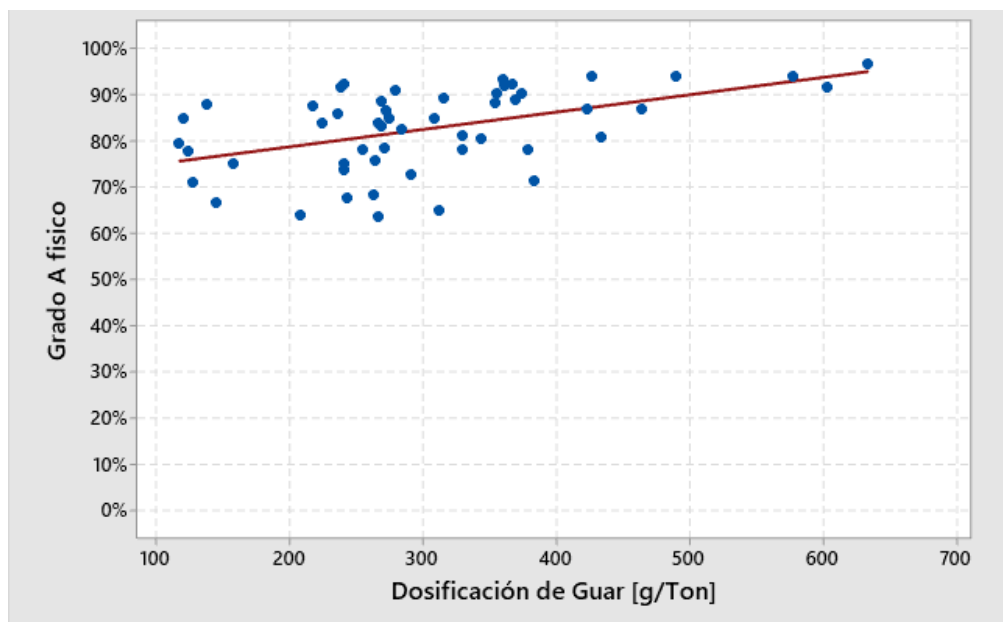


Figura 33: Correlación 4: Grado A físico vs. Dosificación de Guar

Además, existen otras 15 correlaciones adicionales estadísticamente significativas entre variables de proceso, de las cuales hay 4 relevantes, estas son (1) cobre en avance vs. cobre en spent (2) Densidad de corriente vs. Cobre en spent (3) Dosificación de DXG vs. Ion cloruro en spent (4) Densidad de corriente vs. Cobre en avance, estas correlaciones adicionales se muestran en la Tabla 13 con su correspondiente coeficiente de correlación, intervalos de confianza y valor p.

Tabla 13: Correlaciones entre variables de proceso

Variable 1	Variable 2	Correlación	IC de 95%	Valor p
Ácido en spent	Temperatura a celdas	0,359	(0,095; 0,575)	0,009
Ion cloruro en spent	Temperatura a celdas	-0,276	(-0,510; -0,003)	0,048
Densidad de corriente	Temperatura a celdas	0,302	(0,032; 0,531)	0,029
Dosificación de DXG	Temperatura a celdas	0,422	(0,169; 0,623)	0,002
Dosificación de Guar	Temperatura a celdas	0,421	(0,167; 0,622)	0,002
Cobre en avance	Cobre en spent	0,686	(0,508; 0,808)	0,000
TSS entrada a celdas	Cobre en spent	0,292	(0,020; 0,523)	0,036
Densidad de corriente	Cobre en spent	0,487	(0,247; 0,671)	0,000
Dosificación de DXG	Cobre en spent	0,362	(0,098; 0,577)	0,008
Dosificación de DXG	Ion cloruro en spent	-0,391	(-0,600; -0,132)	0,004
Dosificación de Guar	Ion cloruro en spent	-0,428	(-0,628; -0,176)	0,002
Densidad de corriente	Cobre en avance	0,839	(0,733; 0,904)	0,000
Flujo a celdas	TSS entrada a celdas	0,333	(0,066; 0,556)	0,016
Densidad de corriente	Flujo a celdas	0,304	(0,034; 0,533)	0,028
Dosificación de DXG	Flujo a celdas	0,401	(0,144; 0,608)	0,003
Dosificación de Guar	Dosificación de DXG	0,576	(0,359; 0,733)	0,000

5.6 Interpretaciones fenomenológicas de los resultados

Se observa que la nave de EW en DRT mantiene aproximadamente 91,5% de calidad química RT, mientras la calidad física se sitúa en torno a 79,0%, sugiere que durante el período analizado el sistema operó mayoritariamente dentro de parámetros de operación de contenido de impurezas en los cátodos compatibles con la especificación que requiere la división. No obstante, la morfología del depósito habría estado dominada por fenómenos locales que no se reflejan en promedios globales, tales como, (1) distribución no uniforme de corriente en electrodos, ya sea por mal contacto con la barra equipotencial o contacto entre electrodos provocando mayor densidad de corriente en zonas específicas, (2) variaciones en el transporte de masa, es decir, cambios en la corriente límite de difusión, debido a cambios en la capa límite asociados a sistema de aireación o flujo a celda no uniforme, (3) presencia intermitente de arrastres de orgánico en circuito comercial provenientes de la etapa de re-extracción.

En la nave de EW de DRT, los análisis químicos parecen mantenerse dentro de rango, sin embargo, si el depósito de cobre se lleva a cabo bajo parámetros fuera del rango de operación, pueden generarse defectos físicos sin que necesariamente se vea afectada la calidad química del depósito de cobre y por tanto, la variable limitante corresponde a la morfología del depósito.

5.7 Calidad química

Desde el punto de vista fenomenológico, los parámetros de operación de contenido de impurezas como el hierro, se encuentran en control. En cambio, el contenido de plomo en condiciones normales de operación la superficie del ánodo conformado por Pb – Ca - Sn está recubierta por dióxido de plomo y sulfato de plomo. Sin embargo, al interrumpirse la corriente eléctrica que atraviesa el ánodo, es decir, la pérdida de la polarización de este, cada vez que la intensidad de corriente sea cero tiende a reducirse y se desprende en partículas finas de óxido y sulfato de plomo. Una vez el ánodo vuelve a su condición de polarización, esta capa de corrosión formada por el sulfato se desprende del ánodo en forma de borra anódica.

Estas partículas quedan en suspensión y son transportadas mecánicamente hacia el cátodo, donde quedan ocluidas físicamente en el depósito de cobre, contaminándolo químicamente, pero a su vez físicamente.

5.8 Calidad física

5.8.1 Correlación entre cobre en avance y calidad física

En la Figura 30 se observa, al superar concentraciones de cobre del orden de 50 – 51 g/L, la calidad física del depósito de cobre disminuye, lo que resulta contraintuitivo con respecto a la información teórica, que sugiere que a mayor concentración de cúprico disponible se favorece el depósito al existir más iones cúpricos para depositar. No obstante, desde el punto de vista operacional, si la concentración de iones cúprico es elevada y la temperatura disminuye provocara el fenómeno de cristalización de sulfato de cobre en las líneas hidráulicas hacia los bancos. El comportamiento en las fechas de estudio sugiere que, en este rango de operación, predominan fenómenos fisicoquímicos que afectan negativamente la morfología del depósito de cobre.

5.8.2 Correlación entre densidad de corriente y calidad física

En la Figura 31 se observa que, al superar aproximadamente 225 A/m², la calidad física disminuye. Desde un punto de vista fenomenológico, este comportamiento se asocia a aspectos cinéticos del proceso ya que, al incrementarse la densidad de corriente y un desmedro en el flujo a celdas, el sistema se aproxima a la corriente límite de difusión, lo cual establece que no son condiciones de operación adecuadas para el proceso de EW. En estas condiciones, la velocidad de depositación de cobre metálico en el cátodo llega a ser mayor que la velocidad a la que los iones cúpricos pueden difundir desde el seno de la solución hacia la interfase cátodo–electrolito, situación que se presenta cuando la concentración de ion cúprico alcanza su valor máximo.

5.8.3 Correlación entre dosificación de DXG y calidad física

Desde el punto de vista fenomenológico, en la Figura 32 la correlación entre la dosificación de DXG y calidad física del depósito de cobre se ve por el rol que cumple este aditivo como agente nivelador de grano en la interfase cátodo-electrolito. El DXG favorece un crecimiento más homogéneo y promueve depósitos más compactos y de grano fino, sin embargo, al sobrepasar el punto óptimo de aproximadamente 300 g/t, el exceso de DXG provoca un desmedro en la calidad catódica. Esto se traduce en obtener depósito de cobre con estructura cristalina más desordenada, más cercanas a depósitos del tipo UD de acuerdo con el diagrama de Winand.

5.8.4 Correlación entre dosificación de Guar y calidad física

Desde el punto de vista fenomenológico, la correlación entre dosificación de Guar y la calidad física del cátodo, el efecto del Guar incide en las propiedades del electrolito y la incorporación de sólidos en suspensión. A dosificaciones adecuadas, el Guar actúa como un floculante, estabilizando los sólidos en suspensión, lo que disminuye la oclusión de material particulado y la formación de nódulo, favoreciendo depósitos más compactos y uniformes.

6. PROPUESTAS DE PLAN DE MEJORA

Con base en los resultados obtenidos en la nave de EW durante la estadía en División Radomiro Tomic, se elaboró el siguiente plan de mejora, orientado a maximizar la producción de cátodos grado A al término del ciclo siembra-cosecha, evitando la necesidad de realizar recuperación posterior en patio de embarque.

- Evaluar la adición de floculante que permita mitigar las condiciones de sólidos en suspensión presentes en la solución desde piscinas de PLS que ingresan a planta de SX, y que no dañe la tensión interfacial de la fase orgánica.
- Se recomienda mantener la densidad de corriente entre 210 a 225 A/m² de acuerdo con la concentración de ion cúprico disponible (en PLS), es decir, de acuerdo con el cobre transferido en la etapa de SX.
- Se recomienda mantener en las celdas una concentración de ion cúprico en spent mayor a 40 g/L.
- Se recomienda cuando la concentración de ion cloruro en electrolito pobre sea mayor 30 ppm, anular la dosificación de DXG.
- Calcular dosificación de aditivos en función del depósito y corriente suministrada al proceso cada 12 horas.
- Mantener una proporción de dosificación de 30/70 de acuerdo con la dosificación teórica por tonelada de cobre depositado.
- Mantener una disciplina operacional en las tres etapas que conforman el área húmeda (LIX-SX-EW).
- Realizar cambio de aisladores anódicos a rigidizadores anódicos para evitar desprendimiento de dispositivos de ánodo y así no provocar cortocircuitos entre ánodo – cátodo, considerar que el rigidizador anódico elimina la probabilidad de pandeo del ánodo producto de la corrosión.
- Se recomienda aumentar volumen de estanques de planta de aditivos (7 m³) con el fin de obtener un mayor tiempo de residencia para acondicionamiento.

7. CONCLUSIONES

Se realizó un catastro de la situación actual de la planta de EW de División Radomiro Tomic desde Febrero 2024 a Julio 2025 de los cuales se pudo analizar que la principal limitación para aumentar la producción de cátodos grado A durante las fechas de estudio no se centra especialmente en la calidad química, sino que más bien en la calidad física del depósito. En el período analizado, la nave presentó un 91,5% de cumplimiento químico RT (grado A), mientras la calidad física alcanza un 79,0%, evidenciando que la brecha de mejora se centra en la morfología del depósito, específicamente centrado en las no conformidades de defectos físicos.

En primera instancia, se generó una base de datos para cada banco cuyos datos son las no conformidades de defectos físicos una vez la grúa coloca los cátodos en la lingada para el posterior control de calidad visual. De acuerdo con el análisis generado por la base de datos de defectos físicos, el banco que obtiene un mejor desempeño en el período de estudio, es el banco 5, con un 85,8% de calidad grado A físico, mientras que el banco 1 muestra el valor más bajo de desempeño con un 70,8% debido a la presencia de 149 celdas scavenger.

La nave de EW logra una calidad física superior a 80% en un 56,3% del período de estudio, sin embargo, se registró un 32,0% bajo 80% y un 11,7% del período total se estuvo trabajando con parámetros fuera de operación. Esto confirma que la calidad física en DRT no es un evento aislado sin conocimiento, sino un problema asociado a la estabilidad y disciplina operacional.

Con las variables de proceso más significativas de acuerdo con criterio experto de operaciones, se generó un estudio estadístico con relación significativa a la calidad física. En primera instancia se realizó un análisis estadístico descriptivo para calidad física sobre y bajo 80% con el objetivo de analizar la diferencia entre variables de proceso de acuerdo con el porcentaje de calidad.

El análisis de correlación de Pearson identificó como variables de proceso con una relación estadísticamente significativa frente a la calidad física de los depósitos de cobre a las siguientes variables de proceso en orden de importancia decreciente, (1) Dosificación de DXG, (2) Dosificación de Guar, (3) Densidad de corriente, (4) Concentración de cobre en avance, por lo tanto se concluye que la calidad física no depende de todas las variables por igual, de las 10 variables de proceso analizadas, solo 4 explica de manera relevante la variabilidad del resultado final.

De acuerdo con el plan de mejora elaborado se enfocó en optimizar variables de operación determinantes, definiendo rangos de operación en base al estudio estadístico realizado y generar una mayor disciplina operacional. Este plan de mejora permite aumentar la eficiencia del ciclo

catódico, reduciendo defectos físicos en los cátodos y asegurando una calidad grado A física superior al 80%.

Finalmente, el impacto de la transición mineralógica que está viviendo la división debido al agotamiento mineral oxidado y la estrategia de realizar mezcla de sulfuros secundarios con óxidos en las pilas dinámicas de lixiviación, genera una mayor disponibilidad de soluciones ya sea en la etapa de lixiviación y extracción por solventes como en la etapa final de electro obtención. Esta mayor disponibilidad de solución genera la incorporación de ajustes frecuentes de operación en etapas anteriores y dificulta sostener en régimen estable la etapa de electro obtención.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Araneda, E. (2024). Electrometalurgia 542453 [Apuntes de clase]. Universidad de Concepción.
- Vergara, F. (2023). Cinética procesos metalúrgicos 542336 [Apuntes de clase]. Universidad de Concepción.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2013). Proceso y operación de extracción por solventes [Documento interno]. CODELCO.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2018). Manual de electro-depositación para DRT [Manual]. CODELCO.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile, División Radomiro Tomic. (2024). Libro Azul DRT [Documento interno]. CODELCO.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile, Gerencia de Planta. (2024). Manual de operación EW actualizado 2024 [Manual]. CODELCO.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile, Gerencia de Planta. (2024). Manual de operación LX 2024 [Manual]. CODELCO.
- Corporación Nacional del Cobre de Chile, Gerencia de Planta. (2024). Manual de operación SX 2024 [Manual]. CODELCO.
- Crow, D. R. (1974). Principles and applications of electrochemistry. Chapman and Hall.
- King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011). Extractive metallurgy of copper. Elsevier.
- Cochilco. (2024). Reporte estadístico de la producción chilena de cobre.

- London Metal Exchange. (2021). Chemical composition.
- Outokumpu. (1998). Guía práctica planta SX VSF, Radomiro Tomic [Manual interno]. Outokumpu.
- Winand, R. (1992). Electrocrystallization – theory and applications. Hydrometallurgy, 29(1–3), 567–598.

9. ANEXOS

9.1 Anexo I

9.1.1 AREA SECA

El proceso productivo comienza en gerencia de mina, que se encarga de la extracción del mineral mediante tronadura y carguío desde el rajo de la mina, con un volumen de procesamiento estimado de 160 a 220 kt/día. Una vez extraído, el mineral se transporta por camiones de extracción (CAEX) a chancador primario, específicamente un chancador de mandíbula, que reduce el mineral a un tamaño inferior a 14".



Figura 34: CAEX descargando mineral en chancador primario (Chilemineria)

Luego de la primera reducción de tamaño (chancado primario), el mineral es transportado mediante una correa transportadora hacia el silo de almacenamiento de mineral grueso, denominado Stock Pile Secundario, el cual posee una capacidad de 80.000 toneladas vivas de mineral. Desde este punto, el material es transportado a través de correas transportadoras hacia siete líneas de 1400 ton/h que lo llevan al chancado secundario. Este chancador consta de 7 harneros vibratorios que clasifican el mineral y lo envían a 7 chancadores de cono Nordberg de 7 pies cada uno, que reducen el mineral hasta una granulometría de bajo 3".



Figura 35: Líneas de alimentación a chancador secundario

Una vez realizado el chancado secundario, el mineral es transportado vía correas transportadoras hacia el acopio intermedio, conocido como Stock Pile Terciario, con una capacidad de hasta 40.000 toneladas vivas. Desde este punto, el material se dirige al chancado terciario, por cinco líneas de 1.600 toneladas por hora cada una de ellas alimenta a cinco harneros tipo banana, el material pasante es el producto final, mientras que el sobre tamaño alimenta a cinco chancadores, el objetivo fundamental del proceso de reducción de tamaño y clasificación es obtener un mineral con un tamaño promedio de $\frac{3}{4}$ ".



Figura 36: Vista área de stock pile (Costella S.A, 2025)

Al finalizar el proceso de reducción de tamaño y clasificación. El mineral se transporta a través de tres correas transportadoras (CV-112, CV-113, CV-114). Las correas transportadoras CV-112, CV-113, CV-114 van en orden descendente, el cual recibe el material procedente del chancado terciario, en ellas se genera el acondicionamiento (aglomerado y curado) del mineral añadiendo ácido

sulfúrico (H_2SO_4) y cloruro de sodio (NaCl)). Posteriormente, el mineral acondicionado pasa a través del scrubber (limpiador de gases), el cual su función principal es neutralizar el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl) que se genera en el acondicionamiento del mineral.

Posterior al acondicionamiento del mineral, este se transporta por las correas transportadoras CV-201, CV-202, CV-203, CV-204 hacia el puente apilador (stacker) para generar las pilas dinámicas de lixiviación, el puente apilador es el encargado de formar las dos pilas dinámicas de lixiviación que tienen dimensiones de 1354 metros de largo por 350 metros de ancho y 8 metros de altura (variable), las cuales tienen 27 módulos entre ambas pilas y 54 semi-módulos distribuidos en semi-modulo A y semi-modulo B con dimensión de cada semi-modulo de 50 metros por 330 metros.

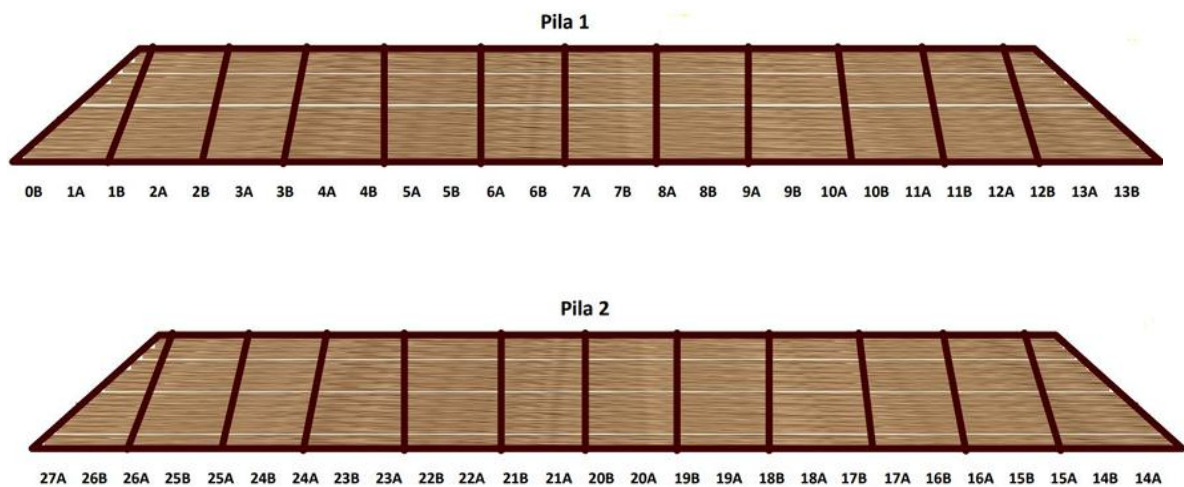


Figura 37: Distribución de semi módulos en pilas dinámicas

9.1.2 AREA HUMEDA

9.1.2.1 Lixiviación (LX)

La lixiviación es un proceso de gran importancia, que conforma el punto principal del tratamiento hidrometalúrgico, así, en consecuencia, una buena operación de este proceso permite maximizar el beneficio obtenido en toda la planta, mediante el aumento de las recuperaciones de cobre obtenidas en esta primera etapa.

Se riega con una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 95-98% de concentración, a su vez mezclado con cloruro de sodio (NaCl) que actúa como lixivante. La solución penetra en el mineral, disolviendo el cobre presente y generando una solución acuosa rica en iones de cobre, conocida como Pregnant Leaching Solution (PLS). Este proceso se lleva a cabo en ciclos que incluyen apilamiento, reposo, impregnación y riego continuo.

Durante la fase de riego, se utilizan sistemas de goteros y aspersores que distribuyen la solución de manera uniforme sobre el mineral. El ciclo de riego dura entre 50 y 75 días, con tasas de riego que van entre 10 y 12 litros por hora por metro cuadrado ($\frac{L}{H \cdot m^2}$).



Figura 38: Vista área de pila 1 y pila 2 (Costella S.A, 2025)

Luego, el PLS se dirige a las dos (2) piscinas desarenadoras, cada una con una capacidad de 10.000 m³, donde se espera que decanten los sólidos en suspensión arrastrados por el PLS desde las pilas dinámicas. Posteriormente, la solución de PLS que está en las piscinas desarenadoras se transfiere mediante rebose a las dos (2) piscinas de PLS disponibles, que tienen una capacidad de 20.000 m³ cada una. Estas piscinas están cubiertas con geomembranas de HDPE, lo que evita la contaminación de la solución, ayuda a mantener la temperatura del PLS y permite controlar la evaporación.



Figura 39: Piscinas de PLS (Imagen propia, 2025)

Los parámetros operacionales, como la razón de lixiviación, la concentración de cobre en la solución y el pH, son monitoreados y ajustados regularmente para maximizar la recuperación de cobre, que puede alcanzar entre el 40% y el 70% de la ley de cobre en el mineral.

Una vez completada la lixiviación primaria, se inicia la lixiviación secundaria de ripios (LSR), cuyo objetivo es recuperar el cobre residual que no fue extraído en la lixiviación primaria. En esta etapa, se utiliza el mineral agotado de las pilas primarias (con menor concentración de cobre) el cual es retirado mediante roto pala que tiene una capacidad nominal de 11.500 toneladas por hora ($\frac{Ton}{H}$). El mineral que se va a lixiviación secundaria de ripios (LSR) es nuevamente lixiviado con soluciones de refino, que contienen menores concentraciones de cobre y ácido.

Este proceso se realiza utilizando un sistema de riego similar al de la lixiviación primaria, donde se aplica una tasa de riego promedio de 5 litros por hora por metro cuadrado ($\frac{L}{m^2}$). La lixiviación secundaria de ripios (LSR) permite recuperar entre el 20% y el 45% del cobre residual, el ciclo de riego en lixiviación secundaria de ripios (LSR) es de 300 días aproximadamente, al igual que lixiviación de óxidos de baja ley (OBL). Las soluciones extraídas de estos procesos, es decir, LSR y OBL se mezclan en piscina ILS (Intermédiaire Leach Solution), en conjunto con refino que viene de la planta de extracción por solventes (SX) y parte de solución que viene desde las pilas primarias, a continuación, se muestra el diagrama de flujo en proceso de lixiviación.

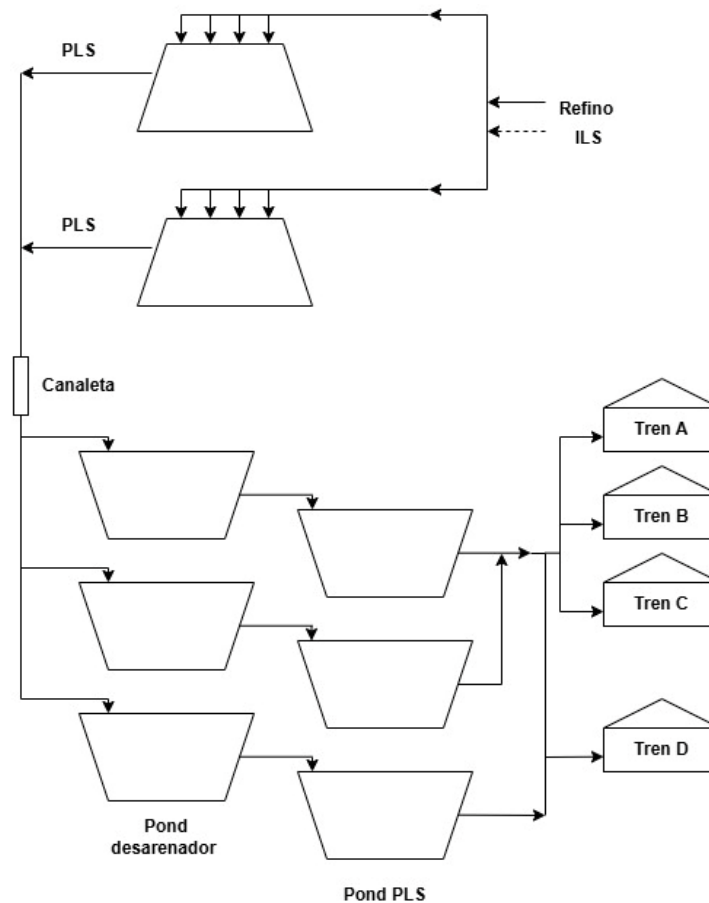
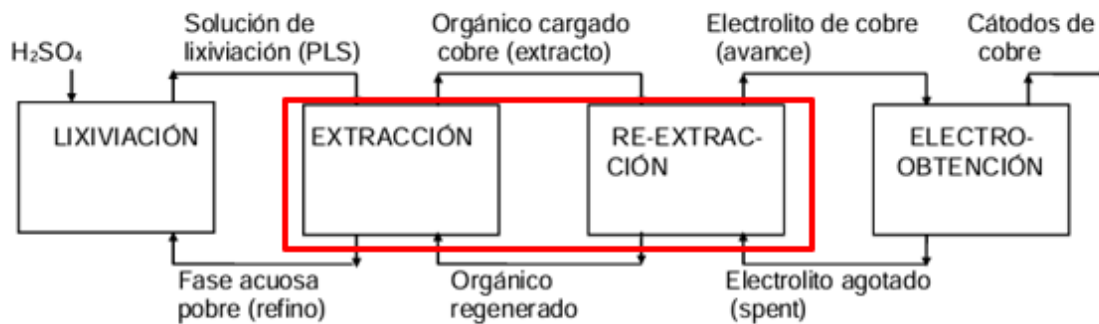


Figura 40: Diagrama de flujo de proceso de lixiviación (Imagen propia, 2025)

Finalmente, la solución PLS, con una concentración de cobre en el rango de 2.5 a 7 gramos por litro ($\frac{g}{L}$), es transportada mediante bombas hacia la planta de extracción por solventes (SX). Este paso es fundamental en el proceso, dado que permite iniciar el proceso de extracción por solventes (SX) el cual el objetivo es que la solución de cobre extraída en lixiviación sea concentrada y purificada.

9.1.2.2 Extracción por solventes (SX)

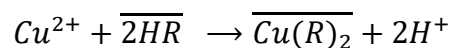
El proceso de extracción por solventes se basa en una reacción química reversible de intercambio iónico entre dos fases inmiscibles, es decir, fase orgánica (FO) y fase acuosa (FA). Esta fase orgánica actúa como el medio de intercambio para efectuar la separación selectiva del cobre, el proceso se lleva a cabo en dos etapas:



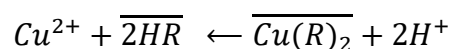
Extracción por solventes

Figura 41: Diagrama de proceso LX-SX-EW para plantas de hidrometalurgia (Ruiz, 2023)

En una primera etapa, la solución de PLS proveniente desde las piscinas de PLS el cual contiene el cobre recuperado del mineral cargado en las pilas es enviado a la primera etapa de extracción, en esta etapa la solución de PLS se coloca en contacto con una fase orgánica (orgánico) capaz de captar el cobre en solución en estanques mezcladores, donde ocurre la dispersión de fases, seguido de la separación de las fases acuosa y orgánica en decantadores, luego del contacto con la fase orgánica (orgánico), en la etapa de extracción es donde se produce la transferencia de cobre desde la fase acuosa (FA) a la fase orgánica (FO) cargada, que se le dice, “cobre cargado”, y una fase acuosa residual con baja concentración de cobre extraído que es denominado refino, la reacción de extracción en su forma iónica es la siguiente:



Y, en una segunda etapa la fase orgánica (FO) cargada, que ahora contiene los iones cúpricos (Cu^{2+}), es contactada nuevamente por dispersión en un mezclador con una nueva fase acuosa de propiedades distintas a la primera, de modo de transferir los iones cúpricos desde la fase orgánica (FO) a la nueva fase acuosa (FA). Esta etapa denominada re-extracción es la inversa de la primera. En esta etapa una vez separada la dispersión en el estanque de decantación, se obtiene una solución acuosa pura y concentrada de iones cúpricos (Cu^{2+}) y un orgánico descargado, esta etapa de re-extracción no solo sirve para recuperar los iones cúpricos (Cu^{2+}) sino que también para regenerar el orgánico dejándolo apto para una nueva etapa de extracción, a continuación, se muestra la reacción de re-extracción en su forma iónica.



La extracción de los iones cúpricos (Cu^{2+}) no es completamente selectiva y existen otras especies que son arrastradas mecánicamente en la fase orgánica durante la etapa de extracción como el ion cloruro (Cl^-), hierro (Fe), manganeso (Mn) y silicio (Si) además de otros elementos contaminantes. Cuando los arrastres mecánicos son de gran magnitud, es necesario agregar una etapa intermedia de lavado de la fase orgánica con una fase acuosa que sea apropiada, para descargar las impurezas contaminantes, antes de realizar la etapa de re-extracción.

Luego, el cobre es primero transferido desde el PLS, generalmente diluida e impura, a la fase orgánica, y a continuación se descarga en el electrolito pobre (spent) concentrado y purificado, que esta apto para ir a las celdas electrolíticas, donde se depositara un cobre de alta pureza en el proceso de electro obtención.

La planta de extracción por solventes (SX) de DRT consta de 4 trenes (A,B,C y D), trenes A,B,C cuenta con dos etapas de extracción (E1 y E2), una etapa de re-extracción (S1) y una etapa de lavado (W), en cambio, el tren D cuenta con una configuración distinta ya que este fue contemplado como un proyecto de ampliación de la planta, el tren D cuenta con dos etapas de 2 etapas de extracción (E1 y E2) y dos etapas de re-extracción (S1 y S2), además de la etapa de lavado (W).

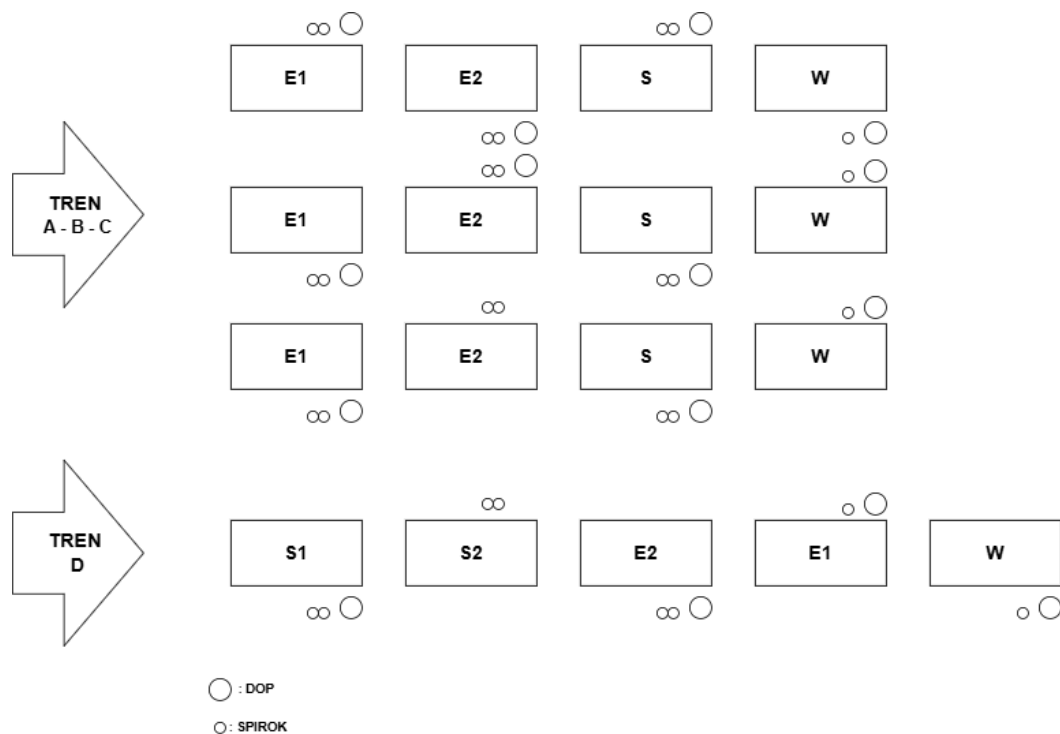


Figura 42: Disposición general de planta SX (Imagen propia, 2025)

Actualmente el diseño de la planta de SX opera con un flujo de nominal de PLS $1600 \frac{m^3}{H}$, $6.0 \frac{g}{L}$ de Cu por cada tren. El flujo total de diseño es de $6000 \frac{m^3}{H}$, sin embargo, el flujo máximo de operación actual entre los cuatro trenes es de $6600 \frac{m^3}{H}$ de PLS, es decir, $1650 \frac{m^3}{H}$ por cada tren.

Los decantadores de SX cuentan con un sistema de bombas y mezcladores para cada etapa cuyos están ubicados al inicio, los decantadores proporcionan la superficie de reposo requerida para llevar a cabo la separación de fases.



Figura 43: Decantador de planta SX (Castro, 2024)

El “DOP” (Dispersion Overflow Pump) proporciona la succión necesaria para realizar la transferencia de soluciones entre etapas y obtener una buena homogenización de la mezcla de soluciones inmiscibles, en cambio, los mezcladores Spirok están diseñados para mantener la dispersión, sin generar microgotas muy pequeñas que no decanten en la etapa de separación siguiente.

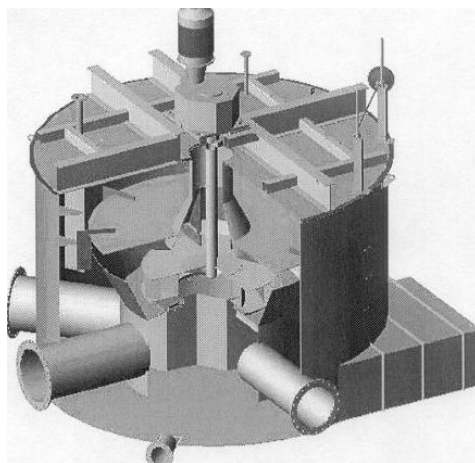


Figura 44: Imagen bomba DOP (Outokompu, 1998)

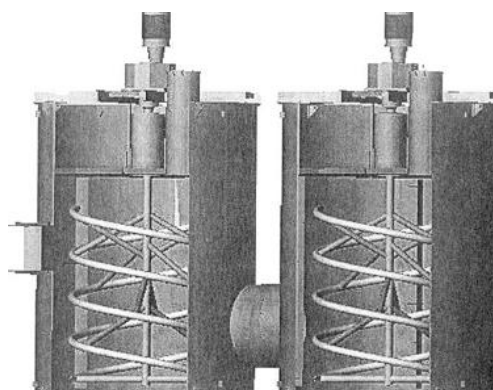


Figura 45: Imagen spirok (Outokompu, 1998)

En la planta de SX de DRT se disponen de la siguiente manera:

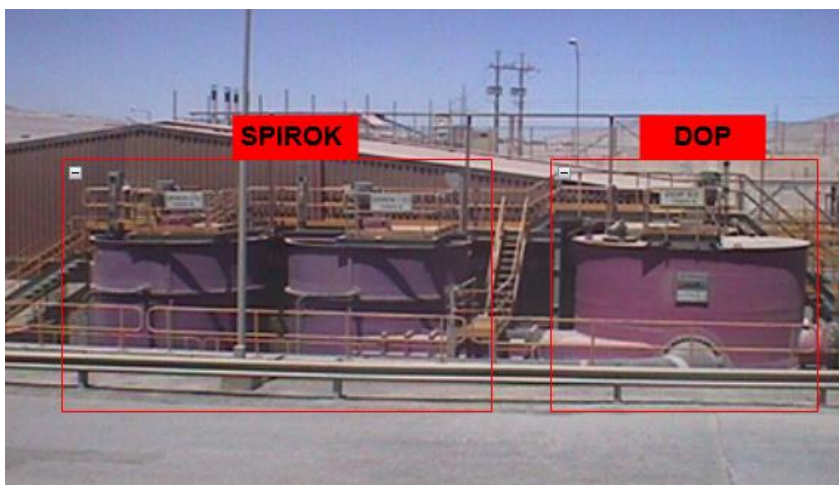


Figura 46: Spirok y bomba DOP en planta de SX (Manual de operaciones SX, 2024)

El mezclado en los decantadores se realiza en múltiples etapas, se utiliza una bomba “DOP” y dos mezcladores Spirok en las etapas de extracción (E1 y E2) y re-extracción (S), y un mezclador DOP y un Spirok para la etapa de lavado (W).

Una vez que la mezcla ingresa de los mezcladores al decantador, este flujo de mezcla es homogenizado por todo el ancho del mezclador, cuyas medidas son 25 metros de largo, 22 metros de ancho y 1.1 metros de alto, luego de que la solución atraviese por una rejilla distribuidora con una forma determinada.

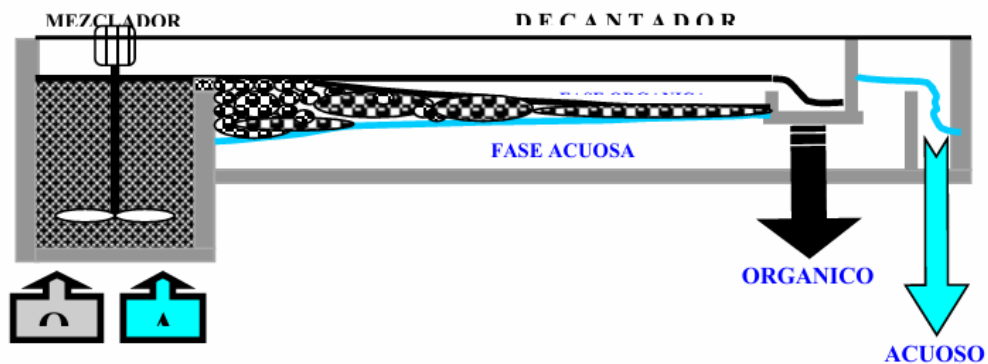


Figura 47: Estanque decantador típico (Costella S.A, 2024)

Al distribuidor de flujo le siguen dos rejillas rectas denominadas “Picket-Fence”, las cuales están colocadas en forma transversal en relación con el eje del decantador, con el fin de mejorar la coalescencia de gotas en la dispersión y acelerar la separación de fases. Aguas abajo del decantador se encuentran ubicados los vertederos de orgánico y acuoso, ubicados en todo lo ancho del decantador, y que mediante rebose recolectan separadamente las soluciones acuosa y orgánica.

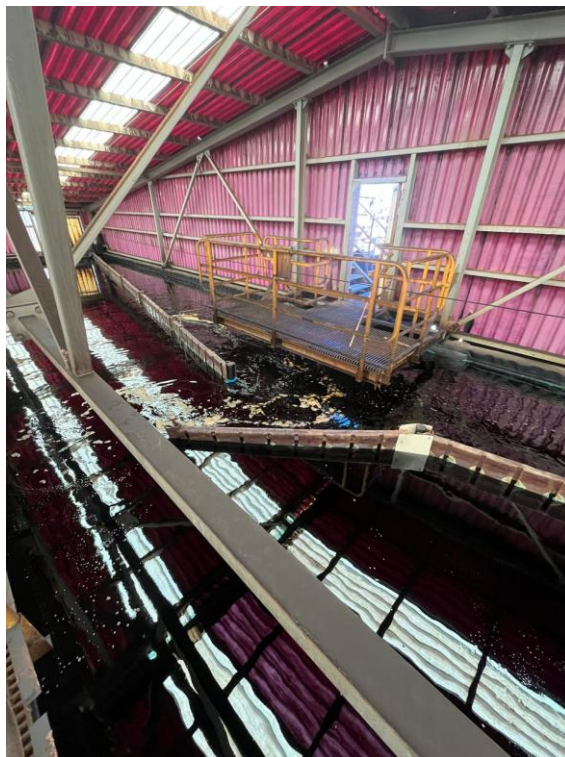


Figura 48: Picket-Fence y distribuidor de flujo en decantador S2 en tren D

En las etapas de extracción, el ion cúprico (Cu^{2+}) que está disuelto en el PLS con 2.5 – 7 gramos por litro ($\frac{\text{g}}{\text{L}}$) hace contacto en contracorriente con la fase orgánica descargada proveniente de la etapa de re-extracción, produciendo orgánico cargado y refino (y semi refino en etapa intermedia).

Los refinados de cada etapa de extracción fluyen por gravedad hacia la piscina de refino.

El orgánico cargado proveniente de las etapas de extracción se dirige a un conjunto de estanques de acero inoxidable que contienen virutilla de HDPE, denominado “Coalescedor Chuquicamata”. Con una capacidad útil de 92,1 m³, este sistema recolecta y remueve la mayor parte de los arrastres de acuoso, haciendo pasar el flujo en sentido ascendente. Para los trenes A, B y C se contemplan siete (7) “Coalescedor Chuquicamata” de los cuales seis (6) se mantienen operando y al restante se le realiza mantenimiento (retrolavado), mientras que para el tren D, se mantienen dos en operaciones y el restante en mantenimiento (retrolavado).

El retrolavado en los “coalescedores Chuquicamata” es una actividad periódica que se realiza cada 7 días aproximadamente para retirar arrastres de acuoso y borra atrapada.



Figura 49: Coalescedor Chuquicamata (Imagen propia, 2025)

Posteriormente, el orgánico cargado de cobre proveniente de los “Coalescedores Chuquicamata” de tren A, B y C ingresa nuevamente por gravedad hacia un estanque de orgánico cargado llamado “TK-401” con una capacidad de 2429 m³, de igual manera se cuenta con un estanque de orgánico cargado independiente para tren D llamado “TK-402” con capacidad de 1766 m³, ambos estanques funcionan como “post-decantadores” ya que cuentan con el volumen necesario para permitir que los arrastres de acuoso remanente sean recolectados.



Figura 50: Estanque de almacenamiento TK-401 de orgánico cargado (Castillo, 2024)

En la etapa de re-extracción (S) el orgánico hace contacto en contracorriente con el electrolito pobre en ion cúprico (38 a 41 $\frac{g}{L}$ de Cu^{2+}) pero de alto contenido de ácido sulfúrico (190 a 200 $\frac{g}{L}$ de H_2SO_4) para producir electrolito rico (50 a 52 $\frac{g}{L}$ de Cu^{2+}), regenerándose la fase orgánica para un nuevo ciclo.

Diagrama de flujo de un sistema de procesamiento de PLS. El flujo comienza en la 'Piscina de PLS' (azul) que alimenta a la etapa E1. E1 tiene una recirculación acuosa/orgánica (gris) hacia E2. E2 tiene una recirculación acuosa/orgánica (gris) hacia E1 y una salida hacia el 'Patio de estanques' (gris). El 'Patio de estanques' alimenta a la etapa S1. S1 recibe agua de lavado (naranja) y ácido sulfúrico (rojo) desde la etapa W. S1 tiene una recirculación acuosa (verde) hacia el 'Patio de estanques' y una salida hacia E2. E2 también recibe agua de lavado (naranja) y ácido sulfúrico (rojo) desde la etapa W. La etapa W recibe agua desmineralizada (naranja) y ácido sulfúrico (rojo) desde la etapa S1. La etapa W tiene una recirculación agua de lavado (naranja) hacia S1. La etapa W también alimenta a la 'Piscina de refino' (gris). La 'Piscina de refino' alimenta a la 'Piscina de PLS'.

Legenda:

- PLS
- Orgánico
- Electrolito Pobre
- Electrolito rico
- Refino
- Ac. Sulfúrico
- Agua desmineralizada

74

Posteriormente, el electrolito rico filtrado en columnas de flotación es dirigido a TK-406 para ir a un grupo de estanques con relleno de fibras de polipropileno llamados “Filtros Chuquicamata”, para remover aún más la mayor parte de arrastres de orgánico, pero también para filtrar los sólidos en suspensión (TSS) que son removidos mediante un retro lavado con agua y aire, la estación de filtros Chuquicamata contiene 10 filtros, 9 en operación y 1 stand-by para retro lavado.

El electrolito rico que pasa por los “Filtros Chuquicamata” es recibido en el TK-412 y, mediante bombas, se impulsa a través de los intercambiadores de calor hasta alcanzar una temperatura de 40–44 °C. Posteriormente, se distribuye a las 149 celdas Scavenger del proceso de electro obtención, con una concentración de 50–56 $\frac{g}{L}$ de Cu^{2+} .

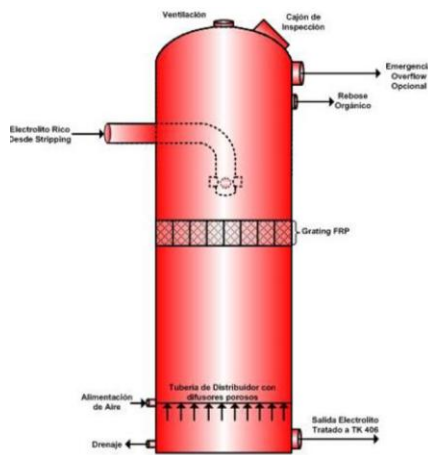


Figura 54: Columnas de flotación DRT (Ruiz, 2023)

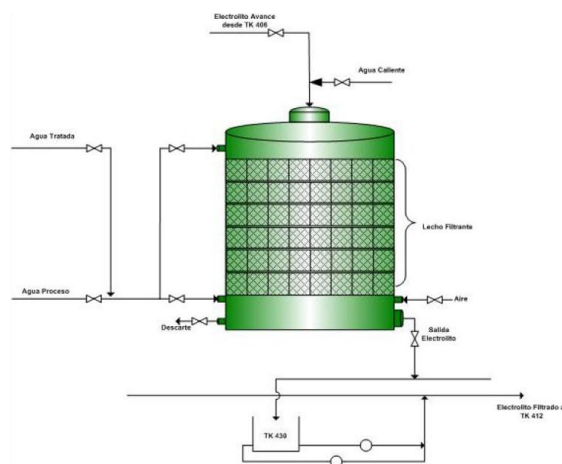


Figura 55: Filtro Chuquicamata DRT (Ruiz, 2023)

El efluente de las celdas Scavenger, es decir, el electrolito pobre, se envía al estanque de recirculación TK-408, con una capacidad de 1.322 m³. Este estanque recibe tanto electrolito rico como pobre y está dividido por un muro con una abertura inferior, que permite el rebose y el paso del electrolito hacia la otra sección del mismo estanque.

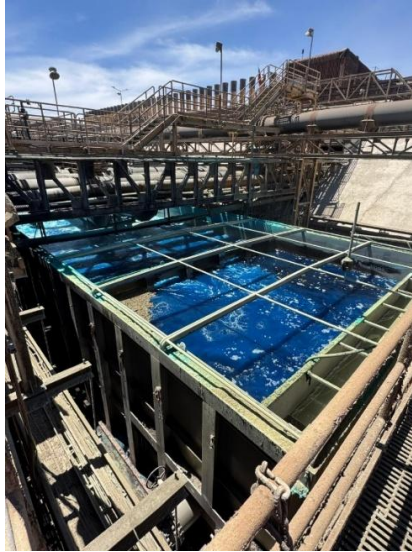
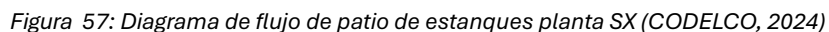


Figura 56: Estanque de recirculación de electrolito TK-408 (Imagen propia, 2025)

Finalmente, a continuación, se muestra el diagrama de flujo del patio de estanque, que contempla los estanques de orgánico cargado (TK-401 y TK-402), los “Filtros Chuquicamata” y los “Coalescedores Chuquicamata”, ubicados a un nivel más bajo que los decantadores y mezcladores para permitir que el orgánico cargado y el electrolito rico fluyan por gravedad las etapas del proceso, por esto el patio de estanques es el pulmón de todo el proceso productivo.



El último proceso productivo antes de obtener un cátodo Grado A, con 99.99% de pureza, es la planta de electro obtención. En ella, el electrólito rico filtrado proveniente del patio de estanques constituye un factor crítico, pues determina la corriente requerida para alcanzar cátodos de alta pureza, conforme a los estándares del manual de calidad de la División Radomiro Tomic.

La nave de electro obtención (back to back) cuenta con 1.000 celdas y, actualmente, es la más grande del mundo en el ámbito de la hidrometalurgia del cobre. Las celdas, cada una con 60 cátodos y 61 ánodos, se distribuyen en seis (6) bancos. El Banco 1 dispone de 176 celdas, de las cuales 149 son celdas Scavenger (de sacrificio), que reciben electrolito rico con presencia de orgánico pero alta concentración de cobre, y 27 son celdas comerciales.

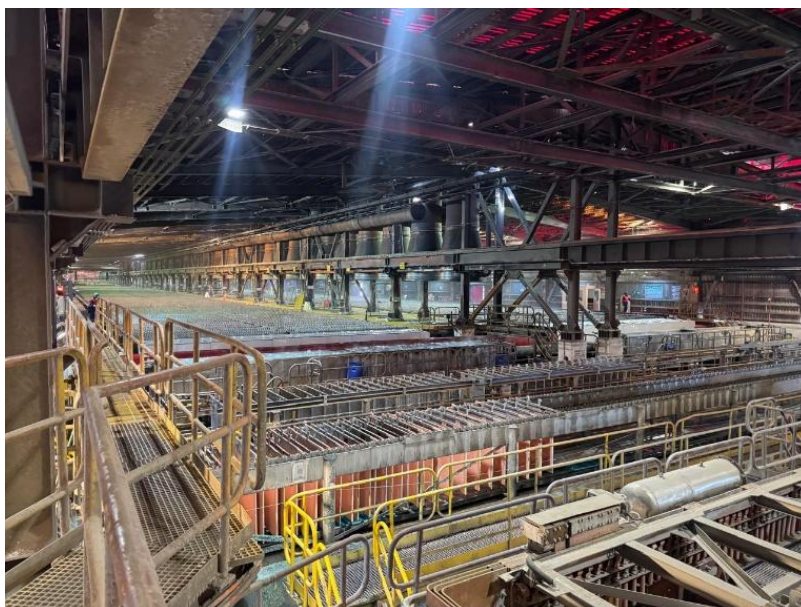


Figura 58: Interior nave EW de DRT (Imagen propia, 2025)

En cambio, los bancos 2, 3 y 4 están conformados exclusivamente por celdas comerciales y cada uno dispone de 176 celdas, organizadas en dos filas de 88 celdas. Por su parte, los Bancos 5 y 6 forman parte de la ampliación de la nave de electro obtención realizada en el año 2000; en ellos la distribución es de dos filas de 74 celdas, es decir, 148 celdas por banco.

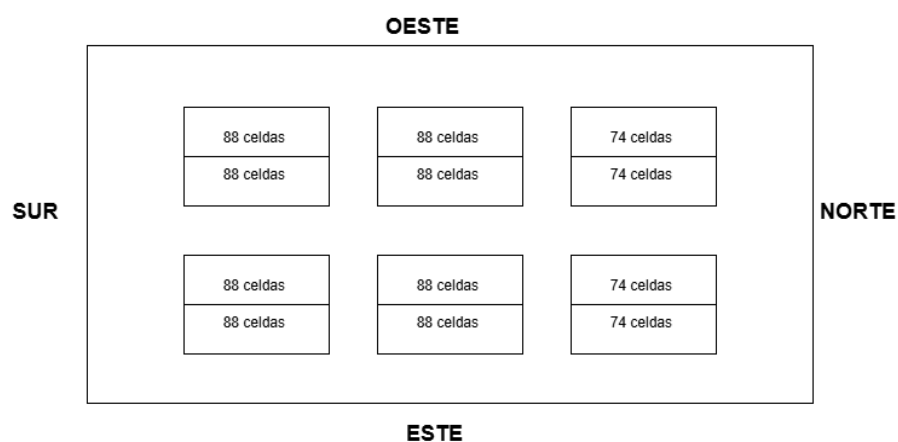


Figura 59: Disposición de celdas al interior de nave EW

El electrolito rico filtrado, es enviado al estanque de electrolito rico TK-412. Luego mediante las bombas PP-481 a PP-484 (tres (3) operando y una (1) en stand by) impulsan el electrolito a los intercambiadores de calor (HX) para alcanzar una temperatura de 40 - 44°C para luego ser alimentado a las 149 celdas de Scavenger (de sacrificio) que se encuentran ubicadas en el banco 1.

La función de las celdas Scavenger (de sacrificio) es remover los arrastres de orgánico que trae el electrolito rico desde la planta de extracción por solventes (SX) ya sea porque el arrastre de orgánico sobrepaso las columnas de flotación y filtros “Chuquicamata”.

La descarga del circuito Scavenger es alimentado al estanque de recirculación TK-408, donde se mezcla este electrolito rico (para las celdas comerciales) con el electrolito pobre (spent) que sale de las celdas comerciales, que a su vez vuelve a alimentar las celdas comerciales para generar el circuito comercial.

La mezcla de electrolito rico y pobre, mediante rebose y por una abertura en la zona inferior del muro de divisiones del estanque de recirculación, circula hacia el otro sector del estanque donde se termina de mezclar ambas soluciones.

El circuito comercial para las celdas comerciales es alimentado por el estanque de recirculación TK-408 mediante las bombas PP-454 a PP-459, cuatro (4) operando y dos (2) en stand-by, impulsan el electrolito (mezcla de EP y ER)

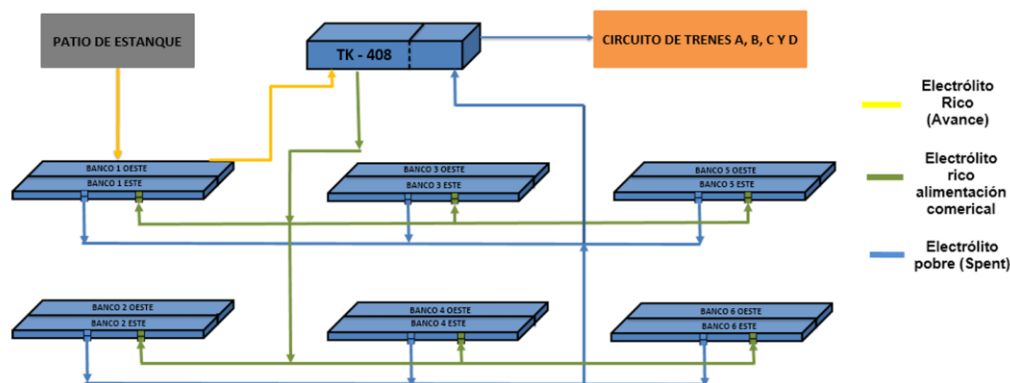


Figura 60: Circuito de electrolito en nave EW (CODELCO, 2024)

En estos bancos, se establece un par ánodo-cátodo, al que se le aplica una corriente continua que fluye a través de los electrodos, generándose una distribución de corriente a través de los electrodos de la siguiente forma:

El cobre se deposita sobre los cátodos permanente en ciclos de 5 a 7 días, dependiendo del flujo masico a celdas, es la cantidad de corriente que cada rectificador debe enviar al circuito eléctrico, utilizando ley de Faraday. Una vez haya finalizado el ciclo catódico (entre siembra y cosecha), los cátodos se retiran con una grúa Femont, esta permite tomar 20 cátodos (1 tercio) de cada una de las dos celdas adyacentes, siendo un total de 40 cátodos para cada cosecha realizada.



Figura 63: Lingada de cátodos previo ingreso a cuba de lavado (Imagen propia, 2025)

Estos son transportados hacia las cubas de lavado la cual contienen agua fresca caliente y están ubicadas en los extremos de banco 2, 3, 4 ,5 y 6. Para el banco 1, hay dos operadores que lavan los cátodos con agua caliente una vez son cosechados, para remover algún remanente de electrolito, orgánico u otro contaminante que pueda estar adherido a la superficie del cátodo.



Figura 64: Lavado de cátodos con agua a presión (Imagen propia, 2025)

Luego, una vez los cátodos son colocados en cadena, según el manual de calidad de DRT, un operador realiza una inspección visual para determinar si los cátodos deben ser rechazados por criterios, en el caso de que son rechazados físicamente los pinta con pintura. Posterior, todos los

cátodos pasan una cámara de lavado con una temperatura de agua alrededor de 50°C para remover contaminantes restantes como restos de sulfato que pueden perjudicar en los análisis químicos.

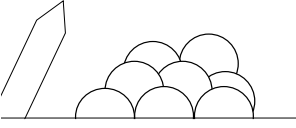
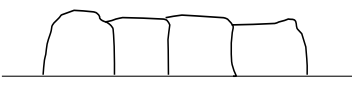
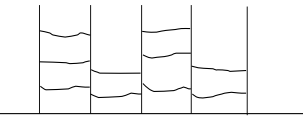


Figura 65: Cátodo pintado por rechazo físico en inspección de lingada (Imagen propia, 2025)

Finalmente, tras el lavado, los cátodos ingresan al carrusel de la máquina despegadora de cátodos (MDC), donde se separa el depósito de cobre del blank. Los blanks se reintegran al proceso, mientras que los cátodos de cobre son empaquetados, previo muestreo aleatorio para análisis químicos. Una vez conformados los paquetes, se pesan en romana y quedan listos para ser comercializados.

9.2 Anexo II

Tabla 14: Clasificación de Fisher

Cristales aislados orientados en el campo (FI)	Cristales orientados sobre la base (BR)	Cristales orientados en el campo (FT)	Cristales sin orientación privilegiada (RD o UD)
El crecimiento se presenta en forma de agujas (wiskers), dendritas o como estructuras dendríticas esponjosas. Esta configuración está asociada a un bajo grado de inhibición y a densidades de corriente reducidas.	El crecimiento tiende a imitar la base, y su orientación depende de los granos que están debajo. Por lo general, se forman buenos depósitos coherentes que cubren la superficie, aunque el grano puede ser grueso y la superficie resultante puede ser bastante irregular. Esta textura se observa con una inhibición moderada y/o densidades de corriente.	El depósito presenta una textura orientada en la dirección de las líneas de corriente, lo cual está relacionado con una inhibición y/o densidad de corriente relativamente alta.	El depósito muestra una estructura coherente de granos finos, a veces con oclusión de electrolito. Esta textura es típica de condiciones de alta velocidad de nucleación, lo que indica una alta inhibición y/o una alta densidad de corriente.
			

9.3 Anexo III

Principales problemas asociados a uso de cátodos permanentes:

- 1.- **Corrosión por pitting**: El problema de corrosión por pitting depende estrictamente de la composición química del electrolito. Una elevada concentración de ácido sulfúrico y la presencia de haluros, como impurezas en el electrolito (iones cloruro, en específico >30ppm, generan problemas de picado en la zona superior de la placa, por sobre la interfaz electrolito – esferas - aire. La intensidad del picado de placas se intensifica en ambientes cerrados donde se concentra la neblina acida sin ser evacuado convenientemente. En DRT la cantidad de neblina acida se controla con bolas polipropileno y salida a través de campanas extractoras.
- 2.- **Exceso de adherencia**: Cuando en el electrolito existe concentración sobre 100 ppm de ion cloruro, ocurre el exceso de adherencia del depósito a la placa en todo el cuerpo.
- 3.- **Formación de estrías**: Ocurre por una deficiente mantención de los cuchillos de la maquina despegadora de cátodos (MDC).
- 4.- **Deformación de la barra**: Puede producir una mala distribución de corriente, generando depósitos no homogéneos, se produce por el esfuerzo de cedencia asociado a recristalizaciones de la barra con electrolito.

9.4 Anexo IV

Es fundamental considerar los siguientes aspectos para asegurar un rendimiento óptimo de los cátodos permanentes:

- 1.- Mantener el cuerpo del cátodo en su totalidad sin desprendimiento de su funda protectora, ya que ayudan a soportar mecánicamente la placa.
- 2.- Continuidad de flujo eléctrico en todo el cuerpo del cátodo permanente.
- 3.- Verticalidad en rangos permisibles.
- 4.- Rigidez mínima y estable en el tiempo.
- 5.- Adecuada resistencia a la corrosión en condiciones de acides, esfuerzo, temperatura y composición del electrolito.
- 6.- Adecuado acabado superficial en términos de la rugosidad del cátodo permanente.
- 7.- Dimensión de grosor de la placa en rango exigidos.
- 8.- Buen estado de los cubre bordes de las placas.
- 9.- Mantener un biselado inferior de la placa de acuerdo con las especificaciones técnicas.

9.5 Anexo V

9.5.1 Pegado de placas y despegue manual de cobre

El pegado de placas es un problema que afecta directamente en la producción de cátodos de cobre.

Se le asocia a dos causas específicas:

1. Cuando la concentración de iones cloruro es elevada, se favorece la formación de complejos con los iones cúpricos(Cu^{2+}). Este fenómeno hace que dichos complejos actúen como agentes reguladores del depósito de cobre.
2. Un exceso de aditivo nivelador de grano y/o deficiente mojado de los electrodos antes de ser sembrados en las celdas. En consecuencia, los cátodos de cobre no pueden ser despegados por la maquina despegadora de cátodos (MDC) y, por lo tanto, son rechazados por rechazo carrusel y enviados a despegue manual en patio de embarque y/o Calama.

9.5.2 Reposición de electrodos (ánodos/cátodos)

En un escenario de pegado de placas, como se dijo anteriormente, ya sea por alta concentración de ion cloruro (Cl^-) en electrolito o un exceso de nivelador de grano, el depósito de cobre es despegado de forma manual en patio de embarque y los cátodos permanentes que permanecen en buenas condiciones se reintegran a la nave de electro obtención (EW).

Cuando los cátodos no pueden ser despegados en patio de embarque, son enviados a “despegue manual en Calama”, el cual es realizado por terceros, es decir, COBRA, a través de un contrato de servicio.

Los cátodos permanentes recuperados en patio o bien aquellos que provienen del despegue manual de Calama, deben ser ingresados a las celdas donde faltan electrodos. La reposición de cátodos permanentes en una celda abierta debe realizarse utilizando el puente grúa. En el caso que solo se trate de algunos cátodos permanentes faltantes en unas celdas, la reposición se realiza en forma programada dependiendo de la disponibilidad del “polipasto”.

Para el caso de los ánodos, estos son utilizados hasta su vida de uso promedio, la cual es aproximadamente 5 años o, cuando al desborrar se note que ha perdido significativamente su grosor.



Figura 66: Actividad de lavado de ánodos (Imagen propia, 2025)

9.5.3 Desborre de celda

El desborre de celdas es directamente proporcional a la vida útil de los ánodos de Pb, los límites de control para los ánodos de 7mm que utiliza DRT son de 6.5 mm y 5.5 mm.



Figura 67: Herramienta para medición espesor de ánodo (Imagen propia, 2025)

El desgaste que presentan los ánodos es principalmente por pérdida de espesor debido a formación de sulfato de plomo ($PbSO_4$) que se desprende del ánodo a la forma de sólidos en suspensión (TSS), en el caso de DRT, que decantan por gravedad, al fondo de las celdas, esta estrictamente prohibido retirar el tapón de celda y vaciar la borra anódica directo a zócalo (a piso). La borra anódica se debe retirar en tambores herméticos porque es tratada como un residuo peligroso, cada tambor promedia 200 kg.

La frecuencia de desborre de celdas en DRT es variable, pero todas las celdas de la nave de electro obtención (EW), es decir, las 1000 celdas, deben pasar al menos por un desborre al año, como mínimo.

Existen dos casos para realizar desborre de celdas en DRT:

1. Cuando un banco está detenido, se aprovecha de realizar el desborre de las celdas de ese banco. Por ejemplo, el banco 3 - 4 permaneció detenido desde febrero de 2024 hasta febrero de 2025, durante ese período se programó el desborre de todas las celdas de ambos bancos mencionados.
2. En caso de presentarse una filtración en una celda, se debe efectuar el desborre de manera urgente utilizando el marco cortocircuitador. Es obligación del operador mayor verificar el nivel de electrolito y rebose de las celdas antes de subir y/o retirar el marco cortocircuitador.



Figura 68: Desborre de celda con borra anódica en su interior (Imagen propia, 2025)

Al finalizar el desborre, cuando la celda alcance aproximadamente $\frac{1}{3}$ su llenado, se deben ingresar esferas de propileno nuevas o en su defecto vaciar un tambor con esferas de propileno recicladas (esferas lavadas, solo si existe falta de stock).

Este procedimiento se realiza dando vuelta el tambor de esferas recicladas o bolsa sobre el inicio, intermedio y final de celda, asegurando una distribución homogénea.

Para el caso de las 149 celdas del banco 1 Scavenger solo se puede reponer esferas lavadas, nunca nuevas.

9.5.4 Mantención de parrillas de aireación

La mantención de parrillas de aireación se realiza en conjunto con la actividad de desborre de celdas.

Una vez desborrada y limpia la celda, se procede el ingreso de 2 operadores a la celda para realizar cambio de manguera micro porosa, manguera de cristal y dispositivo DAS anti-retorno. El acople de estos elementos de aireación se realiza mediante conectores rápidos plásticos y de forma manual, en caso de que el difusor presente problemas se cambia por uno nuevo al igual que el atril (en el caso de existir disponibilidad).



Figura 69: Mantenimiento de parrilla de aireación (Imagen propia, 2025)

Finalizada la mantención de la parrilla de aireación, se debe verificar el correcto acoplamiento del sistema y que la distribución de aire por celda sea la adecuada, es decir, entre 25 y $35 \frac{L}{min}$. Esta comprobación debe realizarse cuando el electrolito tenga una altura de llenado no superior a $\frac{1}{3}$ de la celda.

9.5.5 Distancia inter-electrodos (alineamiento)

El alineamiento de los electrodos se ejecuta durante la siembra. No obstante, no siempre quedan perfectamente alineados, en algunos casos pueden quedar aislados, sin contacto con la barra equipotencial. Esto es desfavorable, ya que compromete la distribución de corriente en la celda.



Figura 70: Electrodos alineados en celda (Imagen propia, 2025)

En la práctica, no se mide la distancia inter-electrodo, esta separación entre ánodo y cátodo está dado por la barra equipotencial (5 cm entre ánodo-catodo). El alineamiento de los electrodos busca ordenar de acuerdo con una línea y a la vez, revisar el contacto de todos los cátodos permanentes con la barra equipotencial.

9.5.6 Lavado de contactos eléctricos

El lavado de contacto es una actividad esencial para mantener un buen housekeeping en la nave de electro obtención (EW).

La neblina acida que se produce en las celdas producto de la reacción de oxidación del agua provoca varios problemas en la nave.

1. Precipitación de sulfato de cobre sobre los capping board, lo que incrementa la posibilidad de deterioro de estos, en el caso de que quede precipitación de sulfato de cobre existe la posibilidad que se cobrifique el capping board.
2. Precipitación de sulfato de cobre sobre las barras que soportan los electrodos y barras equipotenciales. El sulfato de cobre actúa como aislante eléctrico cuando se localiza entre ambas barras.

Por estas consecuencias, se debe realizar un lavado permanente con abundante agua a presión, de los contactos y de todos los sectores que presenten sulfatación en las celdas.

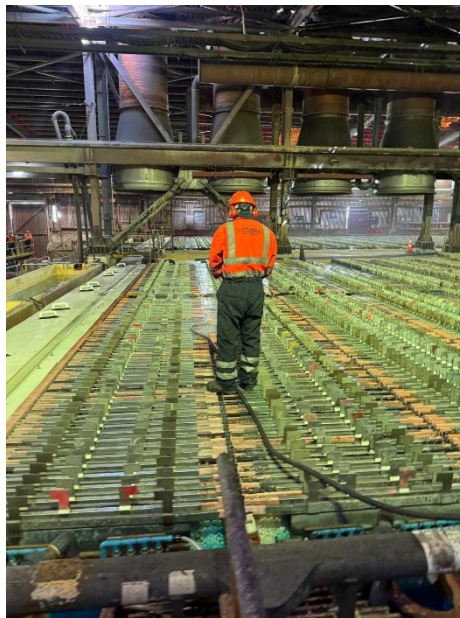


Figura 71: Operador de COBRA realizando actividad de lavado de contactos (Imagen propia, 2025)

9.5.7 Detección de cortocircuitos

Cuando se produce pérdida de geometría de las barras equipotenciales, deterioro o cobrizado de los capping boards, pérdida de verticalidad y/o pandeo de los electrodos, así como la pérdida de los aisladores anódicos (cuyo propósito es separar el par cátodo/ánodo), aumenta el riesgo de contacto físico entre ánodos y cátodos en las celdas mediante cortocircuitos.

La corriente que circula por los cortocircuitos no produce depósito de cobre y, en consecuencia, disminuye la eficiencia de corriente.

La detección de cortocircuitos se realiza con una cámara termográfica y/o por efecto hall. En DRT se utiliza la detección de cortocircuitos por termografía, en el cual se utiliza una cámara termográfica a fin de detectar los electrodos con mayor temperatura debido a cortocircuitos, esta constituye una actividad periódica.

9.5.8 Mantenimiento electrodos

Los cátodos permanentes poseen una vida útil de entre 3 a 5 años. Una vez cumplido el periodo de tiempo, si se presenta deterioro de estos, deben ser enviados a mantenimiento mayor. Actualmente en DRT los cátodos permanentes son enviados todos los días a mantenimiento menor, en promedio son 18.000 hasta 30.000 cátodos permanentes mensuales que van a la estación de mantenimiento menor operado por COBRA.

Los cátodos permanentes pueden ingresar a mantenimiento de dos maneras:

1. Cuando la maquina despegadora de cátodos (MDC) no es capaz de poder despegar el depósito de cobre de la placa porque tiene un exceso de adherencia, es decir, placa proveniente del rechazo carrusel. Se va al robótico de COBRA que despega las placas que MDC no pudo despegar, para posteriormente ir a mantenimiento.

Si el robótico de COBRA tampoco puede despegar el depósito, la placa se envía a “despegue duro” en Calama.

2. Placas sin deposito, provenientes del despegue posterior realizado por la MDC, que se almacenan en racks.

La hoja de ruta para la mantención de cátodos permanentes es:

- Despegue de cobre
- Inspección de barras
- Reparación menor
- Limpieza de la superficie (por ambas caras)
- Reparación de la barra
- Pulido de contactos de barra
- Verticalizado
- Control de calidad (medición de resistencia eléctrica y rugosidad)

Estas mantenciones menores de los cátodos permanentes se realizan periódicamente mediante brazos robóticos, en las instalaciones de empresa contratista ubicada a un costado del patio de embarque.

9.6 Anexo VI

9.6.1 Distribuidor de flujo de electrolito

El uso de distribuidor de flujo de electrolito se utiliza para mejorar la homogeneidad del electrolito que esta al interior de la celda.

El flujo volumétrico de electrolito que alimenta una celda no necesariamente se distribuye en forma equitativa entre todos los pares de electrodos (cátodo-ánodo) que la conforman. La tendencia natural de los fluidos es a desplazarse por zonas de menor resistencia, en este caso, paralelamente al sentido del flujo y por los costados de la celda. Con el fin de homogenizar el flujo dentro de las celdas de electro obtención es que se adoptó, como práctica, alimentar el electrolito mediante un distribuidor de flujo de electrolito.

Actualmente, en la mayoría de las celdas de banco 3, 4, 5 y 6 existen distribuidores de flujo, mientras que en banco 1 es donde quedan en su mayoría manguerotes de alimentación. Una mala práctica operacional corresponde a desconectar los manifold de distribuidor de flujo de electrolito cuando presentan problemas y en su remplazo colocar manguerotes. Esto envés de provocar una distribución homogénea del flujo volumétrico, genera una distribución heterogénea del flujo entre celdas.



Figura 72: Flujo volumétrico a celda por manifold (Imagen propia, 2025)



Figura 73: Flujo volumétrico a celda por distribuidor de flujo (Imagen propia, 2025)

9.6.2 Sistema de parrillas de aireación

Un sistema de parrilla de aireación consiste en inyectar aire a presión en el fondo de las celdas de electro obtención con el fin de mejorar la distribución del flujo del electrolito dentro de ellas.

La razón técnica sobre la implementación de sistemas de parrillas de aireación es que se homogeniza el electrolito y disminuye el espesor de la capa límite de difusión.

Desde el punto fenomenológico, el proceso se hace más dependiente del control por difusión y más dependiente de la etapa por transferencia de carga. (Figura 74)

El sistema de parrillas de aireación fue un proyecto que arranco como un análisis en el año 2011, luego, en 2012, se puso en marcha la construcción de la infraestructura necesaria, y en 2013, se realizó la puesta en marcha del sistema, que incluyó la instalación de 4 sopladores tipo tornillo, de los cuales 3 se encuentran en servicio para satisfacer la necesidad de aire en las celdas.

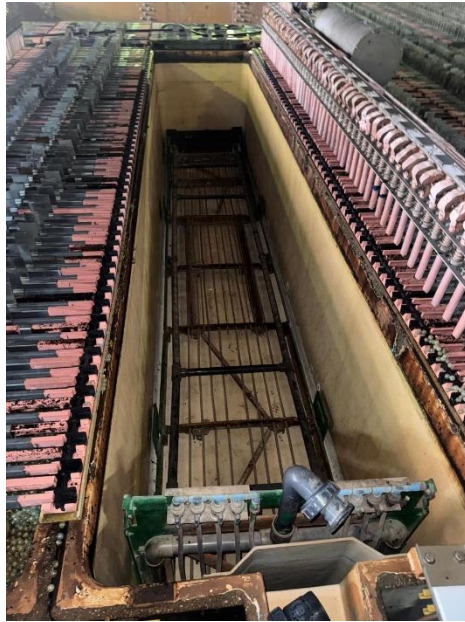


Figura 74: Sistema de parrilla de aireación en celda en mantención (Imagen propia, 2025)

9.7 Anexo VII

Tabla 15: Defectos físicos de cátodos en DRT

Defecto	Descripción
Nódulos superficiales	Superficie rugosa con sobre depósito de cobre, de forma redondeada y tamaño irregular, con unión relativamente fuerte al cuerpo del cátodo. Generalmente se presenta en la parte inferior del cátodo y se origina por la incorporación de material sólido de pequeño tamaño. Pueden ser removidos.
Nódulos internos	Superficie rugosa con sobre depósitos de cobre semicirculares, de tamaño uniforme, firmemente adheridos al cuerpo. Se originan por un proceso de nucleación y crecimiento anómalo del depósito, provocado por la falta de homogeneidad de la carga superficial, la cual se controla mediante aditivos (afinadores de grano). No pueden ser removidos.
Cortocircuito	Deformaciones del depósito en la superficie inferior del cátodo, con morfología ramificada y presencia de pequeñas dendritas. Se asocia principalmente a contaminación por plomo y se origina por el contacto del par cátodo - ánodo.
Cordón	Engrosamientos por sobre depósito en los bordes del cátodo, con depósito liso,

	irregular o poroso, causado por pérdida de simetría entre ánodo y cátodo.
Parche	Incrustaciones de forma irregular de cobre en la superficie inferior del cátodo (generalmente en los vértices).
Falta deposito	Cátodo de menor peso, con poca rigidez, originado por un menor tiempo en que el cátodo permanece en la celda y/o aislamiento eléctrico en la celda.
Quemado	Coloración café-oscura, el cátodo pierde brillo y puede presentar falta de cohesión o disgregarse fácilmente. Se origina por baja concentración de cobre en el electrolito o aumento de intensidad de corriente.
Sulfato	Manchas de electrolito de color azul, blanca o celeste en forma total o parcial en la superficie del cátodo, originado por el incorrecto lavado de los cátodos.
Bajo peso	Cátodo con deposito homogéneo pero cosechado antes del ciclo normal por lo que su peso no alcanza el establecido, en algunos casos no mantiene rigidez.
Sobre depósito	Deposito ubicado en la parte superior del cátodo originado por el mayor tiempo que se encuentra el cátodo en la celda.
Orgánico	Presencia de restos de solvente orgánico de color café, adheridos a la superficie del cátodo, generalmente en la parte superior.

Doble deposito	Producido por cortes de corriente no programados, el cuerpo del cátodo vuelve a depositar cobre sobre el depósito existente, pudiendo encapsular impurezas y orgánico.
Plomo	Tiene origen en el desprendimiento de laminillas y partículas de plomo provenientes del ánodo del mismo material. El defecto puede presentarse en forma de laminillas o diseminado.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Estudio de alternativas operacionales para el aumento de calidad catódica grado A en nave EW de División Radomiro Tomic, CODELCO

Nombre Memorista: Vicente Alejandro Mánquez Orrego

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Guía (s) Prof. ^a Eugenia Araneda H.
Concepto	Sobresaliente	
Calificación	6.8	
Fecha	01/04/2026	
Prof. Froilán Vergara G.		Ingeniero Supervisor: Rolando Tardon S./Julián Ravanal R.
		Institución: División Radomiro Tomic, CODELCO

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Froilán Vergara G.	Prof. Fernando Parada L.
--------------------------	--------------------------

Resumen

La División Radomiro Tomic (DRT) de CODELCO opera la nave EW más grande del mundo, enfrentando el desafío de maximizar la producción de cátodos grado A según los estándares de la London Metal Exchange (LME). DRT está en transición de una producción histórica de óxidos de cobre hacia la lixiviación clorurada, lo que requiere incrementar la producción catódica y operar a plena capacidad para mantener altos niveles de calidad.

Se propone un estudio inicial para identificar las variables operacionales más relevantes en la calidad catódica y evaluar alternativas de mejora. Se realizó un levantamiento de datos históricos para analizar las correlaciones entre la calidad y las variables de proceso, utilizando herramientas estadísticas como la correlación de Pearson.

Los resultados indican que el 91,5% de la calidad química corresponde a grado RT, mientras que el objetivo es minimizar los defectos físicos, aumentando el 79,0% de calidad física global. De diez variables de proceso analizadas, solo cuatro son estadísticamente significativas: (1) Dosificación de DXG, (2) Dosificación de Guar, (3) Densidad de corriente y (4) Concentración de cobre en avance. Finalmente, se concluye que la calidad catódica depende de una gestión precisa de las variables de proceso y la disciplina operativa.