

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor(es) Patrocinante(s)

Eugenia Araneda Hernández

Ingeniero Supervisor

Silvanna Bertoglio Larrondo

**ESTUDIO EXPLORATORIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA
EFICIENCIA DE CORRIENTE EN NAVE DE
ELECTROOBTENCIÓN DE LA PLANTA DE ÓXIDOS, CODELCO –
DIVISIÓN CHUQUICAMATA**

JAVIER ALEJANDRO GONZÁLEZ PINO

Informe de Memoria de Título para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril de 2025

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mis padres, Jaime y Marta, por depositar en mí su confianza incondicional y brindarme la oportunidad de emprender este camino universitario. Su apoyo ha sido el pilar fundamental que me permitió enfrentar los desafíos de esta etapa, transformando cada experiencia en una base para mi formación. Extiendo este agradecimiento a mis tatas, Francisco y Teresa, figuras insustituibles que han ejercido un rol paternal en mi vida, contribuyendo de manera decisiva a la persona que soy hoy.

A los docentes del Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET), mi gratitud por despertar en mí la curiosidad intelectual y ampliar mis horizontes en el fascinante campo de la metalurgia. Destaco especialmente al profesor Fernando, quien me permitió incursionar en las ayudantías de laboratorio, donde descubrí mi pasión por la hidrometalurgia. A la profesora Eugenia, agradezco su guía excepcional durante el desarrollo de esta memoria de título: sus conocimientos en el campo, su paciencia, comprensión y compromiso académico fueron faros indispensables en este proceso.

Gracias a Gustavo y Diego, quienes me acompañaron en este largo camino e hicieron más llevaderos esos momentos difíciles en la universidad, con quienes compartimos días de estudio, trabajos, triunfos y derrotas, pero en todo momento me sentí feliz de contar con su amistad y puedo decir con orgullo que son los mejores amigos que tuve durante la carrera.

Reconozco también el valor formativo de mi experiencia en planta, que me permitió aplicar todo lo aprendido durante mi formación en la universidad y seguir aprendiendo. A Lilian, Silvana, Karen y Diego, jefes con un valor incalculable para mí, que me orientaron y acompañaron durante esta experiencia, mi gratitud por cada consejo oportuno. A los jefes de turno y operadores de las plantas de SX y EW, en especial a los señores Alex Espinoza, Moisés Vega, Carlos Álvarez, Juan Castro, Juan Carrasco, Santiago Rivera, Pablo Segovia, Ismael Cortés, Richard Berger, Eliseo López, Miguel Boggioni, Claudio Neira, Mario Bugueño, Víctor Campillai, César Vega, Cristian Torres, Jorge Rivera, Jorge Videla, Nelson Espinoza, Héctor Vega y Elías Sandoval. A pesar de estar tan lejos de casa, me recibieron como una familia e hicieron más llevadera mi estadía en el norte, ofreciéndome su experiencia de manera desinteresada.

Finalmente, quiero dedicar un agradecimiento especial a Javiera, mi compañera de vida, cuyo apoyo y respaldo incondicional ha sido un refugio y un soporte en cada etapa de este viaje, quien estuvo ahí en los días buenos y en esos días que parecían no terminar nunca, acompañándome incluso a la gran distancia. Su empatía, paciencia, cariño y complicidad han sido fundamentales para mí y han iluminado no solo este largo proceso académico, sino también mi crecimiento personal. Sin sus palabras de aliento ni su compañía no habría sido capaz de llegar hasta aquí. Por esto y más, siempre tendrá mi infinita gratitud.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el estudio y optimización de la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención de la División Chuquicamata, mediante el análisis de variables operacionales claves seleccionadas a partir de información bibliográfica y datos operacionales. Se evaluó la correlación entre la eficiencia de corriente y factores como la composición del electrolito, temperatura, flujo de alimentación, densidad de corriente, cortocircuitos y conductividad de las busbars. Para ello, se recopiló y estandarizó información proveniente de distintas fuentes dentro del período de estudio, permitiendo una evaluación global del proceso.

Los resultados evidenciaron que la eficiencia de corriente de la planta se encontraba por debajo de los valores óptimos reportados en la literatura, con un promedio de 88,94%. Además, se identificó una alta variabilidad entre secciones, con valores que oscilaban entre un máximo de 93,94% en la sección F1 y un mínimo de 83,04% en la sección E2.

El análisis de correlación permitió determinar que las variables con mayor impacto en la eficiencia de corriente fueron la densidad de corriente, la temperatura del electrolito de avance y la conductividad de las busbars. En particular, la conductividad de las busbars explicó en gran medida la variabilidad entre secciones, atribuyéndose a diferencias estructurales y condiciones de mantenimiento.

Como parte del estudio, se propusieron medidas de optimización, entre ellas el aumento progresivo de la densidad de corriente, la regulación de la temperatura del electrolito dentro de rangos óptimos y la implementación de un plan de mantenimiento preventivo de las busbars. Además, se desarrolló un dashboard en Power BI para el monitoreo continuo de la eficiencia de corriente y sus variables asociadas, facilitando la toma de decisiones operativas.

En conclusión, los hallazgos de este trabajo proporcionan información clave para la mejora del desempeño de la planta, destacando la importancia del mantenimiento estructural para mejorar la eficiencia del proceso, lo que conlleva un menor gasto de recursos con un mayor impacto, dadas las condiciones operacionales de la nave de electroobtención.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze and optimize current efficiency in the electrowinning plant of the Chuquicamata Division by examining key operational variables selected based on bibliographic information and operational data. The correlation between current efficiency and factors such as electrolyte composition, temperature, feed flow, current density, short circuits, and busbar conductivity was evaluated. To achieve this, data from various sources within the study period were collected and standardized, allowing for a comprehensive assessment of the process.

The results showed that the plant's current efficiency was below the optimal values reported in the literature, averaging 88,94%. Additionally, a high variability between sections was identified, with values ranging from a maximum of 93,94% in section F1 to a minimum of 83,04% in section E2.

The correlation analysis determined that the variables with the greatest impact on current efficiency were current density, electrolyte feed temperature, and busbar conductivity. In particular, busbar conductivity largely explained the variability between sections, which was attributed to structural differences and maintenance conditions.

As part of the study, optimization measures were proposed, including the progressive increase of current density, regulation of electrolyte temperature within optimal ranges, and the implementation of a preventive maintenance plan for busbars. Additionally, a Power BI dashboard was developed for continuous monitoring of current efficiency and its associated variables, facilitating operational decision-making.

In conclusion, the findings of this study provide key insights for improving the plant's performance, highlighting the importance of structural maintenance to enhance process efficiency. This leads to lower resource consumption with a greater impact, given the operational conditions of the electrowinning facility.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	4
2.1. CONTEXTO DE LA EMPRESA.....	4
2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	4
2.2.1. APILAMIENTO	5
2.2.2. LIXIVIACIÓN.....	6
2.2.3. ÓXIDOS.....	6
2.3. ELECTROOBTENCIÓN DE COBRE	8
2.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO	8
2.3.2. ESTRUCTURA DE UNA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN	10
2.3.3. CALIDAD CATÓDICA	11
2.3.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD	13
2.3.4. EFICIENCIA DE CORRIENTE	13
2.3.4.1. COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO	14
2.3.4.2. TEMPERATURA DEL ELECTROLITO	15
2.3.4.3. DENSIDAD DE CORRIENTE	16
2.3.4.4. CORTOCIRCUITOS.....	17
2.3.4.5. FLUJO DE ELECTROLITO	17
2.3.4.6. CONDUCTIVIDAD DE BUSBARS Y CONTACTOS	18
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	19
3.2. UNIFICACIÓN DE DATOS	20
3.3. CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CORRIENTE.....	21
3.4. CORRELACIÓN CON VARIABLES OPERACIONALES	22
3.4.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON Y VALOR DE P.....	23
3.5. ELABORACIÓN DE POWER BI.....	23
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	25

4.1. CATASTRO DE VARIABLES DE ESTUDIO	25
4.2. RESULTADOS DE EFICIENCIA DE CORRIENTE	26
4.3. ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE CORRIENTE.....	27
4.3.1. ANÁLISIS GLOBAL DE LA NAVE	27
4.3.1.1. COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO	27
4.3.1.2. TEMPERATURA DEL ELECTROLITO.....	29
4.3.1.3. DENSIDAD DE CORRIENTE	30
4.3.1.4. FLUJO DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO.....	32
4.3.2. ANÁLISIS POR SECCIÓN DE LA NAVE	34
4.3.2.1. CORTOCIRCUITOS.....	37
4.3.2.2. CONDUCTIVIDAD DE LAS BUSBARS.....	40
4.4. DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA PLANTA.....	44
4.5. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA PLANTA.....	46
4.5.1. OPTIMIZACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE	46
4.5.2. AUMENTO DE LA TEMPERATURA DEL ELECTROLITO RICO O AVANCE	47
4.5.3. MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO PROGRAMADO DE BUSBARS.....	47
4.5.4. REDUCCIÓN Y CONTROL DE CORTOCIRCUITOS	48
4.6. TABLERO DE CONTROL (POWER BI).....	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	50
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES.....	52
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	55
ANEXO A. CÁLCULO DE VARIABLES.....	55
A.1. CÁLCULO DE PROMEDIO DIARIO DE CORRIENTE.....	55
A.2. CÁLCULO DE DENSIDAD DE CORRIENTE	56
A.3. CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CORRIENTE	56
ANEXO B. PLANILLAS DE DATOS RECOPIRADOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FLUJO DE PROCESO PRODUCTIVO GEL.	5
FIGURA 2. LAYOUT PLANTA DE EW CHUQUICAMATA.	8
FIGURA 3. ESQUEMA DE LA REACCIÓN ELECTROQUÍMICA GLOBAL EN EW DE COBRE.	9
FIGURA 4. ARREGLO TRADICIONAL DE UNA CELDA DE EW.	11
FIGURA 5. CORTOCIRCUITO EN LA SUPERFICIE DE UN CÁTODO DE COBRE (AQUEVEQUE, WIECHMANN, & BURGOS, 2009).	17
FIGURA 6. EFICIENCIA DE CORRIENTE PROMEDIO POR MES DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.	27
FIGURA 7. GRÁFICOS QUE RELACIONAN COMPOSICIÓN DE ESPECIES EN ELECTROLITO Y EFICIENCIA DE CORRIENTE.	28
FIGURA 8. GRÁFICO QUE RELACIONA LA TEMPERATURA DEL AVANCE VS. LA EFICIENCIA DE CORRIENTE DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.	29
FIGURA 9. GRÁFICO QUE RELACIONA LA DENSIDAD DE CORRIENTE VS. LA EFICIENCIA DE CORRIENTE DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.	31
FIGURA 10. GRÁFICO QUE RELACIONA EL FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE AVANCE VS. LA EFICIENCIA DE CORRIENTE DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO.	32
FIGURA 11. VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CORRIENTE PARA UN RANGO DE FLUJO DE AVANCE ACOTADO.	33
FIGURA 12. VARIACIÓN DE LA EFICIENCIA DE CORRIENTE PARA UN RANGO DE DENSIDAD DE CORRIENTE ACOTADO.	33
FIGURA 13. EFICIENCIA DE CORRIENTE POR SECCIÓN DE LA NAVE DE EW.	34
FIGURA 14. VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE LA EFICIENCIA DE CORRIENTE POR SECCIÓN EN EL CIRCUITO E. (A) E1; (B) E2; (C) E3; (D) E4; (E) E5; (F) E6.	36
FIGURA 15. VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE LA EFICIENCIA DE CORRIENTE POR SECCIÓN EN EL CIRCUITO E. (A) F1; (B) F2; (C) F3; (D) F4; (E) F5; (F) F6.	37
FIGURA 16. GRÁFICO QUE MUESTRA LA EFICIENCIA DE CORRIENTE PROMEDIO Y PORCENTAJE DE CIRCUITOS POR SECCIÓN EN LA NAVE DE EW.	39
FIGURA 17. MAPA DE CALOR DE BUSBARS POR CELDA EN NAVE DE EW.	40
FIGURA 18. TEMPERATURA PROMEDIO DE LAS BUSBARS POR SECCIÓN.	41
FIGURA 19. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE LAS BUSBARS FRENTE A LA CORRIENTE APLICADA EN CADA CIRCUITO.	42

FIGURA 20. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE BUSBARS EN LA SECCIÓN F2 FRENTE A LA CORRIENTE APLICADA.	43
FIGURA 21. ALGUNAS PESTAÑAS DEL DASHBOARD INTERACTIVO ELABORADO PARA LA PLANTA.	49
FIGURA 22. PLANILLA DE CONTROL DE COSECHAS Y SIEMBRAS DE LA PLANTA.	57
FIGURA 23. PLANILLA DE CONTROL DE CORTOCIRCUITOS.	57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA REQUERIDA PARA CÁTODOS DE COBRE DE ALTA CALIDAD (DESIGNACIÓN CU-CATH-1) (LONDON METAL EXCHANGE, 2024).....	12
TABLA 2. VARIABLES DE ESTUDIO.....	22
TABLA 3. VARIABLES MEDIDAS DIRECTAMENTE EN LA PLANTA.	25
TABLA 4. DESVIACIONES ESTÁNDAR POR SECCIÓN.....	35
TABLA 5. CORTOCIRCUITOS MEDIDOS EN EL CIRCUITO E.	38
TABLA 6. CORTOCIRCUITOS MEDIDOS EN EL CIRCUITO F.	38
TABLA 7. PENDIENTE DE LA RECTA TRAZADA PARA CADA CONJUNTO DE DATOS POR SECCIÓN.	42
TABLA 8. VARIABLES DE ESTUDIO Y SUS RESPECTIVOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS RELEVANTES.....	44
TABLA 9. MEDICIONES DE CORRIENTE EN UN DÍA.	55
TABLA 10. DATOS PARA CALCULAR EFICIENCIA DE CORRIENTE PARA UNA SECCIÓN DADA.	56

NOMENCLATURA

EW: Electrowinning (proceso de electroobtención).

SX: Solvent extraction (proceso de extracción por solventes).

Codelco: Corporación Nacional del Cobre.

DCh: División Chuquicamata.

SD: Standard deviation (desviación estándar).

p: Valor de significancia. Probabilidad de que un resultado se haya producido por casualidad.

LME: London Metal Exchange (Bolsa de metales de Londres).

Busbar: Barra colectora. Conduce la corriente eléctrica a lo largo de una celda.

CC: Cortocircuito.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de electroobtención desempeña un papel crucial en la producción de cátodos de cobre de alta pureza mediante la vía hidrometalúrgica, constituyendo la etapa final de un conjunto de operaciones que incluyen la lixiviación y la extracción por solventes. Este proceso es esencial porque transforma el cobre presente en soluciones (electrolito) en cátodos metálicos sólidos, que representan el producto final del ciclo productivo. Su importancia radica en que permite obtener cobre con una pureza cercana al 99,99%, lo cual es indispensable para satisfacer las demandas del mercado y cumplir con los estrictos requisitos de calidad exigidos por los estándares internacionales.

El resultado de esta operación no solo es un cátodo de cobre de alta pureza, sino también un material que debe cumplir con normas que establecen parámetros físicos y químicos específicos para su comercialización. Entre estos estándares se encuentran características como el espesor uniforme, escasa presencia de nodulaciones, la adherencia del depósito, y la ausencia de contaminantes metálicos o no metálicos que puedan comprometer su calidad. Estos factores son determinantes para garantizar que el cobre producido sea competitivo en los mercados internacionales y apto para su uso en aplicaciones industriales, como la fabricación de cables eléctricos y componentes electrónicos.

Para alcanzar estos altos niveles de calidad, el proceso de electroobtención debe operar bajo parámetros estrictamente controlados. Variables como la densidad de corriente, la temperatura del electrolito y su composición química, y las condiciones de flujo deben ser finamente ajustadas para optimizar tanto la eficiencia de corriente como la calidad del depósito. Cualquier desviación en estos parámetros puede traducirse en defectos en el producto final, pérdidas de eficiencia energética o problemas operativos que impactan negativamente en la productividad de la planta.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de electroobtención, la eficiencia de corriente se posiciona como un indicador clave del desempeño operativo, ya que mide el porcentaje de la corriente suministrada que se emplea efectivamente en el depósito de cobre. Este parámetro es crucial no solo para garantizar la productividad del proceso, sino también para optimizar

el consumo energético, que representa un componente significativo en la operación. Sin embargo, la eficiencia de corriente es altamente sensible al valor de la densidad de corriente, presencia de cortocircuitos y reacciones parásitas. Estas variables pueden afectar negativamente la eficiencia, además de reducir la calidad del depósito, incrementar los costos operacionales y disminuir la competitividad de la planta.

Dada la complejidad inherente al control de estas variables en un entorno industrial dinámico, resulta imprescindible implementar estrategias que permitan un monitoreo y análisis continuo. Con este propósito, el presente estudio se orientó hacia la implementación de un sistema de monitoreo y control basado en el análisis de datos operacionales, utilizando herramientas avanzadas de visualización y control. Estas herramientas facilitaron la identificación de patrones y áreas de mejora, permitiendo una comprensión más clara y accesible de las variables operativas, incluso en un contexto de alta variabilidad. Este sistema busca no solo mantener una operación eficiente, sino también optimizar la toma de decisiones en tiempo real y contribuir al desarrollo de prácticas más sostenibles y competitivas en la planta de electroobtención.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención de la División Chuquicamata e implementar estrategias de control para su optimización mediante el análisis de variables operacionales clave.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general, se plantearon una serie de objetivos específicos, que corresponden a:

- Implementar el cálculo de la eficiencia de corriente como variable de control en la operación.
- Identificar las variables operacionales más relevantes que afectan la eficiencia de corriente, a través de análisis bibliográfico y de datos operativos históricos.
- Establecer correlaciones entre las variables operacionales y la eficiencia de corriente, evaluando su impacto en el desempeño del proceso.
- Proponer una estrategia operacional para optimizar la eficiencia de corriente.

- Diseñar y proponer mejoras al proceso para incrementar la eficiencia operacional de la planta.
- Desarrollar una herramienta de visualización que facilite el monitoreo continuo de la eficiencia de corriente y sus variables asociadas.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. CONTEXTO DE LA EMPRESA

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa estatal chilena dedicada a la exploración, producción, refinación y comercialización de cobre y constituye una de las mayores empresas productoras de cobre del mundo. Actualmente, cuenta con 8 operaciones a lo largo del país, las que, ordenadas de norte a sur, corresponden a las divisiones: Radomiro Tomic (DRT), Chuquicamata (DCh), Ministro Hales (DMH), Gabriela Mistral (DGM), Salvador (DSAL), Ventanas (DVEN), Andina (DAND) y El Teniente (DET), las que, juntas, suman una producción propia de 1.324.554 toneladas de cobre fino (Codelco, 2024).

Dentro de este contexto, la mina a rajo abierto de DCh, ubicada en la Región de Antofagasta, es una de las más grandes del mundo, la que, además, se encuentra en un proceso de transición a minería subterránea. En lo que respecta a producción, en el año 2023, DCh produjo 248.495 t de cobre fino, lo que corresponde a un 18,76% del total de producción de Codelco (Codelco, 2024). Esta división se caracteriza por explotar tanto sulfuros como óxidos de cobre, por lo que cuenta con ambas líneas de producción: la pirometalúrgica para sulfuros y la hidrometalúrgica para los óxidos. Esta última es llevada a cabo por la Gerencia de Extracción y Lixiviación (GEL) de Chuquicamata.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El tratamiento de óxidos dentro de la GEL sigue un circuito hidrometalúrgico tradicional de producción de cátodos de cobre a partir de minerales oxidados, el que comprende lixiviación, extracción por solventes y electroobtención, sin embargo, la materia prima tratada no corresponde a mineral extraído de una mina, sino a rípios previamente lixiviados y dispuestos en botaderos. A continuación, se presenta un diagrama simplificado del proceso productivo.

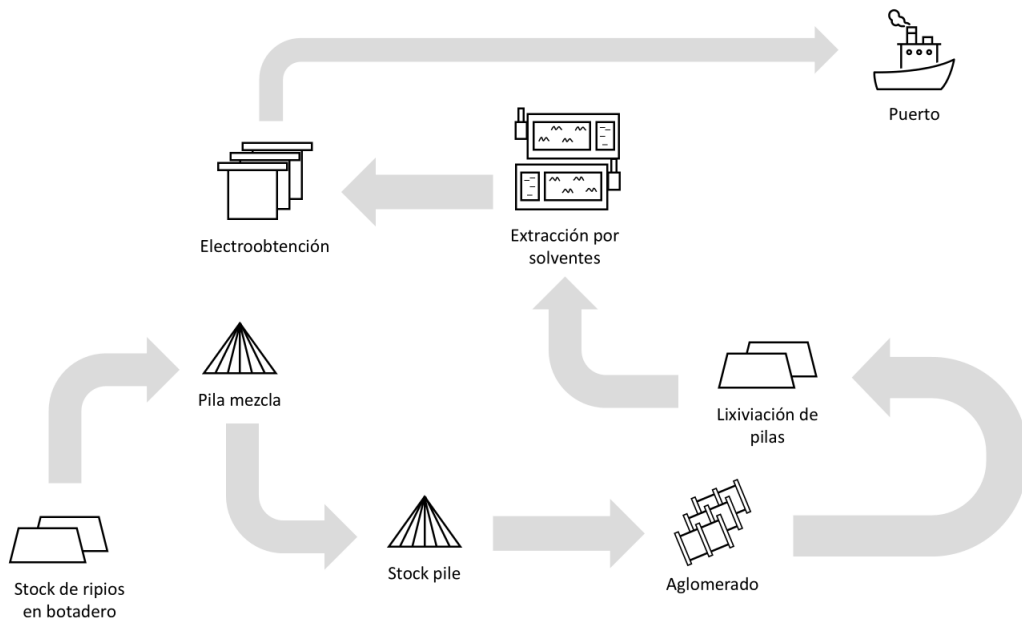


Figura 1. Flujo de proceso productivo GEL.

Por razones administrativas, la línea de producción de óxidos está dividida en 3 unidades: apilamiento, lixiviación y óxidos (plantas de SX y EW).

2.2.1. APILAMIENTO

El ripio es transportado desde los botaderos mediante camiones de extracción (CAEX) hacia los buzones de traspaso, desde donde es transferido a través de correas transportadoras con una capacidad nominal de 2.550 t/h. Durante este trayecto, el material pasa por una serie de parrillas metálicas que funcionan como harneros, cuya función es retener elementos de sobretamaño. Además, se utilizan detectores de metales para identificar y retirar objetos extraños que podrían comprometer el funcionamiento del sistema o la disposición de los ripios.

Posteriormente, el ripio con tamaño de partícula demasiado fino para ser dispuesto directamente en las pilas es procesado en tres tambores aglomeradores que operan en paralelo. En esta etapa, se aplican dosis de 10 L/t de ácido y 20 L/t de agua, logrando la formación de glómeros con un tamaño y porosidad adecuados. Este proceso mejora la permeabilidad de las pilas y su estabilidad, asegurando una distribución uniforme de

las soluciones de riego e impidiendo que se produzcan deslizamientos o derrumbes de las pilas.

Una vez aglomerados, los rípios son trasladados a un puente apilador, una estructura móvil compuesta por correas transportadoras y orugas que permite formar las pilas de manera controlada. Estas pilas, tras completar su ciclo de riego, son finalmente removidas y transportadas nuevamente mediante camiones CAEX hacia los botaderos, cerrando así el ciclo de tratamiento de rípios.

2.2.2. LIXIVIACIÓN

Las pilas son regadas con una solución de riego, que puede ser refino, ILS (también conocido como PDS en la operación) o una solución ácida, dependiendo de la etapa del ciclo de riego en la que se encuentre la pila correspondiente. Este riego permite la disolución del cobre contenido en el material, generando un PLS (solución que contiene cobre).

El PLS obtenido es canalizado hacia piscinas diseñadas para su decantación, donde se facilita la separación de una fracción de los sólidos en suspensión, donde el PLS fluye de una piscina a otra por rebalse y los sólidos son decantados por acción de la gravedad. Una vez clarificada, la solución es bombeada a través de tuberías hacia la etapa de extracción por solventes (SX), donde se inicia el proceso de purificación y concentración del cobre.

2.2.3. ÓXIDOS (SX – EW)

El PLS proveniente del proceso de lixiviación es recibido en la planta de extracción por solventes (SX) en dos piscinas conectadas en serie y operadas por rebalse, lo que permite minimizar el arrastre de sólidos presentes aun en la solución. Desde estas piscinas, el PLS es bombeado hacia dos trenes de procesamiento que trabajan en paralelo, denominados tren A y tren B, con una capacidad combinada de 2.150 m³/h (1.300 m³/h para el tren A y 850 m³/h para el tren B). Cada tren incluye dos etapas de extracción y una etapa de stripping, mientras que el tren A cuenta adicionalmente con un lavador. El flujo en ambos trenes opera en contracorriente, mejorando la eficiencia de extracción y minimizando pérdidas. Además, el sistema está equipado con

coalescedores y filtros para reducir el arrastre de orgánicos hacia las etapas posteriores del proceso.

El avance generado es transferido a la planta de electroobtención (EW) a un flujo de 1.000 m³/h, donde se almacena en un estanque de avance (llamado TK-DD). Desde allí, es bombeado a un estanque de recirculación (denominado TK2), donde se mezcla con 1.000 m³/h de spent para luego ser alimentado a las celdas de electroobtención, pasando primero por celdas de sacrificio. Estas celdas productivas están distribuidas en dos circuitos, denominados circuito E y circuito F, con 126 celdas en el primero y 102 en el segundo, organizadas en seis secciones por circuito, con 63 cátodos por cada celda. En las celdas, el cobre es depositado en cátodos permanentes de acero inoxidable, mientras que los ánodos están fabricados con una aleación de Pb–Ca–Sn laminadas.

Los cátodos cosechados son primeramente seleccionados y posteriormente empaquetados y pesados para su despacho hacia el puerto, con una producción promedio de 38.000 t anuales. El spent que sale del proceso, a una razón de 1.000 m³/h, posterior a la recirculación a las celdas, es enviado al estanque de spent (llamado TK-BB), desde donde se recircula nuevamente a la planta de SX para la etapa de stripping, completando el circuito operativo.

A continuación, en la **Figura 2**, se presenta un layout de la planta de EW de Chuquicamata.

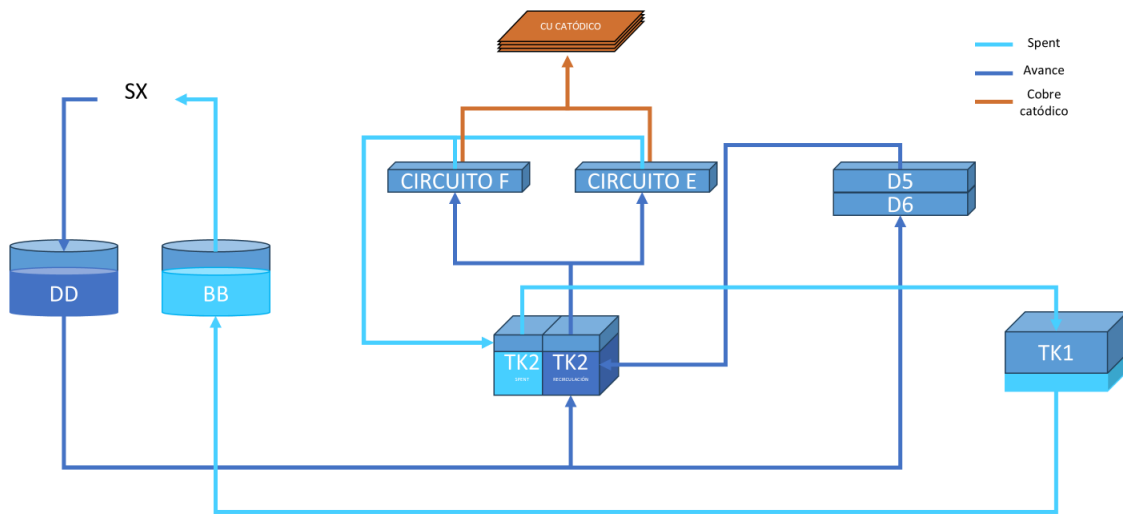


Figura 2. Layout planta de EW Chuquicamata.

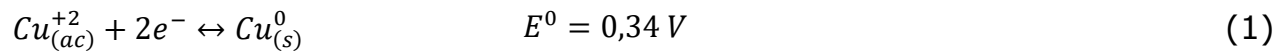
2.3. ELECTROOBTENCIÓN DE COBRE

2.3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

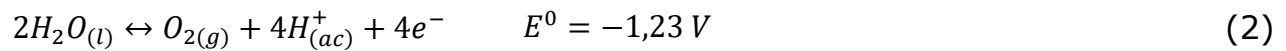
La electroobtención (EW) de cobre es un proceso electrometalúrgico empleado para obtener cobre metálico de alta pureza (>99,99%) a partir de una solución ácida que contiene iones Cu^{+2} , en concentraciones que suelen estar sobre los 40 g/L, conocida como "avance". Este proceso utiliza corriente eléctrica directa para provocar la reducción de los iones de cobre, depositándolos como cobre metálico en la superficie de un cátodo, mientras que en el ánodo ocurre la reacción de oxidación del agua, generando oxígeno gaseoso.

La electroobtención constituye la etapa final del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre, precedida generalmente por las etapas de lixiviación y extracción por solventes (SX). Su propósito principal es la obtención de cátodos de cobre que cumplan estándares internacionales, tales como los definidos por la London Metal Exchange (LME), para su uso en diversas aplicaciones industriales y electrónicas (Schlesinger et al., 2011).

El principio operativo se basa en las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos. En el cátodo, los iones Cu^{+2} son reducidos a cobre metálico:



Mientras tanto, en el ánodo, el agua se oxida para formar oxígeno molecular, liberando protones al electrolito:



Así, la reacción global que se lleva a cabo en una celda de EW de cobre es la siguiente, la que también se ilustra en la **Figura 3**:

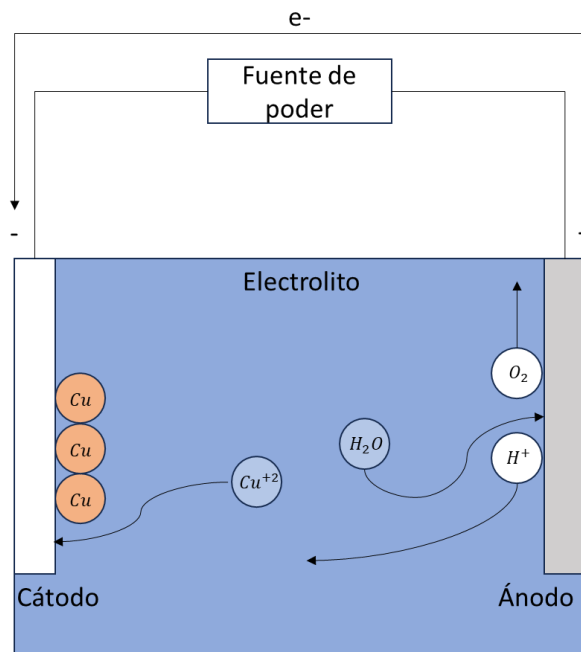


Figura 3. Esquema de la reacción electroquímica global en EW de cobre.

Estas reacciones están influenciadas por varios parámetros operativos, como la densidad de corriente, la temperatura del electrolito y su composición química, entre otros. En condiciones ideales, el proceso logra alta eficiencia de corriente, pero la presencia de impurezas o reacciones parásitas, como la reducción de otras especies metálicas o la evolución de hidrógeno, puede disminuir su rendimiento (Pletcher & Walsh, 1990).

El éxito de la electroobtención depende de un control de las condiciones operativas. La densidad de corriente, por ejemplo, debe optimizarse para evitar problemas como la

formación de depósitos dendríticos en los cátodos o el exceso de sobrevoltaje en el sistema. Asimismo, la composición del electrolito, incluyendo la relación ácido/cobre, influye directamente en la conductividad y estabilidad del proceso (Habashi, 1999; Sole, 2002).

Finalmente, el diseño de los electrodos y el flujo de electrolito son esenciales para garantizar una distribución uniforme de corriente y minimizar las pérdidas de eficiencia.

2.3.2. ESTRUCTURA DE UNA CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN

Las celdas de EW están diseñadas para maximizar la eficiencia del proceso y asegurar un depósito uniforme del cobre. Los componentes principales incluyen:

- **Cátodos:** los que pueden ser placas de acero inoxidable, también llamados cátodos permanentes, o láminas de cobre, también conocidas como cátodos iniciales o de partida. En la actualidad, los primeros son los más utilizados.
- **Ánodos:** los más comunes son fabricados con una aleación de plomo, calcio y estaño laminados (Pb-Ca-Sn), cuyas propiedades permiten la ocurrencia de la reacción de oxidación del agua, además de ser insolubles en el medio.
- **Electrolito:** constituida básicamente por una solución de sulfato de cobre en un medio de ácido sulfúrico.

Las celdas se agrupan en secciones, conectadas en serie principalmente o en paralelo según el diseño de la planta. En una celda típica, los electrodos están dispuestos en forma alternada y paralela, permitiendo un flujo uniforme de corriente, además, se ajusta un espaciado óptimo entre los electrodos para asegurar una uniformidad de la distribución de corriente, cuidando su verticalidad.

El suministro de corriente eléctrica es controlado por rectificadores, equipos que convierten la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC). Los rectificadores deben proporcionar un flujo estable y ajustable de corriente para mantener las condiciones óptimas de operación, minimizando sus fluctuaciones.

Otro componente esencial en el sistema eléctrico de las celdas de EW son las busbars, o barras colectoras, las que están encargadas de transportar la corriente a la celda. Estas barras son fabricadas usualmente de cobre debido a su alta conductividad eléctrica y resistencia mecánica.

El diseño y disposición de las busbars juegan un rol crucial en la eficiencia del sistema. Su sección transversal está dimensionada para altas corrientes sin generar calor excesivo, lo que ayuda a minimizar las pérdidas por resistencia (ASTM International, 2020). Además, el cobre utilizado suele estar recubierto o tratado para resistir la corrosión en ambientes altamente ácidos y a temperaturas elevadas, típicas en operaciones de electroobtención (Habashi, 1999).

Las busbars están configuradas para distribuir la corriente de manera uniforme a lo largo de cada celda. Además, su disposición adecuada previene efectos como fluctuaciones de voltaje o puntos calientes (hot spots), que pueden comprometer la eficiencia energética y operativa del sistema (Pletcher & Walsh, 1990).

A continuación, en la **Figura 4**, se ilustra un esquema simplificado de un arreglo tradicional de una celda de electroobtención.

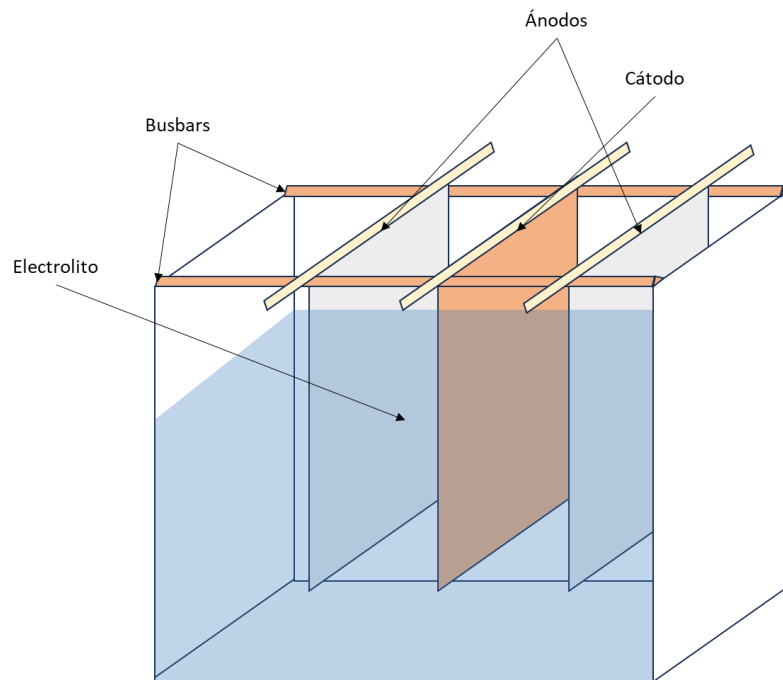


Figura 4. Arreglo tradicional de una celda de EW.

2.3.3. CALIDAD CATÓDICA

La calidad del cátodo de cobre producido en el proceso de EW es crucial para garantizar su aceptación en los mercados internacionales y su desempeño en aplicaciones

industriales. La calidad se evalúa principalmente a través de su composición química y propiedades físicas, ambas determinantes para clasificar el producto como cobre de alta pureza (grado A según estándares como LME).

- **Composición química:** un cátodo de alta calidad debe cumplir con estándares internacionales de pureza, típicamente superiores al 99,99% de cobre, con concentraciones mínimas de impurezas como hierro, azufre y plomo, de acuerdo con la **Tabla 1**. La presencia de estas impurezas, que provienen desde el electrolito, afecta la calidad química del cátodo depositado. Por ejemplo, concentraciones elevadas de hierro pueden generar depósitos defectuosos debido a reacciones secundarias que compiten con la reducción de iones cúpricos (Jacobs & Groot, 2019; Robinson, Sandoval, Sole, Davenport, & Davenport, 2013).

Tabla 1. Composición química requerida para cátodos de cobre de alta calidad (designación Cu-CATH-1) (London Metal Exchange, 2024).

Elemento	Cu	Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
Composición, % máximo	-	0,0025	0,0005	0,00020	-	-	-	0,0010	-	-
P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Zn	Máximo de elementos distintos a Cu	
-	0,0005	0,0015	0,0004	0,00020	-	-	0,00020	-	0,0065	

- **Propiedades físicas:** la morfología del depósito es crucial. Un cátodo bien formado presenta una superficie compacta y uniforme, sin defectos como dendritas o depósitos de polvo, los cuales se asocian con condiciones inadecuadas de corriente o electrolito. Parámetros como la densidad de corriente y la concentración de ciertos aditivos (como agentes nivelantes) influyen en la formación de gránulos más pequeños y estructuras menos dendríticas, mejorando la calidad del depósito (Jacobs & Groot, 2019).

2.3.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD

La calidad catódica se ve afectada por diversas variables, entre las que destacan:

- Control del electrolito: la optimización de los niveles de impurezas, sean estas disueltas o especies insolubles, y la adición de inhibidores, como cloruro o aditivos orgánicos, puede mejorar la uniformidad del depósito.
- Condiciones operativas: densidades de corriente más altas tienden a producir depósitos más dendríticos, mientras que corrientes moderadas favorecen la formación de capas más compactas.
- Tecnología utilizada: la implementación de cátodos permanentes de acero inoxidable, el diseño de celdas y el uso de sensores de medición en línea han mejorado significativamente la calidad catódica, reduciendo defectos en los depósitos y optimizando la operación.

2.3.4. EFICIENCIA DE CORRIENTE

La cantidad de cobre depositada en un cátodo durante un tiempo determinado y una corriente dada puede ser calculada teóricamente gracias a la ley de Faraday, la que se muestra a continuación:

$$m_{Cu} = \frac{I \cdot t \cdot P_{Cu}}{n \cdot F} \quad (4)$$

Con:

- m: Masa teórica de cobre depositado (g).
- I: Corriente aplicada a la celda (A).
- t: Tiempo que circula corriente a través de la celda de EW (s).
- P_{Cu} : Masa atómica del cobre (g/mol).
- n: Número de equivalentes intercambiados en la reacción electroquímica (g-eq/mol).
- F: Constante de Faraday (cb/g-eq).

Esta ecuación considera condiciones ideales, en donde toda la corriente alimentada al proceso es usada en el depósito del cobre. Sin embargo, se sabe que en la práctica esto

no ocurre, ya que existen diversos factores que contribuyen al consumo de corriente del proceso, tales como:

- El requerimiento estequiométrico para que ocurra la reacción de la Ecuación (3).
- Ineficiencias relacionadas a la ocurrencia de reacciones parásitas.
- Ineficiencias ocasionadas por cortocircuitos.
- Fugas de corriente en la propia estructura de las celdas de la nave de EW.

Debido a esto, se utiliza el concepto de eficiencia de corriente, que, desde un punto de vista práctico, corresponde a la cantidad real de cobre depositado dividido por la cantidad calculada teóricamente con la Ecuación (4), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\xi = \frac{m_{Cu,real}}{m_{Cu,teórica}} \cdot 100 \quad (5)$$

Con:

- ξ : Eficiencia de corriente (%).
- $m_{Cu, real}$: Masa medida de cobre depositado.
- $m_{Cu, teórica}$: Masa calculada de cobre depositado, usando la ley de Faraday.

En las plantas de EW convencionales, este valor de eficiencia de corriente suele oscilar entre 85-95% (Schlesinger et al., 2011). La corriente que no es usada para depositar el cobre, generalmente, suele perderse en:

- Cortocircuitos.
- Fugas de corriente a tierra.
- Reducción del ion férrico (Fe^{+3}) u oxígeno disuelto en el cátodo.
- Redisolución u oxidación del cobre depositado en el cátodo.

De esta forma, la eficiencia de corriente se ve afectada por diversos factores que se describen a continuación.

2.3.4.1. COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO

La composición del electrolito es un factor crítico que influye directamente en la eficiencia de corriente durante la EW de cobre. Las impurezas presentes en el electrolito pueden generar reacciones secundarias indeseables, lo que obliga a implementar

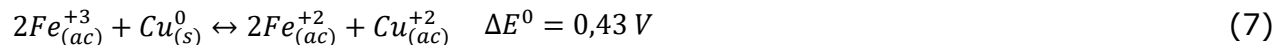
estrategias como la adición de aditivos, la purga de soluciones y, en algunos casos, la modificación del proceso operativo para mitigar sus efectos.

Entre las impurezas más perjudiciales, el ion férrico (Fe^{+3}) destaca por dos mecanismos principales que afectan negativamente la eficiencia del proceso:

- Pérdida de corriente por reducción del ion férrico en el cátodo, lo cual compite con la reducción de los iones cúpricos (Cu^{+2}), como se observa en la Ecuación (6):



- Oxidación del cobre metálico depositado por el ion férrico, lo que causa la redisolución del cobre y reduce la eficiencia del depósito, según la Ecuación (7):



Adicionalmente, la concentración de ácido en el electrolito tiene un efecto significativo en el proceso. Una mayor concentración de ácido aumenta la conductividad eléctrica de la solución, mejorando el transporte iónico (Owais, 2009). Sin embargo, si la concentración de ácido cerca del cátodo es demasiado alta, pueden surgir problemas, especialmente en condiciones de:

- Bajo flujo de electrolito, lo que provoca el agotamiento de los iones cúpricos (Cu^{+2}) y reduce la disponibilidad de especies metálicas en la superficie del cátodo.
- Alta densidad de corriente, que favorece la producción de hidrógeno por reducción del protón, como se describe en la Ecuación (8):



Finalmente, la concentración de iones cúpricos (Cu^{2+}) en el electrolito desempeña un papel fundamental en la eficiencia de corriente. Una concentración adecuada y constante asegura un suministro continuo de iones en la superficie del cátodo, favoreciendo una mayor tasa de depósito y reduciendo la probabilidad de reacciones secundarias.

2.3.4.2. TEMPERATURA DEL ELECTROLITO

La temperatura del electrolito afecta tanto las propiedades fisicoquímicas del electrolito como las reacciones electroquímicas en los electrodos. Entre sus principales efectos, se pueden encontrar:

- Mejora en la cinética de las reacciones electroquímicas: un aumento en la temperatura del electrolito generalmente acelera las reacciones de reducción y oxidación debido a un incremento en la energía cinética de las partículas y una disminución en las resistencias de activación de las reacciones. Esto facilita el depósito de cobre en el cátodo, incrementando la eficiencia de corriente bajo condiciones controladas (Schlesinger et al., 2011).
- Disminución de la viscosidad del electrolito: con temperaturas más altas, la viscosidad del electrolito disminuye, mejorando la movilidad iónica y, por ende, la conductividad eléctrica del sistema. Esto permite un transporte más eficiente de iones cúpricos (Cu^{+2}) hacia la superficie del cátodo, lo cual es esencial para mantener tasas de depósito constantes (Habashi, 1999).
- Impacto en la estabilidad de los aditivos y las impurezas: la temperatura también afecta la estabilidad de los aditivos orgánicos utilizados para controlar la morfología del depósito de cobre y minimizar los efectos de las impurezas. Temperaturas excesivamente altas pueden degradar estos aditivos, reduciendo su eficacia y causando irregularidades en el depósito (Owais, 2009).

2.3.4.3. DENSIDAD DE CORRIENTE

A densidades de corriente bajas, el proceso está principalmente controlado por activación, es decir, la transferencia de cargas es el mecanismo limitante en el proceso, permitiendo una depositación uniforme y eficiente. Sin embargo, esto puede limitar la tasa de producción debido a la menor cantidad de cobre depositado por unidad de tiempo.

A medida que aumenta la densidad de corriente, se incrementa la tasa de depositación de cobre, pero también se presentan desafíos. Por ejemplo, a altas densidades, el proceso puede pasar a estar limitado por la difusión de iones cúpricos hacia la superficie del cátodo. Esto puede conducir a una formación no deseada de depósitos dendríticos y porosos, reduciendo tanto la eficiencia de corriente como la calidad del cobre depositado. En un estudio se observó que en densidades de corriente superiores a 645 A/m^2 , la morfología de los depósitos se vuelve más dendrítica, mientras que a valores óptimos cercanos a 390 A/m^2 , los depósitos son más compactos y de mejor calidad (Ettel, Gendron, & Tilak, 1975).

Otro aspecto es que densidades de corriente extremadamente altas favorecen reacciones secundarias, como la producción de hidrógeno en el cátodo, producto del empobrecimiento de iones Cu^{+2} en las vecindades de este, lo que disminuye aún más la eficiencia de corriente.

2.3.4.4. CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos son un fenómeno durante el cual el cobre es depositado en una pequeña área de los cátodos, como se observa en la **Figura 5**, formando nódulos que reducen la distancia entre el par ánodo-cátodo y, en consecuencia, la resistencia que genera el electrolito entre estos. Producto de esto, la corriente circula preferentemente por esta área, lo que conlleva una gran disipación de energía en un periodo de tiempo determinado, disminuyendo considerablemente la eficiencia de corriente de la operación, por lo que representan un problema nocivo para la EW (Aqueveque, Wiechmann, & Burgos, 2009).

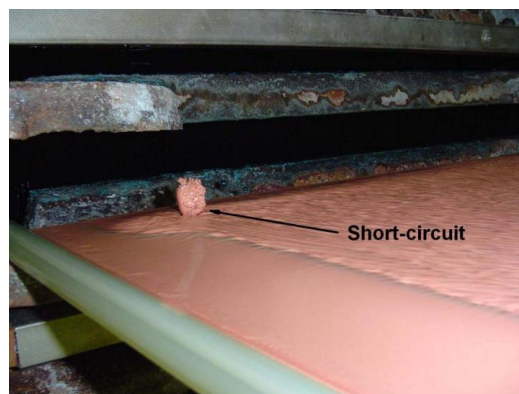


Figura 5. Cortocircuito en la superficie de un cátodo de cobre (Aqueveque, Wiechmann, & Burgos, 2009).

2.3.4.5. FLUJO DE ELECTROLITO

El flujo de electrolito en las celdas de EW es un factor crucial para mantener la eficiencia de corriente. Una adecuada circulación del electrolito asegura la renovación constante de los iones cúpricos en la vecindad del cátodo, lo que reduce los gradientes de concentración y minimiza el riesgo de formación de depósitos irregulares o reacciones secundarias. Un flujo insuficiente puede resultar en un agotamiento local de iones cúpricos cerca de la superficie del cátodo, además de una disminución de temperatura

dentro de la propia celda. Esto favorece la evolución del hidrógeno como reacción competitiva, lo que disminuye la eficiencia de corriente y genera defectos en el depósito catódico. Por otro lado, un flujo excesivo puede incrementar el costo operativo y provocar turbulencias que afecten la uniformidad del depósito.

2.3.4.6. CONDUCTIVIDAD DE BUSBARS Y CONTACTOS

La conductividad de las busbars y los contactos en las celdas de EW desempeña un papel fundamental en la eficiencia del proceso, incluyendo la eficiencia de corriente. Estos componentes actúan como canales principales para la transmisión de corriente desde las fuentes de energía hacia las celdas, y cualquier resistencia adicional en estos puntos puede generar pérdidas significativas de energía y afectar el desempeño general.

Las busbars, al igual que los contactos eléctricos entre los electrodos y las busbars, pueden introducir resistencias que dificultan el paso de corriente hacia los electrodos, la que se disipa como calor. Esto provoca variaciones en la densidad de corriente aplicada a los cátodos y puede derivar en formación desigual del depósito de cobre, reducción de la eficiencia de corriente y generación de cortocircuitos locales (Wiechmann, Morales, & Aqueveque, 2010).

Además, un mantenimiento deficiente de los contactos, como la acumulación de óxido o una conexión suelta, puede aumentar la resistencia y, en consecuencia, las pérdidas por calor en estos puntos. Estudios han mostrado que la identificación y mitigación de puntos calientes ("hotspots") mediante cámaras infrarrojas puede mejorar significativamente la eficiencia de corriente (Moongo & Sony, 2021).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El presente trabajo se basa en el estudio y correlación de variables de proceso de la planta de EW de la DCh con la eficiencia de corriente. Para ello, se diseñó una metodología de trabajo que abarcó la recolección sistemática de datos operacionales de diferentes fuentes, su unificación en una planilla centralizada, y la visualización de la información mediante la plataforma Power BI. Este enfoque permitió un monitoreo exhaustivo y continuo de las variables de proceso, así como la identificación de patrones y oportunidades de mejora en la eficiencia de corriente.

3.1. RECOLECCIÓN DE DATOS

El primer paso de la metodología consistió en la recolección de datos operacionales de la planta que, basados en la literatura, tuvieran relación con la eficiencia de corriente. Sin embargo, primero fue necesario identificar las fuentes de información y establecer una periodicidad de la recolección de estos datos. Para este estudio, se consideró el periodo comprendido entre octubre del año 2023 y junio del año 2024.

Para capturar una visión integral de las variables que afectan la eficiencia de corriente, se tomaron datos de diversas fuentes, como:

- Análisis químico de muestras enviadas a laboratorio: los resultados de los análisis químicos del electrolito eran cargados a PI System, por lo que, mediante PI Datalink, debían ser leídos en una planilla de Excel con esta extensión.
- Reportes de producción: a través de planillas independientes, eran realizados los reportes de producción de la planta, tales como la cosecha y siembra de cátodos.
- Mediciones tomadas en terreno: la temperatura, tanto de los electrodos como de las barras conductoras, era tomada en terreno con un termómetro infrarrojo y luego traspasada a un informe.

Respecto a la periodicidad de los datos, existe una variación según la fuente. Las muestras de electrolito eran tomadas cada 4 horas, mientras que los reportes de

producción y las mediciones eran diarios¹ (todo esto considerando días de operación normales).

De los datos recolectados, se consideraron ciertos supuestos que es necesario precisar:

- La composición del electrolito se considera homogénea para la alimentación de todas las celdas.
- Como la variable de salida en estudio corresponde a la eficiencia de corriente, esta puede ser medida solamente en las cosechas, por lo que el resultado de cada medición depende del comportamiento de las variables de entrada durante el periodo entre la siembra y la cosecha.
- Las operaciones de cosecha y siembra de celdas son continuas, por lo que se considera que la cantidad de cátodos por celda en operación no varía en el tiempo (lo que podría afectar al cálculo de densidad de corriente).

3.2. UNIFICACIÓN DE DATOS

Después de identificar las fuentes de datos clave y establecer la periodicidad con la que debían recolectarse, la información operativa y de laboratorio fue inicialmente organizada en planillas de Excel independientes. Este enfoque buscó garantizar que los datos fueran accesibles y mantuvieran una estructura coherente para su uso inmediato. Sin embargo, con el objetivo de facilitar el manejo, la actualización y el análisis de las variables monitoreadas, se procedió a unificar estas planillas en un archivo maestro. Esta unificación no solo permitió centralizar la información en un único repositorio, sino también facilitar su análisis.

Un aspecto crítico de este proceso fue el ajuste de formatos. Las diversas fuentes de datos presentaban diferencias en la estructura, nomenclatura y tipo de información recopilada, lo que requirió estandarización. Esto incluyó la normalización de fechas, unidades de medida y categorizaciones, además de la eliminación de inconsistencias y valores atípicos. Este trabajo de limpieza y organización fue esencial para garantizar la compatibilidad de los datos con herramientas de análisis más avanzadas.

¹ En el caso de las mediciones de temperatura, si bien se realizaban diariamente, se alternaban las secciones y celdas a muestrear.

Posteriormente, la información fue cargada en Power BI, una plataforma de visualización de datos que permitió desarrollar dashboards interactivos y gráficos personalizados. Este paso final no solo facilitó la interpretación de las tendencias y patrones, sino también ofreció a los operadores y supervisores una herramienta de monitoreo en tiempo real. Gracias a esta integración, se optimizó el acceso a datos críticos y se habilitó la toma de decisiones basada en evidencia.

Esta metodología de recopilación, unificación, ajuste y análisis destacó por su versatilidad y capacidad de adaptarse a los requerimientos dinámicos del proceso de electroobtención, sentando una base sólida para futuros estudios y optimizaciones operativas.

3.3. CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CORRIENTE

En primer lugar, se empleó la Ecuación (4) para determinar la masa teórica de cobre que debería haberse depositado durante cada ciclo de siembra y cosecha de los cátodos. Este cálculo se fundamenta en la corriente eléctrica aplicada promedio durante el ciclo y el tiempo total de operación en días para cada tercio de las celdas involucradas en el proceso.

La corriente aplicada promedio se obtuvo a partir de los registros operacionales de la planta, asegurando que los datos reflejaran con precisión las condiciones reales del proceso. Adicionalmente, se registraron los días de operación de cada tercio, lo que permitió calcular con exactitud la carga eléctrica suministrada durante el ciclo completo. Este valor fue luego utilizado en la Ecuación (4) para estimar la cantidad de cobre que, idealmente, debería haberse depositado en condiciones de 100% de eficiencia.

Por otro lado, los datos reales de producción se obtuvieron mediante el pesaje de las cosechas de los cátodos de cobre, los cuales proporcionaron la masa efectiva de cobre obtenido. Con esta información, se procedió al cálculo de la eficiencia de corriente utilizando la Ecuación (5), que compara la masa real depositada con la masa teórica previamente calculada. Posteriormente, estos resultados fueron tabulados y ordenados por tercio, sección y fecha.

Esta metodología permitió evaluar con precisión el desempeño del proceso y detectar posibles desviaciones en la eficiencia de corriente.

3.4. CORRELACIÓN CON VARIABLES OPERACIONALES

Para evaluar la relación entre la eficiencia de corriente y distintas variables operacionales de la planta de electroobtención, se llevó a cabo un análisis de correlación basado en datos históricos.

En primer lugar, se seleccionaron las variables de estudio, considerando su impacto potencial en la eficiencia de corriente, según la literatura y la experiencia operativa en la planta, los que se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Variables de estudio.

Variable	Unidad de medida	Detalle
ξ	%	Corriente utilizada efectivamente para llevar a cabo el depósito de cobre.
$C_{Cu^{+2},avance}$	g/L	Concentración de cobre en el avance.
$C_{Fe^{+3},avance}$	g/L	Concentración de ion férrico en el avance.
$C_{H^+,avance}$	g/L	Concentración de ácido en el avance.
T_{avance}	°C	Temperatura del avance.
i	A/m ²	Densidad de corriente.
Q_{avance}	m ³ /h	Flujo de avance alimentado a la nave.
CC	-	Cantidad de cortocircuitos medidos a través de temperatura de electrodos.
$T_{busbars}$	°C	Temperatura de busbars de las celdas.

Los datos fueron extraídos de registros operacionales. Sin embargo, algunas variables no eran medidas directamente, por lo que fue necesario realizar los cálculos correspondientes para obtenerlas y así llevar a cabo el análisis.

3.4.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON Y VALOR DE P

Para reforzar estadísticamente el análisis de la relación entre la eficiencia de corriente y las variables operacionales escogidas, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente, denotado como r , mide la intensidad y dirección de la relación lineal entre dos variables y su valor varía entre -1 y 1, donde:

- $r = 1$, indica una correlación perfectamente positiva (a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace proporcionalmente).
- $r = -1$, indica que hay una correlación perfectamente negativa (cuando una variable disminuye, la otra aumenta proporcionalmente).
- $r = 0$, indica que no existe correlación lineal entre las variables.

Además, para determinar si la correlación observada es estadísticamente significativa, se calculó el valor de p . Este valor representa la probabilidad de obtener los resultados observados si la hipótesis nula (H_0 : no hay relación entre las variables) fuera cierta. Para este estudio, se estableció un umbral de significancia del 5% ($p \leq 0,05$), lo que implica que existe un 95% de confianza en que la correlación detectada no es producto del azar.

Así, se calcularon ambos valores para cada variable de estudio para encontrar correlaciones entre las variables y su significancia estadística.

3.5. ELABORACIÓN DE POWER BI

Con el objetivo de facilitar el monitoreo y análisis de las variables clave que influyen en la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención, se diseñó y desarrolló un dashboard interactivo utilizando Power BI. Este dashboard permite visualizar de manera dinámica la evolución de los principales indicadores operacionales y su relación con la eficiencia de corriente, proporcionando una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. Para realizar esto, se siguieron los siguientes pasos:

- Recolección y organización de datos: estos fueron extraídos de las fuentes mencionadas en la sección 3.1, para luego ser integrados a una base de datos unificada en Excel, asegurando la correcta estructuración de tablas y hojas de cálculo para su posterior carga a Power BI.
- Procesamiento y limpieza de datos: se eliminaron valores atípicos y registros incompletos, se realizó la conversión de formatos de fecha y unidades de medida

para estandarizar los datos y se calcularon indicadores derivados, como promedios semanales, mensuales, etc.

- Diseño del dashboard: el dashboard se diseñó para contar con una interfaz intuitiva y de fácil interpretación, tanto para operadores como supervisores de la planta.
- Implementación y uso operacional: el dashboard fue puesto en operación, con actualizaciones automáticas de datos para mantenerlo en tiempo real, permitiendo la identificación de tendencias y anomalías en las variables, evaluar el impacto de cambios en condiciones operacionales y tomar decisiones informadas para optimizar el proceso de electroobtención.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CATASTRO DE VARIABLES DE ESTUDIO

Como se mencionó anteriormente, se hizo enfoque en las siguientes variables de estudio: eficiencia de corriente (como variable de salida), concentración de especies en el electrolito (Cu^{+2} , Fe^{+3} , H^{+}), temperatura del electrolito, flujo de alimentación del electrolito, cortocircuitos y temperatura de las busbars.

A través de la recolección de datos, se pudo determinar qué variables son medidas y controladas directamente y cuáles son obtenidas de forma indirecta a través de cálculos. A continuación, se enumeran, en la **Tabla 3** las variables obtenidas directamente de datos de la planta que fueron utilizadas en el estudio, junto con su procedencia.

Tabla 3. Variables medidas directamente en la planta.

Variable	Unidad de medida	Fuente	Detalle
$C_{\text{Cu}^{+2},\text{avance}}$	g/L	PI System	Concentración de cobre en el avance.
$C_{\text{Fe}^{+3},\text{avance}}$	g/L	PI System	Concentración de ion férrico en el avance.
$C_{\text{H}^{+},\text{avance}}$	g/L	PI System	Concentración de ácido en el avance.
T_{avance}	°C	PI System	Temperatura del avance.
Q_{avance}	m ³ /h	PI System	Flujo de avance alimentado a la nave.
$T_{\text{electrodos}}$	°C	Medición en terreno mediante termómetro infrarrojo	Temperatura de electrodos.
T_{busbars}	°C	Medición en terreno mediante termómetro infrarrojo	Temperatura de busbars de las celdas.
$m_{\text{real},\text{cátodos}}$	kg	Informes de producción diarios	Masa de cátodos electroobtenidos.
$t_{\text{electroobtención}}$	días	Informes de producción diarios	Tiempo de operación de celdas de EW.
I	A	PI System	Corriente de alimentación a celdas de EW.
$A_{\text{cátodos}}$	m ²	Especificaciones de los cátodos	Área efectiva del depósito en cátodos de acero.

Luego, utilizando la información proporcionada por la planta, se calcularon el resto de variables de interés, que corresponden a:

- Masa teórica de cátodos ($m_{teórica,cátodos}$): calculada a través de la corriente de alimentación y el tiempo de operación de las celdas.
- Eficiencia de corriente (ξ): calculada a través de la masa real y la masa teórica de los cátodos.
- Cortocircuitos (CC): conteo realizado considerando un umbral de temperatura de CC.
- Densidad de corriente (i): calculada a través de la corriente y el área efectiva de depósito en los cátodos permanentes.

Así, con las variables necesarias a disposición, fue posible llevar a cabo el estudio de la planta.

4.2. RESULTADOS DE EFICIENCIA DE CORRIENTE

Los resultados mostraron un promedio general de eficiencia de corriente de 88,94%, un valor que se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para operaciones industriales de electroobtención (Schlesinger et al., 2011), aunque más cercano al límite inferior que al superior. En la **Figura 6** se presenta un gráfico que muestra el promedio de eficiencia de corriente de la nave a lo largo de los meses de estudio, cuyos valores presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo, de hasta 7 puntos porcentuales.

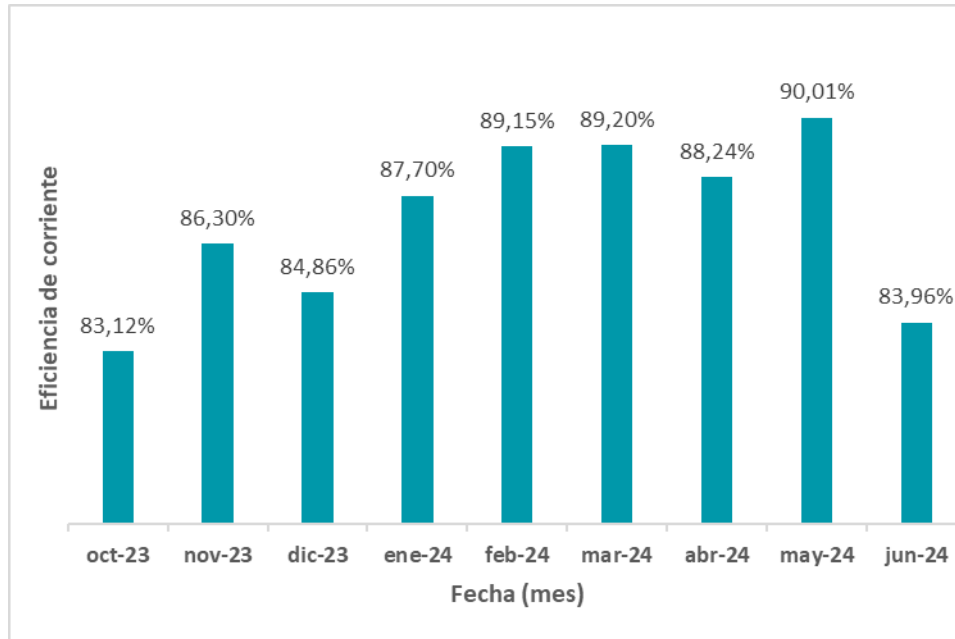


Figura 6. Eficiencia de corriente promedio por mes durante el periodo de estudio.

En particular, el análisis mensual revela un promedio máximo de eficiencia de corriente del 90,01%, registrado en mayo de 2024, y un mínimo de 83,12% en octubre de 2023. Además, se tiene que un 26,90% de los datos recopilados se encuentran por debajo del límite inferior reportado por la bibliografía (85%) y se calculó una desviación estándar de 8,39%, considerando todos los datos recopilados (excluyendo valores atípicos). Estas diferencias resaltan la necesidad de un monitoreo continuo y una comprensión profunda de las variables que afectan la eficiencia, como las mencionadas anteriormente.

4.3. ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE CORRIENTE

4.3.1. ANÁLISIS GLOBAL DE LA NAVE

Para profundizar en los factores que influyen en la eficiencia de corriente, se realizó un análisis de correlación entre esta y diversas variables operacionales clave, como la densidad de corriente, la concentración de iones cúpricos en el electrolito, la temperatura, el flujo del electrolito y la presencia de impurezas, ya que son factores que afectan a la nave de forma homogénea.

4.3.1.1. COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO

Para el caso de la composición del electrolito, se consideró la concentración de Cu^{+2} , Fe^{+3} y H^{+} . Además, se agregó la concentración de hierro total en la solución, ya que es

un parámetro de control común en la operación. Se obtuvieron los gráficos presentados en la **Figura 7**, que corresponden a gráficos de dispersión que relacionan la eficiencia de corriente con la concentración de las especies mencionadas (medida en g/L).

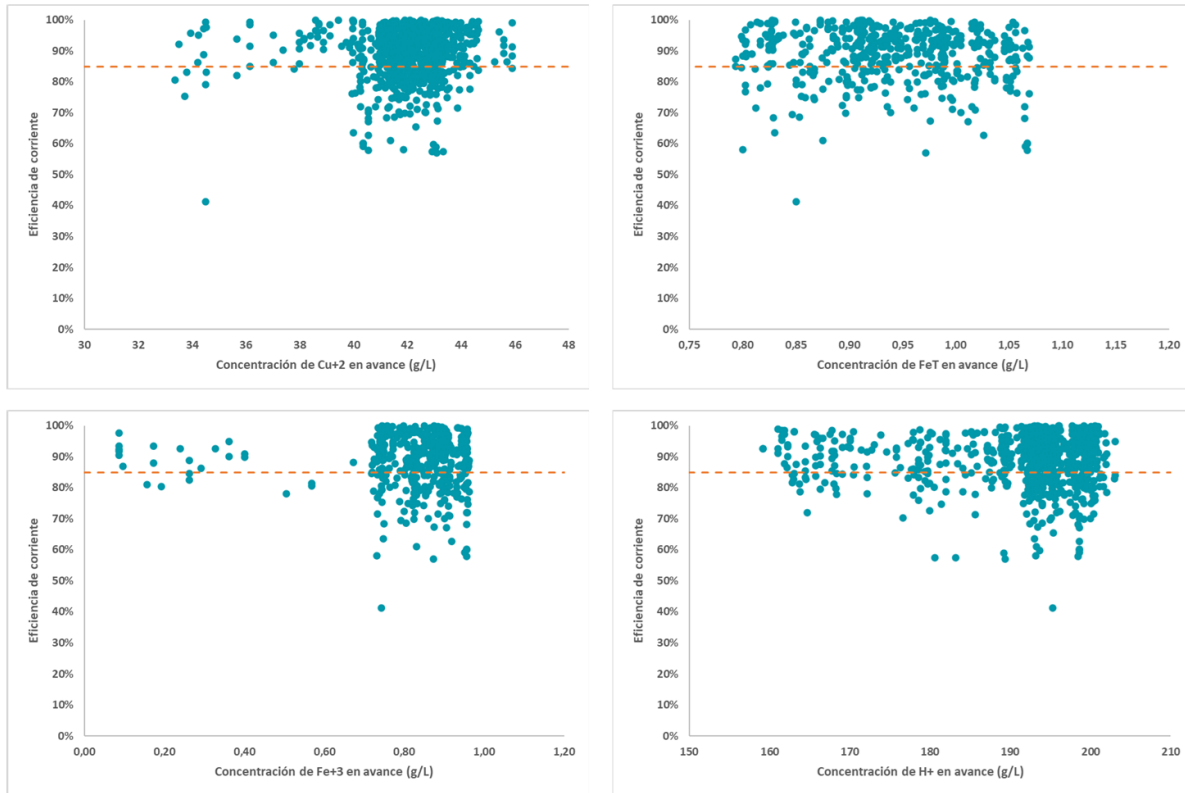


Figura 7. Gráficos que relacionan composición de especies en electrolito y eficiencia de corriente.

Como se puede observar, no hay una clara correlación entre la eficiencia de corriente y la concentración de estas especies (al menos dentro del periodo de estudio). También, se puede ver que las concentraciones se mueven dentro de un rango acotado, que se ve reflejado en las desviaciones estándar de los datos (1,74 g/L; 0,07 g/L; 0,14 g/L; y 9,84 g/L para las concentraciones de Cu^{+2} , Fe_T , Fe^{+3} y H^+ , respectivamente), lo que podría explicar la ausencia de una correlación.

Para evaluar estadísticamente la relación entre estas variables y la eficiencia de corriente, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, acompañado del valor de p para determinar la significancia de los resultados. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron 0,07; -0,07; -0,03 y -0,02 para las concentraciones de Cu^{2+} , Fe_T , Fe^{3+} y H^+ en el electrolito, respectivamente, con valores de p de 0,06; 0,13; 0,44 y 0,60.

Estos resultados indican que no se encontró una correlación estadísticamente significativa entre las concentraciones de estas especies y la eficiencia de corriente, ya que los valores de p son superiores al umbral comúnmente aceptado de 0,05, lo que sugiere que las variaciones en la concentración de estos iones no explican directamente los cambios en la eficiencia dentro del periodo analizado. Esto refuerza la necesidad de considerar otros factores operacionales que podrían estar teniendo un impacto más relevante en el proceso.

4.3.1.2. TEMPERATURA DEL ELECTROLITO

En la **Figura 8**, se muestra el gráfico obtenido a partir de la relación de la temperatura del electrolito y la eficiencia de corriente. A simple vista, no es posible establecer una relación entre ambas variables, ya que el conjunto de datos no sigue una tendencia, ni siquiera realizando un filtrado de datos. Además, se calculó el promedio de la temperatura para eficiencias mayores y menores a 92% (que corresponde al aproximado del promedio de la nave), resultando en valores similares (28,73 °C y 28,44 °C, respectivamente).

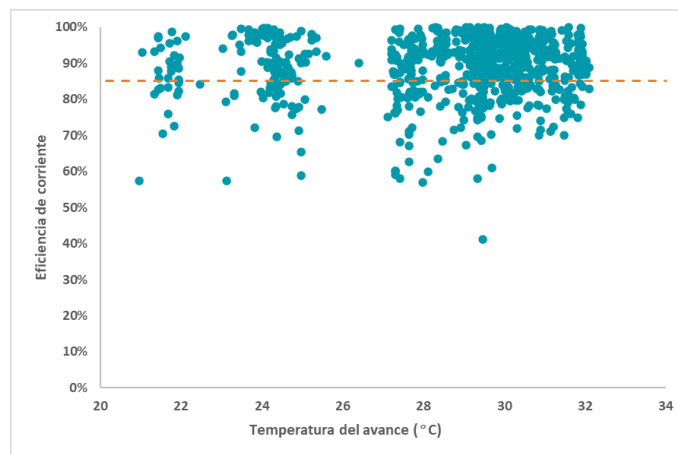


Figura 8. Gráfico que relaciona la temperatura del avance vs. la eficiencia de corriente durante el periodo de estudio.

El análisis de la dispersión de los datos de temperatura arrojó una desviación estándar de 2,63 °C, lo que indica un rango de variabilidad relativamente acotado durante el período de estudio. Esta estabilidad térmica sugiere que la temperatura del electrolito no ha presentado fluctuaciones significativas que puedan generar una tendencia clara en la eficiencia de corriente.

Sin embargo, al calcular el coeficiente de correlación de Pearson y su valor de p, se obtuvieron valores de 0,09 y 0,01, respectivamente. Si bien el valor de p sugiere una significancia estadística del 1%, el coeficiente de correlación es muy bajo y positivo, lo que indica una relación directamente proporcional, pero extremadamente débil entre la temperatura del electrolito y la eficiencia de corriente.

Además, se observó que la operación se llevó a cabo a temperaturas relativamente bajas, con un promedio de 28,58 °C, un máximo de 32,09 °C y un mínimo de 20,97 °C. Estos valores están considerablemente por debajo del rango óptimo recomendado en la literatura, que varía entre 40 y 60 °C, dependiendo de las condiciones específicas de cada planta (Ehsani, Yazici, & Deveci, 2016).

Esto sugiere que un aumento controlado de la temperatura podría contribuir a mejorar la eficiencia del proceso, siempre que se mantenga dentro de los límites adecuados para evitar efectos adversos, como el aumento de la evaporación del electrolito o la corrosión de los componentes de la celda.

4.3.1.3. DENSIDAD DE CORRIENTE

Gracias a los datos recopilados de corriente y al área de depósito de los cátodos, que corresponde a 1 m² por placa, fue posible calcular la densidad de corriente. Se obtuvo un promedio de 141,41 A/m², con una desviación estándar de 23,90 A/m² y un valor máximo y mínimo de 195,94 A/m² y 76,73 A/m², respectivamente, lo que evidencia una gran variabilidad en la operación, además de estar muy por debajo de los parámetros recomendados en la literatura (~250 A/m²).

Con estos datos, se pudo elaborar el gráfico de dispersión de la **Figura 9**, el cual muestra la relación entre la densidad de corriente y la eficiencia de corriente.

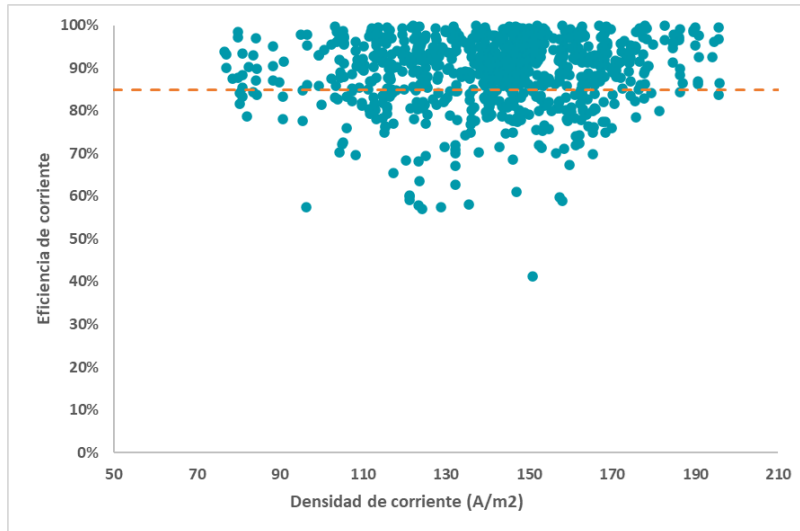


Figura 9. Gráfico que relaciona la densidad de corriente vs. la eficiencia de corriente durante el periodo de estudio.

A pesar de que la literatura sugiere que un aumento en la densidad de corriente puede afectar la eficiencia debido a fenómenos como la formación de hidrógeno o la limitación de masa, en los datos analizados no se observa, al menos gráficamente, una correlación clara entre ambas variables. Es importante destacar que, como se mencionó anteriormente, los valores de densidad de corriente se encuentran muy por debajo del promedio de operación mundial, incluso considerando valores extremos, por lo que es normal que las variaciones en este valor no tengan una incidencia importante en la eficiencia de corriente.

Al analizar estadísticamente la correlación entre la densidad y la eficiencia de corriente, se obtuvieron un coeficiente de correlación de Pearson de 0,1 y un valor de p de 0,01, mostrando una significancia estadística positiva, pero, al igual que en el caso de la temperatura, es extremadamente débil para el caso de estudio. A pesar de esto, se puede asumir, a partir de los datos, que un aumento regulado de la densidad de corriente conllevará una mejora en la eficiencia de corriente.

Es importante destacar que los rechazos podrían influir significativamente en la relación observada entre la eficiencia de corriente y la densidad de corriente. Esto se debe a que, al realizar los cálculos, una parte de la corriente efectiva utilizada para la electrodeposición del cobre no se reflejaría correctamente, ya que la masa depositada en los cátodos rechazados no es contabilizada en la cosecha final. En consecuencia, la

eficiencia de corriente estimada podría verse subestimada en comparación con la corriente realmente utilizada en el proceso.

4.3.1.4. FLUJO DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTROLITO

En cuanto al flujo de alimentación del electrolito hacia las celdas de electroobtención, se registraron valores que oscilaron entre un mínimo de 501,34 m³/h y un máximo de 1.002,15 m³/h, con un promedio de 880,14 m³/h y una desviación estándar de 122,07 m³/h. En la **Figura 10**, se presenta un gráfico de dispersión que ilustra la relación entre el flujo de alimentación con la eficiencia de corriente durante el periodo de estudio.

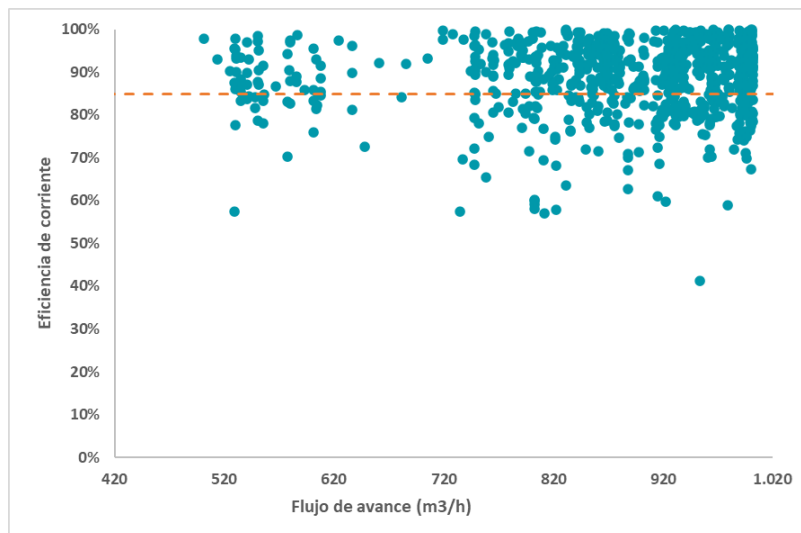


Figura 10. Gráfico que relaciona el flujo de alimentación de avance vs. la eficiencia de corriente durante el periodo de estudio.

A partir del análisis de los datos, no se observa una tendencia clara entre ambas variables, lo que sugiere que el flujo de alimentación no presenta un impacto significativo y directo en la eficiencia de corriente.

Para evaluar esta relación desde un punto de vista estadístico, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, obteniéndose un valor de 0,07, con un valor de p de 0,05. Si bien este resultado indica una significancia estadística del 5%, lo que lo sitúa justo en el umbral de confiabilidad establecido para el estudio, el coeficiente de correlación es muy bajo, lo que sugiere una relación débil y apenas perceptible. Esto implicaría que un

aumento del flujo de alimentación podría estar asociado con un incremento leve en la eficiencia de corriente, aunque la magnitud de este efecto es marginal y no concluyente.

Por otra parte, al ser un proceso complejo y dependiente de diversas variables simultáneamente, se analizó el comportamiento de la eficiencia de corriente frente a más de una variable, fijando un rango acotado de una de estas y variando el resto. En este caso, se acotaron los valores de flujo y densidad de corriente, estableciendo un rango de 950-1000 m³/h para la primera variable y 150-200 A/m² para la segunda. Así, se obtuvieron los gráficos presentados en la **Figura 11** y **Figura 12**.

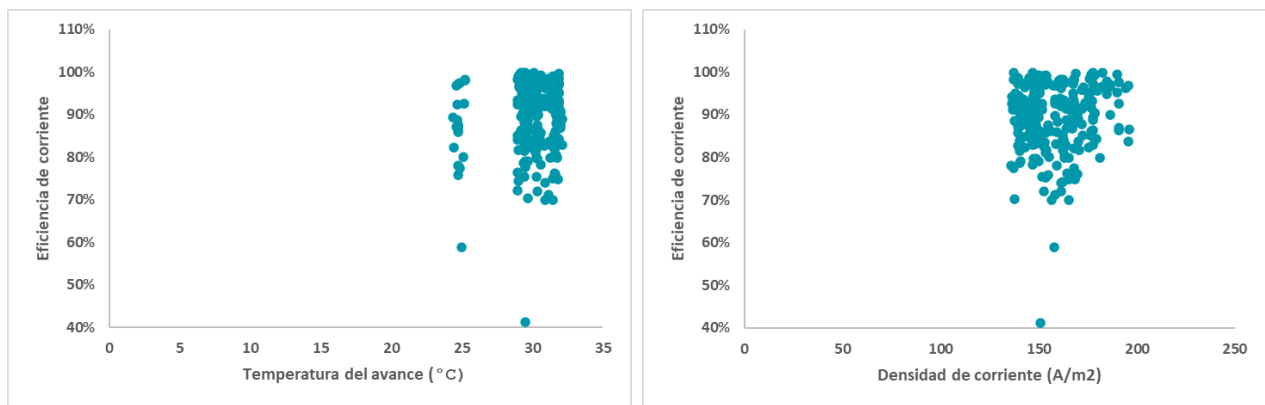


Figura 11. Variación de la eficiencia de corriente para un rango de flujo de avance acotado.

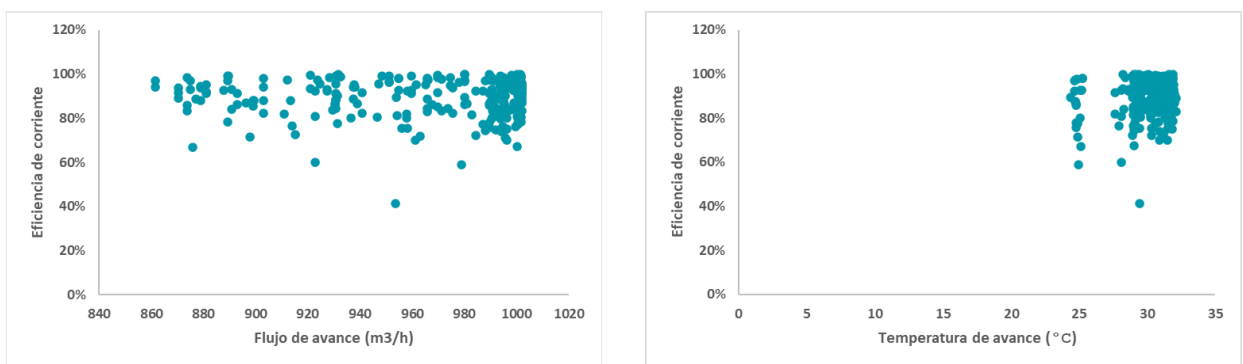


Figura 12. Variación de la eficiencia de corriente para un rango de densidad de corriente acotado.

De esta forma, no fue posible establecer una relación clara, a pesar de considerar más de una variable para su análisis.

4.3.2. ANÁLISIS POR SECCIÓN DE LA NAVE

El análisis de la eficiencia de corriente por secciones permitió identificar diferencias en el desempeño de las celdas distribuidas a lo largo de la nave. Estas variaciones podrían deberse a factores como la distribución de la corriente, las condiciones del electrolito, las propiedades de las busbars o cortocircuitos. Como se muestra en la **Figura 13**, la eficiencia de corriente promedio de cada sección varió entre un mínimo de 84,07% en la sección E2 y un máximo de 93,94% en la sección F1, además, el circuito F mostró, en promedio, un porcentaje mayor de eficiencia respecto al circuito E. Cabe destacar que la sección F1 fue sometida a una mantención completa al inicio del periodo de estudio, lo que podría explicar este aumento en la eficiencia de corriente. Estas diferencias destacan la importancia de estudiar los factores operacionales específicos de cada sección para optimizar el desempeño global del sistema.

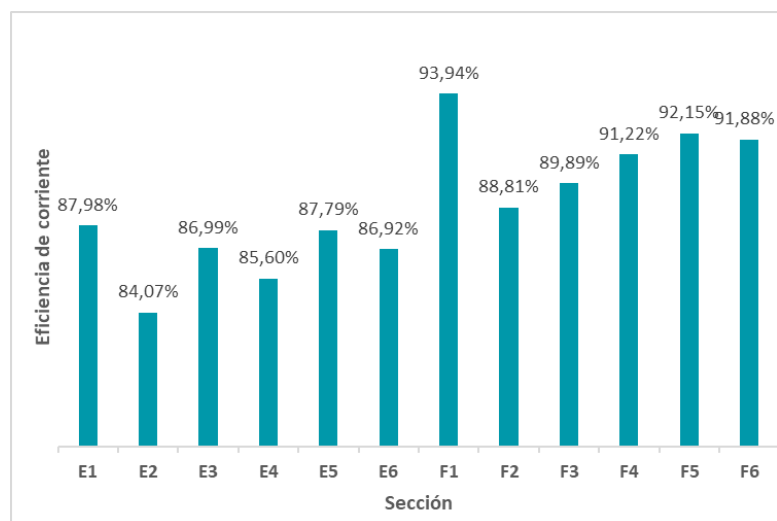


Figura 13. Eficiencia de corriente por sección de la nave de EW.

Además, en la **Figura 14** y la **Figura 15**, se muestra la variación en la eficiencia de corriente, por sección, a lo largo del periodo de estudio, en el que se puede observar un comportamiento prácticamente oscilatorio, mostrando una variabilidad moderada a lo largo del tiempo. Esta variabilidad se cuantifica mediante la desviación estándar de cada sección, cuyos valores se resumen en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Desviaciones estándar por sección.

Sección	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Desviación estándar (SD)	8,24%	7,79%	9,58%	8,22%	8,76%	7,63%

F1	F2	F3	F4	F5	F6
4,35%	10,00%	7,50%	8,19%	6,26%	7,44%

El análisis de estos datos revela diferencias significativas en la estabilidad operativa de cada sección. La sección F1 destaca como la más estable, presentando la menor variabilidad y, al mismo tiempo, la mayor eficiencia de corriente. En contraste, la sección F2 exhibe la mayor fluctuación en sus valores.



Figura 14. Variación en el tiempo de la eficiencia de corriente por sección en el circuito E. (a) E1; (b) E2; (c) E3; (d) E4; (e) E5; (f) E6.

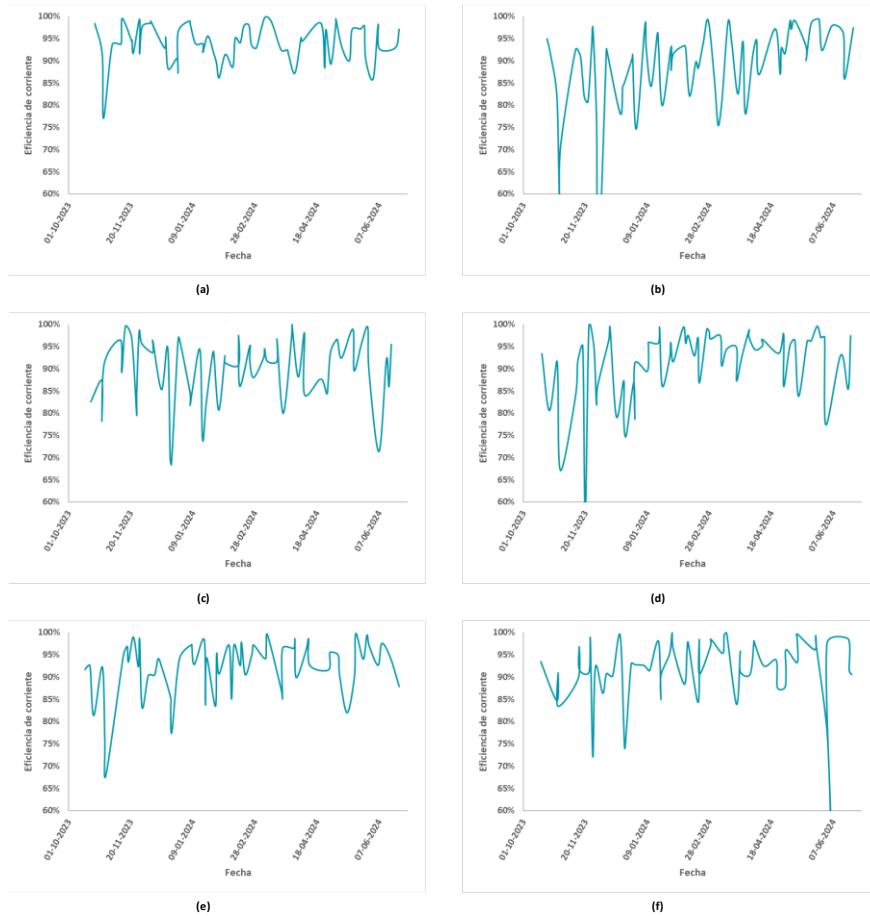


Figura 15. Variación en el tiempo de la eficiencia de corriente por sección en el circuito E. (a) F1; (b) F2; (c) F3; (d) F4; (e) F5; (f) F6.

4.3.2.1. CORTOCIRCUITOS

Al recopilar y organizar los datos de temperatura medidos en cada celda, se estableció un umbral de 53 °C como criterio para identificar la presencia de un posible cortocircuito en el electrodo. Este límite se definió con base en estudios previos y en la experiencia operativa de la planta, considerando que temperaturas superiores a este valor pueden indicar una resistencia de contacto anómala o una conducción eléctrica no deseada entre electrodos.

Bajo este criterio, se obtuvieron los resultados presentados en la **Tabla 5** y **Tabla 6**, que muestran la cantidad de mediciones que superaron el umbral de temperatura en los circuitos E y F, respectivamente.

Tabla 5. Cortocircuitos medidos en el circuito E.

Sección	Número de mediciones	Número de cortocircuitos	% de cortocircuitos
E1	294	24	8,2%
E2	675	168	24,9%
E3	548	65	11,9%
E4	485	195	40,2%
E5	358	117	32,7%
E6	867	243	28,0%
Total	3227	812	25,2%

Tabla 6. Cortocircuitos medidos en el circuito F.

Sección	Número de mediciones	Número de cortocircuitos	% de cortocircuitos
F1	297	2	0,7%
F2	424	38	9,0%
F3	931	328	35,2%
F4	382	29	7,6%
F5	509	13	2,6%
F6	509	116	22,8%
Total	3052	526	17,2%

El análisis de estas mediciones revela que las secciones con mayor incidencia de cortocircuitos fueron E4 (40,2%), F3 (35,2%) y E5 (32,7%), lo que sugiere una posible concentración de problemas en esas áreas específicas de la nave. Además, se observó que el circuito E presentó una mayor frecuencia de cortocircuitos en comparación con el circuito F (25,2% frente a 17,2%), lo que podría estar asociado a diferencias en la configuración eléctrica, el estado de los contactos o la distribución de corriente en cada circuito.

A continuación, en la **Figura 16**, se muestra un gráfico que relaciona la eficiencia de corriente por sección, representada en el eje primario, y el porcentaje de cortocircuitos, representado en el eje secundario.

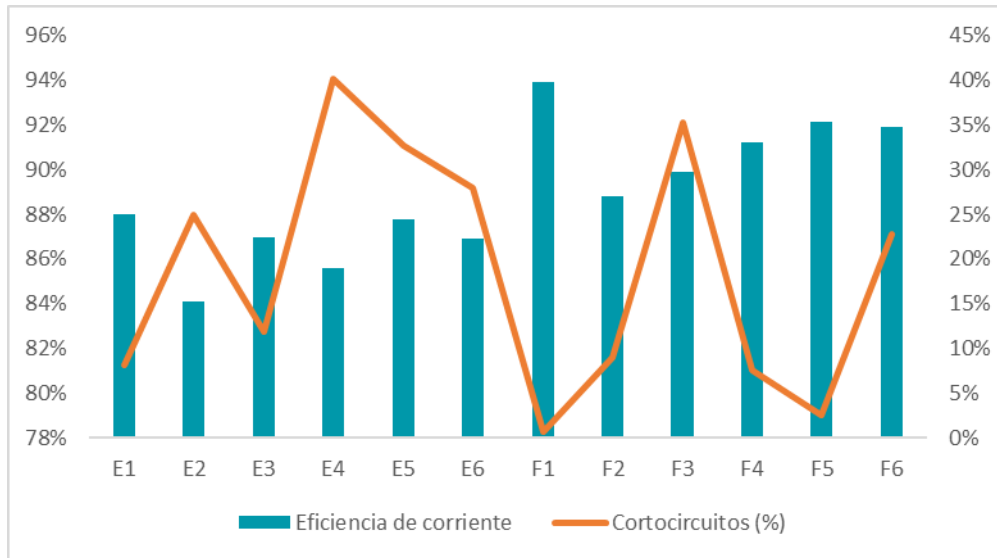


Figura 16. Gráfico que muestra la eficiencia de corriente promedio y porcentaje de cortocircuitos por sección en la nave de EW.

A primera vista, se observa que un mayor porcentaje de cortocircuitos tiende a estar asociado con una menor eficiencia de corriente, como era de esperarse. No obstante, es fundamental considerar que existe una diferencia significativa en el número de mediciones realizadas por sección, lo que podría influir en la calidad de los resultados y su interpretación.

Para evaluar esta relación de manera objetiva, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y el valor de p , obteniéndose valores de $-0,01$ y $0,78$, respectivamente. Estos resultados indican una correlación prácticamente nula y una falta de significancia estadística, lo que sugiere que, dentro de los datos analizados, los cortocircuitos no tienen un impacto determinante en la eficiencia de corriente.

Sin embargo, aunque en este estudio los cortocircuitos no se identificaron como una variable de alto impacto, siguen siendo un factor relevante en la operación, ya que pueden afectar la estabilidad del proceso y generar pérdidas localizadas. Por lo tanto, su monitoreo y control continúan siendo prácticas esenciales para optimizar el rendimiento de la electroobtención.

4.3.2.2. CONDUCTIVIDAD DE LAS BUSBARS

Mediante la medición de la temperatura de las busbars en cada celda, se elaboró el mapa de calor presentado en la **Figura 17**, el cual muestra el promedio de temperatura registrado en cada celda, utilizando una escala de color representativa.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
E1	37,58	54,07	53,60	50,99	58,77	52,20	48,47	54,45	55,13	53,98	54,22	51,62	55,91	54,10	47,22	54,86	54,84	60,33	49,18	54,84	56,68
E2	37,06	51,34	54,99	52,06	62,81	56,04	89,03	89,68	84,89	86,17	87,22	88,70	82,00	57,89	70,14	73,82	56,36	55,02	54,59	57,79	52,15
E3	37,23	49,72	52,35	49,10	45,43	50,62	49,42	50,77	56,21	54,70	51,69	50,77	54,37	50,72	51,37	50,64	47,10	43,98	46,79	54,99	49,20
E4	38,48	54,28	53,38	50,07	60,20	63,78	60,33	89,51	74,88	62,65	60,36	59,69	62,85	68,35	65,65	66,39	59,95	68,25	50,97	54,75	54,73
E5	37,61	56,84	62,75	58,29	67,82	62,32	88,39	87,10	64,08	70,78	64,25	67,74	85,80	64,02	68,23	67,51	61,69	65,42	55,83	64,31	59,58
E6	34,83	56,71	59,05	53,07	58,78	58,90	60,96	67,89	72,89	64,70	59,62	60,16	57,77	69,09	61,61	59,55	58,56	56,90	54,99	60,78	55,75
F1	37,29	36,30	36,00	36,15	36,99	36,63	35,39	35,93	36,29	36,07	35,38	35,78	37,15	36,72	37,08	36,00	37,61				
F2	45,61	65,64	72,18	65,17	48,54	64,48	69,89	65,55	47,73	63,65	69,09	63,14	51,53	64,00	61,37	71,15	54,52				
F3	38,65	48,42	48,27	47,35	50,22	52,01	40,63	39,90	40,58	42,00	39,95	40,89	65,05	59,19	65,33	61,57	53,62				
F4	41,68	52,66	62,92	57,44	59,03	60,34	64,23	59,98	63,83	65,87	49,59	64,38	48,31	47,83	60,58	50,85	49,83				
F5	41,76	62,98	57,00	62,68	56,78	63,77	57,03	62,71	62,82	53,61	48,94	57,73	57,15	55,49	66,12	51,57	54,97				
F6	43,59	57,79	49,23	50,58	47,89	55,88	40,78	51,57	66,75	53,82	43,72	41,23	63,13	42,77	46,65	49,39	60,25				

Figura 17. Mapa de calor de busbars por celda en nave de EW.

A partir de este análisis, se observa que las temperaturas más elevadas se concentran en el circuito E, con un promedio general de 57,47 °C. Dentro de este circuito, la sección con la mayor temperatura promedio es E5, alcanzando 62,87 °C, mientras que la sección con menor temperatura corresponde a E3, con 49,96 °C.

Por otro lado, en el circuito F, la temperatura promedio registrada es de 51,93 °C. La sección con las temperaturas más altas es F2, con un promedio de 61,38 °C, mientras que la sección con las temperaturas más bajas es F1, con 36,58 °C, lo que destaca como una diferencia significativa respecto a las demás secciones del circuito.

A modo de resumen, a continuación, en la **Figura 18**, se muestra un gráfico de barras con la temperatura promedio de cada sección.



Figura 18. Temperatura promedio de las busbars por sección.

Realizando un análisis estadístico de los datos, se obtuvo que el coeficiente de correlación de Pearson para esta variable tiene un valor de $-0,09$, con un valor de p de $0,04$. Esto indica, como en casos anteriores, que, a pesar de tener una significancia dentro del límite establecido, la fuerza de la correlación es baja. Sin embargo, una disminución en la temperatura de las busbars conllevaría un aumento leve en la eficiencia de corriente, lo que puede explicarse por la conductividad de estas o, dicho de otra manera, una menor resistividad, que disiparía la corriente alimentada a las celdas en forma de calor.

Es importante destacar que un aumento en la temperatura no implica necesariamente una disminución en la conductividad de la barra, por lo que este análisis debe complementarse con otros factores operacionales, como la corriente aplicada al momento de la medición de la temperatura. Por esto, a continuación, se observa, en la **Figura 19**, un gráfico de dispersión que relaciona la corriente aplicada (por cada sección) y la temperatura de la barra, como una medida indirecta de la resistividad.

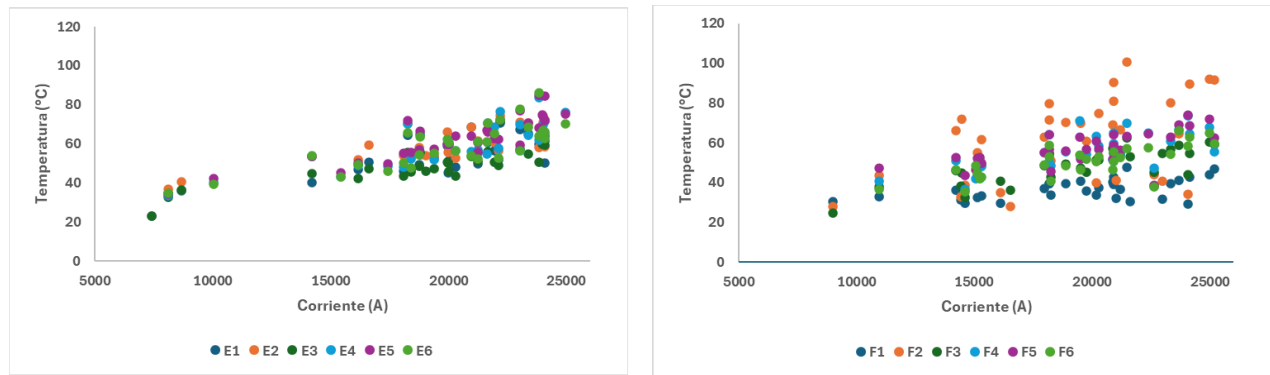


Figura 19. Comportamiento de la temperatura de las busbars frente a la corriente aplicada en cada circuito.

Se observa un comportamiento predominantemente lineal en ambos circuitos, con la excepción de la sección F2, que presenta algunos valores atípicos. La pendiente de la recta de tendencia para cada conjunto de datos proporciona una estimación comparativa de la resistividad en cada sección, lo que permite explicar en parte las variaciones observadas en la eficiencia de corriente. Este análisis es clave para identificar posibles problemas en la distribución de corriente y evaluar oportunidades de mejora en la infraestructura eléctrica de la planta.

En la **Tabla 7**, se registraron las pendientes de las rectas obtenidas para cada sección, a modo de comparar la resistividad.

Tabla 7. Pendiente de la recta trazada para cada conjunto de datos por sección.

Sección	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Pendiente ($\cdot 10^{-3}$)	1,9	1,7	1,8	2,3	2,5	2,2
F1	F2	F3	F4	F5	F6	
0,7	2,5	1,7	1,8	1,6	1,7	

Así, se puede observar que, al menos comparativamente, las secciones con peor condición en términos de conductividad son F2, E5 y E4, mientras que la sección con mejor desempeño es, notablemente, F1, la cual también exhibe la mayor eficiencia de corriente.

Como ya se mencionó anteriormente, al inicio del período de estudio, se llevó a cabo una mantención en la sección F1, que incluyó el reemplazo de sus busbars. Este cambio explica su mejor estado de conservación, reflejado en una menor resistencia eléctrica, temperaturas más bajas y, en consecuencia, una mayor eficiencia de corriente. Del mismo modo, en abril se realizó una intervención similar en la sección F2, lo que redujo significativamente su temperatura promedio, alcanzando un valor de 36,01 °C.

En la **Figura 20**, se presenta un gráfico de dispersión que muestra la relación entre la corriente aplicada y la temperatura de las busbars en la sección F2 a partir de la fecha de la mantención. Se observa que la recta de tendencia que modela el comportamiento de la temperatura en esta sección redujo su pendiente de $2,5 \cdot 10^{-3}$ (la más alta de la planta antes de la mantención) a $0,8 \cdot 10^{-3}$ (la segunda más baja), indicando una mejora en la conductividad de las barras colectoras.

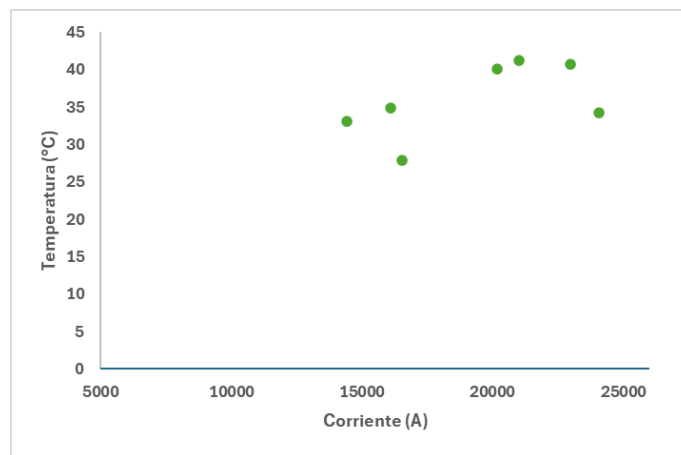


Figura 20. Comportamiento de la temperatura de busbars en la sección F2 frente a la corriente aplicada.

Además, el promedio de eficiencia de corriente de la sección F2 pasó de 86,88% a 94,73% tras la mantención, lo que refuerza la relación entre el estado de las busbars y el desempeño del proceso de electroobtención y explica la mayor variabilidad en su eficiencia de corriente. Si bien la disponibilidad de datos posteriores a la intervención es limitada debido a la finalización del período de estudio, los resultados obtenidos, sumados al caso de la sección F1, permiten afirmar que el estado de las busbars tiene un impacto directo en la eficiencia de corriente y que su adecuado mantenimiento es una estrategia clave para optimizar el proceso.

4.4. DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA PLANTA

Habiendo recopilado y analizado cada variable de control escogida para la realización de este estudio, se pudo comprobar tanto gráfica como estadísticamente la correlación y el impacto que estas tienen en la eficiencia de corriente. A modo de resumen, en la **Tabla 8** se muestran las variables analizadas y parámetros relevantes.

Tabla 8. Variables de estudio y sus respectivos parámetros estadísticos relevantes.

Variable	SD	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Óptimo según la literatura	Coef. Correlación de Pearson	p
ξ	8,39%	88,34%	41,21%	99,92%	85 – 95%	-	-
$C_{Cu^{+2},avance} \left(\frac{g}{L}\right)$	1,73	41,97	33,38	45,89	40 – 45	0,07	0,06
$C_{FeT,avance} \left(\frac{g}{L}\right)$	0,07	0,94	0,79	1,07	$0,8 \leq Fe_T \leq 4$	-0,07	0,13
$C_{Fe^{+3},avance} \left(\frac{g}{L}\right)$	0,15	0,82	0,09	0,96	-	-0,02	0,44
$C_{H^+,avance} \left(\frac{g}{L}\right)$	9,83	191,11	159,18	203,06	170 – 200	-0,02	0,60
$T_{avance} (^{\circ}C)$	2,63	28,58	20,97	32,09	40 – 60	0,09	0,01
$i \text{ (A/m}^2\text{)}$	23,90	141,41	76,73	195,94	250 – 400	0,10	0,01
$Q_{avance} \left(\frac{m^3}{h}\right)$	122,07	880,14	501,34	1002,15	-	0,07	0,05
CC	11,18%	14,40%	0,70% (sección F1)	33,81% (sección E4)	~ 0	-0,01	0,22
$T_{busbars} (^{\circ}C)$	12,96	54,67	23,04 (sección E1)	100,59 (sección F2)	-	-0,09	0,04

A partir del análisis de datos operacionales y del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson junto con el valor de significancia estadística (valor p), se ha identificado el impacto relativo de distintas variables en la eficiencia de corriente. Ordenadas de mayor a menor influencia, las variables más relevantes son:

- Densidad de corriente: los valores registrados en la planta se encuentran considerablemente alejados de los recomendados en la literatura para optimizar la eficiencia del proceso. De acuerdo con los datos analizados, esta variable

mostró la mayor incidencia en la eficiencia de corriente. De acuerdo con estos resultados, un incremento en la densidad de corriente se traduciría en un aumento en la eficiencia de corriente, lo que sugiere que una estrategia viable sería elevar la corriente de alimentación dentro de los límites operacionales adecuados.

- Temperatura del electrolito: la temperatura de operación de las celdas de electroobtención es significativamente menor a la recomendada en otras plantas y estudios previos. Se encontró una correlación positiva entre la temperatura del electrolito de avance y la eficiencia de corriente, lo que indica que operar a temperaturas más altas podría mejorar el desempeño del proceso.
- Temperatura de las busbars: se observó que las secciones con mayor temperatura en las busbars tienden a presentar menor eficiencia de corriente, lo que indica una posible pérdida de conductividad eléctrica debido a un mayor desgaste o acumulación de óxidos u otros elementos contaminantes en las barras colectoras. En particular, el estudio en terreno de las celdas evidenció una contaminación crítica con orgánico proveniente del proceso de SX, el que se acumula en la superficie de las celdas y las busbars. El análisis de la relación entre corriente y temperatura en las busbars permitió evaluar su condición y detectar diferencias significativas entre secciones. De manera particular, se evidenció que el reemplazo de las busbars en las secciones F1 y F2 tuvo un impacto positivo en la eficiencia de corriente, reforzando la importancia del mantenimiento de estos elementos.
- Flujo de avance: si bien se encontró una correlación débil entre el flujo de avance y la eficiencia de corriente, la significancia estadística obtenida sugiere que un aumento en el flujo podría generar una ligera mejora en la eficiencia. Sin embargo, su impacto es marginal en comparación con las variables anteriormente mencionadas. Este bajo nivel de incidencia podría explicarse porque en la planta se opera a bajas densidades de corriente, lo que disminuye el efecto de esta variable en la eficiencia de corriente.

Por otro lado, las variables que no mostraron una correlación clara con la eficiencia de corriente fueron:

- Concentración de especies en el electrolito: Las concentraciones de Cu^{+2} , Fe^{+3} y H^{+} en el electrolito no evidenciaron una relación estadísticamente significativa con

la eficiencia de corriente en este estudio. Esto sugiere que, en las condiciones operacionales de la planta, estos parámetros se encuentran en rangos que no afectan de manera determinante el proceso.

- Cortocircuitos en las celdas: Si bien un mayor porcentaje de cortocircuitos podría esperarse que afecte la eficiencia de corriente, el análisis estadístico no mostró una relación significativa. No obstante, los cortocircuitos siguen siendo una variable de control importante en la operación, ya que su reducción contribuye a la estabilidad del proceso.

En conclusión, los resultados obtenidos permiten identificar oportunidades de optimización en la operación de la planta, principalmente a través del ajuste de la densidad de corriente y la temperatura del electrolito, además de la mantención preventiva de las busbars para evitar pérdidas de eficiencia.

4.5. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA PLANTA

A partir del análisis de las variables operacionales y su impacto en la eficiencia de corriente, se identificaron diversas oportunidades de mejora en la planta. Estas propuestas se enfocan en optimizar las condiciones del proceso para maximizar la eficiencia de corriente y mejorar la estabilidad operativa.

4.5.1. OPTIMIZACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE

El análisis de datos reveló que la densidad de corriente es la variable con mayor impacto en la eficiencia de corriente, mostrando una correlación positiva. No obstante, los valores registrados en la planta están por debajo de los recomendados en la literatura. Sin embargo, se observó un sobrecalentamiento de los rectificadores al aumentar la corriente por sobre los 24 kA. Por lo tanto, se propone:

- Evaluar un reemplazo de rectificadores de forma progresiva que permita incrementar la corriente impuesta, con el fin de aumentar la densidad de corriente de operación de la planta, de acuerdo con el análisis de los datos operacionales.
- Implementar un monitoreo continuo de la eficiencia de corriente a diferentes densidades para determinar un punto óptimo de operación.
- Realizar pruebas en secciones específicas antes de aplicar cambios a toda la planta para evaluar el impacto en la calidad del depósito de cobre.

4.5.2. AUMENTO DE LA TEMPERATURA DEL ELECTROLITO RICO O AVANCE

Se observó que la temperatura de operación es significativamente menor a la recomendada en estudios previos, y que un aumento en la temperatura del electrolito se asocia con una mejora en la eficiencia de corriente. Para abordar esto, se recomienda:

- Ajustar la temperatura del electrolito dentro de los rangos óptimos sugeridos por la literatura (40-60 °C), por medio de, por ejemplo, intercambiadores de calor, manteniéndola en valores adecuados para evitar efectos adversos en el proceso.
- Mejorar el sistema de control térmico para garantizar una temperatura más estable y uniforme en las celdas.
- Implementar un monitoreo más riguroso de la temperatura del electrolito en cada etapa del proceso, identificando posibles pérdidas térmicas y puntos críticos de disipación de calor.

4.5.3. MANTENIMIENTO Y REEMPLAZO PROGRAMADO DE BUSBARS

El análisis de la temperatura de las busbars evidenció que una mayor temperatura en estas estructuras puede estar relacionada con una disminución de su conductividad y, en consecuencia, con una menor eficiencia de corriente. Además, la mantención realizada en la sección F1 y, posteriormente, en F2, mostró mejoras significativas en la eficiencia tras el reemplazo de las busbars. En base a esto, se propone:

- Implementar un plan de mantenimiento preventivo y reemplazo periódico de busbars en función de su condición operativa.
- Mitigar la contaminación con orgánico de las celdas de EW a través de la habilitación de celdas de sacrificio, que permitan separar la fase orgánica de la acuosa antes de entrar a las celdas comerciales.
- Evaluar la limpieza y tratamiento superficial de las busbars y contactos para reducir la formación de óxidos y precipitación de sales y asegurar una mejor conductividad eléctrica.

4.5.4. REDUCCIÓN Y CONTROL DE CORTOCIRCUITOS

Aunque los cortocircuitos no mostraron una correlación clara con la eficiencia de corriente en este estudio, siguen siendo una variable relevante para la estabilidad del proceso. Para minimizar su impacto, se recomienda:

- Implementar inspecciones regulares y un sistema de monitoreo térmico en las celdas para detectar cortocircuitos en tiempo real.
- Mejorar la limpieza y alineación de los electrodos para reducir la probabilidad de cortocircuitos.
- Evaluar la implementación de sensores de temperatura en cada celda para identificar anomalías y actuar rápidamente en su corrección.

4.6. TABLERO DE CONTROL (POWER BI)

Para mejorar la toma de decisiones operativas y optimizar el control de las variables críticas, se desarrolló un dashboard interactivo en Power BI, el cual permite visualizar en tiempo real la evolución de la eficiencia de corriente y su relación con las principales variables operacionales. Este dashboard se alimenta automáticamente a partir de una planilla maestra en Excel, en la que se consolidan los datos operativos de la planta, asegurando una actualización eficiente y precisa de la información.

A través de este sistema, los operadores y supervisores pueden monitorear tendencias, identificar desviaciones y evaluar el impacto de ajustes operacionales en la eficiencia de corriente, lo que facilita la implementación de estrategias de mejora continua. Además, el diseño del dashboard permite una navegación intuitiva entre diferentes secciones, incluyendo análisis detallados de densidad de corriente, temperatura del electrolito, conductividad de las busbars y distribución de eficiencia por sección.

En la **Figura 21**, se presentan capturas de pantalla del dashboard, destacando sus principales funcionalidades y su utilidad para el monitoreo y optimización de la operación.

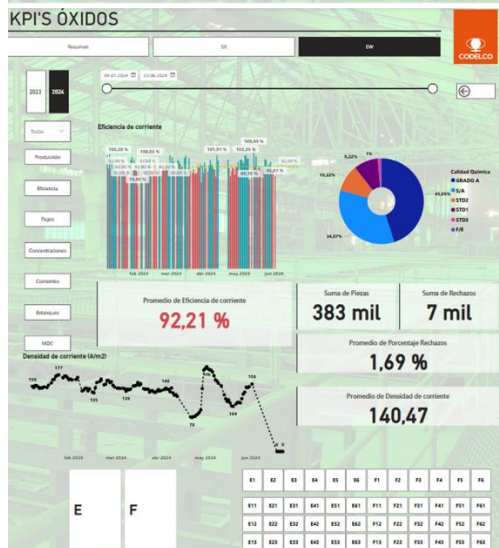
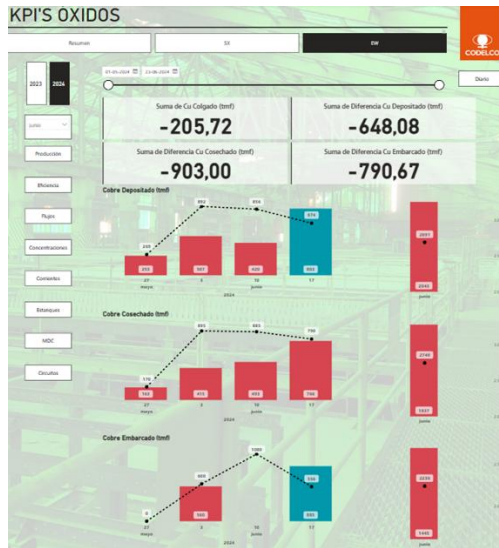


Figura 21. Algunas pestañas del dashboard interactivo elaborado para la planta.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como objetivo general analizar la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención de la División Chuquicamata e implementar un sistema de monitoreo y control de variables operacionales clave. A partir del análisis de datos operacionales, el desarrollo de correlaciones estadísticas y la revisión de la literatura, se lograron cumplir los objetivos específicos planteados, permitiendo obtener hallazgos relevantes para la optimización del proceso.

En primer lugar, se mejoró la metodología de cálculo de la eficiencia de corriente, basada en la medición del cobre cosechado versus la masa teórica calculada, consolidando los datos en una planilla de monitoreo y estableciendo este parámetro como una variable de control en la operación. Esto permitió obtener una visión más clara sobre la evolución de la eficiencia a lo largo del período de estudio, evidenciando diferencias significativas entre secciones y circuitos de la planta. Además, se identificó que la eficiencia de corriente promedio se encontraba por debajo de valores óptimos reportados en la literatura, con un promedio de la planta de 88,94% y variaciones importantes por circuito y sección, con un mínimo de 84,07% en la sección E2 y un máximo de 93,94% en la sección F1, lo que sugiere oportunidades de mejora en la operación.

A través del análisis de datos operacionales y bibliográficos, se identificaron las variables más relevantes que afectan la eficiencia de corriente, donde se mostró que estas se encontraban fuera de rangos óptimos. Destaca la temperatura de avance, con un promedio de 28,58 °C durante el periodo de estudio, valor muy por debajo de lo indicado en la literatura (40-60 °C), y una baja densidad de corriente, con un promedio de 141,41 A/m².

Entre estas variables, la densidad de corriente y la temperatura del electrolito de avance fueron las que mostraron una mayor incidencia en la eficiencia de corriente, con correlaciones positivas y estadísticamente significativas. Por otro lado, variables como el flujo de avance y la concentración de especies en el electrolito presentaron correlaciones débiles o no significativas, indicando que su impacto en la eficiencia es menor dentro del rango de condiciones evaluado en este estudio. Sin embargo, al tratarse de un proceso multivariable complejo y encontrarse tan alejado de los estándares operacionales comunes, se puede concluir que las variables operacionales

no tienen un rol fundamental en la eficiencia de corriente, ya que, de no realizar una mejora completa en las condiciones de la planta, la manipulación de algunas de estas variables no tiene mayor impacto en el desempeño de esta.

Por otro lado, se observó una relación entre la temperatura de las busbars y la eficiencia de corriente, lo que sugiere que un adecuado mantenimiento de estas estructuras puede contribuir a una menor pérdida de energía y a una operación más eficiente.

El análisis de la conductividad de las busbars a través de mediciones de temperatura y corriente permitió identificar secciones con mayores pérdidas de energía debido a resistencias elevadas. En particular, se evidenció que las secciones F2, E5 y E4 presentaban las peores condiciones en términos de conductividad, lo que se reflejaba en mayores temperaturas (61,38 °C; 62,87 °C; y 59,75 °C; respectivamente) y menor eficiencia de corriente. Por otro lado, la sección F1 mostró el mejor desempeño, contando con una eficiencia de corriente promedio de 93,94% y un promedio de temperatura de las busbars de 36,58 °C, lo que se atribuye a una mantención reciente en la que se reemplazaron sus busbars. Estos hallazgos resaltan la importancia del mantenimiento periódico y del monitoreo de la temperatura como estrategia para optimizar la eficiencia del proceso.

Con base en los resultados obtenidos, se propusieron medidas específicas para optimizar la eficiencia de corriente, donde un correcto housekeeping es fundamental para una planta de estas características de antigüedad y mantenimiento, por lo que la implementación de un plan de mantenimiento preventivo de busbars y reemplazo de electrodos cobra una gran importancia. Asimismo, se diseñó una herramienta de visualización en Power BI que facilita el monitoreo continuo de la eficiencia de corriente y sus variables asociadas, lo que contribuirá a una mejor toma de decisiones en la operación.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten establecer una serie de recomendaciones orientadas a optimizar la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención de la División Chuquicamata. Se ha evidenciado que las variables operacionales evaluadas, tales como la densidad de corriente y la temperatura del electrolito, se encuentran muy por debajo de los valores recomendados en la literatura, lo que reduce significativamente su impacto en la eficiencia de corriente. Por otro lado, el estado estructural de las busbars ha demostrado ser un factor determinante en la eficiencia de corriente, destacándose como un aspecto clave a mejorar mediante estrategias de mantenimiento adecuadas.

El análisis de temperatura de las busbars permitió identificar secciones con pérdidas energéticas significativas debido a una menor conductividad eléctrica, asociada a factores como el desgaste mecánico, la acumulación de residuos y la falta de intervenciones preventivas. Para mitigar estos efectos, se recomienda:

- Inspecciones periódicas: implementar un programa de monitoreo térmico mensual para detectar anomalías en la temperatura de las busbars, lo que permitiría identificar puntos de alta resistencia antes de que afecten la eficiencia del proceso.
- Limpieza y ajuste de conexiones: se recomienda realizar limpiezas programadas para eliminar residuos y asegurar una correcta conexión entre las barras, minimizando la resistencia de contacto.
- Reemplazo progresivo de busbars en mal estado: considerando el caso de la sección F1, donde la eficiencia de corriente mejoró tras la sustitución de las busbars, se sugiere replicar esta estrategia en las secciones que presentan las mayores pérdidas.
- Mitigación de la contaminación de la nave con orgánico: habilitación de celdas de sacrificio a través de un bypass en las líneas de alimentación de la nave, lo que permite una separación más efectiva del avance y el orgánico arrastrado desde el proceso de SX.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aqueveque, P., Wiechmann, E., & Burgos, R. (2009). Short-Circuit Detection for Electrolytic Processes Employing Optibar Intercell Bars. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1225-1231.
- ASTM International. (18 de Junio de 2020). *Standard Specification for Copper, Bus Bar, Rod, and Shapes and General Purpose Rod, Bar, and Shapes*. Obtenido de ASTM International: <https://www.astm.org/>
- Cochilco. (2023). *Reporte estadístico de la producción chilena de cobre*.
- Codelco. (2023). *División Chuquicamata: Codelco*. Obtenido de <https://www.codelco.com/division-chuquicamata>
- Codelco. (2024). *Memoria Anual 2023*. Obtenido de Sitio Web Codelco: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20240404/20240404191040/memoria_codelco_2023.pdf
- Ehsani, A., Yazici, E., & Deveci, H. (2016). *The Effect of Temperature on the Electrowinning of Copper*.
- Ettel, V., Gendron, A., & Tilak, B. (1975). Electrowinning Copper at High Current Densities. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 31-36.
- Habashi, F. (1999). *Textbook of hydrometallurgy*. Quebec: Métallurgie Extractive Québec.
- Jacobs, J., & Groot, D. (2019). Improving cathode morphology at a copper electrowinning plant by optimizing Magnafloc 333 and chloride concentrations. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- London Metal Exchange. (2024). *Chemical Composition: London Metal Exchange*. Obtenido de London Metal Exchange: <https://www.lme.com/-/media/Files/Physical-services/Brands/Chemical-composition/Chemical-composition-Copper.pdf>
- Moongo, T., & Sony, M. (2021). A continuous quality improvement framework for electrowinning current efficiency. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Owais, A. (2009). Effect of electrolyte characteristics on electrowinning of copper powder. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1587-1595.
- Pletcher, D., & Walsh, F. (1990). *Industrial Electrochemistry*. Chapman and Hall Ltd.
- Robinson, T., Sandoval, S., Sole, K., Davenport, & Davenport, W. (2013). Copper electrowinning - 2013 world operating tankhouse data. *Copper-Cobre 2013*, (págs. 3-14). Santiago.

Schlesinger, M., King, M., Sole, K., & Davenport, W. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Oxford: Elsevier.

Sole, K. (2002). Solvent Extraction in the Hydrometallurgical Processing and Purification of Metals. En K. Sole, & P. Cole, *Hydrometallurgy* (págs. 151-167).

Wiechmann, E., Morales, A., & Aqueveque, P. (2010). Improving Productivity and Energy Efficiency in Copper Electrowinning Plants. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1264-1270.

ANEXOS

ANEXO A. CÁLCULO DE VARIABLES

A.1. CÁLCULO DE PROMEDIO DIARIO DE CORRIENTE

Desde PI System, se obtuvieron las mediciones de la corriente de alimentación para cada circuito cada 2 horas. Así, para un día de operación normal, se obtiene un arreglo de datos como el presentado en la siguiente tabla:

Tabla 9. Mediciones de corriente en un día.

Fecha de medición	Corriente Circuito E (A)	Corriente Circuito F (A)
20-03-2024 00:00	24.083,86	20.358,30
20-03-2024 02:00	24.083,86	20.358,30
20-03-2024 04:00	23.681,09	20.079,10
20-03-2024 06:00	23.077,02	19.656,44
20-03-2024 08:00	21.064,20	18.214,31
20-03-2024 10:00	21.064,20	18.214,31
20-03-2024 12:00	21.064,20	18.214,31
20-03-2024 14:00	20.058,24	17.474,04
20-03-2024 16:00	21.064,20	18.214,31
20-03-2024 18:00	22.070,46	18.941,78
20-03-2024 20:00	22.070,46	18.941,78
20-03-2024 22:00	22.070,46	18.941,78

Luego, para obtener el promedio de corriente diario, se calcula el promedio por sección con todos los datos del día, de la siguiente

$$I_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^{12} I_i}{12}$$

Para este caso, $I_{promedio}(E) = 22.121 A$ e $I_{promedio}(F) = 18.967,42$.

A.2. CÁLCULO DE DENSIDAD DE CORRIENTE

Por cada celda, se tiene un total de 63 cátodos, cada uno con una superficie de 1 m². Por lo tanto, tomando como ejemplo la corriente del cálculo anterior, la densidad de corriente de operación sería:

$$i(E) = \frac{22.121 A}{63 \text{ cátodos}} \cdot \frac{\text{cátodo}}{2 \text{ caras}} \cdot \frac{\text{cara}}{1 \text{ m}^2} = 175,56 \frac{A}{\text{m}^2}$$

$$\text{Análogamente, } i(F) = 150,54 \frac{A}{\text{m}^2}$$

A.3. CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CORRIENTE

Para realizar el cálculo de la eficiencia de corriente, se tienen en consideración los días de siembra y cosecha, que indican los días de operación de la celda, el número de celdas cosechadas y la corriente promedio durante los días de operación. Así, para un ciclo de siembra y cosecha se tiene:

Tabla 10. Datos para calcular eficiencia de corriente para una sección dada.

Sección	N° Celdas	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Corriente promedio	Masa real
F5	5	02-10-2023	14-10-2023	19.180,29 A	40.863 kg

Luego, utilizando la Ecuación (4) y convirtiendo el valor para el total de celdas, se tiene:

$$m_{teórica} = \frac{\left(19.180,29 A \cdot 14 \text{ días} \cdot 63,546 \frac{g}{\text{mol}}\right)}{96485,33 \frac{C}{g \text{ eq}} \cdot 2 \frac{g \text{ eq}}{\text{mol}}} \cdot 24 \frac{h}{\text{día}} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot 5 \text{ celdas} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$
$$= 40.201,01 \text{ kg Cu}$$

Luego, utilizando la Ecuación (5):

$$\xi = \frac{40.863 \text{ kg}}{40.201,01 \text{ kg}} \cdot 100 = 91,69\%$$

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Estudio exploratorio para la optimización de la eficiencia de corriente en nave de electroobtención de la planta de óxidos, Codelco – División Chuquicamata

Nombre Memorista: Javier Alejandro González Pino

Modalidad	Investigación	Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha	01/04/2025	
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Prof. ^a Eugenia Araneda H.
		Ingeniero Supervisor: Silvana Bertoglio L.
		Institución: División Chuquicamata, Codelco

Comisión (Nombre y Firma)

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

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar y optimizar la eficiencia de corriente en la planta de electroobtención de la División Chuquicamata. Se identificó que la eficiencia de corriente promedio de la planta (88,94%) estaba por debajo de valores óptimos reportados en la literatura, con una alta variabilidad entre secciones (93,94% en F1 y 83,04% en E2).

Se evaluó la correlación entre la eficiencia de corriente y diversas variables operacionales, incluyendo densidad de corriente, temperatura del electrolito, flujo de avance, cortocircuitos y conductividad de las busbars. Se determinó que la densidad de corriente y la temperatura del electrolito son clave, pero operan en rangos demasiado bajos como para generar un impacto significativo. En contraste, la conductividad de las busbars fue el principal factor que explicó la variabilidad entre secciones, demostrado por la mejora de eficiencia de corriente de las secciones F1 y F2, evidenciando la importancia del mantenimiento estructural.

Como medidas de mejora, se recomendó implementar un plan de mantenimiento preventivo de las busbars para reducir pérdidas eléctricas. También se desarrolló un dashboard en Power BI para el monitoreo continuo de la eficiencia de corriente, facilitando la toma de decisiones operativas y promoviendo una optimización sostenible del proceso.