

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Mitigación y Detección de Anomalías en Sistemas de Distribución de Corrientes en Hidrometalurgia de Cobre

por

Jorge Alberto Henríquez Muñoz

Profesor guía

Eduardo Pieter Wiechmann Fernández

Concepción, Diciembre de 2016

Tesis presentada a la

ESCUELA DE GRADUADOS
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



para optar al grado de

DOCTOR CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON MENCIÓN
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Mitigación y Detección de Anomalías en Sistemas de Distribución de Corrientes en Hidrometalurgia de Cobre

Jorge Alberto Henríquez Muñoz

Una Tesis del
Departamento de Ingeniería Eléctrica



Presentada en Cumplimiento Parcial de los Requerimientos del Grado
de Doctor en ciencias con Mención en Ingeniería Eléctrica de la Escuela de
Graduados de la Universidad de Concepción, Chile

Diciembre 2016

© Jorge Alberto Henríquez Muñoz, 2016

Resumen

Mitigación y Detección de Anomalías en Sistemas de Distribución de Corrientes en Hidrometalurgia de Cobre.

Jorge Alberto Henríquez Muñoz, Doctor

Universidad de Concepción, 2016

Esta tesis presenta un sistema de distribución de corriente (barra intercelda) para procesos de electro-refinación y electro-obtención para mitigar y detectar anomalías típicas del proceso.

El trabajo se enmarca en un contexto de alta penetración de las ERNC y la necesidad de actualizar las políticas de consumo de energía en Chile. En función de esto se deben desarrollar tecnologías que sean de alta confiabilidad y que permitan operación con modulación de corriente (operación con alta corriente de día y baja corriente de noche). Para esto, el trabajo presenta un nuevo diseño de barra intercelda que permite mitigar y detectar anomalías en el proceso, pero además aumenta la confiabilidad del sistema y permita operar los procesos de ER y EW con modulación de corriente.

Para lograr el objetivo se realizó un modelo matemático de parámetros concentrados que describa el fenómeno eléctrico en las barras intercelda. Con el modelo se determinó la distribución de corrientes que circulan en las celdas electrolíticas. Además, mediante un modelo de parámetros distribuidos utilizando FEM (*Finite Element Method*) se caracterizó el comportamiento eléctrico y térmico del sistema de distribución de corriente. Los modelos se sintonizaron utilizando parámetros recopilados en planta. Se caracterizó la operación del sistema y las anomalías típicas: cortocircuito metalúrgico, circuito abierto y contacto deficiente.

Se analizaron las principales tecnologías de barras intercelda y su desempeño en los distintos escenarios. Luego, se determinó una configuración para mitigar y detectar anomalías. Se incluye el diseño de la configuración eléctrica, la topología (ordenamiento espacial) y la posibilidad de utilizar cobre-cromo como el principal material conductor.

Finalmente se analiza el efecto de la corrosión sobre el cobre y el cobre-cromo. Además se

determina la resistencia a la corrosión del material y disminución de la velocidad de corrosión por menores temperaturas de operación y su impacto en la eficiencia de la barra intercelda.

Para la tecnología equipotencial en operación normal, la dispersión de corriente es de 15,4% y la temperatura de operación de la barra es 69 [°C]. Para la tecnología segmentada la dispersión de corriente es de 9,9% con una temperatura de operación de barra de 66 [°C]. Se determinó que la barra equipotencial ofrece mitigación para contactos deficientes, mientras que la barra segmentada aporta mitigación frente a cortocircuitos. Sin embargo, ninguna de las dos posee mitigación en presencia de circuitos abiertos.

La nueva interconexión de barra que se propone, mitiga los circuitos abiertos que se producen, generando así una redundancia $n + 1$ en el sistema eléctrico. Con esto, en presencia de un circuito abierto se produce depósito en el cátodo a 46% de la corriente nominal. Enfrentando un contacto deficiente se deposita a 53% de la corriente nominal. Además, la barra BCS utiliza una configuración segmentada que mantiene la protección frente a cortocircuitos metalúrgicos.

Este trabajo fue apoyado por: CONICYT: Beca de Doctorado Nacional, CORFO: con los proyectos 11iDI2-10819-CBF y 15ITE2-46304 y FONDEF: iDEA CA12i10186.





A mis padres y hermanos

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi supervisor de tesis Dr. Eduardo Wiechmann por su apoyo y guía durante todos estos años. Él ha sido una fuente de inspiración durante todos estos años, desde el pregrado hasta hoy. Siempre con una palabra de aliento importante, haciéndome sentir parte importante de un grupo de investigación y no solo como un estudiante más. Sus consejos, tantos profesionales como personales han sido y siempre serán importantes en mi vida.

Además quiero agradecer al Dr. José Espinoza, Dr. Rubén Peña y al Dr. Guillermo Vidal por sus consejos y por los desafíos que pusieron en mi camino para lograr, no solo un trabajo de calidad, sino una crecimiento personal y profesional.

Importante agradecer a todos quienes han contribuido a que este trabajo sea posible: Victor Vidaurre, Miguel Ángel Sarría, Mauricio Perretta, Marco Cifuentes. Especialmente agradecer al Dr. Pablo Aqueveque por su constante apoyo y consejo durante el transcurso de mi doctorado y al Dr. Aníbal Morales por su apoyo, con un consejo o presentando desafíos nuevos e interrogantes. Al grupo de trabajo de laboratorio: Waldo Silva, Enrique Nusdel y Paulina Gutierrez. Una mención especial requiere mi compañero de doctorado Luis Muñoz, por su ayuda en los momentos difíciles, siempre dando la palabra de aliento precisa.

Quisiera agradecer a CONICYT por su apoyo financiero para realizar mis estudios de postgrado, mediante la beca de doctorado nacional.

Adicionalmente, quiero agradecer a quienes durante todo este proceso me apoyaron: mis amigas de la vida Camila y Javiera por los almuerzo distendidos, Leonardo, Felipe e Ignacio por esos momentos de relax tan necesarios para poder llevar a cabo esta tarea y a la familia Rivera Jarufe por todos los años de apoyo incondicional.

La última palabra de agradecimiento a mi familia, Rodrigo, Helga, Camila y Alejandro. Ellos son parte esencial de todo lo que he hecho durante todo este tiempo.

A todos Uds., muchas gracias.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	IV
NOMENCLATURA	VII
ABREVIACIONES	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO	5
1.3. OBJETIVOS	5
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.5. TEMARIO Y METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 2. PROCESO DE ELECTROLISIS DE COBRE	8
2.1. INTRODUCCIÓN	8
2.2. COMPONENTES DE NAVE ELECTROLÍTICA	8
2.3. ELECTRO-REFINACIÓN	13
2.4. ELECTRO-OBTENCIÓN	14
2.5. PERTURBACIONES DEL PROCESO.....	15
2.6. ANOMALÍAS	17
2.7. ÍNDICES DE OPERACIÓN	19
CAPÍTULO 3. MODELO DEL PROCESO ELECTROLÍTICO	21
3.1. INTRODUCCIÓN	21
3.2. TOPOLOGÍA DEL MODELO.....	21
3.3. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS.....	22
3.4. MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS	27
3.5. SINTONIZACIÓN DE MODELOS	33
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE	34

4.1.	INTRODUCCIÓN	34
4.2.	MODELOS DE BARRAS INTERCELDA.....	34
4.3.	DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE EN ELECTROLITO	34
4.4.	DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAL EN ELECTRODOS.....	38
4.5.	DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAL EN EL ELECTROLITO	39
4.6.	EFICIENCIA DE BARRA INTERCELDA	43
4.7.	RESUMEN.....	46
CAPÍTULO 5. DISEÑO DE BARRA INTERCELDA		48
5.1.	INTRODUCCIÓN	48
5.2.	DISEÑO ELÉCTRICO.....	50
5.3.	EVALUACIÓN ELÉCTRICA DE ALTERNATIVAS	52
5.4.	MITIGACIÓN DE ANOMALÍAS	53
5.5.	DETECCIÓN DE ANOMALÍAS	55
5.6.	MATERIALES.....	59
5.7.	RESUMEN.....	65
CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN.....		67
6.1.	CONCLUSIÓN	67
6.2.	TRABAJOS FUTUROS	68
CAPÍTULO 7. PUBLICACIONES		70
7.1.	PUBLICACIONES ISI (7).....	70
7.2.	CONFERENCIAS (9).....	71
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....		72
ANEXO A: RESISTENCIAS DE ELECTROLITO		77
ANEXO B: RESISTENCIAS DE CONTACTO.....		79

Nomenclatura

Escalares

v_c	:	caída de voltaje medida entre el busbar una celda y la celda siguiente [V].
J_k	:	densidad de corriente en el cátodo [A/m].
\bar{J}	:	densidad de corriente media [A/m]
η	:	eficiencia de corriente [%].
m_t	:	masa teórica de acuerdo a la ley de Faraday [g].
m_{real}	:	masa real cosechada [g]
q	:	carga transferida [c].
q_e	:	carga de un electrón: $1,602 \cdot 10^{-19}$ [c].
n	:	número de valencia.
N_A	:	número de Avogadro: $6,022 \cdot 10^{23}$ [mol ⁻¹]
M	:	masa atómica [g].
I_0	:	corriente de entrada a la barra intercelda [A].
R_{bulk}	:	resistencia de un segmento de cobre (o equivalente) [Ω].
σ_{bulk}	:	conductividad del cobre de un segmento (o equivalente) [S/m].
$l_{streamline}$:	largo de línea de corriente (<i>current-streamline</i>) [m].
S	:	área de la línea de corriente (<i>current-streamline</i>) [m ²].
E_0	:	potencial de equilibrio de la reacción [V].
η_c	:	sobrepotencial catódico [V].
η_a	:	sobrepotencial anódico [V].
v_e	:	caída de tensión en el electrolito [V].
v_{cc}	:	caída de tensión en el contacto entre el cátodo y la barra intercelda [V].
v_{ca}	:	caída de tensión en el contacto entre el ánodo y la barra intercelda [V].
v_h	:	caída de tensión en el hardware de la celda electrolítica [V].

v_r	: caída de tensión en barras entre rectificador y celda electrolítica [V].
σ_e	: desviación estándar de la resistencia de electrolito medida [Ω].
μ_e	: media de la resistencia de electrolito medida [Ω].
R_{el}	: resistencia de electrolito [Ω].
σ_{el}	: conductancia eléctrica del electrolito [S/m].
c_{Cu}	: concentración de cobre en el electrolito [g/L].
$c_{H_2SO_4}$: concentración de ácido sulfúrico en el electrolito [g/L].
T_{el}	: temperatura en el electrolito [$^{\circ}C$].
$i_{loc,m}$: densidad corriente en el electrodo [A/m^2].
i_o	: densidad de corriente de intercambio [A/m^2].
α_c	: coeficiente de transferencia catódica.
α_a	: coeficiente de transferencia anódica.
F	: constante de Faraday: $N_A \cdot q_e$
R_u	: constante universal de los gases: 8,314472 [J/(K·mol)]
P	: potencia [W].
I_{c_j}	: corriente en el cátodo j [A].
R_{c_j}	: resistencia de contacto entre el cátodo j y la barra intercelda [Ω].
I_{a_j}	: corriente en el ánodo j [A].
R_{a_j}	: resistencia de contacto entre el ánodo j y la barra intercelda [Ω].
d_e	: distancia entre electrodos [m].
D_A	: distancia entre los centros de dos ánodos contiguos [m].
d_a	: espesor del ánodo [m].
d_c	: espesor del cátodo [m].
A_c	: área de transferencia entre ánodo y cátodo [m ²].
c_i	: concentración del compuesto i [mol/m ³].
R_i	: Reacción i
D_i	: coeficiente de difusión [m ² /s]
z_i	: valencia de la especie i .
$u_{m,i}$: corresponde a la movilidad de la especie i [s·mol/s].
i_s	: densidad de corriente en el electrodo [A/m].
σ_s	: conductividad del electrodo [S/m].

ϕ_s	:	potencial del electrolito [V].
i_l	:	densidad de corriente en el electrolito [A/m].
ϕ_l	:	potencial del electrolito [V].
σ_l	:	conductividad del electrolito [S/m].
σ_c	:	conductividad del contacto [S/m].
d_s	:	ancho de la interfaz del contacto [m].
$I_{s,total}$:	corriente total entrando a la barra intercelda [A].
ρ	:	densidad [g/m^3].
C_p	:	calor específico [$J/kg \cdot K$].
k	:	conductividad térmica [$W/K \cdot m$].
Q	:	calor por conducción [J].
Q_s	:	calor en la superficie [J].
U_o	:	rapidez del aire [m/s].
p	:	presión [Pa].
$n_{catodos}$:	número de cátodos por celda

Vectoriales

J	:	densidad de corriente [A/m].
n	:	normal a la superficie
V	:	vector de voltajes de nodo [V].
I	:	vector de corrientes de entrada [A].
Y	:	matriz de conductancias [S].
E	:	campo eléctrico [V/m].
N_i	:	flujo de especies [$mol/(m^2 \cdot s)$].
u	:	vector de velocidad [m/s].

Abreviaciones

LIX	:	proceso de lixiviación del cobre.
PIB	:	Producto Interno Bruto
LIX	:	proceso de lixiviación del cobre.
SX	:	proceso de extracción por solventes.
EW	:	electro-obtención o electrowining del cobre
ER	:	Electro-refinación
SIC	:	Sistema Interconectado Central
SING	:	Sistemas Interconectado del Norte Grande
ERNC	:	Energía Renovable No Convencional
MTBF	:	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR	:	<i>Mean Time To Repair</i>
CORFO	:	Corporación de Fomento a la Producción
FONDEF	:	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico
ICBB	:	<i>Intercell Busbar</i>
KPI	:	key performance indicators (indicadores claves de rendimiento)
CS	:	Current Source
VS	:	Vltaje Sourceo
CODELCO	:	Corporación Nacional del Cobre
AMSA	:	Antofagasta Minerals S.A.
ETP	:	Electrolytic Tough Pitch

IACS : *International Annealed Copper Standard*
BCS : *Busbar – Capping Board – Secondary Connector*



Índice de Figuras

Figura 1. Porcentajes de participación en matriz eléctrica en capacidad instalada año 2016 (a) SIC (b) SING.	2
Figura 2. Proyección de porcentajes de participación en matriz eléctrica en capacidad instalada año 2030 (a) SIC (b) SING. [4]	2
Figura 3. Distribución de corrientes catódicas (a) Tecnología equipotencial (b) Tecnologías segmentada.	4
Figura 4. Distribución de corriente catódicas para la tecnología equipotencial, segmentada y segmentada con aumento de 8,6% en la corriente nominal.....	4
Figura 5. Celdas electrolíticas con electrodos. Se detallan los componentes de la celda electrolítica: cátodos (A); ánodos (B); sistema de distribución de corriente (C); pared de celda (D); y puntos de contacto de ánodos y cátodos con el sistema de distribución de corriente (E). 9	9
Figura 6. Celdas electrolíticas con ingreso de electrolito. Se detallan los componentes de la celda electrolítica: ingreso del electrolito provenientes de la etapa de SX (A); burbujeo de electrolito a la celda (B); y celda electrolítica (C).	9
Figura 7. Electrodos (a) Ánodo simétrico de EW con hangerbar sólido. (b) Cátodos simétrico de EW con hangerbar de alma de acero recubierto en cobre.....	10
Figura 8. ICCB equipotencial convencional tipo <i>dogbone</i> , vista lateral de interconexión entre eletrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; (C) Cátodo; y (D) pared de la celda electrolítica.	12
Figura 9. ICCB equipotencial convencional tipo <i>dogbone</i> , vista superior de interconexión entre eletrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; y (C) Cátodo.....	12
Figura 10. ICCB segmentada convencional tipo <i>dogbone</i> , vista superior de interconexión entre eletrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; y (C) Cátodo.....	12
Figura 11. ICCB equipotencial doble contacto tipo <i>dogbone</i> , vista lateral de interconexión entre	

electrodos y ICCB (A) Baseboard; (B) Ánodo; y (C) Cátodo; (D) Pared de celda electrolítica; y (E) Barra intercelda. [13].....	12
Figura 12. Estado de contactos de ánodos de una ICCB. (a) Contacto de una barra nueva (b) Contacto deformado producto de la operación en planta (c) Contacto después de 4 años de servicio en planta.	16
Figura 13. Anomalías del proceso (a) Cortocircuito metalúrgico producido por un nódulo. (b) Blank producido por un circuito abierto.	18
Figura 14. Contactos de cátodo y ánodo (a) Contacto de cátodo nuevo; (b) Contacto de ánodo nuevo; (c) Contacto de cátodo envejecido; (d) Contacto de ánodo envejecido.....	18
Figura 15. Diagrama de modelos y simulaciones realizadas.	22
Figura 16. Modelo de voltaje de una celda de electrólisis entre un cátodo y un ánodo.	23
Figura 17. Resistencias de Electrolito (a) Dispersión de Resistencia de electrolito (b) Distribución de resistencias de electrolito medidas en planta.	25
Figura 18. Resistencias de Contacto (a) Dispersión de Resistencia de contacto de cátodo (b) Distribución de resistencias de contacto de cátodo medidas en planta.....	26
Figura 19. Modelo de parámetros concentrados de barra equipotencial.	27
Figura 20. Modelo de parámetros concentrados de barra segmentada	28
Figura 21. Malla de una celda electrolítica (A) Electrolito; (B) Ánodo; (C) Cátodo.....	30
Figura 22. Malla de una barra intercelda (A) Barra Intercelda; (B); Cátodo (C) Ánodo	31
Figura 23. Malla de una sistema de barra intercelda con un dominio de aire (A) Barra Intercelda; (B); Cátodo (C) Ánodo; (D) Volumen.....	33
Figura 24. Sistema de barra intercelda para ER (a) VS (b) CS.	35
Figura 25. Sistema de barra intercelda para EW (a) VS (b) CS.	35
Figura 26. Distribución de densidades de corriente (a) Configuración con barra equipotencial (b) Configuración con barra segmentada.	36
Figura 27. Distribución de densidades de corriente en presencia de un cortocircuito como un gráfico de colores y de barras, (a) VS (b) CS.	36
Figura 28. Distribución de densidades de corriente en presencia de un circuito abierto como un gráfico de colores y de barras (a) VS (b) CS.	37
Figura 29. Distribución de densidades de corriente en presencia de un contacto deficiente como un gráfico de colores y de barras, (a) Configuración con barra equipotencial (b)	

Configuración con barra segmentada.	38
Figura 30. Distribución de potencial en los electrodos en EW (a) Cátodo (b) Ánodo.	38
Figura 31. Distribución de potenciales eléctricos en el electrolito y los electrodos en EW (a) VS (b) CS.	39
Figura 32. Velocidad del aire en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.	40
Figura 33. Voltajes en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.	40
Figura 34. Temperatura en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.	41
Figura 35. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un cortocircuito (a) VS (b) CS.	41
Figura 36. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un circuito abierto (a) VS (b) CS.	42
Figura 37. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un contacto deficiente (a) VS (b) CS.	42
Figura 38. Tomografía en planta de EW(a) VS (b) CS.	42
Figura 39. Modelo de parámetros concentrados (a) VS (b) CS.	45
Figura 40. Sistema de barra intercelda equipotencial. (a) La zona azul demarca la superficie por la cual entra la corriente a la barra. (b) La zona azul demarca el potencial 0V en el sistema – tierra –.	46
Figura 41. Líneas de corrientes en una barra intercelda convencional. (verde) Distribución ideal de las corrientes (azul) Distribución no deseada de corrientes.	46
Figura 42. Modelo de Barra Intercelda propuesta para refinería Chuquicamata (CODELCO).	49
Figura 43. Diagramas de funcionamiento de la barra intercelda en presencia de (a) Contacto deficiente (b) Circuito abierto. [21]	50
Figura 44. Esquema de interconexión de barras intercelda. (a) VS (b) CS (c) Sistema Propuesto. Idc corresponde a la corriente del rectificador. [37]	51
Figura 45. Barra intercelda de planta piloto con conectores secundarios segmentados. (A) Segmento central (B) Segmento lateral (C) Electrodo conectado en su lado aislado al segmento lateral (D) Electrodo conectado al segmento central.	51
Figura 46. Barra intercelda para proceso de ER con barra superior. (A) Segmento central (B) Segmento superior (C) Capping board (D) Baseboard.	51
Figura 47. Distribuciones de corrientes (a) VS (b) CS (c) BCS (d) Comparación de histogramas de	

corrientes efectivas de depósito.	54
Figura 48. (a) Perfil térmico de placa auxiliar (b) Temperatura en el punto medio en función del alto de la placa y el ancho en la zona de detección.....	56
Figura 49. Temperatura en el punto medio en función del alto de la placa y el ancho en la zona de detección.	56
Figura 50. Cortocircuito de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito....	57
Figura 51. Circuito abierto de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito.	58
Figura 52. Contacto deficiente de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito.	58
Figura 53. Dureza de metales en función de la temperatura.....	59
Figura 54. (a) Muestra de cobre C18200 (b) Muestra de cobre C11000.	60
Figura 55. Setup de medición de conductividad de piezas de cobre (a) Pieza M1 C18200 (b) Pieza M2 C11000.	61
Figura 56. Corrosión en pieza de cobre M1 (C18200) (a) Superficie antes del ensayo (b) Superficie después del ensayo (sucio) (c) Superficie después del ensayo (limpio) (d) Superficie amplificada.	64
Figura 57. Corrosión en pieza de cobre M2 (C11000) (a) Superficie antes del ensayo (b) Superficie después del ensayo (sucio) (c) Superficie después del ensayo (limpio) (d) Superficie amplificada.	64
Figura 58. Velocidad de corrosión de cobre C11000 en función de la temperatura. [25].....	65
Figura 59. Depósito de cobre en cañerías de ingreso de electrolito.	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Dimensiones de ánodo y cátodo para EW y ER.	24
Tabla 2. Voltaje de celda para cada proceso. [2]	35
Tabla 3. Propiedades física del Cobre ETP C11000 @ 20°C. [25].....	45
Tabla 4. Tabla resumen del desempeño de las tecnologías de barras intercelda.....	47
Tabla 5. Tabla resumen del desempeño de las tecnologías de barras intercelda evaluadas.....	52
Tabla 6. Resumen de Mitigación de las tecnologías evaluadas.	53
Tabla 7. Corriente máximas en barra secundaria de acuerdo a la anomalía.	55
Tabla 8. Tabla resumen del desempeño de las tecnologías de barras intercelda.....	56
Tabla 9. Propiedades física del Cobre ETP C11000 @ 20°C.....	60
Tabla 10. Proyección de aumento de pérdidas en barra intercelda.	60
Tabla 11. Resultados de Mediciones de conductividad.	61
Tabla 12. Resultados de Mediciones de dureza.	62
Tabla 13. Resultados de Análisis Químico.	62
Tabla 14. Condiciones de ensayo de corrosión estandarizado.	63
Tabla 15. Resultados de masa de las muestras en prueba de corrosión..	63
Tabla 16. Resumen de desempeño de barras intercelda (I).....	65
Tabla 17. Resumen de desempeño de barras intercelda (II).	66
Tabla 18. Resumen de las tecnologías.	68

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

En Chile, la minería del cobre corresponde al 12,7% del PIB [1]. Es la principal actividad comercial del país y lo tiene posicionado como el mayor productor de cobre del mundo, con una producción equivalente al 17% de la producción mundial.

De todos los productos que se comercializan a nivel mundial, Chile es el principal productor de cobre de alta pureza, con un 37% de la participación mundial en producción de cátodos electro-refinados y electro-obtenidos. El producto que se comercializa depende de la naturaleza del mineral. En una primera etapa, el mineral es extraído (rajo abierto o subterráneo) para luego ser procesado. Para el mineral de cobre en forma de sulfato, se utiliza un proceso de flotación para obtener el producto concentrado de cobre que puede ser comercializado. Si se continúa con un proceso de fundición del concentrado se obtiene el producto ánodos o cobre blíster. Finalmente el ánodo puede ser electro-refinado obteniéndose cátodos o cobre grado A. Para el mineral de cobre en forma de óxido, el mineral se debe lixiviar (LIX), luego se pasa al proceso de extracción por solventes (SX) para finalmente pasar al proceso de electro-obtención (EW) que culmina con cátodos de cobre grado A. La diferencia con los sulfuros, es que en los procesos de LIX-SX-EW no se producen productos intermedios comercializables [2].

Los procesos del cobre conllevan altos requerimientos energéticos. Una proyección al año 2026 indica que los requerimientos de energía en minería aumentará un 53%, de 22,25[TWh/año] a 34,09[TWh/año]. [3]

1.1.1. Matriz Energética y Proyecciones

La matriz energética actual de Chile está dominada principalmente por combustibles fósiles, GNL e hidráulica (para el SIC). En los últimos años, las ERNC se han sumado a la matriz, donde hoy representan cerca de un 16% de la potencia instalada en el SIC y 8% en el SING. En la Figura 1

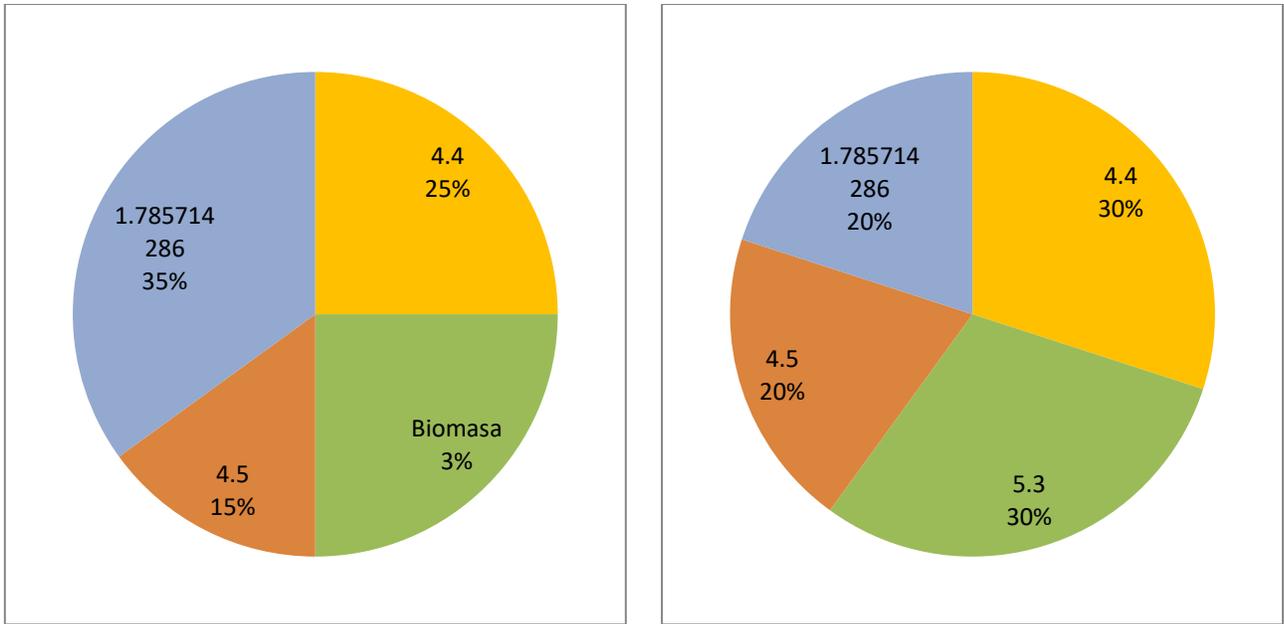


Figura 1. Porcentajes de participación en matriz eléctrica en capacidad instalada año 2016 (a) SIC (b) SING.

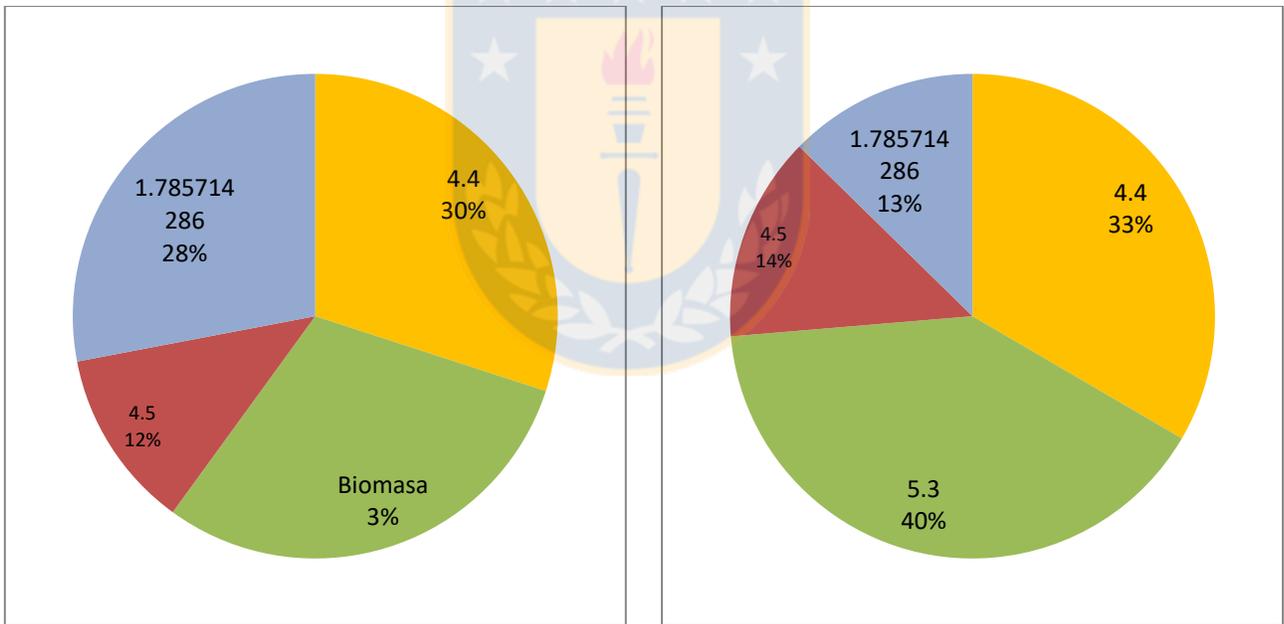


Figura 2. Proyección de porcentajes de participación en matriz eléctrica en capacidad instalada año 2030 (a) SIC (b) SING. [4]

se muestra la distribución de la potencia instalada para los sistemas interconectados central (SIC) y del norte grande (SING). Para el año 2030, existe una proyección con una fuerte penetración de ERNC, especialmente de geotermia en el SIC y solar en el SING. Se proyecta que en el SIC, el 30% de la capacidad instalada corresponda a ERNC y en SING este valor llegará a 39% (ver Figura 2) [4].

Estos cambios estarán impulsados por la disminución del precio de kilo-Watt instalado. El precio de potencia instalada para paneles fotovoltaicos se encuentra en 2.110[USD/kW] y está proyectado a que disminuya a 1.085[USD/kW] al año 2030 [4]. Sin embargo, esta tecnología cuenta con limitaciones horarias. Paneles fotovoltaicos no generan energía durante la noche y los procesos mineros operan 24/7. Por lo tanto, este cambio tecnológico que impactará a la matriz energética debe ir de la mano de cambios en los procesos productivos.

1.1.2. Integración de ERNC a ER y EW

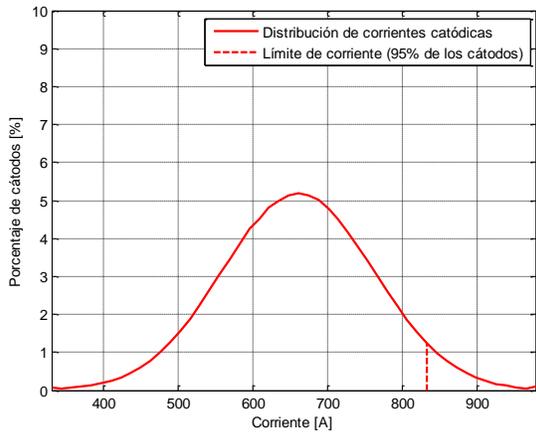
Se identifican entonces tres áreas que pueden aportar a la integración de estas tecnologías a los procesos de ER y EW:

1. Load Shedding.
2. Net Metering y operación con modulación de corriente.
3. Aumento de disponibilidad y confiabilidad.

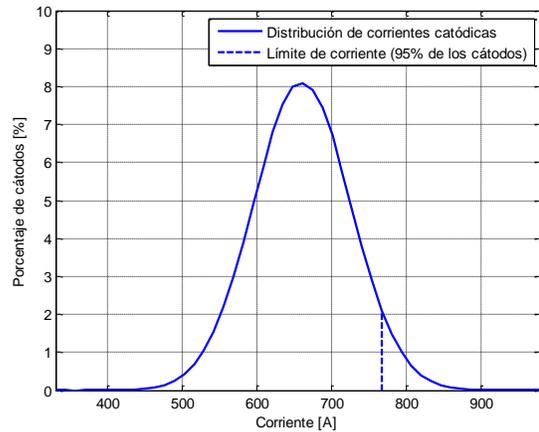
Debido a que los procesos de EW y ER son muy estables en el tiempo, no existen cambios bruscos en los consumos. Al operar con modulación de corriente, los procesos de EW y ER podrán operar con mayor corriente durante el día y menor corriente durante la noche. Las barras interceldas segmentadas son un paso hacia la modulación de corriente en el proceso, favoreciendo la penetración de las ERNC. Actualmente el proceso opera a una corriente nominal con tasas de fallas y rechazo admisibles. Sin embargo, al modular la corriente nominal del proceso, la tasa de fallos aumenta y el producto disminuye en calidad. Por lo tanto es necesario invertir en tecnologías que permitan migrar hacia una operación con modulación de corriente, es decir aumentar o reducir la corriente nominal del proceso sin afectar la calidad final del producto.

En ER y EW, la operación con modulación de corriente significará enfrentar las anomalías que se producen en el proceso. Esto es transitar hacia una operación libre de cortocircuitos metalúrgicos, con baja dispersión de densidad de corrientes en los cátodos y principalmente con depósito ante todo evento. Asegurar el depósito y localizar las anomalías es clave para lograr operación con modulación de corriente en ER y EW.

Al eliminar las anomalías, la dispersión de corriente disminuye, y las corrientes en los cátodos tienden a la corriente nominal. Para las tecnologías de barras intercelda equipotenciales, la dispersión de corriente es de 15,4%, lo que genera una distribución de corrientes como se muestra en la Figura 3 (a). La corriente nominal máxima se define de forma operacional. En el proceso de



(a)



(b)

Figura 3. Distribución de corrientes catódicas (a) Tecnología equipotencial (b) Tecnologías segmentada. Fuente: Elaboración propia

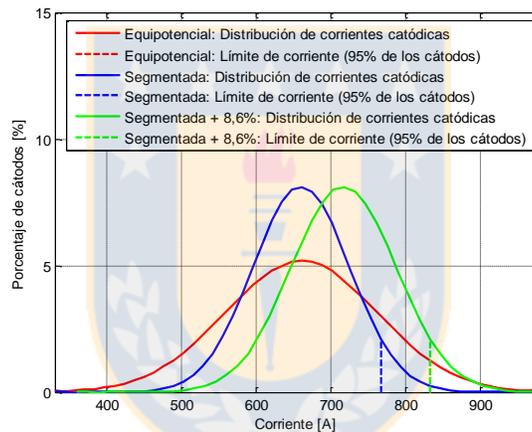


Figura 4. Distribución de corriente catódica para la tecnología equipotencial, segmentada y segmentada con aumento de 8,6% en la corriente nominal. Fuente: Elaboración propia

ER de la mayor planta del país el nivel de corriente máximo considerado aceptable es de 832[A].

Para la tecnología de barras intercelda equipotencial, el 95% de los cátodos opera con corriente inferiores a 832[A]. Para una tecnología segmentada el 95% de los cátodos opera bajo los 766[A] (Ver Figura 3 (b)). Esto permite incrementar la corriente nominal del sistema un 8,6% y para mantenerse dentro del rango de operación aceptable (Ver Figura 4). Este análisis preliminar no considera los efectos de calentamiento de electrolito, ni operación libre de anomalías, lo que aumentaría el nivel de corriente al cual se puede operar.

1.1.3. Aporte de la Tesis

La irrupción de las ERNC en el corto plazo, impulsadas por el bajo costo de MW instalado y

la necesidad de una matriz de generación más limpia; llevará a la industria a la integración de los tres conceptos antes mencionados: Load Shedding, Modulación de corriente y tecnologías de alta confiabilidad. Esta tesis propone una tecnología de barras intercelda que permita una operación con modulación de corriente, habilitando Load Shedding, alta confiabilidad con una redundancia “ $n + 1$ ” en el proceso de electro-depositación. El trabajo cuenta con el soporte de proyectos CORFO 11iDI2-10819-CBF y 15ITE2-46304 y FONDEF iDEA CA12i10186 y presenta la ingeniería de detalle para el proyecto “Barras Intercelda Segmentada Triple” para la planta de ER de Chuquicamata (CODELCO) que será financiada con un proyecto aprobado en el “Concurso FONDEF para la Minería 2016”.

1.2. Hipótesis de Trabajo

Una configuración con barras segmentadas auxiliares que conecta los extremos aislados de los electrodos permite la mitigación y localización temprana de anomalías como cortocircuitos metalúrgicos, contactos deficientes y circuitos abiertos, asociadas a los procesos de electro-refinación y electro-obtención.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Crear una tecnología de distribución de corrientes para los procesos de hidrometalurgia del cobre que permita mitigar y detectar las anomalías presentes en el proceso.

1.3.2. Objetivos Específicos

Los objetivos planteados para este trabajo se plantean a continuación:

- Determinar, mediante un modelo eléctrico y térmico, el punto de operación de una nave de electrólisis.
- Determinar origen de pérdidas en barras intercelda.
- Caracterizar los perfiles termo gráficos de una nave de electro obtención para distintas condiciones de operación.
- Caracterizar los perfiles de corrosión de barras intercelda.
- Generar una herramienta de evaluación de sistemas de barras intercelda en función su

desempeño térmico.

- Diseñar un sistema de distribución de corriente de una nave de electrólisis de baja dispersión.

1.4. Alcances y Limitaciones

El trabajo será realizado en las plataformas Matlab y COMSOL Multiphysics de acuerdo a las licencias que tenga Universidad de Concepción a la fecha.

1.5. Temario y Metodología

El trabajo se desarrollará de forma teórica, con simulación del proceso mediante elementos finitos y el diseño de elementos (por ejemplo la barras intercelda) en función de las simulaciones obtenidas. Esto considera lo siguiente:

- Modelación y simulación en Matlab de modelo de parámetros concentrados para proceso de EW y ER.
- Modelación y simulación en mediante elementos finitos en software COMSOL Multiphysics 5.1 de modelo de parámetros distribuidos para proceso de EW y ER.
- Diseño de partes y tareas que involucran el proceso de EW y ER.
- Fabricación por parte de terceros de algunos elementos mejorados.
- Obtención de resultados experimentales de los elementos fabricados.

Con respecto al temario, del primer capítulo donde se detallan los objetivos e hipótesis de la investigación.

El capítulo dos corresponde al proceso de electrolisis del cobre. Esto comprende los procesos de electro-refinación y electro-obtención. Además se analizan las partes de una nueva de electrolisis, y las tecnologías de distribución de corriente que se utilizan actualmente en la industria.

El capítulo tres explica la modelación de proceso de electrolisis. Esto se divide en modelos de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos. Además se modelan las distintas elementos resistivos y elementos no lineales que componen estos modelos.

El capítulo cuatro trata de la simulación de una nave de electrolisis utilizando los modelos antes señalados en el capítulo tres.

El capítulo cinco es el diseño de la barra intercelda, que busca de mitigar y detectar las anomalías de los procesos. En este capítulo de detalla el proceso de diseño de la barra principal y las

barras auxiliares.

El capítulo seis son las conclusiones de esta investigación.



Capítulo 2. Proceso de Electrolisis de Cobre

2.1. Introducción

En este capítulo se presentarán los dos procesos de electrolisis del cobre, electro-refinación (ER) y electro-obtención (EW). Ambos procesos son de reducción-oxidación (*Redox*). Se discutirán los principales factores que afectan a estos procesos y las tecnologías de sistemas de distribución de corrientes que actualmente existen. Además se presentarán las geometrías y consideración espaciales necesarias para la modelación y simulación del proceso.

2.2. Componentes de Nave Electrolítica

Las celdas electrolíticas es donde ocurre el proceso de electrolisis a nivel industrial. Dentro de estas celdas están los ánodos y cátodos son posicionados alternadamente, como se puede apreciar en la Figura 5. Las celdas son posicionadas de forma contigua, para que la corriente circule desde una celda a la celda siguiente mediante un sistema de distribución de corriente, típicamente llamado barras intercelda [2, p. 354].

2.2.1. Celda Electrolítica

La celda electrolítica es fabricada en cemento polimérico y sus dimensiones son de 6,5[m] a 8[m] de largo dependiendo de la cantidad de electrodos, 1,2[m] de ancho y 1,5[m] de profundidad. [2, p. 354]. Sobre las paredes de las celdas electrolíticas descansa el sistema de distribución de corriente o barras intercelda (ICBB por su acrónimo en inglés *InterCell BusBar*). Sobre las ICBB se depositan los cátodos de una celda y ánodos de la celda siguiente. De esta forma, la corriente circula desde los cátodos de una celda a los ánodos de la celda siguiente (Ver Figura 5). El electrolito ingresa desde el fondo de la celda a través de un sistema de cañerías y sale de la celda por rebalse por uno de los extremos de la celda (Ver Figura 6).

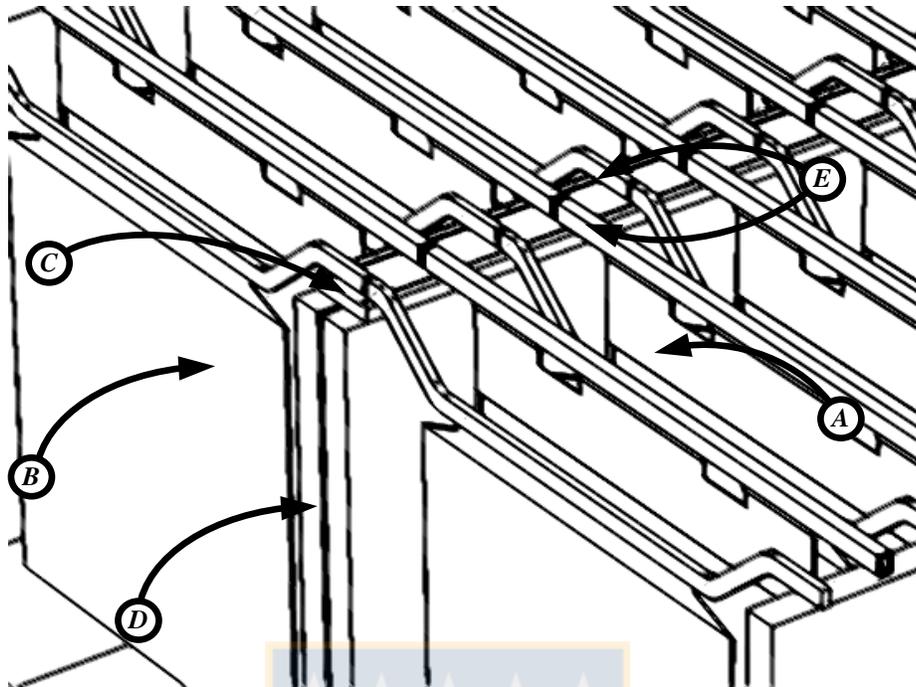


Figura 5. Celdas electrolíticas con electrodos. Se detallan los componentes de la celda electrolítica: cátodos (A); ánodos (B); sistema de distribución de corriente (C); pared de celda (D); y puntos de contacto de ánodos y cátodos con el sistema de distribución de corriente (E).

Fuente: Elaboración propia

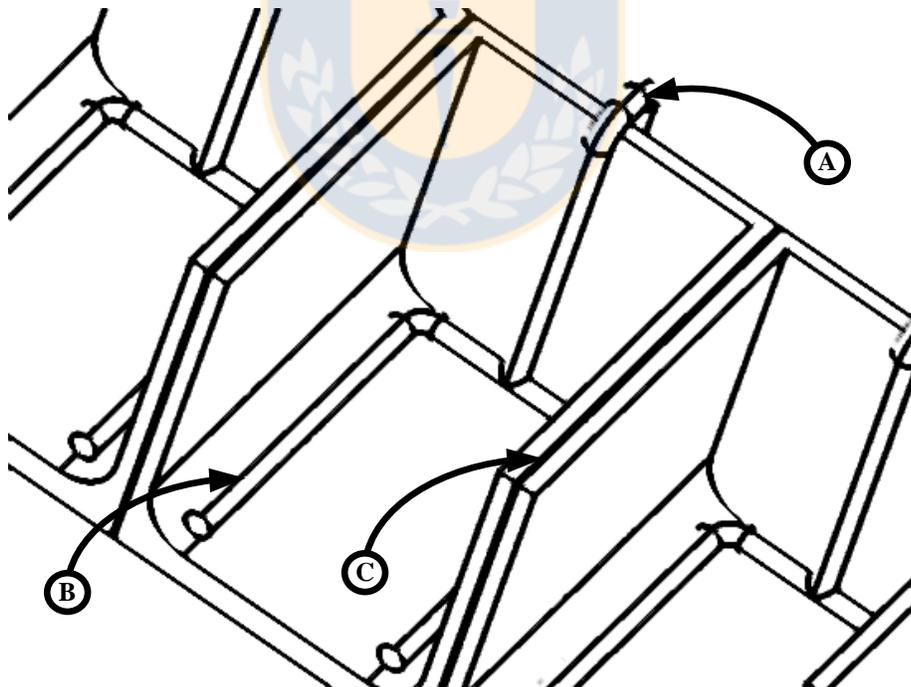


Figura 6. Celdas electrolíticas con ingreso de electrolito. Se detallan los componentes de la celda electrolítica: ingreso del electrolito provenientes de la etapa de SX (A); burbujeo de electrolito a la celda (B); y celda electrolítica (C).

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Rectificador

El rectificador de altas corriente debe inyectar la corriente al proceso electrolítico. Por cada cátodo que se tiene en una celda de electro-obtención se necesitan en condiciones normales 700A. Una celda electrolítica tiene entre 60 a 70 cátodos, por lo que el rectificador debe ser capaz de inyectar 50kA. Por lo general, la corriente es inyectada por 2 rectificadores de 6 pulsos con tiristores en paralelo, con un reactor de interfase, de aproximadamente 6MVA cada uno. Estos valores varían de acuerdo a cada faena. [5]

2.2.3. Electrodo

El cátodo es de acero inoxidable, típicamente SS316 o SS316L, con una superficie sumergible de aproximadamente 1m^2 . La placa de acero se adhiere al *hangerbar* que puede ser de cobre sólido o bien un perfil de acero con un baño superficial de cobre [6] (Ver Figura 7).

Por otra parte, el ánodo dependerá del proceso. En el caso de ER el ánodo es de cobre y se disuelve en el electrolito. En el caso de EW, el ánodo tiene una superficie aproximadamente de $0,95\text{m}^2$ y es típicamente de plomo, con aditivos como níquel para evitar el desgaste y dar rigidez al ánodo. Esta placa se encuentra soldada al *hangerbar*. [7]

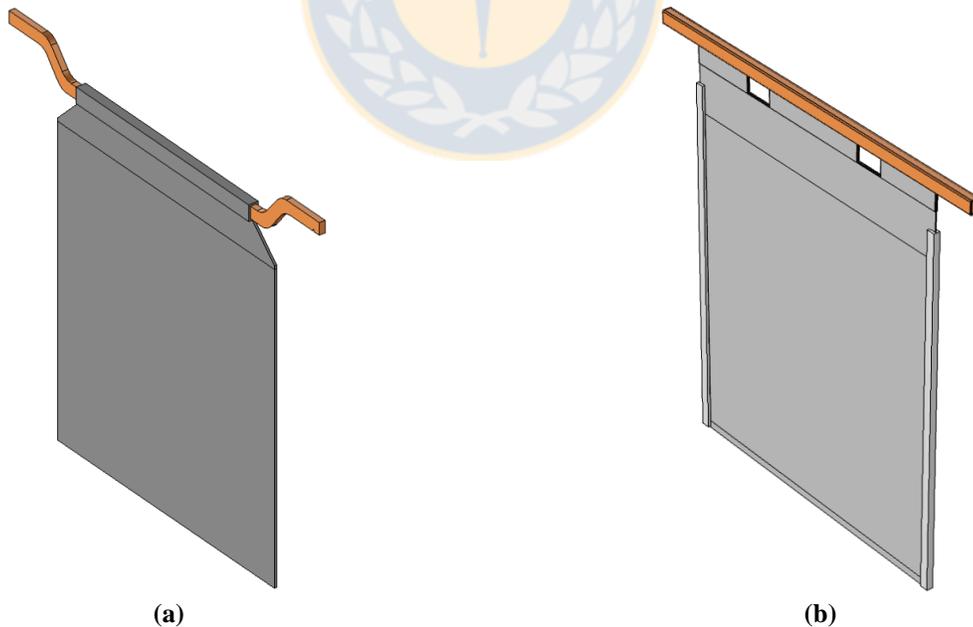


Figura 7. Electrodo (a) Ánodo simétrico de EW con hangerbar sólido. (b) Cátodos simétricos de EW con hangerbar de alma de acero recubierto en cobre.

Fuente: Elaboración propia

2.2.4. Sistemas de Distribución de Corriente

El sistema de distribución de corrientes, llamado barras intercelda (ICBB), es lo que permite el paso de la corriente de una celda a la siguiente. Actualmente en la industria se utilizan principalmente 3 tipos de barras: barras convencionales continuas (tipo dogbone o centrales), barras de doble contacto y barras segmentadas. Las barras equipotencial continuas tipo dogbone son posicionadas sobre las paredes de las celdas electrolíticas. Sobre la barra se posiciona un *capping board* cuya función es mantener la alineación de los electrodos y aislar uno de los extremos del electrodo.

Barra Equipotencial Convencional

La barra convencional es la más utilizada en la industria minera. Corresponde a la patente US 687.800 presentada por Arthur Walker en 1901 [8]. Este tipo de barra conecta todos los cátodos de una celda con todos los ánodos de la celda siguiente (ver Figura 8). Desde el punto de vista eléctrico, la barra corresponde a un nodo. Las corrientes que salen de una celda a través de los cátodos llegan al nodo e ingresan a los cátodos de la celda siguiente. Estas corrientes son redistribuidas de acuerdo a los parámetros eléctricos de la celda siguiente. En sección 4.3 se detallará como se realiza la redistribución de la corriente de acuerdo a los modelos eléctricos presentados.

El sistema convencional equipotencial garantiza que entre todos los cátodos y ánodos exista el mismo voltaje. Esta forma de conexión se llama “Conexión Fuente de Voltaje” o “Voltage Source” (VS). De esta forma, la densidad de corriente que circula a través de los cátodos variará en función de la resistencia entre el ánodo y el cátodo.

Barra Segmentada

La barra segmentada es una barra que conecta un ánodo de una celda con un solo cátodo de la celda siguiente (Ver Figura 10) [9]. Esta configuración genera caminos de corriente y conecta los electrodos de una celda con los electrodos de la celda siguiente. De esta forma, los voltajes entre electrodos de una misma celda varían, lo que atenúa el efecto de la variación de la resistencia entre cátodo y ánodo. Esta forma de conexión es llamada “Conexión Fuente de Corriente” o “Current Source” (CS). Este sistema de conexión corresponde a un patente del año 1999 de Wiechmann, Pagliero y Vidal. Otros tipos de configuraciones CS se han patentado el año 2011 y 2012. [10] [11] [12]

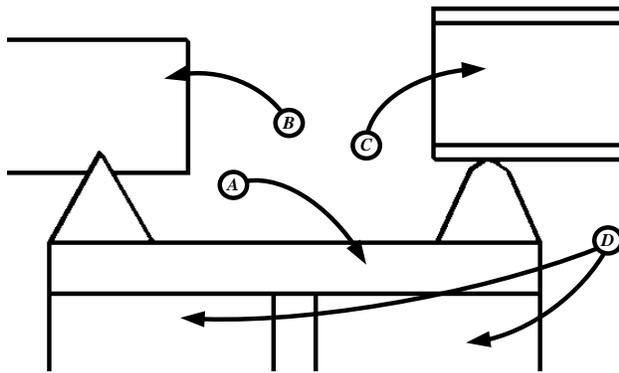


Figura 8. ICCB equipotencial convencional tipo *dogbone*, vista lateral de interconexión entre electrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; (C) Cátodo; y (D) pared de la celda electrolítica.

Fuente: Elaboración propia

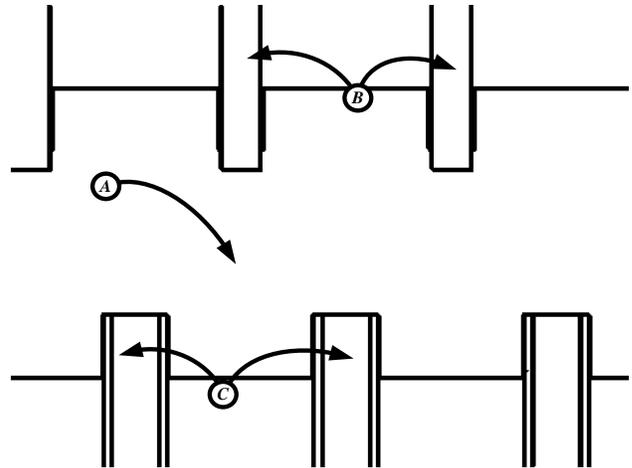


Figura 9. ICCB equipotencial convencional tipo *dogbone*, vista superior de interconexión entre electrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; y (C) Cátodo.

Fuente: Elaboración propia

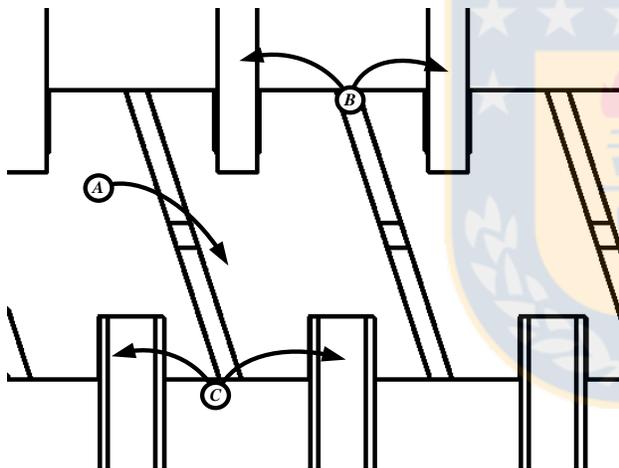


Figura 10. ICCB segmentada convencional tipo *dogbone*, vista superior de interconexión entre electrodos y ICCB (A) Barra intercelda ; (B) Ánodo; y (C) Cátodo.

Fuente: Elaboración propia

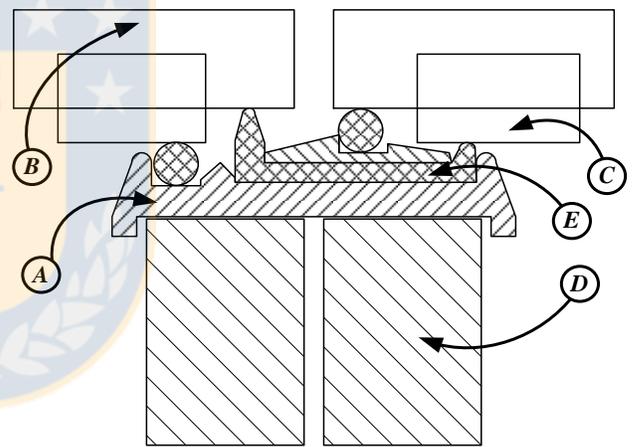


Figura 11. ICCB equipotencial doble contacto tipo *dogbone*, vista lateral de interconexión entre electrodos y ICCB (A) Baseboard; (B) Ánodo; y (C) Cátodo; (D) Pared de celda electrolítica; y (E) Barra intercelda.

[13]

Barra Equipotencial Doble Contacto

La barra equipotencial de doble contacto está compuesta por una barra equipotencial convencional central. Además tiene una barra equipotencial auxiliar, que conecta los extremos aislados de los cátodos y otra barra equipotencial auxiliar que conecta los extremos aislados de los ánodos [13] (Ver Figura 11). Esta barra también está en conexión fuente de voltaje, al igual que la barra equipotencial convencional. Al existir una barra auxiliar se genera un doble contacto. El primero es el contacto entre el *hangerbar* del electrodo y la ICBB y el segundo contacto es entre el

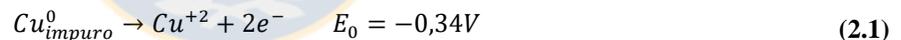
hangerbar en la parte aislada y la barra auxiliar. Ambos contactos estén en paralelo, por lo que la resistencia de contacto disminuye a la mitad. Esta caída en la resistencia de contacto mejora la distribución de las densidades de corriente en los cátodos. Sin embargo, el sistema es más vulnerable a cortocircuitos metalúrgicos.

2.3. Electro-refinación

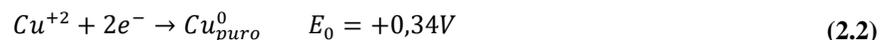
La electro-refinación (ER) de cobre es un proceso electrolítico que transfiere los átomos de cobre desde un ánodo de cobre a un cátodo de acero inoxidable. La roca que contiene sulfato de cobre, entre 0,5% y 2,0%, es reducida en chancadores primarios, secundarios y terciarios. Luego el mineral pasa a la molienda donde se mezcla con una solución para formar una especie de pasta. Luego pasa por un proceso de flotación donde se genera el concentrado de cobre. Este concentrado es convertido en ánodos de cobre a través de un proceso de fundición. Finalmente, el ánodo de cobre es electro-refinado. Este proceso es el proceso final para obtener cátodo de alta pureza (>99,99%).

La electro-refinación de cobre (ER) ocurre en dos etapas: (a) disolución de cobre impuro de los ánodos al electrolito que contiene CuSO_4 y H_2SO_4 y (b) adhesión del cobre en el electrolito al cátodo [2, pp. 251-252].

El cobre del ánodo es disuelto en el electrolito, produciendo un catión de cobre y dos electrones, ver ecuación (2.1)



Luego, los electrones son conducidos al cátodo mediante un circuito externo y una fuente de poder. Los cationes de cobre son arrastrados al cátodo mediante difusión y convección. En la superficie del cátodo, el catión de cobre se recombina con los electrones, según la ecuación (2.2)



Al combinar las ecuaciones (2.1) y (2.2) se tiene que:



Es necesario considerar que además del voltaje de reacción, se tiene un sobre potencial catódico (~50mV) y un sobre potencial anódico (~100mV), además de las pérdidas óhmicas en el electrolito y en las resistencias de contacto entre los *hangerbars* y las barras intercelda. Finalmente,

el potencial aplicado a una celda de electro-refinación es de ~300mV [2, p. 273].

2.4. Electro-obtención

El proceso de electro-obtención de cobre corresponde al último para la extracción de óxidos de cobre. Luego que el tamaño del mineral es reducido en los chancadores primarios, secundarios y terciarios, este pasa al proceso de Lixiviación (LX), luego al proceso de Extracción por Solventes (SX) y finalmente al proceso de electro-obtención (EW) [2, p. 282].

La lixiviación (LX) es el proceso en que un líquido disolvente se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de unos de los componentes del sólido, en este caso el cobre [2, pp. 287-288]. En la industria minera del cobre, la lixiviación se realiza en pilas. Estas son regadas con ácido sulfúrico distribuido homogéneamente por cañerías. El ácido es recolectado en el fondo de la pila por sifones, los cuales dirigen todo el flujo aportado por los paños a distintas piscinas, para luego ser enviado al proceso de SX. La concentración de cobre la solución recolectada es el principal factor para la determinación de la densidad de corriente en el proceso de EW [14].

La extracción por solvente (SX) es el proceso que permite purificar y concentrar soluciones. Este proceso se realiza con una fase orgánica, que posee un extrayente, que entra en contacto con una fase acuosa que posee el material de interés [2, p. 323]. En este caso la fase acuosa es el ácido sulfúrico cargado con cobre en una concentración promedio entre 2gpl a 3gpl. El extrayente reacciona químicamente con el metal de la fase acuosa, adhiriendo el metal a la fase orgánica y manteniendo las impurezas en la fase acuosa. Luego, en un proceso inverso, se inyecta el metal nuevamente en una fase acuosa a una concentración cercana a los 40gpl (electrolito rico). Esta fase acuosa es enviada al proceso de electro-obtención para su posterior refinación. [15]

La electro-obtención (EW) es el proceso final para obtener cobre de alta pureza. Se realiza dentro de celdas de electrolisis donde se depositan cátodos y ánodos alternadamente. El electrolito ingreso a las celdas de electrolisis por la parte inferior y evacúa la celda por un extremo [2, p. 349]. El cátodo está formado por acero resistente al ácido sulfúrico que va adherido a una barra conductora (*hangerbar*) típicamente de cobre [16]. El ánodo por otra parte está compuesto generalmente por una aleación de plomo-níquel-estaño que va adherido un *hangerbar*. Ambos *hangerbars* descansan sobre una barra conductora en un extremo y un aislador en otro. Al aplicar un voltaje en los terminales del cátodo y ánodo se genera la electrolisis, la cual extrae el cobre de la

solución y por transferencia de masa adhiere los átomos de cobre al cátodo. La duración de este proceso se determina a partir de la ecuación de Faraday [17] y la masa con la que se quieran cosechar los cátodos.

Dentro de la celda electrolítica se producen diversas reacciones químicas. La primera es la reducción del cobre que se produce en el cátodo, donde el ión Cu^{+2} capta 2 electrones para formar un átomo de cobre, como se muestra en la ec (2.4). El potencial de activación de ésta reacción es de +0,34V. [18]



Por otra parte, en el ánodo se produce la oxidación del agua, reacción que tiene un potencial de activación de -1,23V.



Por lo tanto, para que se produzca la reacción es necesario un potencial mínimo de 0,89V. Una vez liberado el cobre del sulfato de cobre ($CuSO_4$), el ión SO_4^{-2} se unirá con el hidrogeno liberado de la oxidación del agua, formando ácido sulfúrico, el cobre se adherirá a la placa de acero y el oxígeno será liberado en forma de gas [17].

2.5. Perturbaciones del Proceso

Las perturbaciones del proceso de ER y EW pueden ser de origen químico (metalúrgico) o mecánico. Las perturbaciones de origen mecánico producen debido al constante *stress* que se aplica sobre los contactos de las barras intercelda. Al momento de cosechar, los cátodos son levantados un tercio a la vez con un puente grúa para ser llevados a la máquina despegadora de cátodos (*stripping machine*). Luego, cátodos nuevos (sin depósito de cobre) son sembrados en la celda. Al momento que la grúa bajar los cátodos, ésta llega lo más cerca posible de la barra intercelda, a una distancia de no más de 10[cm]. Luego, los cátodos son soltados desde esta altura. El golpe que se genera al momento de la siembra genera una *stress* mecánico en los contacto, creando deformaciones en esta zona (Ver Figura 12 (b)). Estas deformaciones hacen que la resistencia eléctrica del contacto aumente, lo que aumenta la potencia disipada en el contacto durante la operación. Esto se traduce en altas temperaturas en los contactos. La distancia por diseño el centro de un electrodo y el centro del electrodo contiguo debe ser de 2". Sin embargo, la alineación de los electrodos no es perfecta. Las

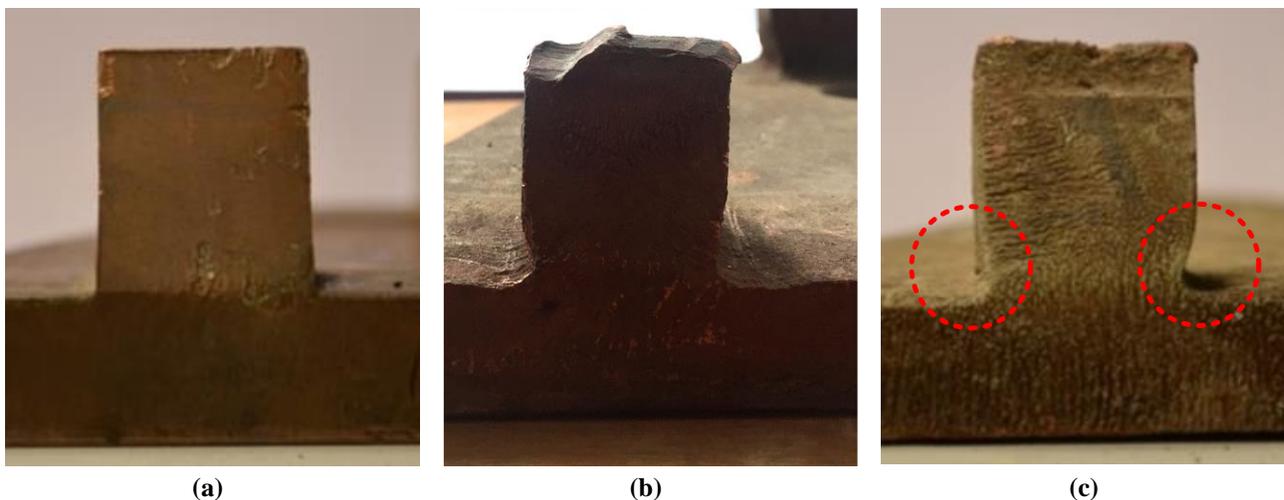


Figura 12. Estado de contactos de ánodos de una ICCB. (a) Contacto de una barra nueva (b) Contacto deformado producto de la operación en planta (c) Contacto después de 4 años de servicio en planta.
Fuente: Elaboración propia

variaciones de las distancias entre electrodos puede llegar a ser de 0,5[cm] por lo que la resistencia entre los electrodos varía.

Por otra parte, perturbaciones de origen metalúrgico corresponden a las reacciones adicionales que ocurran dentro de la celda de ER y EW; los efectos de la corrosión producto de la neblina ácida; y la formación de nódulos en el cátodo.

Las reacciones adicionales corresponden a la oxidación de otros componentes que no son el cobre, como por ejemplo el Hierro (Fe) y Estaño (Sn) provenientes de la etapa de SX y el Plomo (Pb) que se libera de los ánodos en el proceso de EW.

La neblina ácida se genera debido a que el proceso de EW genera una molécula de oxígeno. Esta molécula gaseosa se libera al aire y acarrea partículas de ácido sulfúrico. El ácido se impregna a la ICBB por la condensación, lo que genera corrosión en la ICCB como se puede apreciar en la Figura 12 (c).

Por otra parte, se produce nodulación en los cátodos. En planta se han identificado las principales causas a la formación de nódulos. La primera es por las impurezas en el electrolito. Mientras más impurezas contenga el electrolito, mayor será la probabilidad de generar un nódulo. La segunda causa es por sobre corrientes. El aumento de corriente puede producirse por varios efectos, pero el principal es que un cátodo vecino no esté haciendo contacto, por lo que la corriente circula por los cátodos adyacentes. Al formarse un nódulo, la resistencia entre los electrodos disminuye, por lo que la corriente se eleva. Este es un efecto domino, donde más corriente genera más nódulos; y más nódulos generan más corriente.

2.6. Anomalías

Las perturbaciones anteriormente mencionadas se manifiestan en las siguientes anomalías del proceso: corto-circuitos [19], contactos deficientes [20] y circuitos abiertos [21]. Cada anomalía presenta características únicas y afectan al proceso de forma diferente. Estas anomalías serán las que se mitigarán y detectarán con la nueva tecnología de barra intercelda.

Corto Circuito

El corto circuito metalúrgico se produce cuando se genera un nódulo en el cátodo. Debido a que este nódulo es una protuberancia que sale del cátodo, la distancia entre el cátodo y el ánodo disminuye, por lo que la corriente aumenta considerablemente (50% a 150%) [22]. En la Figura 13 (a) se muestra un cátodo de cobre con un nódulo.

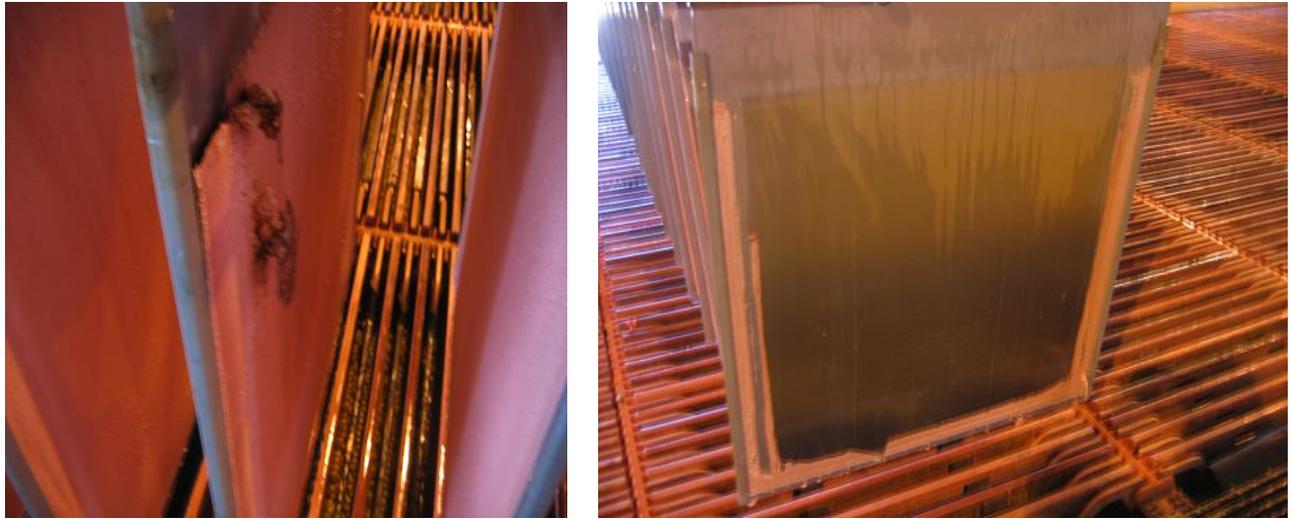
El problema que presenta la medición y detección de los cortocircuitos, es que para medir la corriente, se necesita un sistema invasivo [22] lo que no va en línea con los desarrollos futuros de las plantas de electrolisis.

Circuito Abierto

El circuito abierto se produce cuando no existe contacto eléctrico entre el *hanger bar* del electrodo y la barra intercelda. Al no existir contacto, la corriente no fluye a través del cátodo, por lo que la electro-depositación no ocurre. Esto es llamado *blank* en la industria, que es cuando un cátodo es cosechado sin depósito de cobre (ver Figura 13 (b)). El *blank* no sólo reduce la producción de cobre, si no que a la vez aumenta la corriente en los cátodos vecinos, aumentando la posibilidad de que se forma nodulación o, en caso más extremos, un corto circuito metalúrgico. [21]

Contacto Deficiente

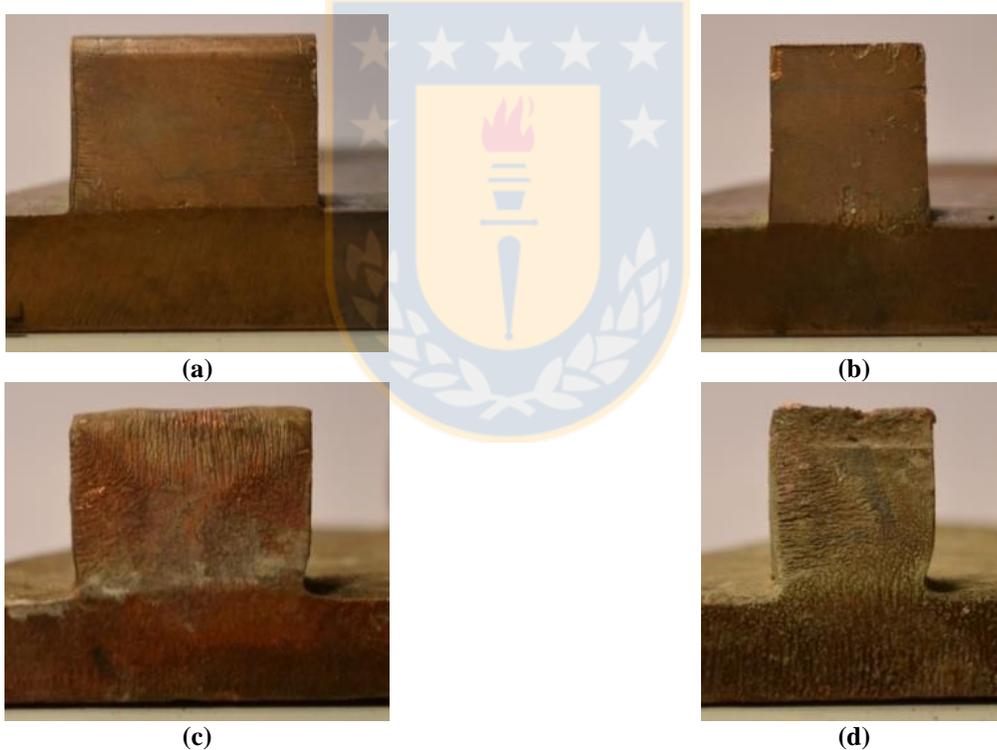
El contacto deficiente se produce por un stress mecánico. Esto ocurre en la etapa de siembra de los electrodos. Los electrodos son depositados en las celdas electrolíticas mediante un puente grúa. El proceso debe posicionar suavemente los electrodos sobre los contactos de las barras intercelda, sin embargo en la realidad estos son acercados hasta una distancia prudente y luego se dejan caer sobre la barra. Esto genera una deformación del contacto, que con el tiempo comienza a deformarse. En la Figura 14 se puede observar un contacto de un cátodo (a) y un ánodo (c) al comienzo de la vida útil de la barra intercelda. Luego de transcurridos 4 años, la barra es reemplazada y los contactos de los cátodos se ven deformados (ver Figura 14 (b) y (d)).



(a)

(b)

Figura 13. Anomalías del proceso (a) Cortocircuito metalúrgico producido por un nódulo. (b) Blank producido por un circuito abierto. Fuente: Elaboración propia



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 14. Contactos de cátodo y ánodo (a) Contacto de cátodo nuevo; (b) Contacto de ánodo nuevo; (c) Contacto de cátodo envejecido; (d) Contacto de ánodo envejecido.

Fuente: Elaboración propia

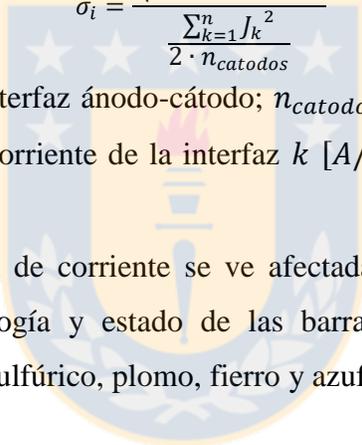
El proceso para la deformación de los contactos es vicioso. La deformación de los contactos produce que la resistencia en el contacto aumente, aumentado de esta forma la potencia disipada en el contacto. Luego el calor que se libera en el contacto aumenta, elevando la temperatura y emblandeciendo el cobre, lo que lo hace más propenso a la deformación [16] [23].

2.7. Índices de Operación

Los indicadores de planta son aquellos que nos permiten analizar el funcionamiento global de la planta de electrólisis. En estos indicadores convergen muchas variables del proceso que son difíciles – en algunos casos imposibles – de medir.

2.7.1. Dispersión de Densidad de Corriente

El índice de dispersión de densidad de corriente (σ_i) es la relación que existe entre la desviación estándar de las corrientes medidas en una celda – o grupo de celdas – y su promedio. Una dispersión de corriente 0, significa que todas las densidades de corriente tienden al valor medio.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (J_k - \bar{J})^2}{2 \cdot n_{catodos} - 1}} \quad (2.6)$$


Donde k representa a la interfaz ánodo-cátodo; $n_{catodos}$ corresponde al número de cátodos; J_k corresponde a la densidad de corriente de la interfaz k [A/m^2]; \bar{J} corresponde a la densidad de corriente media [A/m^2].

La dispersión de densidad de corriente se ve afectada principalmente por factores como: anomalías en el proceso; tecnología y estado de las barras intercelda; variables metalúrgicas (concentraciones de cobre, ácido sulfúrico, plomo, fierro y azufre); y estado de los electrodos.

2.7.2. Eficiencia de Corriente

La eficiencia de corriente es un factor que determina el porcentaje de aprovechamiento de la corriente en el proceso de electrólisis. Esta se define como la relación entre la masa obtenida en una cosecha y la masa teórica que se debió obtener.

La masa teórica en una celda de electrólisis se obtiene mediante la Ley de Faraday (ec. 2.7):

$$m_t = \frac{q}{q_e \cdot n} \cdot \frac{M}{N_A} \quad (2.7)$$

Donde m_t representa a la masa teórica [g]; q representa a la carga transferida en el proceso de electrólisis [c]; q_e representa la carga de un electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}[c]$); n representa el número de valencia del catión (+2); M representa la masa atómica del cobre ($63,536[g \cdot mol^{-1}]$); y N_A representa al número de Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23} [mol^{-1}]$).

Al reemplazar los parámetros q_e , n , N_A y M y además reemplazar la carga total de acuerdo a la siguiente fórmula,

$$q = n_{celda} \cdot n_{catodos} \int I \cdot dt = I \cdot t \cdot n_{celda} \cdot n_{catodos} \quad (2.8)$$

Por lo tanto, al reemplazar la ec. 2.8 en 2.7, se tiene que:

$$m_t = 1,185466 \cdot I \cdot t \cdot n_{celda} \cdot n_{catodos} \quad (2.9)$$

Donde I representa a la corriente media del proceso de electrólisis [A]; t corresponde a la duración del proceso [h]; n_{celdas} corresponde al número de celdas; y $n_{catodos}$ corresponde al número de cátodos por celda.

Luego, la eficiencia de corriente se define como,

$$\eta = \frac{1,185466 \cdot I \cdot t \cdot n_{celda} \cdot n_{catodos}}{m_{real}} \quad (2.10)$$

2.7.3. Consumo Específico

El consumo específico se define como la cantidad de energía necesaria para producir una tonelada de cobre refinado.

$$W_s = \frac{\overline{v_{celda}} \cdot I \cdot t}{m_{real}} \quad (2.11)$$

Donde W_s es el consumo específico [Wh/g]; $\overline{v_{celda}}$ es el voltaje promedio de una celda de electrólisis [V]; y m_{real} corresponde a la masa real cosechada de la celda de electrólisis [g].

Para ajustar las unidades de medida, se reemplaza la ec. (2.10) en (2.11) y se obtiene,

$$W_s = 843,55 \cdot \frac{\overline{v_{celda}}}{\eta \cdot n_{celdas} \cdot n_{catodos}} \quad (2.12)$$

Donde W_s se mide en [kWh/ton].

Capítulo 3. Modelo del Proceso Electrolítico

3.1. Introducción

En este capítulo se modela el proceso de electrolisis de cobre. La optimización el sistema de distribución de corrientes requiere modelar los procesos electrolíticos para cuantificar el impacto que tendrá el sistema sobre el proceso. Se plantean dos modelos: un modelo de parámetros concentrados y un modelo de parámetros distribuidos. Cada uno de estos modelos está compuesto por modelos estocásticos y modelos determinísticos de acuerdo a la disponibilidad de información y simplicidad en la simulación.

El modelo de parámetros concentrados determina la distribución de las corrientes en los electrodos. Las corrientes que se obtienen del modelo de parámetros concentrados se utilizan como entradas al modelo de parámetros distribuidos. Este último se utilizará para predecir el comportamiento térmico que tendrá el sistema de distribución. Ambos modelos deben ser ajustados de acuerdo mediciones realizadas en plantas industriales.

3.2. Topología del Modelo

Para determinar el comportamiento eléctrico y térmico de las barras intercelda se utilizan una serie de modelos estocásticos y determinísticos. Los modelos estocásticos se utilizan para representar fenómenos que constan de muchas variables difíciles de controlar o incluso medir. Estos modelos son incorporados como parámetros a los modelos determinísticos de los cuáles se obtienen los resultados.

La implementación de los diversos modelos se realiza mediante modelos de parámetros concentrados y de parámetros distribuidos. En la Figura 15 se muestran los modelos estocásticos a implementar, entre los que se encuentra el modelo de posicionamiento de electrodos, modelos de resistencia de contacto, modelo de cortocircuitos, circuitos abiertos y contactos deficientes. Estos modelos se utilizarán como parámetros en el modelo de celdas de electrolisis de parámetros

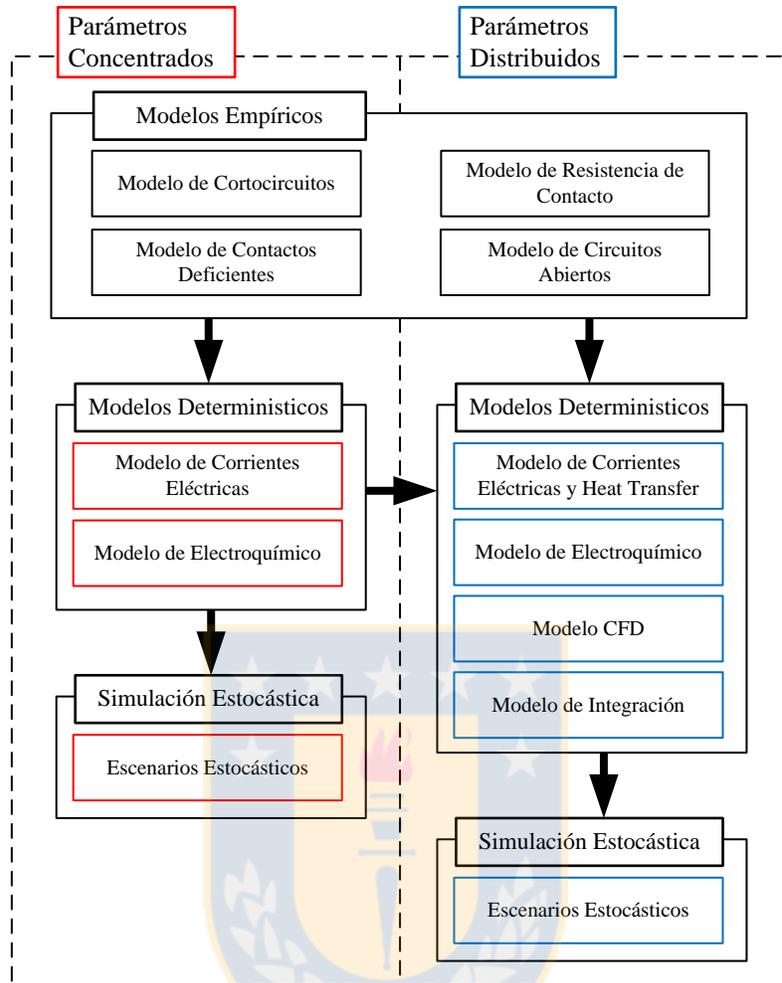


Figura 15. Diagrama de modelos y simulaciones realizadas.
Fuente: Elaboración propia

concentrados y de parámetros distribuidos. Del modelo de parámetros concentrados se obtienen las distribuciones de corriente que finalmente se utilizan para simular la temperatura en un modelo de parámetros distribuidos.

3.3. Modelo de Parámetros Concentrados

EL modelo de celda debe considerar cada uno de los elementos que tienen caídas de tensión. Este modelo del voltaje de celda se determina de la siguiente forma:

$$v_c = E_0 + \eta_c + \eta_a + v_e + v_{cc} + v_{ca} + v_h + v_r \quad (3.1)$$

Se puede observar que los distintos elementos del sistema dependerán de diversos parámetros. Tanto el voltaje de las resistencias de contacto de cátodo (v_{cc}), ánodo (v_{ca}) y la

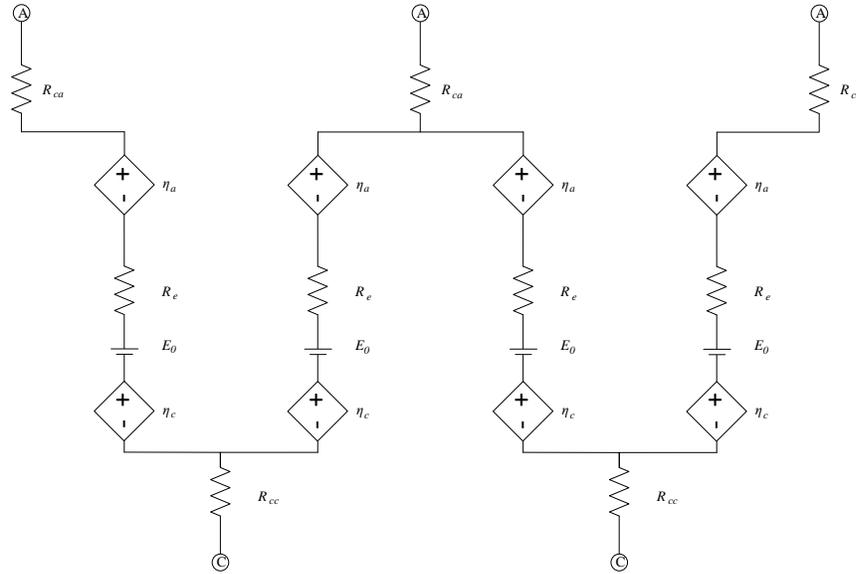


Figura 16. Modelo de voltaje de una celda de electrólisis entre un cátodo y un ánodo.
Fuente: Elaboración propia

resistencia de electrolito (v_e) dependen del valor de la resistencia y la corriente que circulo por ellos. El voltaje de activación (E_0) depende de los procesos que ocurran en la celda. Los sobre potenciales catódicos (η_c) y anódicos (η_a) dependen de la corriente que circula. El voltaje de hardware (v_h) depende de la topología de barra intercelda y el del rectificador (v_r) depende de los semiconductores que utilice y la distancia entre el rectificador y la planta de electrólisis.

Se puede observar que los distintos elementos del sistema dependerán de diversos parámetros. Tanto el voltaje de las resistencias de contacto de cátodo (v_{cc}), ánodo (v_{ca}) y la resistencia de electrolito (v_e) dependen del valor de la resistencia y la corriente que circulo por ellos. El voltaje de activación (E_0) depende de los procesos que ocurran en la celda. Los sobre potenciales catódicos (η_c) y anódicos (η_a) dependen de la corriente que circula. El voltaje de hardware (v_h) depende de la topología de barra intercelda y el del rectificador (v_r) depende de los semiconductores que utilice y la distancia entre el rectificador y la planta de electrólisis.

El modelo genera una malla de admitancias y resuelve la ley de Ohm, para determinar el voltaje en cada nodo del sistema. El vector de corrientes de entrada corresponde a la corriente del rectificador, que se sitúa en el último nodo del sistema.

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{I} \quad (3.2)$$

3.3.1. Modelación de Resistencia de Electrolito

Las resistencias de electrolito dependen del área de los electrodos, la distancia de los electrodos, las concentraciones de cobre y ácido sulfúrico, la temperatura del electrolito y la homogeneidad del electrolito [15]. Por lo tanto la resistencia de electrolito se determina como sigue en la ec. (3.3).

$$R_{el} = \frac{1}{\sigma_{el}} \cdot \frac{d_e}{A_c} \quad (3.3)$$

Donde σ_{el} corresponde a la conductividad del electrolito [S/m], d_e corresponde a la distancia entre los electrodos [m] y A_c corresponde a al área de transferencia entre ánodo y cátodo que está sumergidas en el electrolito [m^2].

Donde la conductancia se define como la ec. (3.4) [15],

$$\sigma_{el} = 13,4 - 0,356 \cdot c_{Cu} + 0,249 \cdot c_{H_2SO_4} + 0,426 \cdot T_{el} \quad (3.4)$$

Donde c_{Cu} corresponde a la concentración de cobre en el electrolito [g/l]; $c_{H_2SO_4}$ representa a la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito [g/l]; y T_{el} es la temperatura del electrolito en [$^{\circ}C$].

Además la distancia entre electrolito d_e se determina considerando la distancia entre el centro del ánodo y el cátodo y además sus anchos, es decir,

$$d_e = \frac{D_A}{2} - \left(\frac{d_A}{2} + \frac{d_C}{2} \right) = \frac{D_A - (d_A + d_C)}{2} \quad (3.5)$$

Donde D_A es la distancia entre dos ánodos, d_A es el ancho del ánodo y d_C es el ancho del cátodo.

La distancia entre los electrodos es variable y esto causa que no todas las resistencias de electrolito sean iguales. Para esto, se utiliza un modelo estocástico, con una distribución de resistencias. Al medir la resistencia de electrolito en planta y hacer un histograma de los valores

TABLA 1. DIMENSIONES DE ÁNODO Y CÁTODO PARA EW Y ER.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro	EW	ER
D_A	101,9 [mm]	100 [mm]
d_A	9 [mm]	36 [mm]
d_C	3,25 [mm]	3,25 [mm]

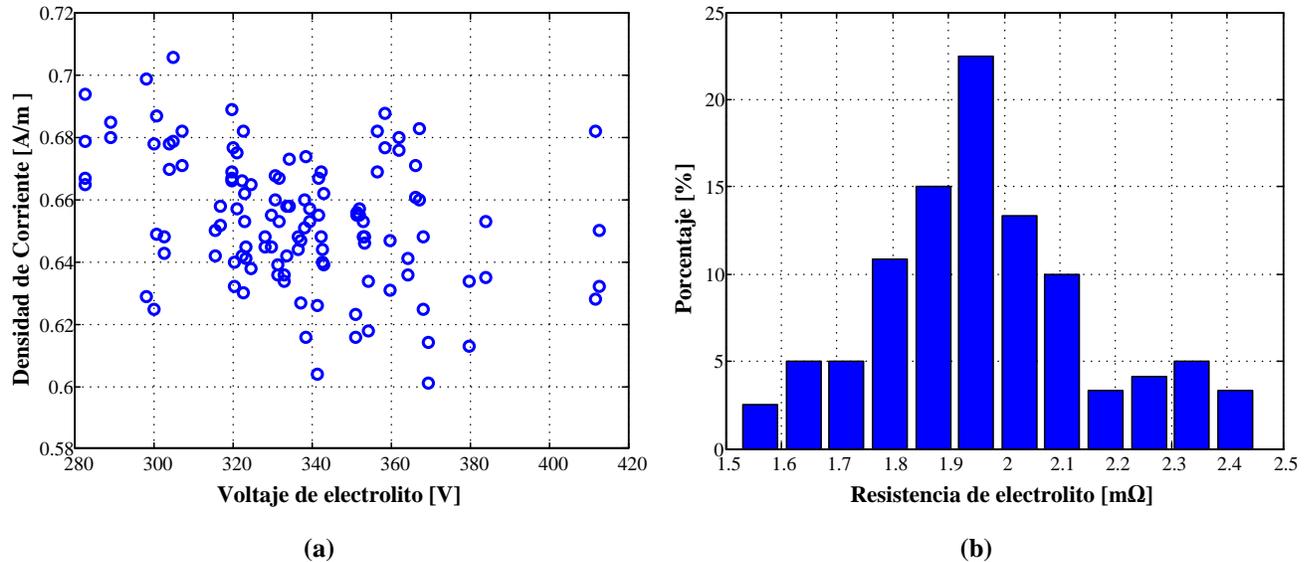


Figura 17. Resistencias de Electrolito (a) Dispersión de Resistencia de electrolito (b) Distribución de resistencias de electrolito medidas en planta.

Fuente: Elaboración propia

obtenidos (Anexo A) se observó que las resistencias siguen una distribución normal como la que se muestra en la ec. (3.6).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_e}{\sigma} \right)^2} \quad (3.6)$$

Donde, μ es el valor medio de las resistencias de electrolito medidas y σ es la desviación estándar de las resistencias de electrolito medidas. En la Figura 17 se muestra la distribución de resistencia de electrolito

3.3.2. Modelación de Resistencia de Contacto

La resistencia de contacto corresponde a la resistencia que existe entre el hangerbar de un electrodo y la barra intercelda. Esta resistencia dependerá de factores como el peso de los electrodos, la forma del contacto, el nivel de corrosión de la zona de contacto en la barra intercelda y la integridad de la zona de contacto del hangerbar.

Al igual que la resistencia de electrolito, la resistencia de contacto se midió en terreno y se generó un modelo estocástico que será incorporado a modelo de parámetros concentrados en forma de una distribución de resistencias. Como se observa en la Figura 18 (b) la distribución de probabilidades tiene una forma de distribución Gamma. Como la que se muestra en la ec. (3.7).

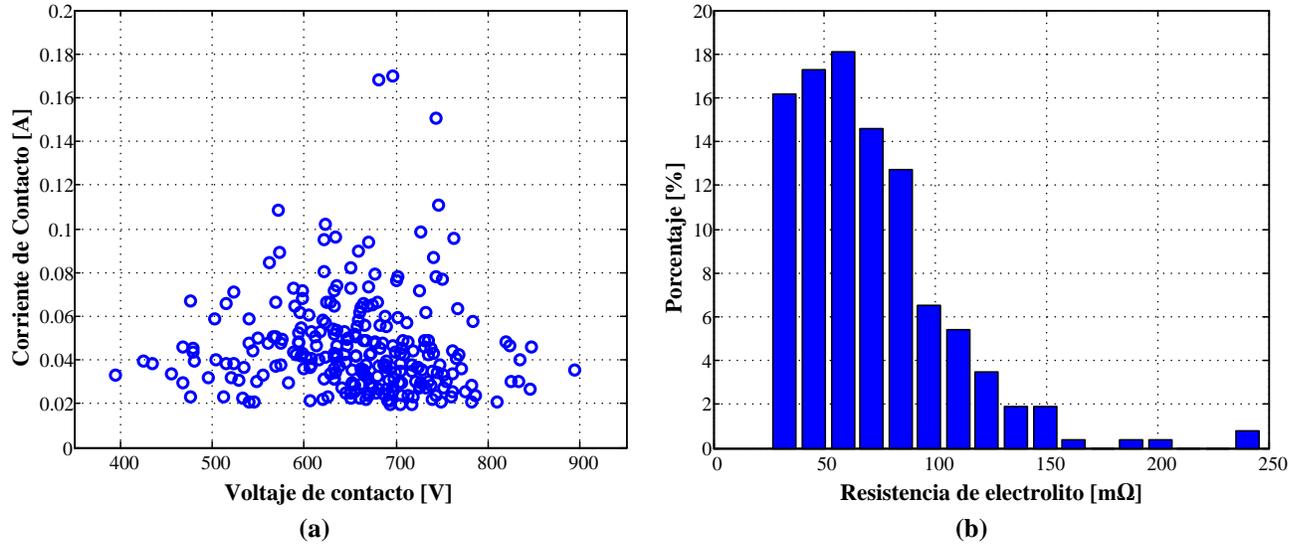


Figura 18. Resistencias de Contacto (a) Dispersión de Resistencia de contacto de cátodo (b) Distribución de resistencias de contacto de cátodo medidas en planta.

Fuente: Elaboración propia

$$f(x) = \frac{1}{b^a} e^{-\frac{x}{b}} \cdot x^{a-1} \cdot \frac{1}{\Gamma(a)} \quad (3.7)$$

Donde a y b son valores empíricos calculados de acuerdo a las resistencias de contacto de cátodo medidas. Los valores se muestran en el Anexo B.

3.3.3. Modelación de Sobrepotencial

Finalmente, en el modelo, cuando se considera una distribución de corrientes secundaria, es necesario contabilizar el sobrepotencial catódico y anódico. Este efecto considera las dinámicas en la interfaz del ánodo y el cátodo. Para esto, la ecuación de Butler-Volmer es utilizada. El sobrepotencial depende en gran medida de la densidad de corriente, como se aprecia en la ecuación (3.8). [14]

$$i_{loc,m} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{R_u T}\right) \right) \quad (3.8)$$

Donde $i_{loc,m}$ corresponde a la densidad de corriente en la interfaz para la reacción m [A/m^2]; i_0 es la densidad de corriente de intercambio [A/m^2]; α_a es el coeficiente de transferencia anódica; α_c es el coeficiente de transferencia catódica; y R_u es la constante universal de los gases.

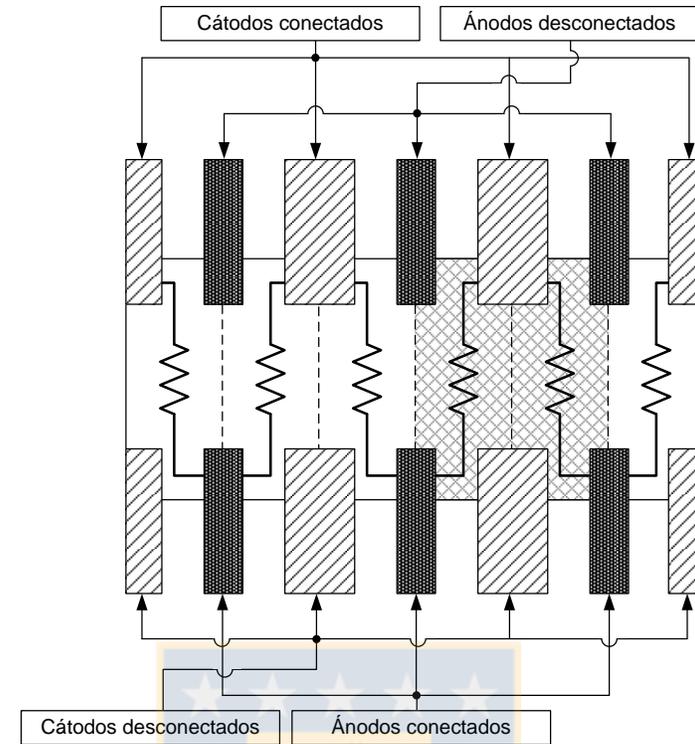


Figura 19. Modelo de parámetros concentrados de barra equipotencial.
Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Modelación de Barra Intercelda

La barra intercelda debe modelarse como un conjunto de resistencias para ser incorporado al modelo de parámetros concentrados. El valor de las resistencias conectadas entre los electrodos variará dependiendo del tipo de conexión. La resistencia de la barra, entre los electrodos es

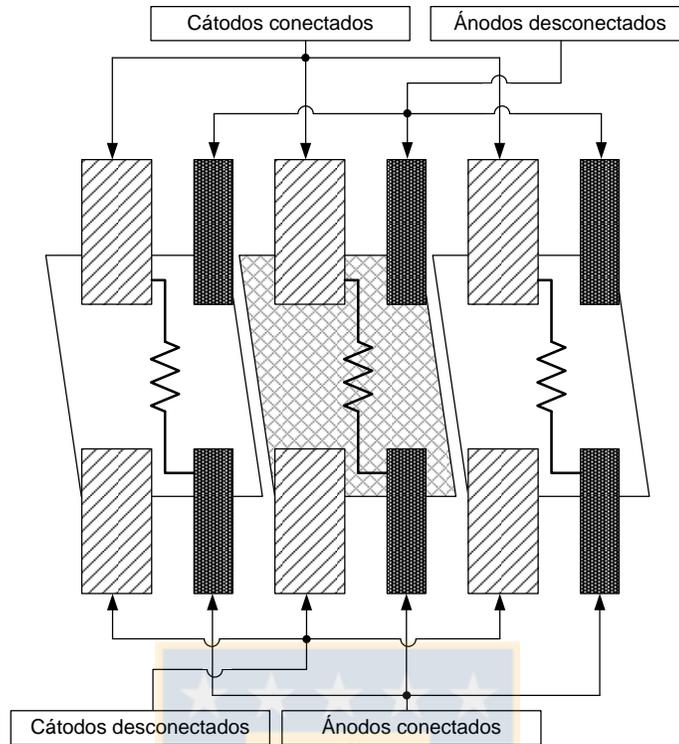
$$R_{bulk} = \rho \cdot \frac{l_{streamline}}{S} \quad (3.9)$$

Donde R_{bulk} es la resistencia entre electrodos [Ω]; ρ corresponde a la resistividad del material de la barra (típicamente cobre C11000) [$\Omega \cdot m$]; $l_{streamline}$ es la distancia media de las líneas de corriente que pasan por el segmento (típicamente se asume el ancho de la barra) [m]; y S es la sección transversal del segmento.

En la Figura 19 se muestra el modelo de parámetros concentrados de una barra equipotencial y en la Figura 20 se muestra el modelo de una barra segmentada.

3.4. Modelo de Parámetros Distribuidos

Debido a que el sistema es multifísico, un modelo de resistencia no considera el problema en



**Figura 20. Modelo de parámetros concentrados de barra segmentada .
Fuente: Elaboración propia**

toda su complejidad. Para esto se utiliza el modelo de parámetros distribuidos, que permite incluir diversos fenómenos físicos en la electrólisis del cobre y agregar dependencias entre parámetros y variables. Al utilizar un software de elementos finitos que tenga capacidad de resolver las ecuaciones relacionadas a cada una de los modelos físicos que se incluyen en el modelo, se puede resolver el sistema en función de todas sus variables. [24] [25]

En un sistema de parámetros distribuidos es necesario resolver para cada elemento las ecuaciones que describen el fenómeno. [26] [27]

3.4.1. Modelo Electro-Químico

En general, el balance de masa para especies diluidas en un electrolito es descrito por la siguiente ecuación, [28]

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i = R_{i,tot} \quad (3.10)$$

Donde \mathbf{N}_i corresponde al flujo de la especie i [$mol/(m^2 \cdot s)$]; c_i representa la concentración del ion i [mol/m^3]; y $R_{i,tot}$ representa a la reacción i [$mol/(m^3 \cdot s)$].

El flujo de electrolito se describe con la ecuación de Nernst-Planck que considera el flujo de

especies por difusión, migración y convección; primer, segundo y tercer término de la ecuación (3.11).

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_{m,i} F c_i \nabla \phi_l + c_i \mathbf{u} \quad (3.11)$$

Donde D_i corresponde al coeficiente de difusión [m^2/s]; z_i corresponde a la valencia de la especie i ; $u_{m,i}$ corresponde a la movilidad de la especie i [$s \cdot mol/kg$]; F corresponde a la constante de Faraday; ϕ_l corresponde al potencial del electrolito [V]; y \mathbf{u} corresponde al vector de velocidad [m/s]

La densidad de corriente total se describe como,

$$\mathbf{i}_l = F \sum z_i \mathbf{N}_i \quad (3.12)$$

El modelo a utilizar, utilizara distribución de corrientes primarias y secundarios. Esto significa que se considera electroneutralidad – por lo que se elimina la convección – y que el electrolito es homogéneo y no existe gradiente de concentración – por lo que la difusión se elimina. Por lo tanto, la densidad de corriente en el electrolito se describe como,

$$\mathbf{i}_l = -F^2 \sum z_i^2 u_{m,i} c_i \nabla \phi_l \quad (3.13)$$

Asumiendo que la conductividad en el electrolito es constante,

$$\sigma_l = F^2 \sum z_i^2 u_{m,i} c_i \quad (3.14)$$

Luego, se puede reescribir la ecuación (3.11) de la misma forma que la ley de Ohm.

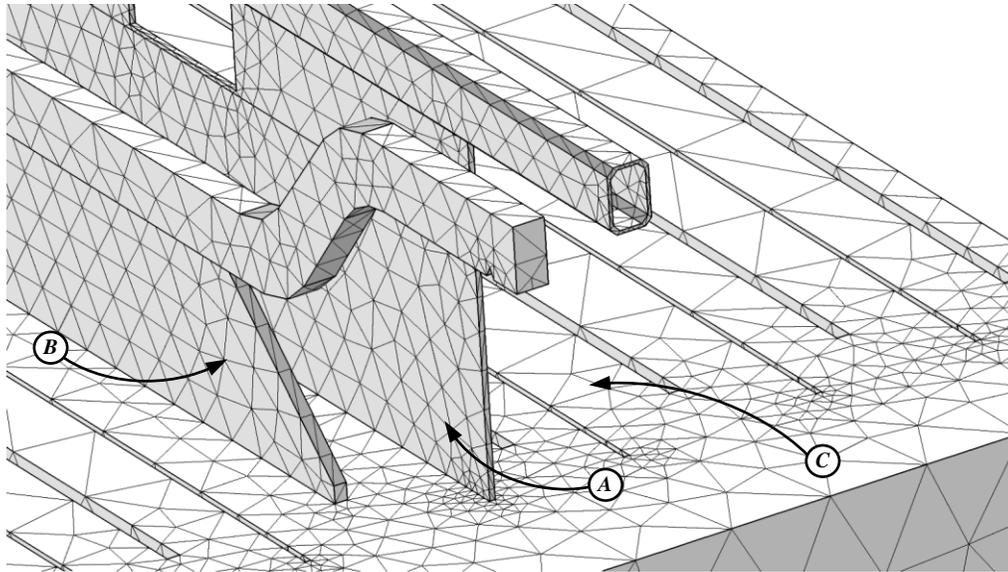
$$\mathbf{i}_l = -\sigma_l \nabla \phi_l \quad (3.15)$$

Para el electrodo, la ley de Ohm queda escrita como,

$$\mathbf{i}_s = -\sigma_s \nabla \phi_s \quad (3.16)$$

Donde el subíndice s representa al electrodo.

La distribución de corriente primaria en el electrolito solo considera la caída de voltaje producto de la resistencia de electrolito (Figura 21). La distribución de corriente secundaria, considera además los voltajes en las interfaces entre el electrolitos y los electrodos. Esto define la corriente en las interfaces entre el electrolito y el electrodo en función del sobrepotencial, dado por la ecuación de Butler-Volmer. [29]



**Figura 21. Malla de una celda electrolítica (A) Electrolito; (B) Ánodo; (C) Cátodo.
Fuente: Elaboración propia**

3.4.2. Modelo Eléctrico de Barra Intercelda

En un sistema de parámetros distribuidos es necesario resolver para cada elemento las ecuaciones que describen el fenómeno. [26] [27] Al igual que en el caso del modelo electro-químico la densidad de corriente en cualquier elemento del sistema se define mediante la ley de Ohm.

$$\mathbf{J}_{ec} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla V \quad (3.17)$$

Donde \mathbf{J}_{ec} corresponde a la densidad de corriente, σ es la conductividad del material, \mathbf{E} corresponde al campo eléctrico y V es la diferencia de tensión. Luego, se debe cumplir la ecuación de Laplace (ver ec. 3.18), para una sistema estacionario *dc*,

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{ec} = \nabla \cdot (-\sigma \nabla V) \quad (3.18)$$

Es necesario definir una referencia para el sistema, donde el potencial es 0V. Para esto, en un extremo de las celdas se debe considerar la siguiente condición de contorno,

$$\mathbf{V} = 0 \quad (3.19)$$

El sistema debe acoplarse con el modelo electro-químico. La corriente que sale por el cátodo desde la barra intercelda, debe ingresar al electrolito, por lo tanto, entre la barra intercelda y el hangerbar de los electrodos se define una resistencia de contacto [30].

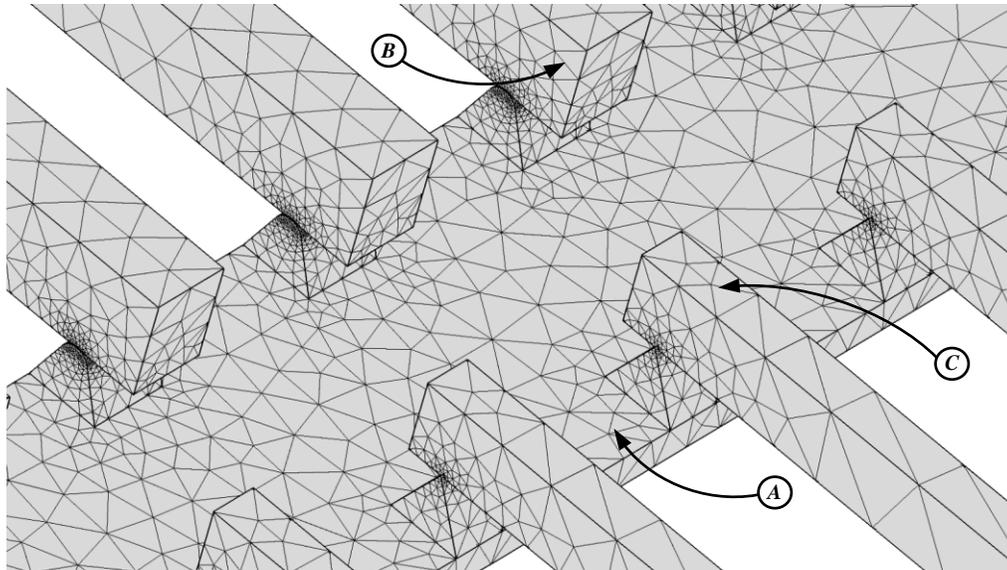


Figura 22. Malla de una barra intercelda (A) Barra Intercelda; (B); Cátodo (C) Ánodo
Fuente: Elaboración propia

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = \frac{\sigma_c}{d_s} \Delta V \quad (3.20)$$

Donde σ_c corresponde a la conductividad del contacto [S/m]; y d_s es el ancho de la interfaz entre el hangerbar y la barra intercelda (típicamente 1[mm]). La conductividad de los contactos se determina mediante el modelo de resistencia de contacto en la sección 3.3.2.

Finalmente, la corriente de entrada al sistema electro-químico se determina de la corriente de salida del sistema eléctrico, de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$\int_{\partial\Omega} \mathbf{J}_{ec} \cdot \mathbf{n} dS = I_{s,total} \quad (3.21)$$

3.4.3. Modelo Térmico de Barra Intercelda

Por otra parte, para integrar el sistema eléctrico con la transferencia de calor, es necesario determinar las fuentes de calor. Estas se producen por la potencia disipada por los elementos. La potencia disipada por un elementos sólido, como barras intercelda, *hangerbars*, placas de acero y electrolito, se definen en la ecuación 3.22,

$$\rho C_p \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (3.22)$$

Donde ρ corresponde a la densidad del material, C_p corresponde al calor específico del material, T corresponde a la temperatura, k es la conductividad térmica y Q corresponde al calor entregado por una fuente externa.

La potencia disipada por superficies, específicamente superficies de contacto entre *hangerbar* y barra intercelda, se define en la ecuación 3.23,

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = Q_s \quad (3.23)$$

Donde \mathbf{n} corresponde al vector normal a la superficie y Q_s es una fuente de calor superficial externa.

Luego, las fuentes de calor generadas por la potencia se definen como la integral de volumen en un dominio, según la ecuación 3.24,

$$Q = \oint_{\partial\Omega} -\nabla T \cdot \mathbf{J} \cdot d\Omega \quad (3.24)$$

3.4.4. Ventilación del Sistema

La ventilación del sistema considera un flujo de aire laminar que recorre la nave de forma lateral, es decir perpendicular a la posición de los electrodos. El aire se puede modelar como un flujo de calor que sale del sistema o bien como un dominio independiente donde existe un flujo de aire y transferencia de calor entre los electrodos, barras intercelda y aire.

El sistema está descrito mediante las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos de una fase. Para esto se tiene la ecuación de continuidad, [31]

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.25)$$

Y la ecuación de momento,

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (3.26)$$

Donde ρ es la densidad del fluido [kg/m^3]; \mathbf{u} es el vector de velocidad [m/s]; p es la presión [Pa]; \mathbf{F} es el vector de fuerza volumétrica [N/m^3]; y μ es la viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].

El sistema define una entrada de aire en una cara del dominio, donde

$$\mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n} \quad (3.27)$$

Donde U_0 es la magnitud de la velocidad del aire [m/s].

Además, en la cara de entrada del aire debe considerarse una condición de borde de temperatura. La temperatura en este borde será la temperatura del aire, típicamente 20°C. En la cara

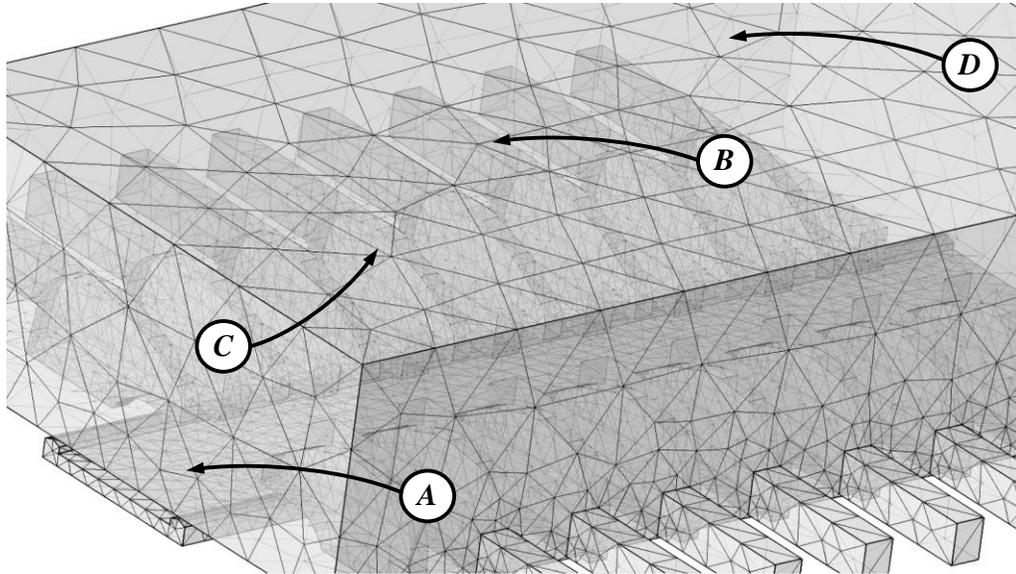


Figura 23. Malla de una sistema de barra intercelda con un dominio de aire (A) Barra Intercelda; (B); Cátodo (C) Ánodo; (D) Volumen.

Fuente: Elaboración propia

contraria (salida de aire) es necesario definir una condición de salida de calor. Para esto se define en la cara,

$$-\mathbf{n}(-k\nabla T) = 0 \quad (3.28)$$

3.5. Sintonización de Modelos

Los modelos han sido sintonizados con parámetros reales medidos en plantas industriales. Específicamente se realizaron mediciones en la nave de electro-refinación de Chuquicamata (CODELCO) y la nave de electro-obtención en Compañía Minera Zaldívar (AMSA).

La recopilación de antecedentes constó de mediciones diarias de corrientes catódicas, voltajes de operación (cátodo-ánodo y grupos de celdas), voltajes en los contactos de ánodos y cátodos, temperatura de contacto, temperatura en la barra intercelda, temperatura de electrolito, termografías de la nave de electrólisis, corriente del rectificador, voltaje del rectificador y peso de cátodos cosechados. Estas mediciones se llevaron a cabo entre los años 2005 y 2012, bajo distintas condiciones de operación. [32]

Capítulo 4. Simulación de Sistemas de Distribución de Corriente

4.1. Introducción

En este capítulo se simula el proceso de electrolisis de cobre de acuerdo a los modelos vistos en el capítulo anterior. El modelo de parámetros concentrados permite determinar las corrientes que circulan en la nave de electrolisis. Para esto se realizan 1000 simulaciones, cada una de ella con parámetros aleatorios siguiendo las distribuciones de resistencias implementadas en la sección 3.3 y considerando una planta de electrolisis de 65 cátodos y 7 celdas, con una densidad de corriente media de $330[A/m^2]$. El modelo de parámetros distribuidos nos entrega información de las pérdidas en las barras intercelda y las temperaturas de operación y su perfil térmico bajo distintas condiciones de operación.

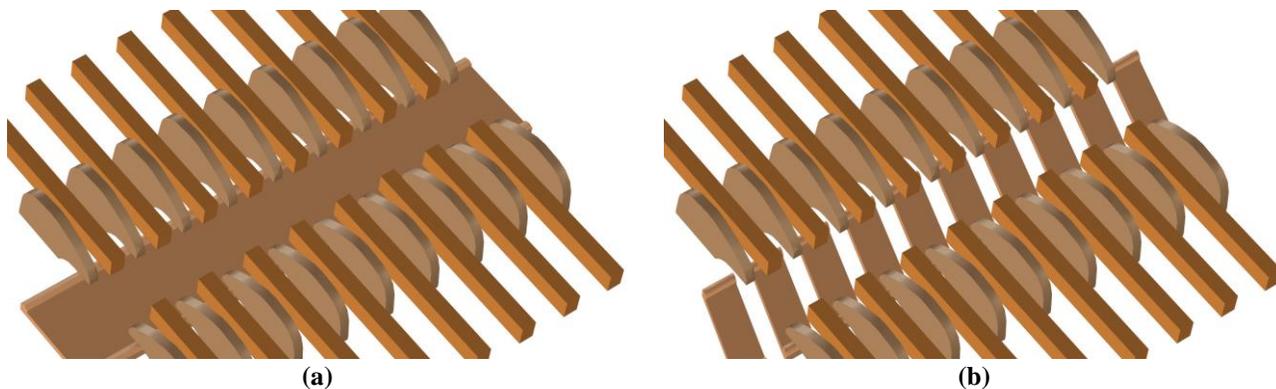
4.2. Modelos de Barras Interceldas

Se simulan los comportamientos eléctricos, térmicos y electro-químico para las tecnologías CS y VS. Las tecnologías de barras interceldas simulados corresponden a las mostradas en la Figura 24 para el proceso de ER y Figura 25 para el proceso de EW.

Los modelos de barras interceldas varían de acuerdo al proceso. Existen dos variaciones importantes en cuantos a la simulación de estos procesos. La primera es el voltaje de activación de cada uno de los procesos y los sobrepotenciales asociados (ver Tabla 2)

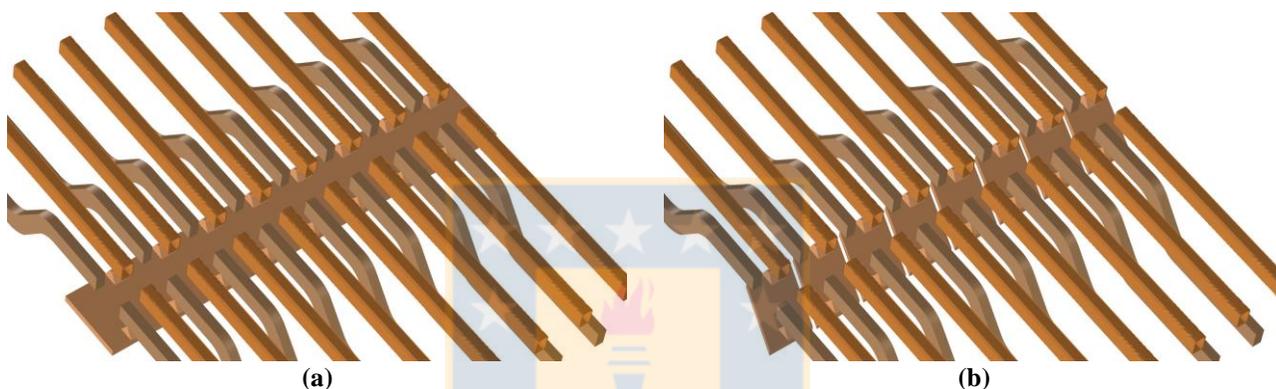
4.3. Distribución de Corriente en Electrolito

La distribución de corriente de una nave de electrolisis se muestra en la Figura 26. Se observa que la distribución de densidades de corriente es más dispereja en una nave con tecnología de barra intercelda equipotencial. El gráfico representa la posición de la densidad de electrolito en la



(a) (b)
Figura 24. Sistema de barra intercelda para ER (a) VS (b) CS.

Fuente: Elaboración propia



(a) (b)
Figura 25. Sistema de barra intercelda para EW (a) VS (b) CS.

Fuente: Elaboración propia

TABLA 2. VOLTAJE DE CELDA PARA CADA PROCESO. [2]

Parámetro	Descripción	Unidad	EW	ER
E_0	Potencial de activación	[V]	0,89	0,0
η_c	Sobrepotencial catódico	[V]	0,05	0,05
η_a	Sobrepotencial anódico	[V]	0,5	0,05
v_e	Voltaje en el electrolito	[V]	0,35	0,25
v_{cc}	Voltaje de contacto de cátodo	[V]	0,06	0,03
v_{ca}	Voltaje de contacto de ánodo	[V]	0,02	0,01
$v_h + v_r$	Voltajes en hardware y rectificador.	[V]	0,3	-
Total		[V]	~2,2	~0,4

celda en el eje horizontal y número de celda en el eje vertical. El color representa la intensidad de la densidad de corriente.

La dispersión teórica proyectada para VS es de 15,4%, en tanto, para CS la dispersión es de 9,8%. El sistema presenta distribuciones similares para ER y EW, incluso cuando las resistencias de electrolito varían en magnitud.

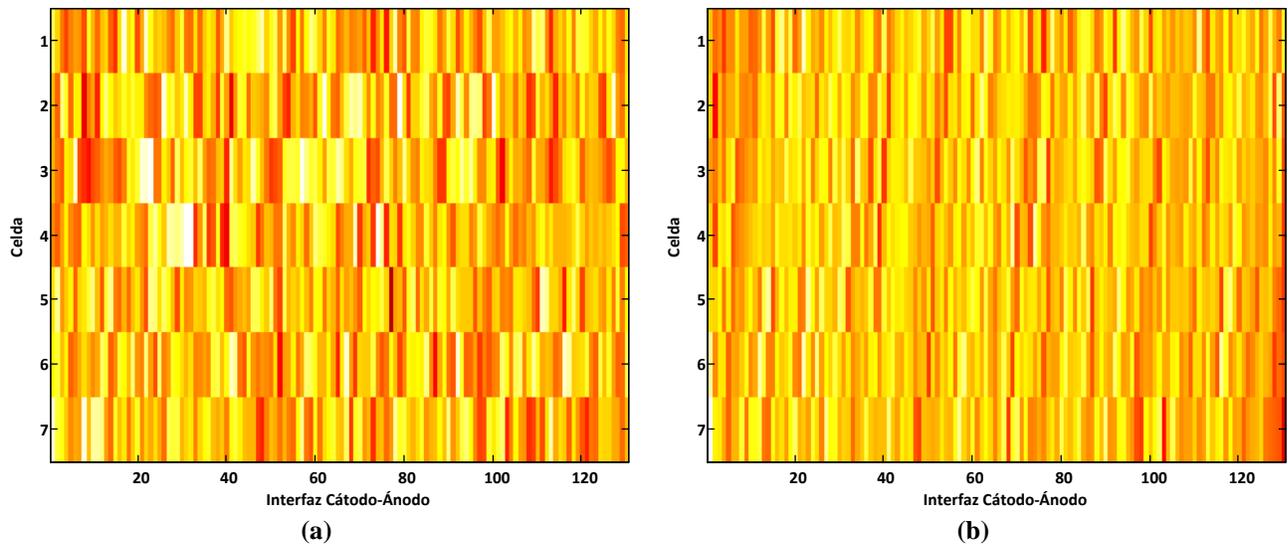


Figura 26. Distribución de densidades de corriente (a) Configuración con barra equipotencial (b) Configuración con barra segmentada.

Fuente: Elaboración propia

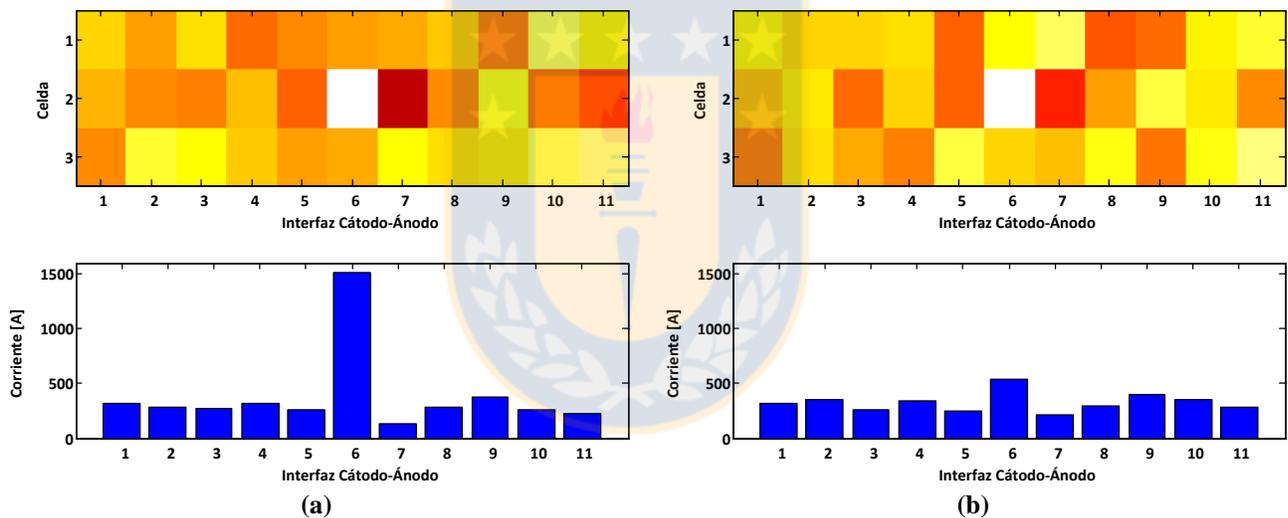


Figura 27. Distribución de densidades de corriente en presencia de un cortocircuito como un gráfico de colores y de barras, (a) VS (b) CS.

Fuente: Elaboración propia

4.3.1. Corto Circuito

El cortocircuito se debe simular como una resistencia de contacto disminuida. Para esto se disminuye 20 veces en ambos escenarios. La corriente en el electrolito durante un cortocircuito con barras VS llega a $1.650[A]$ mientras que en el caso de la barra CS, esta no supera los $863[A]$. En la podemos ver las corrientes en las del cortocircuito. Esto representa sobrecorriente de 300% (por sobre la corriente nominal de electrolito $330[A]$) para VS y de 60% para CS.

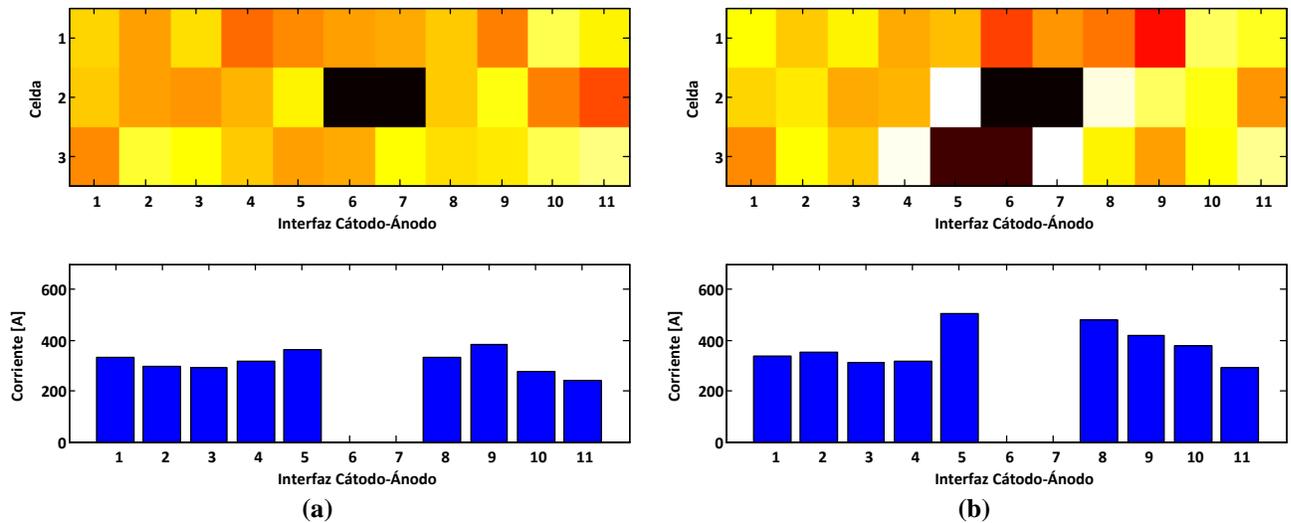


Figura 28. Distribución de densidades de corriente en presencia de un circuito abierto como un gráfico de colores y de barras (a) VS (b) CS.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Circuito Abierto

El circuito abierto se muestra en la Figura 28. Se observa que por cada circuito abierto, existen dos caras donde no se deposita cobre. En el caso de CS, debido a la forma de conexión (un cátodo conectado a un ánodo), al aislarse un cátodo, también se aísla un ánodo. Por lo tanto por cada circuito abierto existen 4 caras que no tiene depósito.

Adicionalmente, el sistema fuerza la corriente por los cátodos vecinos, por lo que existen aumentos de corrientes. Estas sobrecorrientes generan depósito irregular y nodulación, generando cortocircuitos metalúrgicos. Por lo tanto, el circuito abierto debe ser detectado de forma prematura para evitar pérdidas en la eficiencia de la producción.

Es importante señalar que los circuitos abiertos dependen exclusivamente de la operación y *housekeeping* de la nave de electrólisis y no de variables metalúrgicas del proceso. Por esta razón, los circuitos abiertos pueden ser controlados con mayor facilidad que un cortocircuito.

4.3.3. Contacto Deficiente

En el contacto deficiente, se aumenta la resistencia de contacto 10 veces. Esto produce que la corriente prefiera caminos alternativos para circular. En la Figura 29 se muestran las corrientes de electrolito en presencia de un contacto deficiente. En VS, la corriente tiende a pasar por otros cátodos por lo que la corriente que pasa a través del contacto es baja, menor a 130[A]. Sin embargo en CS la corriente esta forzada a circular por el cátodo deficiente, pudiendo llegar a 250[A]. El

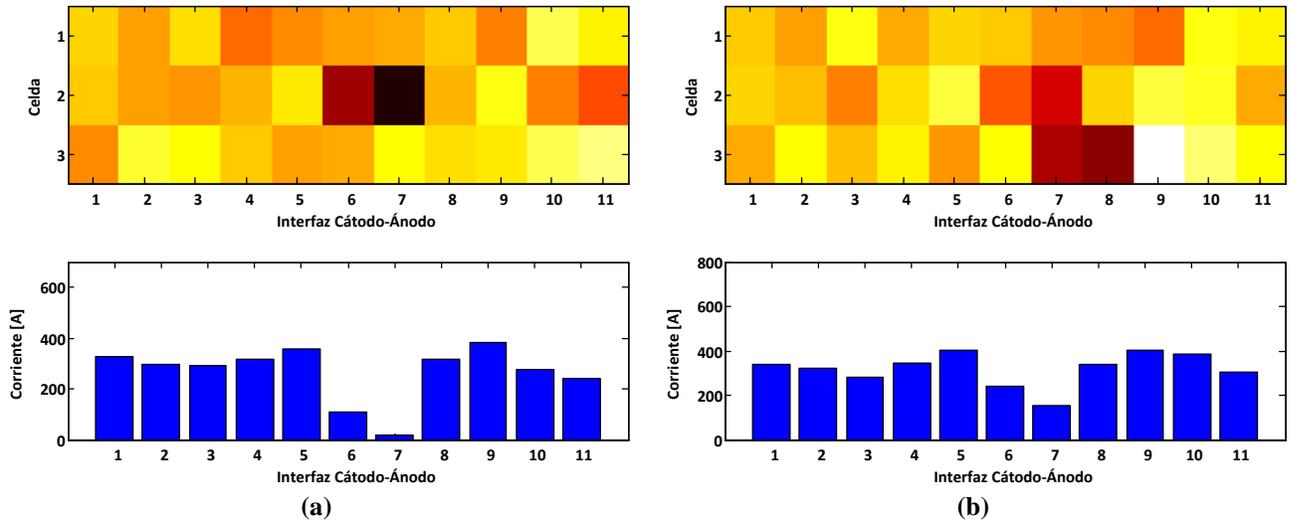


Figura 29. Distribución de densidades de corriente en presencia de un contacto deficiente como un gráfico de colores y de barras, (a) Configuración con barra equipotencial (b) Configuración con barra segmentada. Fuente: Elaboración propia

doble de corriente que circula por el contacto deficiente significa que la potencia disipada es 4 veces mayor en CS y por lo tanto existe un incremento en la temperatura de operación del contacto.

4.4. Distribución de Potencial en Electrodo

El modelo de parámetros distribuidos nos permite ver la distribución del potencial en los electrodos. Se puede observar que en el cátodos hay una caída de potencial de 19,1[mV] entre el punto de conexión a la barra intercelda (extremo azul) y el fondo del cátodo. A su vez, en el ánodo, podemos ver una caída de potencial de 13[mV] entre el punto de conexión a la barra intercelda (extremo rojo) y el fondo del ánodo.

La potencia disipad por conducción en los electrodos corresponde a 7,5[W] en un ánodo y

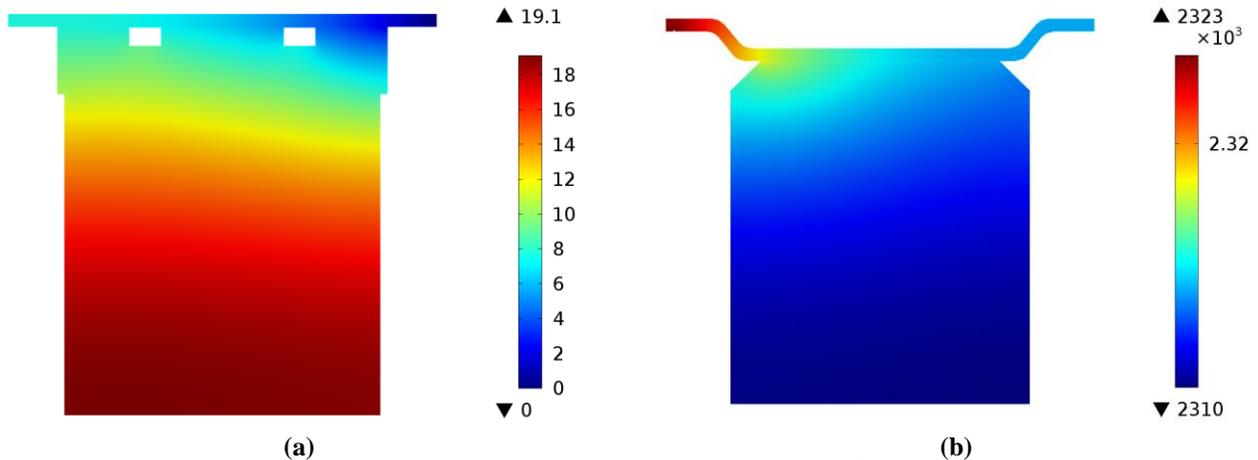


Figura 30. Distribución de potencial en los electrodos en EW (a) Cátodo (b) Ánodo. Fuente: Elaboración propia

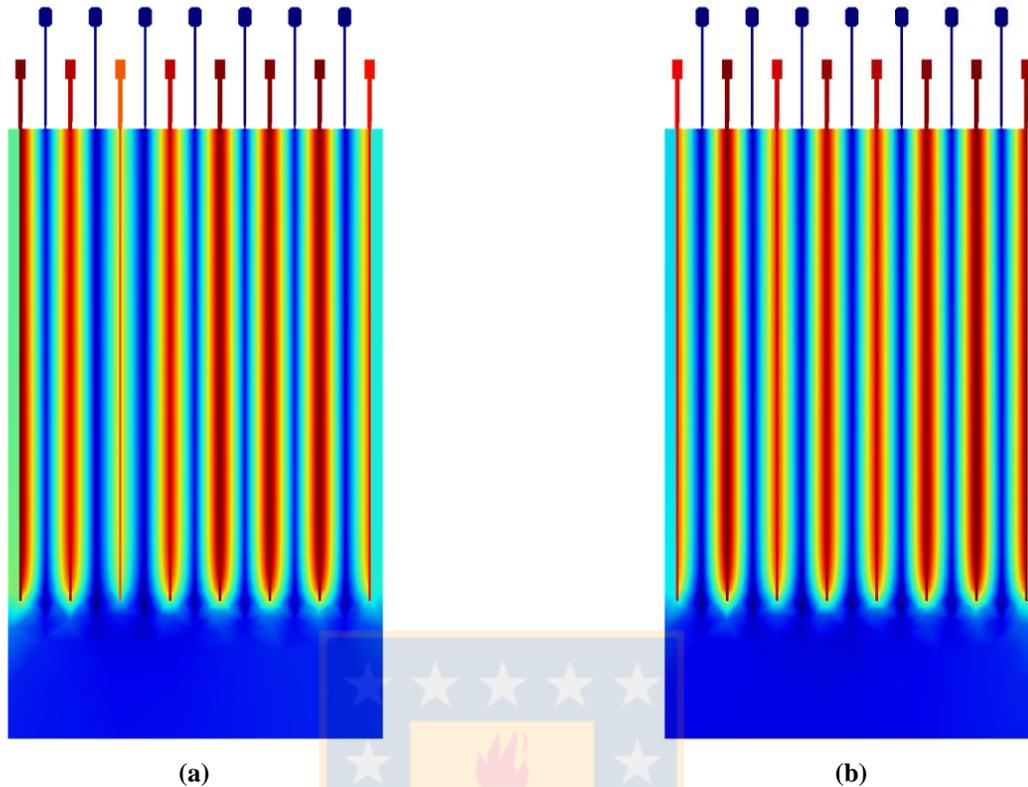


Figura 31. Distribución de potenciales eléctricos en el electrolito y los electrodos en EW (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

10,3[W] en un cátodo.

4.5. Distribución de Potencial en el Electrolito

La distribución de potenciales en el electrolito estará dada por las corrientes de entrada obtenidas en el modelo de parámetros concentrados. Para las distintas configuraciones, se obtienen perfiles de distribución distintos como se puede observar en la Figura 31. El voltaje en VS llega a 2,49V entre el ánodo y cátodo, mientras que para CS, el voltaje máximo es de 2,32V. Esto representa un 7% más de voltaje utilizando VS.

La potencia disipada en el electrolito tiene directa relación con el voltaje y la corriente que circula a través de este. La potencia disipada en el electrolito utilizando VS es de 218,3W por cátodo. Mientras que la potencia disipada utilizando CS disminuye a 180,9W por cátodo.

4.5.1. Ventilación de Barra Intercelda

Para efectos de simplicidad del modelo, se han eliminado las dependencias entre la temperatura y la velocidad del aire. Lo único que influye en que el sistema varíe la velocidad del

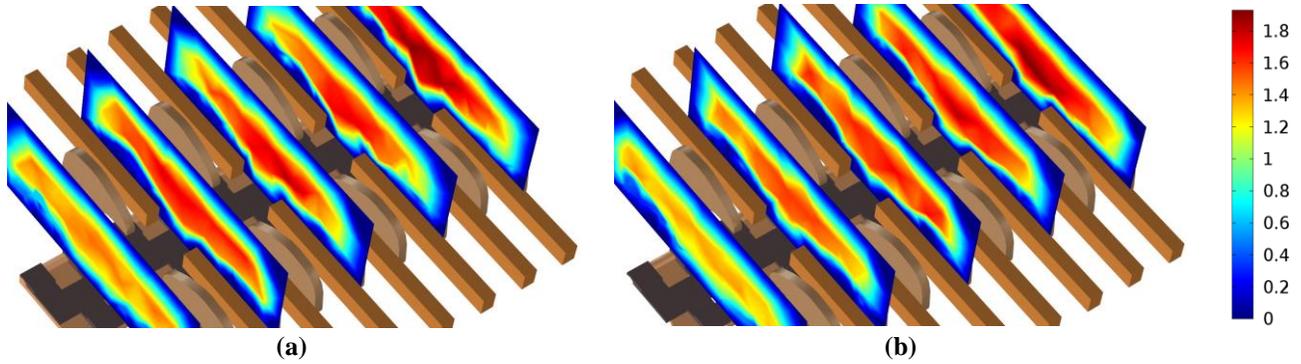


Figura 32. Velocidad del aire en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

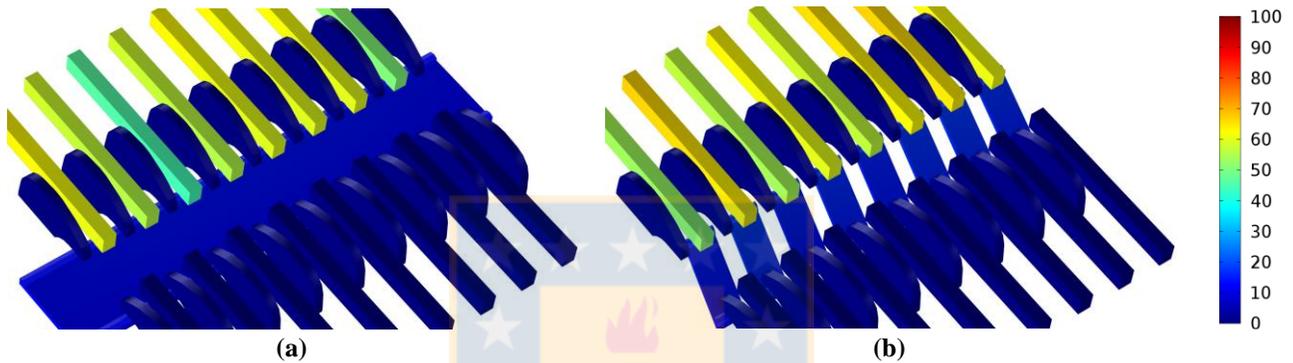


Figura 33. Voltajes en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

aire es la forma geométrica. Debido a que ambos sistemas están cubiertos mediante un capping board, la velocidad del aire se aumenta en el centro y no presenta una gran variación sobre los elementos disipadores de calor (hangerbars). En la Figura 32 se puede ver el perfil de velocidad del aire en una sección de la barra intercelda. No existe un cambio particularmente notable en la intensidad ni dirección del aire, por lo que se puede determinar que la ventilación para cada uno de los sistema influye de la misma manera.

4.5.2. Voltajes en Barra Intercelda

El perfil de voltajes en la barra intercelda estará marcado por las corrientes que pasan a través de las resistencias de contacto. Las principales caídas de tensión se producen en los contactos de cátodo, porque el peso es menor comparado con el ánodo. En la Figura 33 se puede apreciar el que la diferencia de tensión entre el cátodo y la barra es mayor que entre la barra y el ánodo. Este efecto se explica en ER porque el ánodo pesa 400[kg] al inicio del ciclo y el cátodo solo 40[kg]. En EW el ánodo pesa 200[kg] pero además tiene un contacto superficial, que disminuye resistencia.

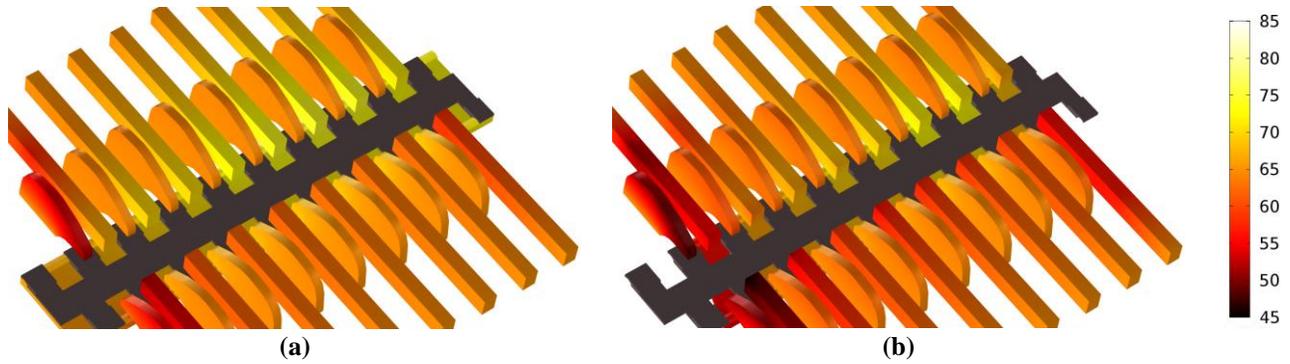


Figura 34. Temperatura en un sistema de distribución de corriente (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

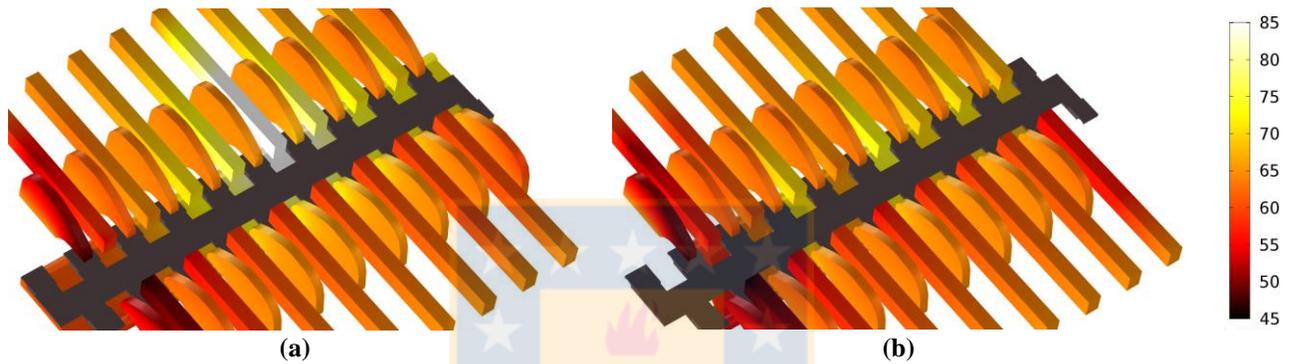


Figura 35. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un cortocircuito (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

4.5.3. Temperatura en Barra Intercelda

La temperatura tiene directa relación con el voltaje y corriente que circula por un contacto. Mientras mayor sea la corriente, mayor será el voltaje y por lo tanto la potencia disipada se eleva. En la Figura 34 se puede ver el perfil de temperatura de las barras bajo una operación normal. La temperatura de operación de las barras es de $75[^\circ\text{C}]$. La barra al operar con un cortocircuito, la corriente aumenta, por lo que el voltaje en el contacto también lo hace. La potencia disipada se eleva y por lo tanto aumenta la temperatura, como se aprecia en la Figura 35. Sin embargo, en la barra segmentada, el aumento de corriente está limitado, por lo que la temperatura no indica que exista algún problema. Este efecto, que es una gran cualidad (limitar la corriente de cortocircuito) es especialmente nocivo en ER debido a que el cortocircuito se formó, es decir existe una dendrita en la placa del cátodo, peor no se puede detectar. La no detección lleva a una mala calidad del depósito.

Adicionalmente, en un contacto deficiente, la temperatura en la barra CS incrementa considerablemente, llegando a valores de $150[^\circ\text{C}]$ (ver Figura 37). Este efecto no ocurre con la tecnología VS, pues la corriente busca caminos alternativos para circular.

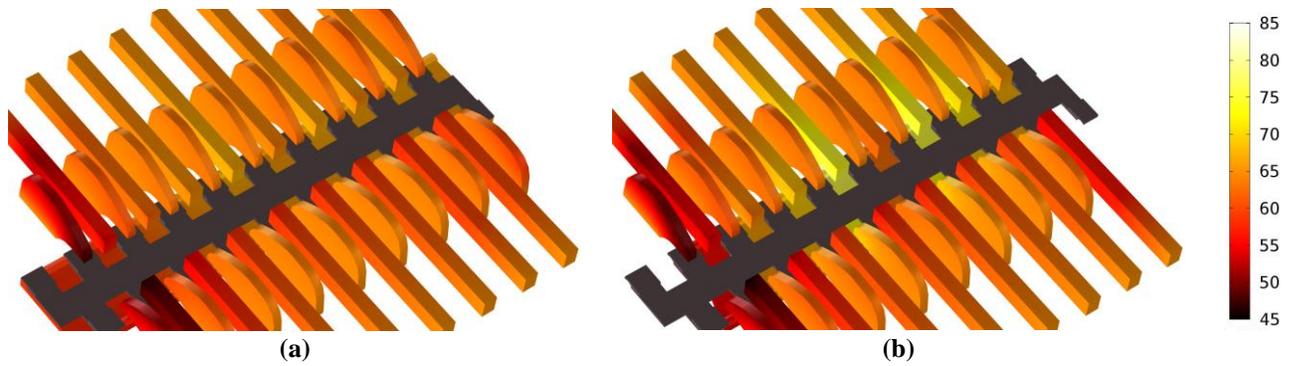


Figura 36. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un circuito abierto (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

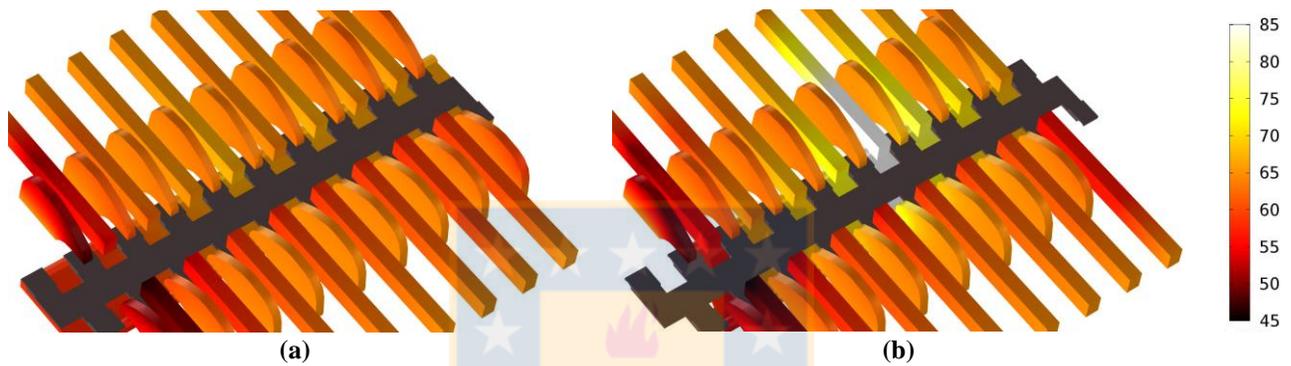


Figura 37. Temperatura en un sistema de distribución de corriente frente a un contacto deficiente (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

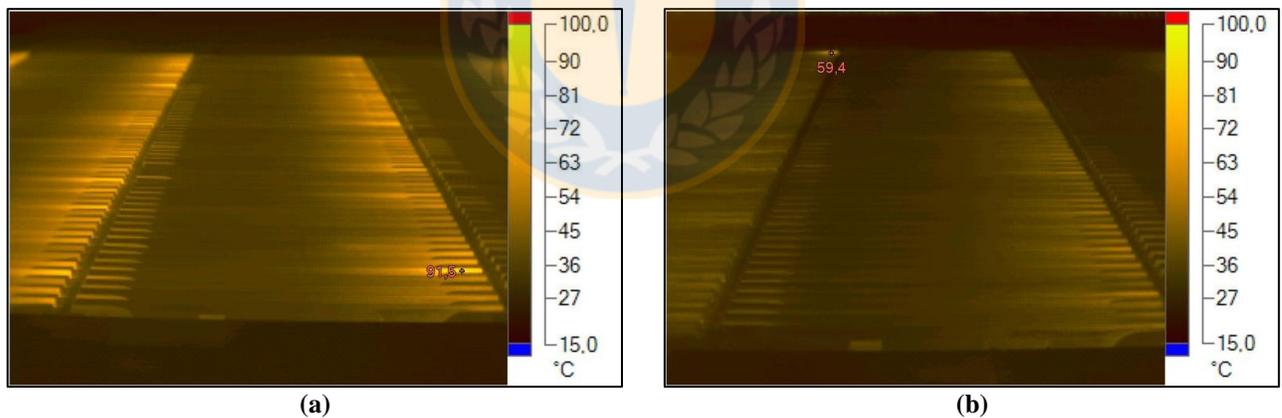


Figura 38. Tomografía en planta de EW(a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

Por último, al enfrentar un circuito abierto, la temperatura en la barra CS no se ve afectada mayormente, mientras que en la barra segmentada se ve claramente donde se produce la anomalía (ver Figura 36). Esto hace que el circuito abierto sea fácil de identificar en una barra CS.

Dependiendo de la tecnología de barra intercelada, los atributos varían. Para una barra segmentada, la dispersión de corriente es baja – en torno al 9,8% - mientras que para una tecnología equipotencial, la dispersión de corriente se encuentra en torno al 15,4%. Además, la evidencia en

terreno, muestra que la tecnología CS trabaja a una temperatura menor que la tecnología VS. (Ver Figura 38). En promedio, las barras intercelda de tecnología CS operan a una temperatura entre 5°C y 10°C menor a la tecnología VS. Entonces posible determinar la relación que existe entre la dispersión de corriente y la temperatura de operación de la barra.

4.6. Eficiencia de Barra Intercelda

Para cumplir el objetivo, se deben analizar el comportamiento eléctrico de las barras intercelda y determinar cuál es el perfil deseado de corrientes. Desde el punto de vista metalúrgico, la dispersión de corriente debe ser lo más baja posible para asegurar una alta eficiencia de corriente, con cátodos de cobre parejos y del mismo peso. La tecnología de barra intercelda influye en la distribución de densidad corriente, y por lo tanto en la distribución de la corriente que circula por la barra y los cátodos. [33] Por otro lado, es necesario generar una barra intercelda que sea eficiente con el uso de la energía y disipe la menor cantidad de potencia en su funcionamiento.

En una barra intercelda, la potencia que disipa la barra se puede dividir en 3 grupos: Potencia disipada en contacto de cátodo, potencia disipada en el segmento y la potencia disipada en el contacto de ánodo, ec. (4.1).

$$P = \sum_{j=1}^k I_{c_j}^2 R_{c_j} + \sum_{j=1}^{k+1} I_{a_j}^2 R_{a_j} + P_{busbar} \quad (4.1)$$

Las condiciones de ventilación y aislamiento térmico son idénticas en ambas tecnologías, pues no se modifica la estructura externa, sino solo la interconexión [8] [34]. Por lo tanto, la diferencia de temperatura debe radicar en que las fuentes de calor son distintas.

El modelo de parámetros concentrados provee una evaluación de nivel cualitativo para determinar el peso de los factores que afectan la disipación de potencia. Por simplicidad, se asumen que las pérdidas en el cátodo y en el ánodo son idénticas. Al minimizar la ecuación de la potencia, se muestra la relevancia de la dispersión de corriente en las pérdidas.

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^k I_{c_j}^2 R_{c_j} \right)}{\partial I_{c_1}} = 0 \quad (4.2)$$

Luego, considerando que la corriente total no varía y es la suma de todas las corrientes, la corriente I_n se determina como:

$$I_k = I_{total} - \left(\sum_{j=1}^k I_{c_j} \right) \quad (4.3)$$

Al resolver (1.5) y reemplazar (1.6), se obtiene que

$$\frac{\partial P_{c_k}}{\partial I_{c_k}} = 2 \cdot I_{c_k} \cdot R_{c_k} - 2 \cdot \left(I_{total} - \left(\sum_{j=1}^k I_{c_j} \right) \right) \cdot R_{c_n} = 0 \quad (4.4)$$

Por lo tanto, al despejar la ec. (4.5),

$$I_{c_k} \cdot R_{c_k} = I_{c_n} \cdot R_{c_n} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, para minimizar las pérdidas en la barra, se requiere que:

- a) Minimización y ecualización de las resistencias de contactos.
- b) Ecualización de las corrientes que pasan a través de los cátodos.

Las mismas condiciones aplican para las pérdidas en los ánodos. Además, otras condiciones para minimizar las pérdidas en la barra intercelda deben cumplirse, como:

- a) Mantener conductividad nominal del cobre ETP (101% IACS).
- b) Maximizar el área de conducción eléctrica.
- c) Minimizar los largos de los caminos de corrientes a través de la barra de cobre de acuerdo a la ecuación.

Considerando que el largo del camino de conducción eléctrica se define por la ec. (4.6)

$$R_{bulk,local} = \frac{1}{\sigma_{local}} \cdot \frac{l_{current paths}}{A_{current paths}} \quad (4.6)$$

Para un sistema de barra segmentada, los caminos de las corrientes son únicos (Ver Figura 20). Mientras que para la barra equipotencial, los caminos de resistencia pueden ser de largos variables, pues la corriente no está forzada a transitar desde el cátodo al ánodo más cercano.

En la Figura 39 se puede ver, con un modelo de parámetros concentrados, las diferencias entre las tecnologías de barra intercelda. Es esperable entonces, que la tecnología de barra intercelda segmentada, al tener una menor dispersión de corriente, disipa menos potencia en los contactos y además al generar menos caminos de corrientes, disipe menos potencia en la barra. El modelo de parámetros concentrado solo permite entregar una explicación a nivel cualitativo, sin determinar de

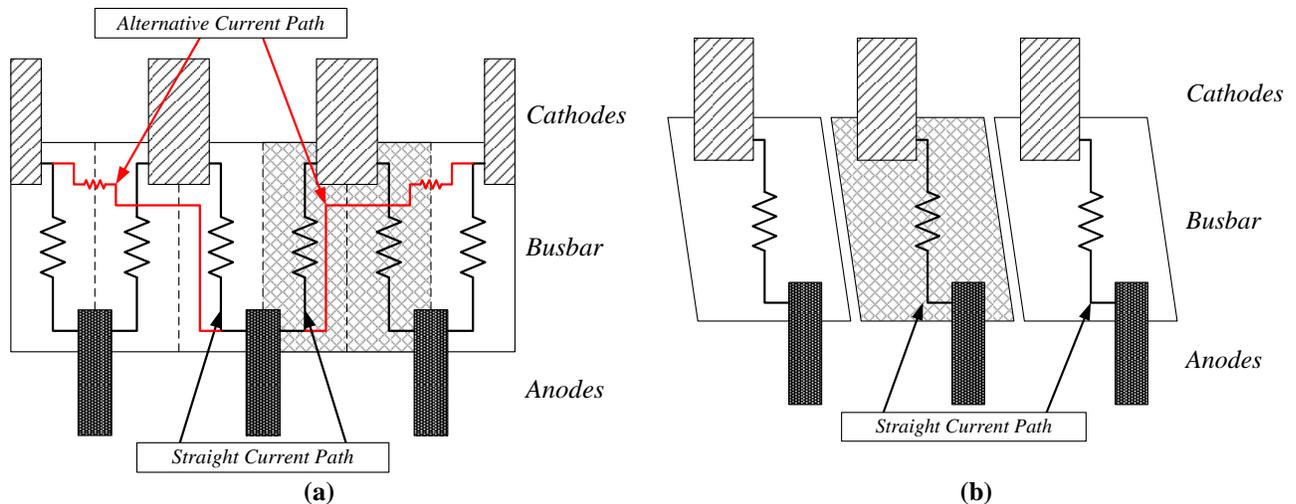


Figura 39. Modelo de parámetros concentrados (a) VS (b) CS.
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3. PROPIEDADES FÍSICA DEL COBRE ETP C11000 @ 20°C. [25]

Propiedad Física	Unidad	Valor
Conductividad Térmica	[BTU/ft ² -hr]	226
Expansión Térmica	[per °F]	0.0000098
Densidad	[lb per inch ³]	0.323
Conductividad Eléctrica	[% IACS]	101
Módulo de Elasticidad	[KSI]	17,000

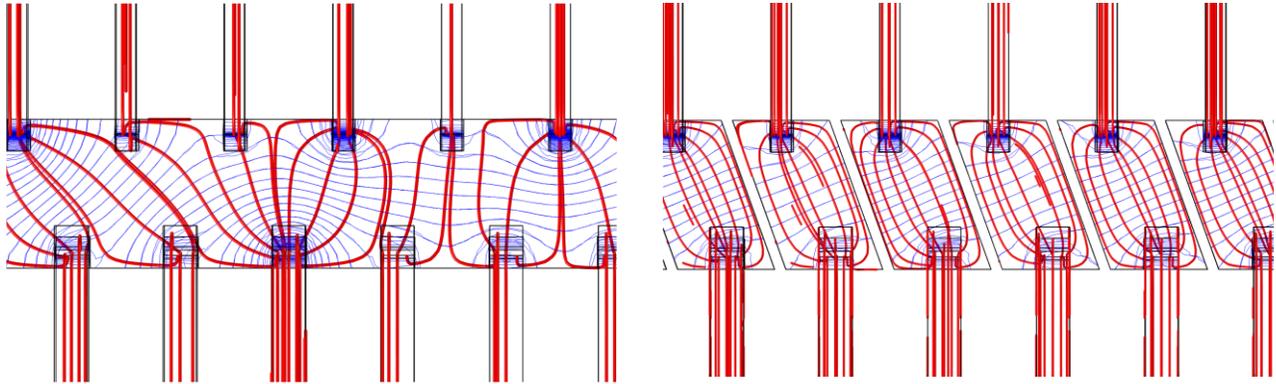
forma exacta la potencia que se disipan cada una de las tecnologías.

Mediante el modelo de parámetros distribuidos se obtienen las potencias disipadas por cada una de las tecnologías. Con este modelo, y considerando los parámetros del cobre ETP C11000 mostrado en la Tabla 3 [35], se evaluaron los siguientes aspectos de cada tecnología:

- Distribución de potencial y distribución de corrientes en la barra intercelda.
- Potencia total disipada en la barra intercelda.
- Temperatura de operación de la barra intercelda.

En la Figura 40 se puede apreciar los potenciales eléctricos (en azul) y los caminos de corriente (en rojo) para cada una de las barras. Como se puede observar, la corriente circula de forma perpendicular a las líneas de potencial. En las barras intercelda segmentadas (Figura 40 (b)), las líneas de potencial son parejas entre sí, lo que es esperable, pues no existen caminos alternativos para la corriente. En la barra continua (Figura 40 (a)) las líneas de potencial son dispares, haciendo que las corrientes circulen a través de la barra.

Las corrientes circulantes no deseadas se muestran en la Figura 41. La corriente en azul es



(a)

(b)

Figura 40. Sistema de barra intercelda equipotencial. (a) La zona azul demarca la superficie por la cual entra la corriente a la barra. (b) La zona azul demarca el potencial 0V en el sistema – tierra –.

Fuente: Elaboración propia

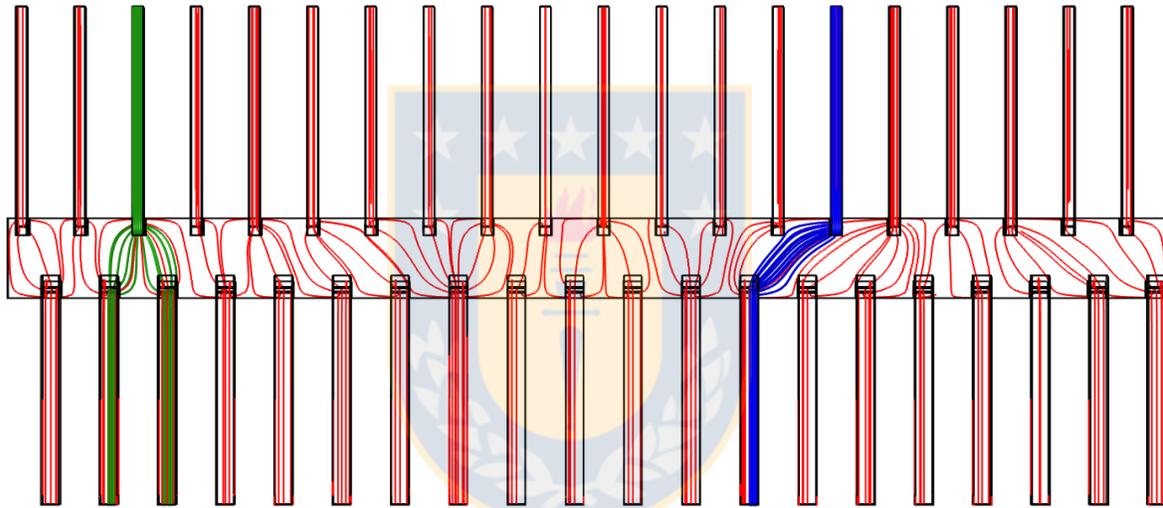


Figura 41. Líneas de corrientes en una barra intercelda convencional. (verde) Distribución ideal de las corrientes (azul) Distribución no deseada de corrientes.

Fuente: Elaboración propia

corriente que no circula por los caminos óptimos, y por lo tanto genera pérdidas adicionales en la barra. Estas corrientes generan pérdidas en la barra intercelda. Al comparar las potencias disipadas en una barra intercelda VS con una CS se puede ver que una barra VS disipa un 7,5% más de potencia que una barra CS. En la Tabla 4 se muestra en detalle donde se producen los aumentos de las potencia. [25]

4.7. Resumen

En la Tabla 4 se muestra el desempeño de las tecnologías equipotencial y segmentada de acuerdo a los índices antes mencionados. De esta tabla se deprenden las características principales

que de tener una diseño de barra intercelda. Cualquier diseño como mínimo debe considerar protección para cortocircuito, y visualización del cortocircuito cuando este se produzca. Además debe eliminar los *blanks* en los cátodos y minimizar las pérdidas en los contactos deficientes.

TABLA 4. TABLA RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BARRAS INTERCELDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro	Unidad	VS	CS
Dispersión de densidad de corriente	[%]	15,4	9,9
Voltaje máximo entre cátodo-ánodo	[V]	2,45	2,32
Potencia disipada por cátodo	[W]	218,3	180,9
Sobrecorriente frente a cortocircuito	[%]	120	19,6
Temperatura en cortocircuito	[°C]	150	80
Blanks generados en circuito abierto	[un]	2	4
Temperatura en circuito abierto	[°C]	70	65
Temperatura de contacto deficiente	[°C]	70	140
Power losses in anode contacts ¹	[W]	635	574
Δ Power losses by circulating currents	[W]	+61	0
Power losses in cathode contacts ²	[W]	1,624	1,523
Δ Power losses by circulating currents	[W]	+101	0
Power losses in bulk busbar ³	[W]	166	145
Straight current lines	[W]	145	145
Circulating streamline currents	[W]	21	~0
Total contact power losses ¹⁺²	[W]	2,260	2,097
Total Power losses per busbar¹⁺²⁺³	[W]	2,425	2,242
Δ Power losses by circulating currents	[W]	+183	0

Capítulo 5. Diseño de Barra Intercelda

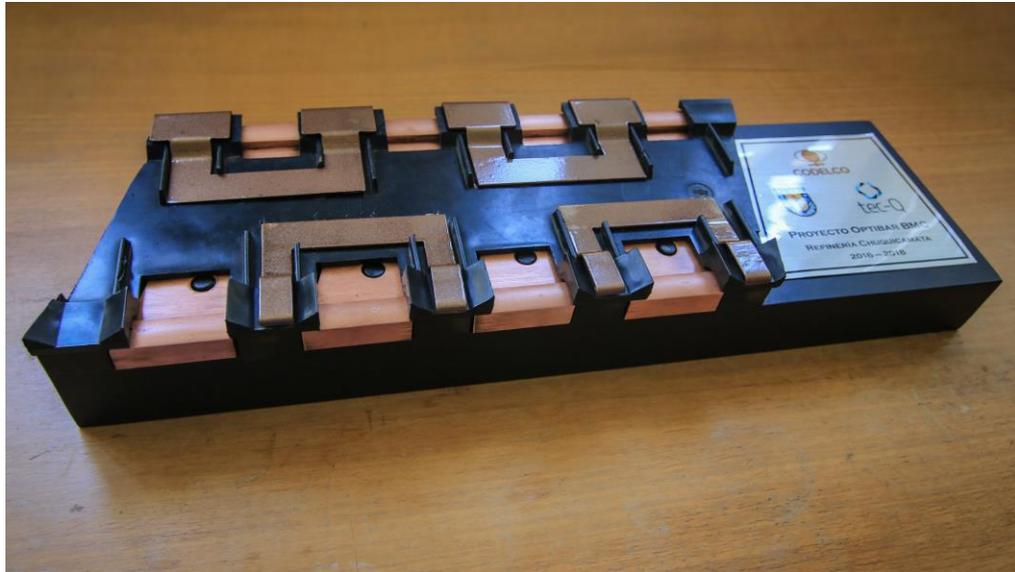
5.1. Introducción

En este capítulo se determinarán las condiciones de borde para el diseño de una barra intercelda. La barra intercelda es un elemento clave en el proceso de electrolisis, como se vio en la sección 2.2.4 Sistemas de Distribución de Corriente. La tecnología influye en el desempeño global del proceso, tanto en la eficiencia de corriente como en el consumo específico. Dependiendo de la tecnología de barra intercelda, los atributos varían. Para una barra CS, la dispersión de corriente es baja – en torno al 9,9% - mientras que para una tecnología VS, la dispersión de corriente se encuentra en torno al 15,4%. Además la barra CS ofrece una protección frente a los cortocircuitos, disminuyendo las sobre corrientes de un 120% a menos de 20%. Adicionalmente, la evidencia en terreno, muestra que la tecnología CS trabaja a una temperatura menor que la tecnología VS. (Ver Figura 38). En promedio, las barras intercelda de tecnología CS operan a una temperatura entre 5°C y 10°C menor a la tecnología VS.

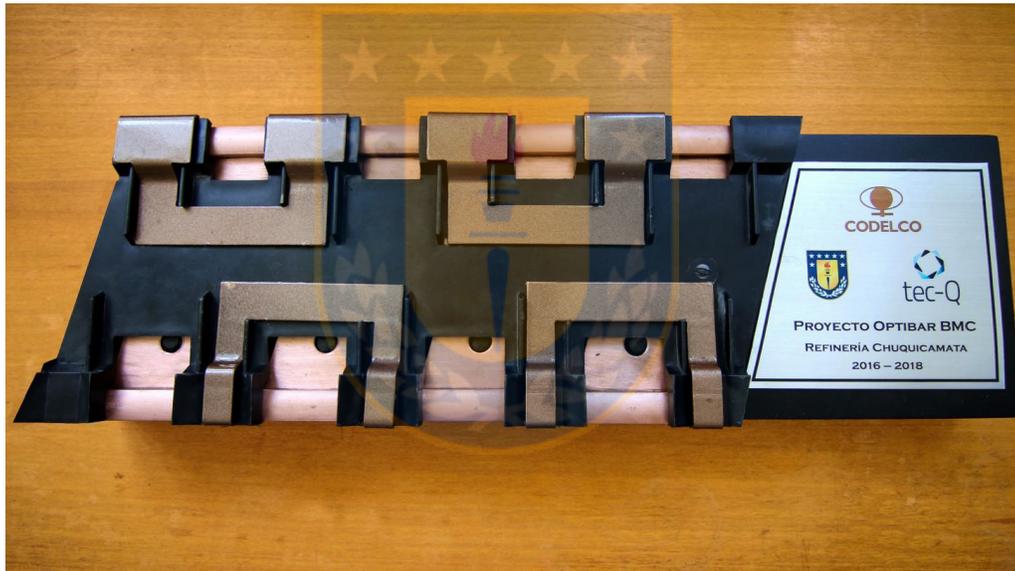
Por otro lado, la tecnología VS ofrece un mejor desempeño en presencia de un contacto deficiente, donde la corriente que circula por él es 50% menor a la corriente que circula por un contacto deficiente en CS. Esto redundo en pérdidas 4 veces menores y consecuentemente en temperaturas más bajas. Además, frente a un circuito abierto, la barra VS sólo genera dos blanks, mientras que CS genera cuatro.

De acuerdo con lo anterior, un diseño de barra intercelda debe considerar los mejores aspectos de cada una de las tecnologías y por lo tanto debe cumplir con las siguientes características:

1. Baja dispersión de corriente.
2. Protección de corto-circuito.
3. Eliminación de *blanks*.
4. Disminución de potencia disipada en contactos deficientes.



(a)



(b)

**Figura 42. Modelo de Barra Intercelda propuesta para refinería Chuquicamata (CODELCO).
Fuente: Elaboración propia**

Adicionalmente, la barra intercelda debiera manifestar claramente los problema, resaltando su ubicación, sin que esto afecte su desempeño global.

Para cumplir con todas las condiciones de borde impuestas, se propone utilizar una barra CS con conexiones laterales que funcionarán como sistema de *Bypass* y *Backup* para el proceso electrolito. En la Figura 42 se muestra una maqueta con un sistema propuesta para la refinería de Chuquicamata (CODELCO).

En este capítulo se analiza un diseño eléctrico de la barra intercelda y se evaluará el

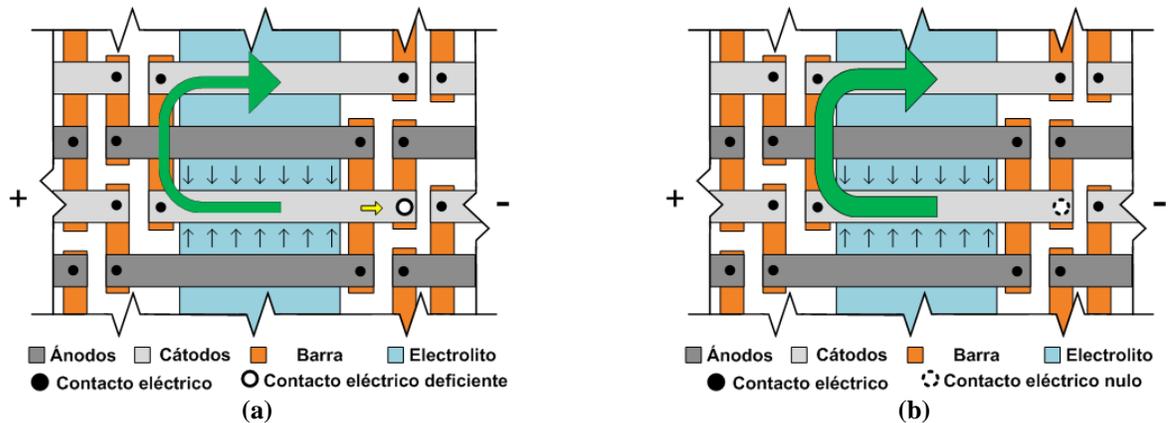


Figura 43. Diagramas de funcionamiento de la barra intercelda en presencia de (a) Contacto deficiente (b) Circuito abierto. [21]

desempeño con respecto a las tecnologías VS y CS convencionales. Se analizará la forma de mitigación y detección de anomalías como parte de la topología propuesta.

5.2. Diseño Eléctrico

El diseño de la nueva barra intercelda propone que la conexión entre dos celdas (n y $n+1$) se realiza desde un solo cátodo al ánodo adyacente por la izquierda de la siguiente celda (///). La siguiente conexión entre celdas ($n+1$ y $n+2$) se realiza conectando solo un cátodo al ánodo adyacente por la derecha de la siguiente celda (\\), haciendo de esta manera que la corriente fluya siguiendo un patrón Zig Zag [36].

La innovación propone la adición de dos barras laterales. Estas barras laterales actúan como *Bypass* en presencia de un contacto deficiente ofreciendo un camino alternativo de menor resistencia a la corriente para que fluya (Figura 43 (a)), evitando pérdidas extras en el contacto deficiente. Además, actúan como *Backup* en presencia de un circuito abierto ofreciendo un camino alternativo que permite el correcto flujo de corriente en el electrodo afectado (Figura 43 (b)), permitiendo el correcto depósito de cobre. Una comparación entre la discusión física de los segmentos se muestra en la Figura 44.

Las barras laterales segmentadas conectan en grupos los lados de los *hangerbars* de los cátodos y ánodos que en otras tecnologías se encuentran aislados. En la Figura 45 es posible observar una configuración de las barras laterales en donde cada segmento conecta 2 ánodos en un lado y 2 cátodos en el lado opuesto. Para el proceso de ER, la barra propuesta utiliza una barra superior (ver Figura 46). Esta barra superior es análoga a la barra lateral de la Figura 45. Otras

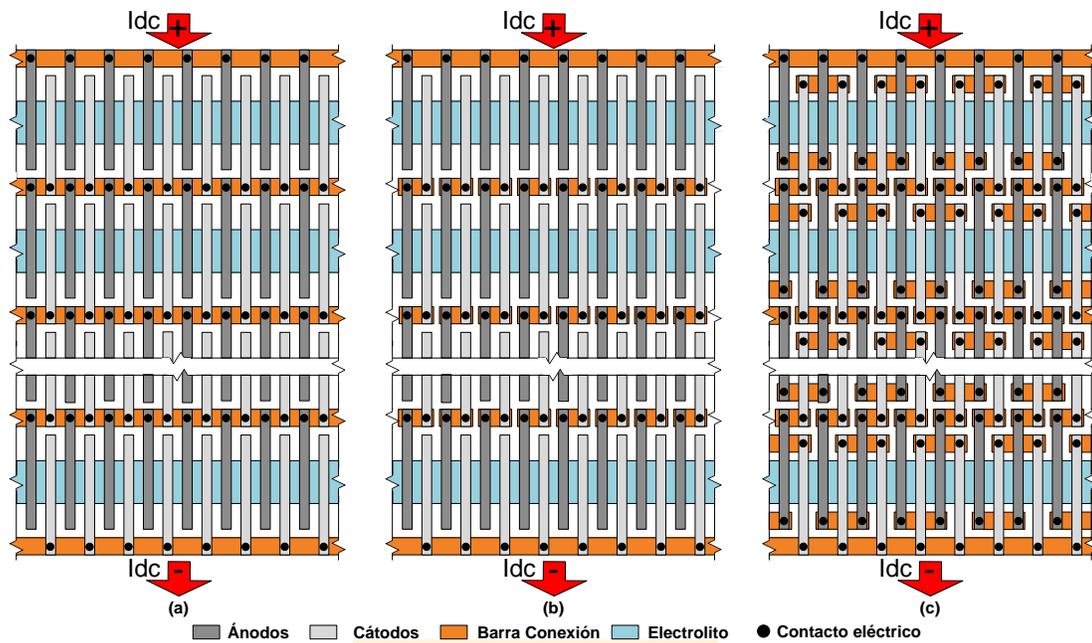


Figura 44. Esquema de interconexión de barras intercelda. (a) VS (b) CS (c) Sistema Propuesto. I_{dc} corresponde a la corriente del rectificador. [37]

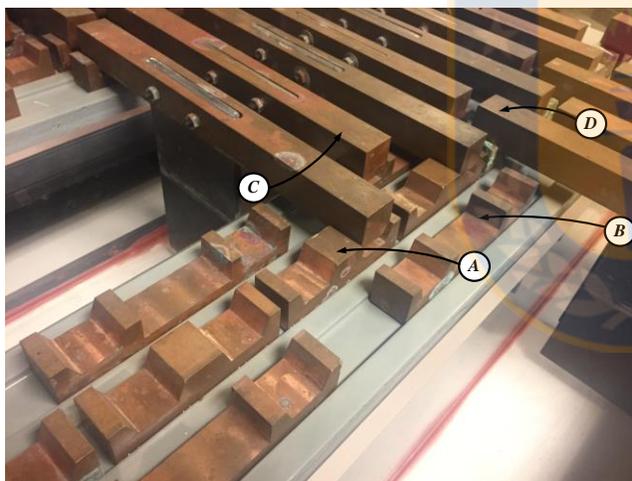


Figura 45. Barra intercelda de planta piloto con conectores secundarios segmentados. (A) Segmento central (B) Segmento lateral (C) Electrodo conectado en su lado aislado al segmento lateral (D) Electrodo conectado al segmento central. Fuente: Elaboración propia

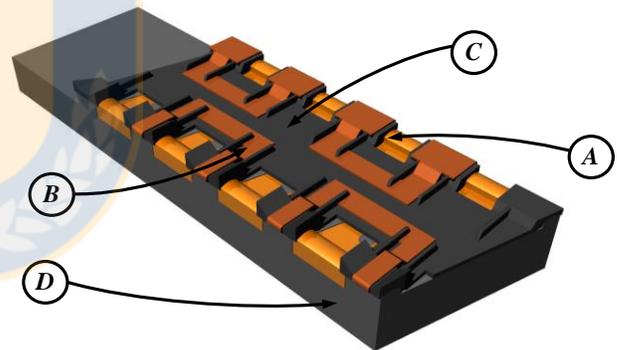


Figura 46. Barra intercelda para proceso de ER con barra superior. (A) Segmento central (B) Segmento superior (C) Capping board (D) Baseboard. Fuente: Elaboración propia

posibles configuraciones son: barras laterales o superiores conectando tres ánodos y cátodos, cuatro o cinco electrodos y así sucesivamente. En presencia de cortocircuito, BCS conserva la característica positiva de la conexión fuente de corriente. Añadiendo *bypass* para contactos sucios y *backup* para circuitos abiertos. [21]

5.3. Evaluación Eléctrica de Alternativas

El sistema puede ser diseñado considerando barras laterales que conectes 2, 3 4 o más electrodos. Además puede ser utilizado para conectar sólo ánodos, sólo cátodos o ánodos y cátodos.

DEPENDIENDO DE LA CANTIDAD DE ELECTRODOS CONECTADOS, LA DISPERSIÓN DE CORRIENTE VARIARÁ. EN LA se muestra el resumen de los valores del desempeño de la barra. Se evaluaron varios sin embargo solo se reportan los casos que podrían ser realizados a nivel industrial y que tienen los mejores resultados:

1. Configuración VS
2. Configuración CS
3. Configuración CS con barras laterales que unen 2 cátodos.
4. Configuración CS con barras laterales que unen 3 cátodos.
5. Configuración CS con barras laterales que unen 2 cátodos y 2 ánodos.

Frente a los resultados obtenidos, se puede observar que la sobre corriente frente a un cortocircuito, los valores disminuyen con respecto a la barra VS. Las sobre corriente se sitúan en torno al 40% para todas las barras con configuración CS que tienen barras laterales. Sin embargo, la única barra elimina completamente los *blanks* de su operación es la barra CS con barras laterales en los cátodos y en los ánodos.

En la Tabla 6 se muestra un cuadro resumen de las propiedades de mitigación de cada una de las tecnologías evaluadas.

TABLA 5. TABLA RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BARRAS INTERCELDA EVALUADAS.

1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro	Unidad	VS	CS	CS+ 2 Cátodos	CS + 3 Cátodos	CS + 2 Cátodos + 2 Ánodos
Corriente nominal	[A]	660	660	660	660	660
Dispersión de densidad de corriente	[%]	15,4	9,9	9,4	9,6	9,5
Sobrecorriente frente a cortocircuito	[%]	120	19,6	30,3	38,9	35,6
Corriente de depósito en contacto abierto	[A] [% nom]	0	0	230	338	240
<i>Blanks</i> generados en circuito abierto	un	0	0	34,9	51,3	36,4
<i>Blanks</i> generados en circuito abierto	un	2	4	2	2	0
Corriente de depósito en contacto deficiente	[A] [% nom]	114	228	360	424	347
Corriente que pasa a través de contacto deficiente	[A]	17,2	34,6	54,5	64,2	52,6
Corriente que pasa a través de contacto deficiente	[A]	114	228	195	179	163

TABLA 6. RESUMEN DE MITIGACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS EVALUADAS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro	VS	CS	CS+ 2 Cátodos	CS + 3 Cátodos	CS + 2 Cátodos + 2 Ánodos
Mitigación de cortocircuito	No	Si	Si	Si	Si
Mitigación de circuito abierto	No	No	No	No	Si
Mitigación de contacto deficiente	No	No	Si	Si	Si

5.3.1. Distribución de Corrientes

EN LA

se puede observar las diferencias en la dispersión de densidades de corriente. La tecnología VS presenta una dispersión de corriente de 15,4% mientras que CS tiene una dispersión de 9,9%. La nueva configuración, presenta caminos alternativos a la corriente y genera contactos que en el circuito se muestran como resistencias en paralelo. Esto hace que la resistencia de contacto “total” se perciba como dos resistencias en paralelo y por lo tanto la resistencia de contacto es la mitad en el sistema BCS que en VS o CS. Esto genera que la dispersión de corrientes disminuya a 9,5%.

Una baja dispersión de corriente influye positivamente en la prevención de los cortocircuitos metalúrgicos, limitando la corriente disponible para que estos se formen. Al obligar a que las corrientes estén cerca del valor nominal, la formación de nódulos se realiza más lento, disminuyendo de esta forma la cantidad de cortocircuitos por ciclo.

Adicionalmente, la barra BCS permite modulación de corriente al igual que la barra CS. Esto permitirá aumentar la corriente en aproximadamente 8,6% durante el día y se reduzca a un 91,4% durante la noche.

Una representación gráfica de las densidades de corriente se puede ver en la Figura 47.

5.4. Mitigación de Anomalías

Es necesario evaluar cuales de las alternativas anteriormente evaluadas cumplen con los requisitos de mitigación para los procesos de electro-refinación y electro-obtención. En operación en presencia de un cortocircuito, todas las alternativas aseguran una sobrecorriente inferior al 50%, lo que redundo en que la corriente total no debiera superar los 1.000[A] en condiciones nominales. Por otra parte, la integridad de los segmentos de cobre se mantiene y se previene su envejecimiento prematuro.

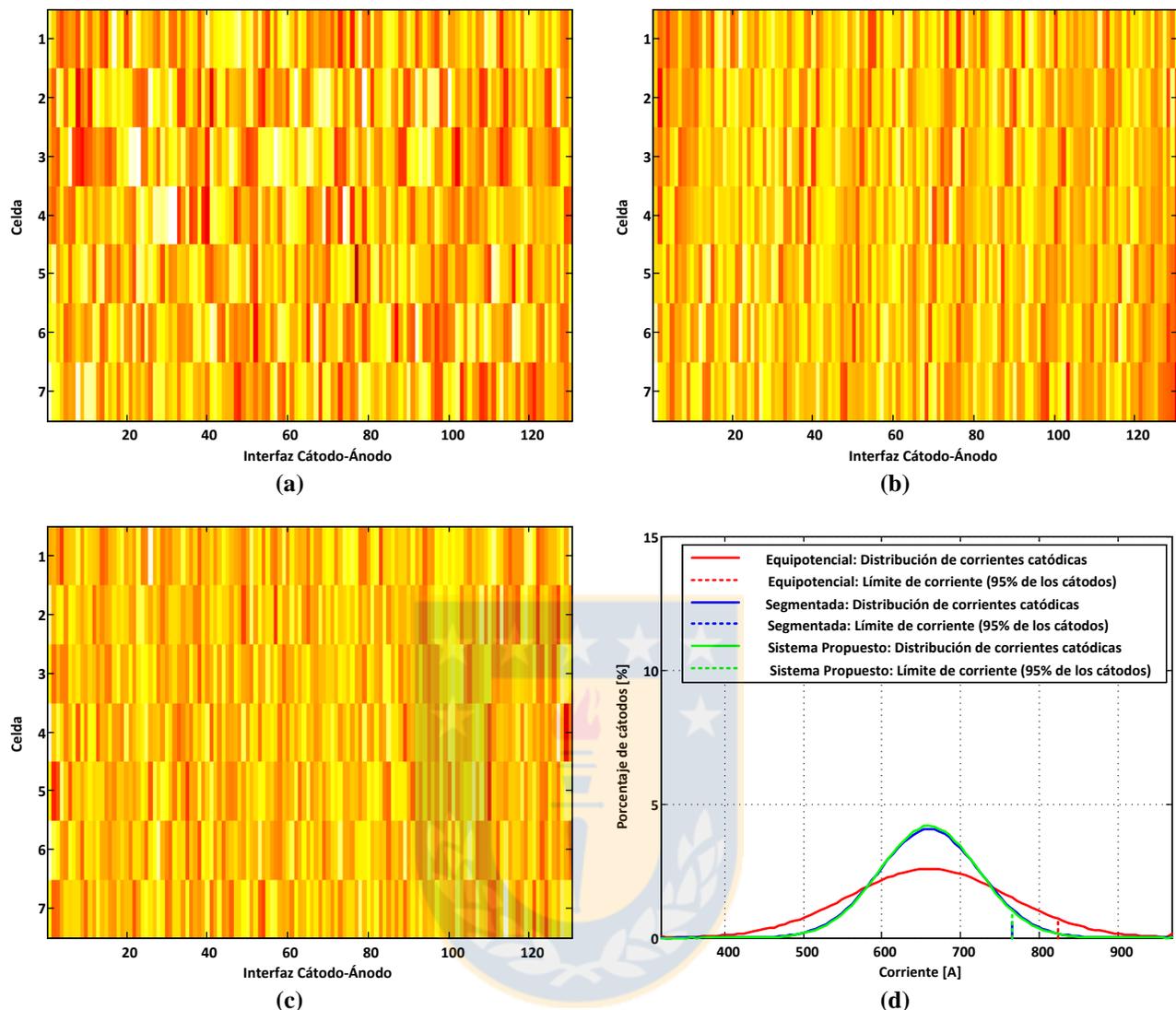


Figura 47. Distribuciones de corrientes (a) VS (b) CS (c) BCS (d) Comparación de histogramas de corrientes efectivas de depósito.

Fuente: Elaboración propia

En operación en presencia de un circuito abierto, la única configuración que asegura depósito en todos los cátodos es la configuración **CS + 2 cátodos + 2 ánodos**. Todas las otras configuraciones mantienen 2 o 4 caras sin depósito de cobre.

Finalmente, para la operación en presencia de un contacto deficiente, se evalúan dos aspectos: el depósito de cobre y la corriente que circula a través del contacto. Es deseable que la corriente de depósito sea lo más alta posible y que la corriente que pasa a través del contacto sea lo más baja posible. Considerando esto, todas las alternativas presentan mitigación al contacto deficiente.

Considerando todas las alternativas, la alternativa CS + 2 cátodos + 2 ánodos presenta una

ventaja que las otras alternativas no tienen: es la única configuración que posee mitigación al contacto abierto.

5.5. Detección de Anomalías

La detección de anomalías se puede hacer mediante temperatura. La termografía es el método más utilizado en las plantas industriales actualmente. Para esto es necesario entonces realizar una configuración que permita, mediante termografía, identificar los segmentos que tienen problemas.

Se propone una topología, en la cual las barras laterales se encuentran sobre el capping board. El capping board por esencia es un aislador, por lo que además de aislar eléctricamente la barra intercelda, también aísla el calor. Si las barras laterales van por debajo del capping, una cámara termográfica no podrá visualizar la temperatura en estos segmentos. Por lo tanto, se propone utilizar segmentos que vayan por sobre el capping board. El sistema que se presenta es nombrado BCS (**B**aseboard – **C**apping Board – **S**econdary Connector) debido al orden en el cuál los elementos está ordenando espacialmente.

Estos segmentos deben tener una masa específica y una resistencia tal que funcione como una barra conductora, pero a su vez se “ilumine” térmicamente por el paso de la corriente, como se muestra en la Figura 48. En la Figura 46 se presenta la topología a implementar. Esta está compuesta de un baseboard, la barra central, el capping board y una barra superior. Esta barra superior, que reemplaza a las barras laterales, está compuesta de segmentos que unen los extremos aislados de dos ánodos o de dos cátodos. Este segmento está diseñado de forma que la temperatura sea lo suficientemente alta para que la cámara termográfica la detecte, sin comprometer su integridad. La zona que se calentará para detectar las anomalías es el centro del conector auxiliar. La temperatura de detección se establece en 90[°C] para diferenciarlo de la temperatura de operación de las barras que es cercana a los 75[°C]. La máxima corriente que circula por un segmento auxiliar es de 320[A] (ver Tabla 7). Del gráfico de la Figura 49 se observa que las alternativas que cumple con la

TABLA 7. CORRIENTE MÁXIMAS EN BARRA SECUNDARIA DE ACUERDO A LA ANOMALÍA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Anomalías	Corriente Máxima por Barra Secundaria
Cortocircuito	320[A]
Circuito Abierto	250[A]
Contacto Deficiente	270[A]

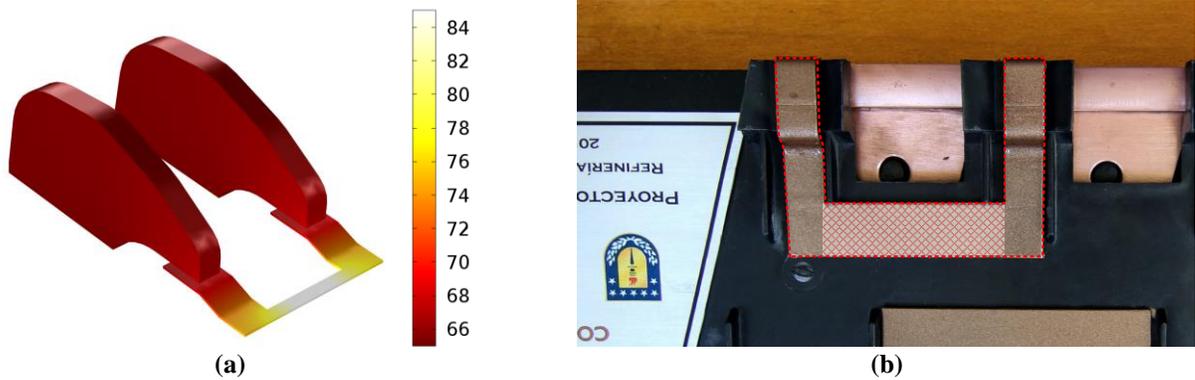


Figura 48. (a) Perfil térmico de placa auxiliar (b) Temperatura en el punto medio en función del alto de la placa y el ancho en la zona de detección.

Fuente: Elaboración propia

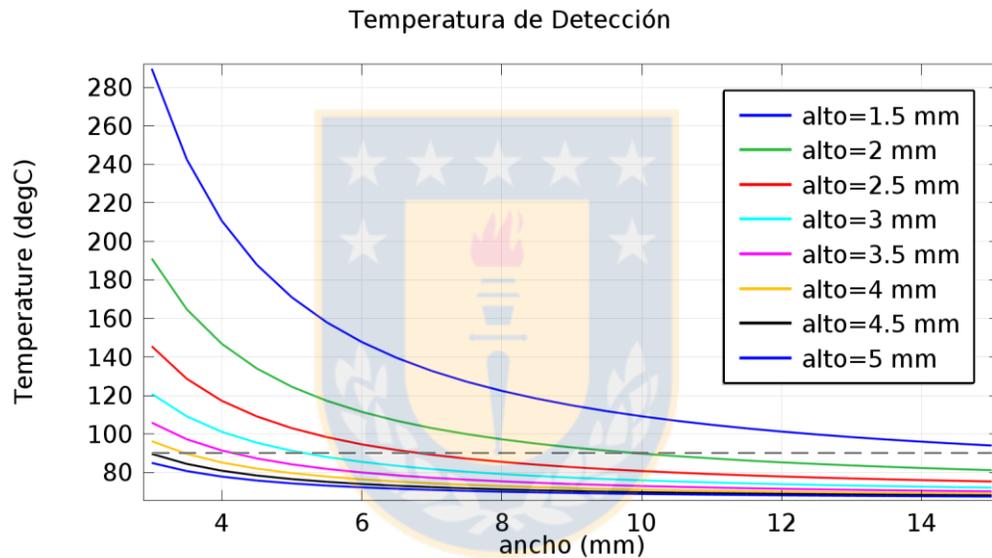


Figura 49. Temperatura en el punto medio en función del alto de la placa y el ancho en la zona de detección.

Fuente: Elaboración propia

TABLA 8. TABLA RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BARRAS INTERCELDA

Alto [mm]	Ancho [mm]	Area [mm ²]	Temperatura [°C]
2	10	20	89,8
2,5	7	17,5	89,2
3	5	15	91,3
3,5	4	14	91,5
4	3,5	14	89,7

condición expuesta. De todas estas configuraciones (ver Tabla 8), la placa que tiene un ancho de 10[mm] y un alto de 2[mm] es la que tiene menor resistencia. Debido a que estamos añadiendo un camino alternativo a la corriente, es importante que la resistencia de este camino sea lo menor

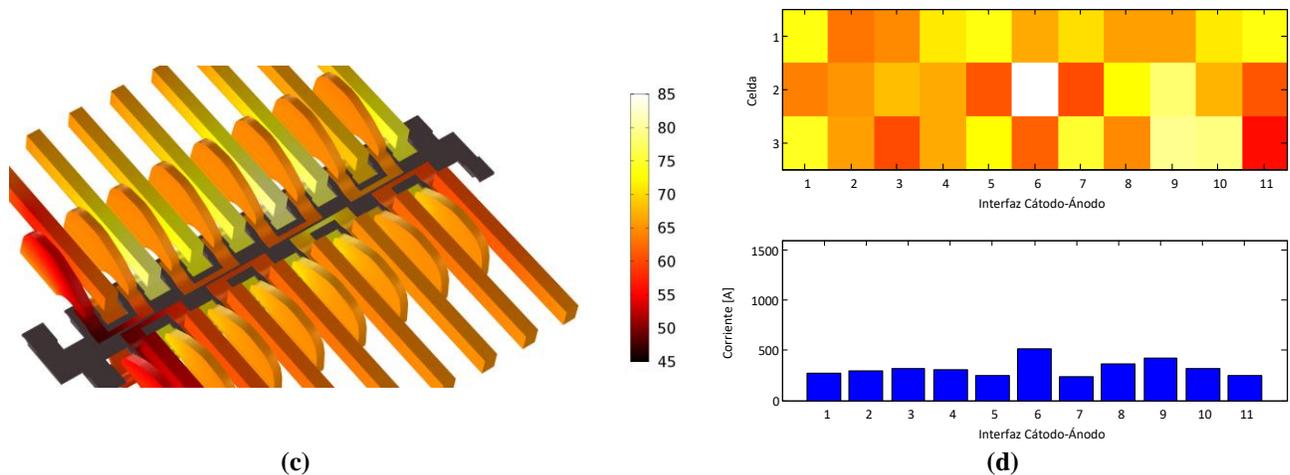


Figura 50. Cortocircuito de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito. Fuente: Elaboración propia

posible con el fin de no aumentar las pérdidas de forma considerable en la barra.

5.5.1. Cortocircuito

Para un cortocircuito, la corriente aumenta en el electrodo en que se forma el nódulo. Debido a las limitaciones de que presenta CS para la corriente, esta corriente no aumenta más allá de los 800[A]. Sin embargo, al incluir una barra secundaria, la corriente fluye a través de los electrodos vecinos hacia el electrodo con el cortocircuito, por la diferencia de potencial que se genera entre los extremos aislados de los electrodos. Esta corriente es inferior a 320[A] independiente de la disminución de la resistencia de electrolito. En total, la corriente que circula por el electrolito en el cátodo que genera el cortocircuito es de 984[A].

Esta corriente circula por el segmento superior, elevando la temperatura. Con termografía se puede identificar la ubicación exacta del cortocircuito. La temperatura en la zona central del segmento es de 89,8[°C]. De esta forma, la corriente de depósito es limitada por debajo de los 1.000[A] y el cortocircuito se ve resaltado en la barra superior.

5.5.2. Circuito abierto

El circuito abierto se muestra en la Figura 51. La corriente que circula por el circuito abierto es de 0[A], sin embargo la corriente de depósito es de 309[A]. Esta corriente ingresa a través del ánodo y luego para por el cátodo a la placa auxiliar hasta el otro cátodo, para volver a la barra principal. La corriente que circula a través de la barra superior hace que la temperatura de un

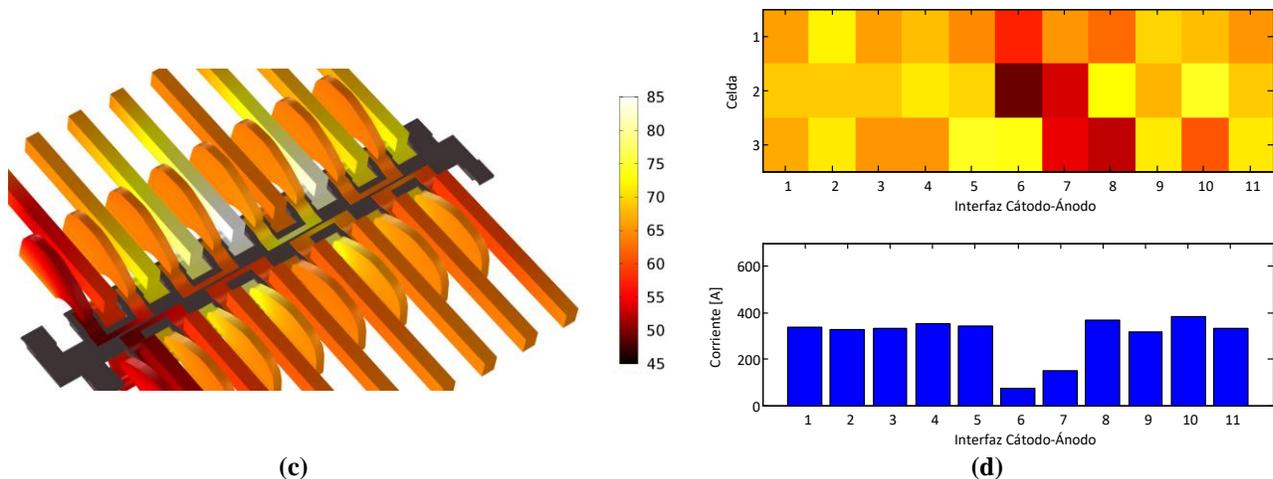


Figura 51. Circuito abierto de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito.
Fuente: Elaboración propia

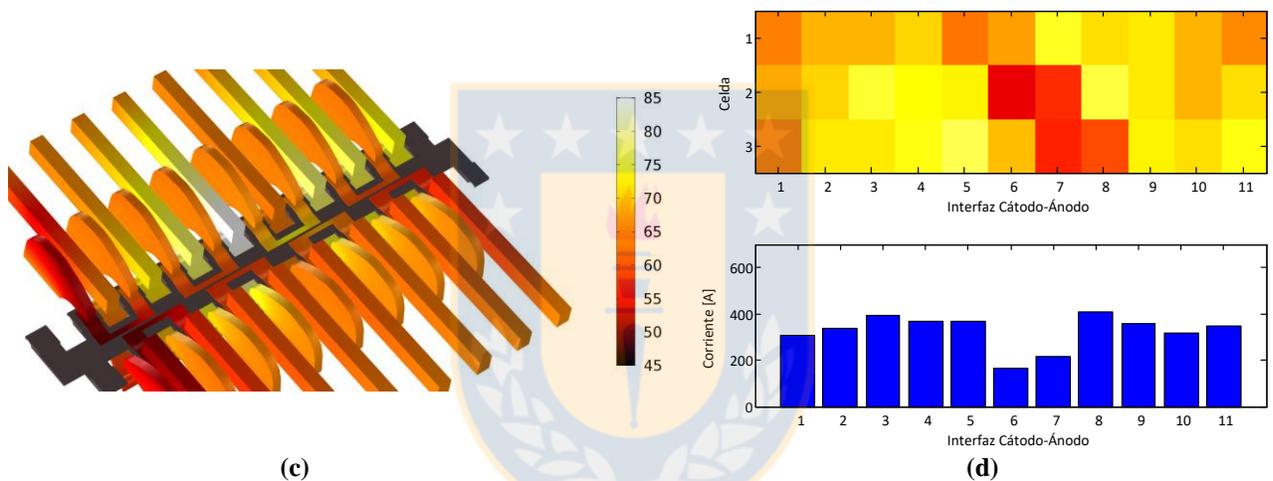


Figura 52. Contacto deficiente de BCS (a) Perfil térmico (b) Distribución de corrientes de electrolito.
Fuente: Elaboración propia

segmento aumente, haciéndolo visible a la cámaras termográficas. La temperatura del segmento es de $77,5[^\circ\text{C}]$, que es suficiente para diferenciarlo del resto de las placas y de esa forma detectar el lugar donde se produce el circuito abierto.

5.5.3. Contacto deficiente

El contacto deficiente es una variación del circuito abierto, con la excepción que existe depósito en el cátodo. La corriente en el contacto deficiente circula de la misma forma que en el circuito abierto e incluso las temperaturas que se registran en las placas de la barra superior son parecidas. La temperatura de placa llega a $72[^\circ\text{C}]$, pues la corriente es un poco más baja (inferior a $250[\text{A}]$).

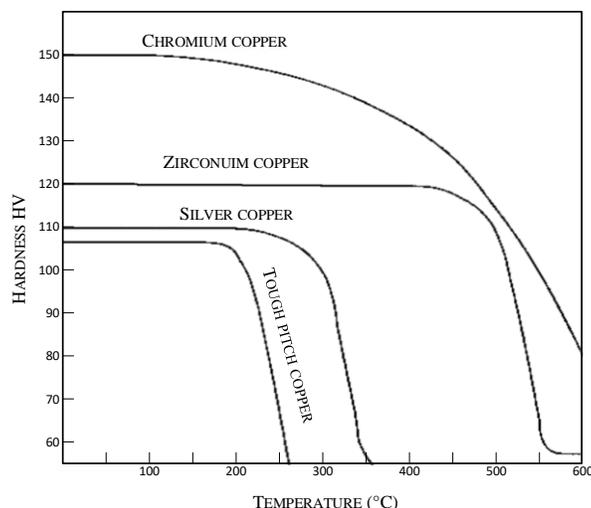


Figura 53. Dureza de metales en función de la temperatura.
Fuente: Elaboración propia

5.6. Materiales

Típicamente, las barras intercelda son fabricadas con cobre C11000 (ETP: *Electrolytic Tough Pitch*). El cobre C11000 ha sido el material con que históricamente se han fabricado los elementos de las plantas de electrólisis. Sin embargo, el cobre tiene un mal desempeño frente a la temperatura y la corrosión. La dureza el cobre disminuye considerablemente con el aumento de la temperatura, como se puede ver en la Figura 53. El cobre sobre los 180[°C] comienza a disminuir su dureza de forma acelerada, hasta llegar a los 250[°C] donde la dureza corresponde a la mitad de la nominal. Si bien, temperaturas sobre los 200[°C].

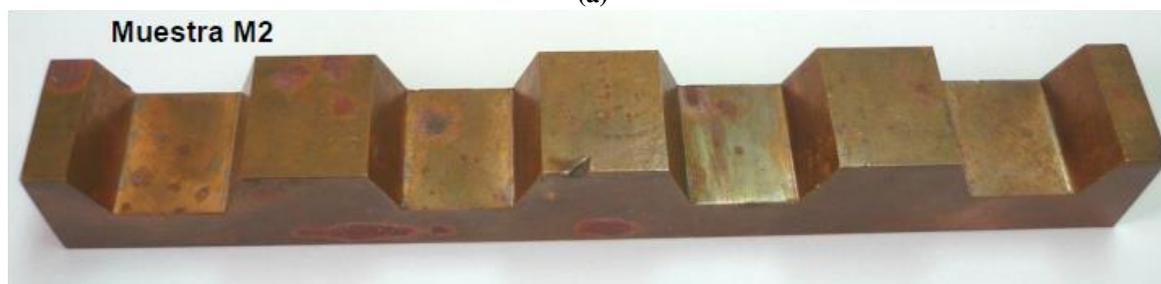
Por lo tanto se propone utilizar un material que conserve las propiedades eléctricas del cobre C11000 pero que sea más resistente a la temperatura y a la corrosión. Es así, como se muestra en la Figura 53, el cobre cromo presenta una de las mayores durezas y un mejor desempeño que el cobre frente a las altas temperaturas.

5.6.1. Pruebas Eléctricas

Se propone a cobre-cromo C18200 como material potencial de cambio sobre el C11000. Al comparar las resistencias eléctricas, el C18200 presenta un 80%IACS mientras que C11000 presenta un 101%IACS (ver Tabla 9). Esto significa que podría esperarse un aumento en las pérdidas por conducción. Sin embargo, estas pérdidas representan sólo el 6% de las pérdidas totales de la barra. Es estima un aumento de las perdidas en un 1,48% en la conducción. Las pérdidas por disminución



(a)



(b)

Figura 54. (a) Muestra de cobre C18200 (b) Muestra de cobre C11000.

Fuente: Elaboración propia

TABLA 9. PROPIEDADES FÍSICA DEL COBRE ETP C11000 @ 20°C.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Propiedades Física	C11000	C18200
Conductividad Eléctrica (%IACS)	101	80
Dureza (Rockwell B Scale)	40	70

TABLA 10. PROYECCIÓN DE AUMENTO DE PÉRDIDAS EN BARRA INTERCELDA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Pérdidas	Unidad	CS	BCS
Pérdidas en contactos de cátodo	[W]	1.523	1.517
Pérdidas en contactos de ánodo	[W]	574	570
Pérdidas por conducción en barra	[W]	144	180
Potencia Total	[W]	2.241	2.267
Δ Potencia Total	[W]	-	+16
Δ Potencia Total	[%]	-	+1,16

de la dispersión de corrientes harán que los contactos disipen menos potencia, como se muestra en la Tabla 10. En total, la potencia disipada por las barra aumentaría un 1,16% y en el proceso en general podría significar un aumento de 0,12%. Sin embargo no se considera el efecto de mayor producción, confiabilidad ni eliminación temprana de anomalías. Por lo tanto, el efecto de aumento de resistividad no produce un aumento apreciable en el consumo eléctrico.



Figura 55. Setup de medición de conductividad de piezas de cobre (a) Pieza M1 C18200 (b) Pieza M2 C11000.
Fuente: Elaboración propia

TABLA 11. RESULTADOS DE MEDICIONES DE CONDUCTIVIDAD.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Mediciones	M1 C18200		M2 C11000	
	Voltaje [mV]	Corriente [A]	Voltaje [mV]	Corriente [A]
Medición 1	5,73	110,1	0,075	9,95
Medición 2	7,97	152,4	0,098	12,46
Medición 3	10,90	207,3	0,120	16,48
Medición 4	13,95	263,5	0,132	18,08
Medición 5	16,38	307,6	0,154	21,63
Medición 6	-	-	0,169	23,63

Se realizaron pruebas eléctricas para comprobar los valores de cada uno de los materiales. Las muestras utilizadas se pueden ver en la Figura 54. (a) Muestra de cobre C18200 (b) Muestra de cobre C11000.

Al realizar el ajuste de acuerdo a las formas y volúmenes de cada una de las piezas, se determina que las conductividades determinadas mediante las mediciones realizadas (ver Tabla 11). corresponden efectivamente a las reportadas en datasheet de proveedor.

5.6.2. Pruebas Mecánicas

Se realizaron pruebas mecánicas por un especialista. Los datos se muestran en la Tabla 12. Los resultados concuerdan con los datos presentados en la hoja técnica de los fabricantes.

TABLA 12. RESULTADOS DE MEDICIONES DE DUREZA.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Mediciones	M1 C18200	M2 C11000
	[Rockwell B]	[Rockwell B]
Medición 1	80,4	42,2
Medición 2	80,8	44,6
Medición 3	79,9	38,6
Medición 4	81,0	40,1
Medición 5	82,8	39,9
Medición 6	81,4	38,4
Media	81,1	40,6

TABLA 13. RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Mediciones	M1 C18200	M2 C11000
	[%]	[%]
Cobre	98,1	99,8
Cromo	1,34	0,002
Silicio	0,12	0,006
Aluminio	0,01	0,01
Fierro	0,09	0,09
Manganeso	0,01	0,003
Fósforo	0,01	0,001
Zinc	0,03	0,045

5.6.3. Pruebas Químicas y Corrosión

LAS PRUEBAS DE ANÁLISIS QUÍMICO SE MUESTRAN EN LA

Tabla 13. La muestra M1 (C18200) contiene un 98,1% de cobre, 1,34% de cromo y 0,12% de silicio. El resto de los elementos se consideran impurezas propias del proceso de fabricación. Por otra parte, la muestra M2 (C11000) contiene un 99,8% de cobre y el 0,2% restante se consideran impurezas.

Se realizaron pruebas de corrosión a los materiales. El ensayo se realizó de acuerdo a las

TABLA 14. CONDICIONES DE ENSAYO DE CORROSIÓN ESTANDARIZADO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro	Unidad	Nivel	Observaciones
Volumen de celda EW	[L]	0,56	Corresponde a la capacidad de la celda. Se consideró 2[L] adicionales en el estanque para la recirculación
Tipo de electrodos		2 ánodos de aleación Pb-Ca-Sn. 1 cátodo acero 316L	Extraídos de electrodos industriales.
Dimensión de los electrodos	[cm]	Ánodos: 23x7x0,6 Cátodo: 23x85x0,3	Área catódica efectiva (sumergida) es de 187 [cm ²]
Temperatura de electrolito	[°C]	60	Se mantiene constante durante toda la prueba
Composición del electrolito	[g/L]	Cu ⁺² : 40 H ₂ SO ₄ : 200 Cl ⁻ : 1	
Duración del ensayo	[h]	240	
Corriente aplicada	[A]	11,2	
Densidad de corriente	[A/m ²]	600	
Condiciones ambientales		Aire y ambiente ácido	

normas ASTM G 1-90 “Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens” y G 31-72 “Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”. El ensayo consistió en una celda electrolítica de EW a escala laboratorio a temperatura y composición de electrolito en el rango industrial. Las condiciones de la prueba se muestran en la Tabla 14.

Los resultados obtenidos muestran una pequeña pérdida de masa en las muestras, que no son significativas y están dentro del margen de error del ensayo. Sin embargo, al ver las muestras en el microscopio, se logra ver que existe un mayor desgaste en la pieza de cobre (ver Figura 56). La pieza de cobre C11000 presenta corrosión generalizada en todas las caras en contacto con el neblina ácida (ver Figura 57).

Adicionalmente, la temperatura tiene un efecto acelerador en la corrosión [38]. VS al operar a 5[°C] de temperatura por sobre la barra CS, tiene una velocidad de corrosión 1,7 veces más rápida. Al comparar esto con la temperatura de 108[°C] que exhibe la barra CS cuando opera con un contacto deficiente, la velocidad de corrosión aumenta 100 veces (ver Figura 58) [38].

TABLA 15. RESULTADOS DE MASA DE LAS MUESTRAS EN PRUEBA DE CORROSIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Muestra	Masa Inicial [g]	Masa Final [g]	Diferencia [g]
C18200	877,85	877,23	0,62
C11000	1.102,7	1.101,74	0,96

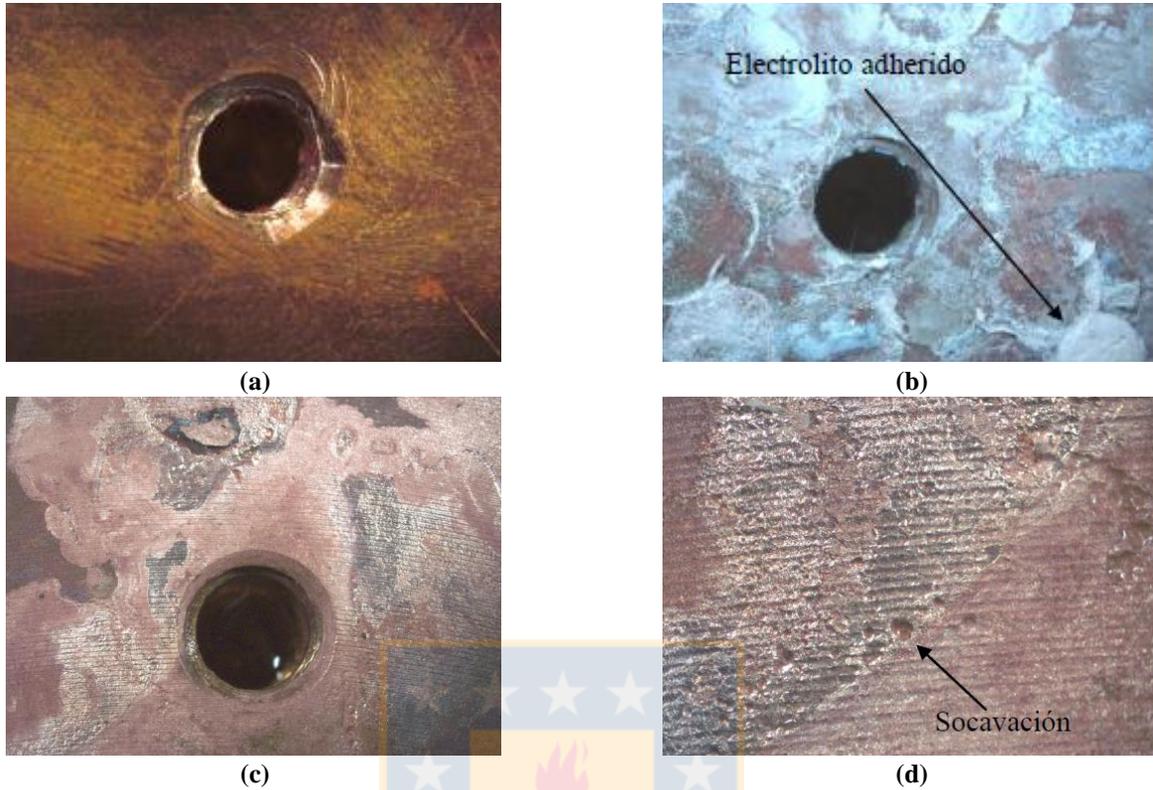


Figura 56. Corrosión en pieza de cobre M1 (C18200) (a) Superficie antes del ensayo (b) Superficie después del ensayo (sucio) (c) Superficie después del ensayo (limpio) (d) Superficie ampliada.

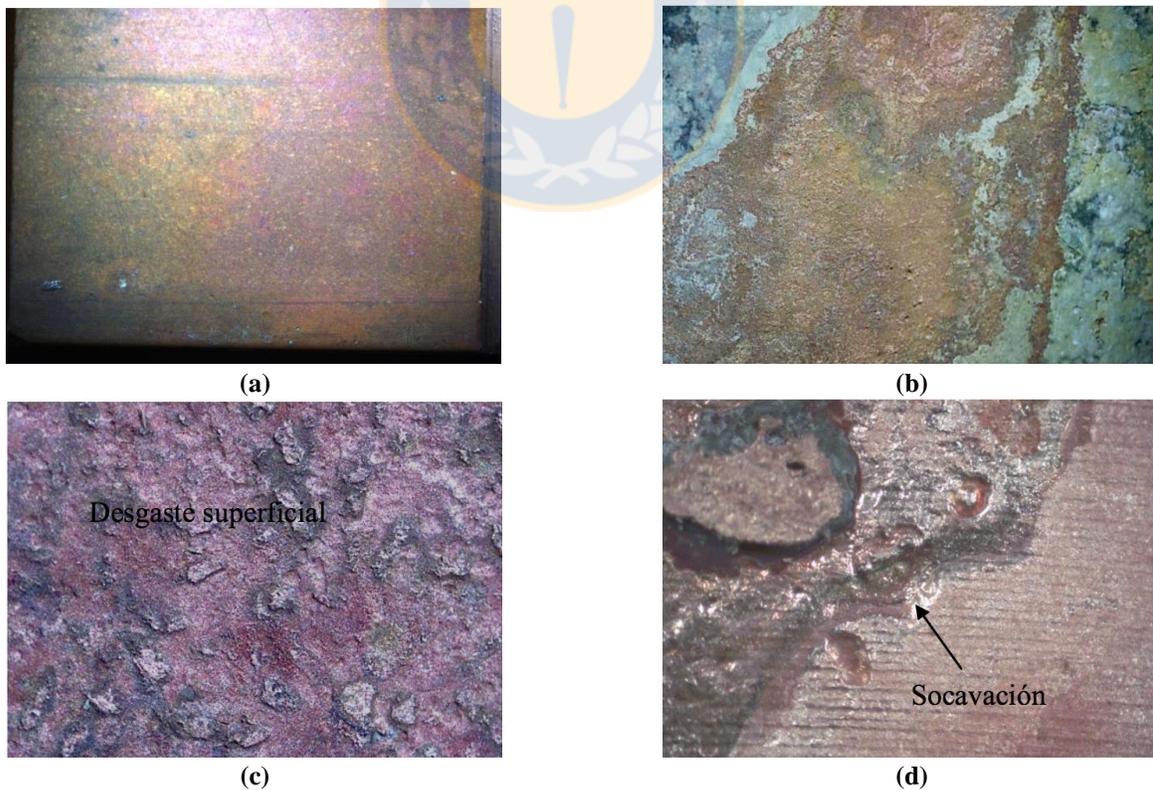


Figura 57. Corrosión en pieza de cobre M2 (C11000) (a) Superficie antes del ensayo (b) Superficie después del ensayo (sucio) (c) Superficie después del ensayo (limpio) (d) Superficie ampliada.

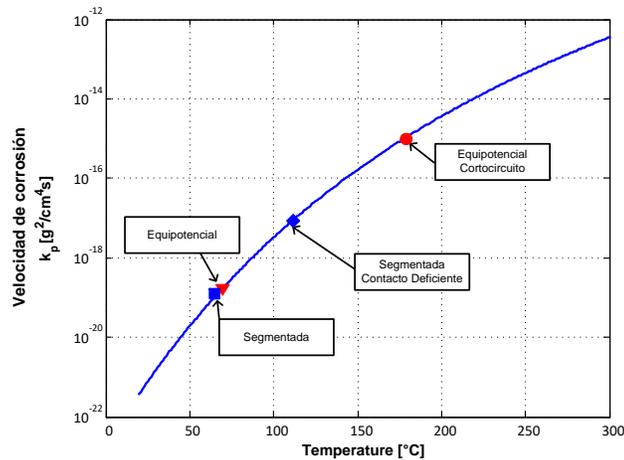


Figura 58. Velocidad de corrosión de cobre C11000 en función de la temperatura. [25]

5.7. Resumen

La barra BCS asegura una operación normal en presencia de cortocircuitos, circuitos abiertos y contactos deficientes. Además permite la identificación del lugar donde estén ocurriendo las anomalías para que puedan ser despejadas.

Desde el punto de vista de la confiabilidad, BCS otorga una redundancia " $n + 1$ ". Cuando se pierde conducción por un camino, el sistema es capaz de seguir operando, pero con solo el 46% de la corriente nominal.

Asegurar una operación libre de circuitos abiertos, cortocircuitos y contactos deficientes, asegura una baja corrosión de la barra principal, lo que puede ser apoyado con un material resistente a la corrosión, como lo es el cobre-cromo C18200.

TABLA 16. RESUMEN DE DESEMPEÑO DE BARRAS INTERCELDA (I). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro		VS	CS	BCS
	Corriente nominal	[A]	660	660
	Temperatura de barra	[°C]	68	66
	Dispersión de corriente	[%]	15,4	9,9
	Confiabilidad		baja	alta
Cortocircuito	Corriente en cortocircuito	[A]	1.770	787
	Corriente efectiva de depósito	[A]	1.770	787
	Mitigación de cortocircuito		No	Si
	Temperatura de cortocircuito	[°C]	178	73
	Temperatura en barra secundaria	[°C]	-	-
	Detección de cortocircuito		Si	No

TABLA 17. RESUMEN DE DESEMPEÑO DE BARRAS INTERCELDA (II). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	Parámetro		VS	CS	BCS
Circuito Abierto	Corriente efectiva de depósito	[A]	0	0	309
	Depósito de cobre	[%]	0	0	46,8
	Mitigación de circuito abierto		No	No	Si
	Temperatura de circuito abierto	[°C]	65	62	64
	Temperatura electrodos vecinos	[°C]	67	74,5	83,5
	Temperatura en barra secundaria	[°C]	-	-	77,5
	Detección de circuito abierto		No	Si	Si
Contacto Deficiente	Corriente en contacto deficiente	[A]	128	248	88
	Corriente efectiva de depósito	[A]	128	248	350
	Depósito de cobre	[%]	19,4	37,8	53,0
	Mitigación de contacto deficiente		Si	No	Si
	Temperatura de contacto deficiente	[°C]	65	108	64
	Temperatura electrodos vecinos	[°C]	65,5	73,5	84
	Temperatura en barra secundaria	[°C]	-	-	72
	Detección de contacto deficiente		No	Si	Si



Capítulo 6. Conclusión

6.1. Conclusión

Este trabajo presentó el proceso de modelación, simulación y diseño de una barra intercelda con una barra superior auxiliar (BCS).

Se modeló y simuló una nave de electrólisis de acuerdo a parámetros recopilados en planta, determinando las condiciones basales de temperatura y distribución de corriente. Los modelos generados pueden utilizarse como herramienta de evaluación de tecnologías que impactan al sistema de distribución de corrientes de la nave de electrólisis, por ejemplo el sistema SELE.

Para la tecnología equipotencial en operación normal, la dispersión de corriente es de 15,4% y la temperatura de operación de la barra es 69 [°C]. Para la tecnología segmentada la dispersión de corriente es de 9,9% con una temperatura de operación de barra de 66 [°C]. La explicación de la diferencia en las temperaturas está en la dispersión de corriente y las circulaciones de corriente extras requeridas por la barra equipotencial para resetear potenciales. Se determinó que la barra equipotencial ofrece mitigación para contactos deficientes, mientras que la barra segmentada aporta mitigación frente a cortocircuitos. Sin embargo, ninguna de las dos posee mitigación en presencia de circuitos abiertos.

La nueva interconexión de barra que se propone, mitiga los circuitos abiertos que se producen, generando así una redundancia " $n + 1$ " en el sistema eléctrico. Con esto, en presencia de un circuito abierto se produce depósito en el cátodo a 46% de la corriente nominal. Enfrentando un contacto deficiente se deposita a 53% de la corriente nominal. Además, la barra BCS utiliza una configuración segmentada que mantiene la protección frente a cortocircuitos metalúrgicos.

En cuanto a la localización temprana, el sistema BCS utiliza la barra superior aprovechando la corriente que circula a través de ella que eleva la temperatura del segmento involucrado. Todo lo anterior, resulta en una barra que puede operar con anomalías, mitigando sus efectos sobre el proceso. Además resalta la ubicación de las anomalías. La muestra el resumen de las tecnologías.

TABLA 18. RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro		VS	CS	BCS
Mitigación de cortocircuito		No	Si	Si
Mitigación de circuito abierto		No	No	Si
Mitigación de contacto deficiente		Si	No	Si
Detección de cortocircuito		Si	No	Si
Detección de circuito abierto		No	Si	Si
Detección de contacto deficiente		No	Si	Si
Cortocircuito	Corriente en cortocircuito [A]	1.770	787	798
	Corriente efectiva de depósito [A]	1.770	787	984
	Temperatura de cortocircuito [°C]	178	73	79
	Temperatura en barra secundaria [°C]	-	-	89
Circuito Abierto	Corriente efectiva de depósito [A]	0	0	309
	Depósito de cobre [%]	0	0	46,8
	Temperatura de circuito abierto [°C]	65	62	64
	Temperatura electrodos vecinos [°C]	67	74,5	83,5
	Temperatura en barra secundaria [°C]	-	-	77,5
Contacto Deficiente	Corriente en contacto deficiente [A]	128	248	88
	Corriente efectiva de depósito [A]	128	248	350
	Depósito de cobre [%]	19,4	37,8	53,0
	Temperatura de contacto deficiente [°C]	65	108	64
	Temperatura electrodos vecinos [°C]	65,5	73,5	84
	Temperatura en barra secundaria [°C]	-	-	72

6.2. Trabajos Futuros

Realizar la instalación y prueba en terreno de la tecnología que se presenta en esta tesis. Esto será posible durante 2017-2018 mediante el apoyo de FONDEF.

Por otra parte, la simulación por elementos finitos provee una plataforma para desarrollar nuevas tecnologías para la detección de anomalías. FEM permite modelar la temperatura en el electrolito y con ello es posible generar perfiles térmicos de electrolito y de esta forma determinar el

flujo de entrada de electrolito a las celdas. El problema de flujo de entrada de electrolito es un tema recurrente en la industria de ER, debido al bloqueo por depósito de cobre en cañerías producido por corrientes parásitas (ver Figura 59).

Determinar y predecir corrosión para realizar mantenimiento predictivo a las barra es un trabajo futuro con alto impacto.

En cuanto a la ERNC, se pueden generar modelos de gestión que integren los conceptos de load shedding, y modulación de corriente; con el fin de buscar el mejor escenario para la penetración de energía eólica y fotovoltaica a los sistemas interconectados.



Figura 59. Depósito de cobre en cañerías de ingreso de electrolito.
Fuente: Imagen provista por CODELCO.

Capítulo 7. Publicaciones

7.1. Publicaciones ISI (7)

E. P. Wiechmann; A. S. Morales; P. Aqueveque; J. A. Henriquez; L. Munoz, "3D FEM Thermal and Electrical Analysis of Copper Electrowinning Intercell Bars," in IEEE Transactions on Industry Applications , vol.PP, no.99, pp.1-1 (Aceptado para publicación).

DOI: [10.1109/TIA.2016.2609847](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2609847)

E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, E. J. Pino, L. Muñoz and J. A. Henriquez, "Intercell Busbar Design for Copper Electrowinning," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 5, pp. 4480-4488, Sept.-Oct. 2016.

DOI: [10.1109/TIA.2016.2582138](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2582138)

E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, J. A. Henríquez, E. J. Pino and L. G. Aburto, "On the Design Robustness and Long-Term Performance of the Most Used Electrodes in the Copper Electrowinning Industry," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 5, pp. 4460-4469, Sept.-Oct. 2016.

DOI: [10.1109/TIA.2016.2574778](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2574778)

Aqueveque, P., Wiechmann, E.P., Henriquez, J.A., Munoz, L., "Energy Quality And Efficiency Of An Open Pit Mine Distribution System: Evaluation And Solution," IEEE Transactions On Industry Applications, 52, n. 1, pp. 581 – 588, 2015.

DOI: [10.1109/TIA.2015.2464172](https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2464172)

E. Wiechmann, P. Aqueveque, J. Henriquez, L. Muñoz, "BMC: A Modulating Bar for Copper Electrowinning Designed for Heavy Duty and High Reliability", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, n. 2, pp 2375 - 2381, 2014.

DOI: [10.1109/TIA.2013.2290841](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2290841)

E. Wiechmann, L. Muñoz, P. Aqueveque, G. Vidal, J. Henriquez, "Introducing a BypassBackup Connection System for Current Mode Copper Electrowinning Intercell Bar", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, n. 2, pp. 1490 – 1495, 2014.

DOI: [10.1109/TIA.2013.2273752](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2273752)

E. Wiechmann, P. Aqueveque, G. Vidal, J. Henriquez, "Contact System Design to Improve Energy Efficiency in Copper Electrowinning Processes", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, n. 6, pp. 2461 – 2465, 2013.

DOI: [10.1109/TIA.2013.2269035](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2269035)

7.2. Conferencias (9)

E. P. Wiechmann, P. Aqueveque, J. A. Henríquez and A. Morales, "An intercell busbar topology to improve resilience to anomalies of copper electrorefining process," 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, USA, 2016, pp. 1-6.

E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, E. J. Pino, L. Muñoz and J. A. Henríquez, "Intercell busbar design for copper electrowinning," Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, Addison, TX, 2015, pp. 1-7.

E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, J. A. Henríquez and L. Muñoz, "3D FEM thermal and electrical analysis of copper electrowinning intercell bars," Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, Addison, TX, 2015, pp. 1-7.

P. Aqueveque, E. P. Wiechmann, J. A. Henríquez and L. Muñoz, "Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: An evaluation," 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-7.

E. P. Wiechmann, P. Aqueveque, L. Muñoz and J. A. Henríquez, "Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: An improvement," 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC, 2014, pp. 1-7.

E. P. Wiechmann, P. E. Aqueveque, J. Henríquez, L. Muñoz and A. Morales, "BMC: A modulating bar for copper electrowinning designed for heavy duty and high reliability," Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE, Lake Buena Vista, FL, 2013, pp. 1-7.

E. P. Wiechmann, P. E. Aqueveque, L. G. Muñoz, J. A. Henríquez and A. S. Morales, "Technical assessment of industrial operation of copper electrowinning cells with current source topology," Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE, Lake Buena Vista, FL, 2013, pp. 1-5.

E. P. Wiechmann, L. G. Muñoz, P. E. Aqueveque, G. A. Vidal and J. A. Henríquez, "Introducing a bypass-backup connection system for current mode copper electrowinning intercell bars," Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2012 IEEE, Las Vegas, NV, 2012, pp. 1-6.

E. Wiechmann, P. Aqueveque, G. Vidal and J. Henríquez, "Introducing surecontact ®: A design concept to improve energy efficiency in copper electrowinning processes," Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE, Orlando, FL, 2011, pp. 1-6.

Capítulo 8. Bibliografía

Banco Central de Chile, «Cuentas Nacionales de Chile,» 2015.

1]

W. G. Davenport, K. C. Sole, M. J. King y M. E. Schlesinger, *Extractive Metallurgy of Copper*, UK: Elsevier, 2011.

2]

Comisión Chilena del Cobre, «Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2015 - 2026,» Santiago, 2015.

3]

Fundación Chile, «Escenarios Energéticos Chile 2030,» Santiago, 2013.

4]

R. Brown, «Rectifier and DC Bus System Design for the copper Electrowining Industry,» *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 26, nº 6, pp. 1116-1119, 1990.

5]

E. P. Wiechmann, A. Morales, P. Aqueveque, E. Pino y L. Aburto, «On the design robustness and long term performance of the most used electrodes in the copper electrowining industry,» de *Industry Applications Society Annual Meeting*, Texas, 2015.

6]

K. L. Eastwood y G. W. Whebell, «Developments in Permanent Stainless Steel Cathodes within the Copper Industry,» de *Copper 2007*, Australia, 2007.

7]

Walker, «Plant for Electrodeposition of Metals». United States Patente 687800, 3 December 1901.

8]

E. P. Wiechmann, G. Vidal y A. Pagliero, «Current-Source Connection of Electrolytic Cell Electrodes: An Improvement for Electrowining and Electrorefining,» *IEEE Transactions*

9]

on *Industry Applications*, vol. 42, n° 3, pp. 851-855, 2006.

10] E. Wiechmann, A. Pagliero y G. Vidal, «Conexion Multicircuital Para Equilibrar Las Corrientes De Los Catodos Y Disminuir La Ocurrencia De Cortocircuitos En Un Sistema De Celdas Electroliticas, Comprende Una Sucesion Longitudinal De Segmentos Electricamente Conductores Dispuesta Sobre Una Placa». Chile Patente 199902608, 07 08 2007.

11] E. Wiechmann, «Sistema de Barra Intermedia y/o de Cabecera para Celdas de Procesos Electroliticos Compuesto por Barra Continua o Segmentada, Descansos Conductores y Aislados Dispuestos en Forma Alternada, un Canal Central y Opcionalmente una Base Aislante para una Barra». Chile Patente 201102108, 09 12 2014.

12] A. Wiechmann, A. Morales, P. Aqueveque, E. Pino, L. Muñoz y J. Henriquez, «Intercell busbar design for copper electrowining,» de *Industry Applications Society Annual Meeting*, Addison, TX, 2015.

13] H. Virtanen, I. Virtanen, T. Marttila y T. Kivistö, «Busbar construction for electrolytic cell». United States Patente US6342136, 29 January 2002.

14] N. A. Doren y M. A. Hoffman, «Clarifying the Butler-Volmer equation and related aproximations for calculating activation losses in solid oxide fuel cells models,» *Journal of Power Sources*, vol. 152, pp. 175-181, 2005.

15] D. C. Price y W. G. Davenport, «Densities, electrical conductivities and viscosities of CuSO₄/H₂SO₄ solutions in the range of modern electrorefining and electrowining electrolytes,» *Metallurgical Transactions B*, pp. 159-163, 1980.

16] I. Filzwiesser, A. Filzwieser y R. Ofner, «Geometric Surface Inspection for Stainless Steel Cathode Plates and Copper Cathodes,» *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 155, n° 1, pp. 7-11, 2010.

17] H. Aminian, C. Bazin, D. Hodouin y C. Jacob, «Simulation of a SX-EW Pilot Plant,» *Hydrometallurgy*, vol. 56, n° 1, pp. 13-31, 2000.

18] R. Parsons, Handbook of electrochemical constants, London: Butterworths Scientific Publications, 1959.

19] P. Aqueveque, E. P. Wiechmann y R. Burgos, «Short-Circuit Detection for Electrolytic Processes Employing Optibar Intercell Bars,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, n° 4, pp. 1225-1231, 2009.

20] P. Aqueveque, E. P. Wiechmann, J. Herrera y E. Pino, «Measurable Variables in Copper Electrowining and Their Relevance to Predicting Process Performance,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, n° 3, pp. 2607-2614, 2015.

21] E. P. Wiechmann, L. Muñoz, P. Aqueveque, G. Vidal y J. Henriquez, «Introducing a Bypass-Backup Connection System for Current-Mode Copper Electrowining Intercell Bars,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n° 2, pp. 1490-1495, 2014.

22] P. Aqueveque, E. P. Wiechmann y A. Morales, «System for the Measurement of Cathodic Currents in Electrorefining Processes That Employ Multicircuital Technology,» *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 46, n° 5, pp. 1764-1768, 2010.

23] S. Heikkinen, *Fatigue of Metals - Copper Alloys*, 2001.

24] I. S. Laitinen, H. K. Virtanen, O. T. Järvinen, T. M. Kumara y J. T. Tantt, «Finite Element Modeling of an Electrolysis Cell,» *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Pretroleum*, pp. 561-573, 2007.

25] E. P. Wiechmann, A. Morales, P. Aqueveque, J. Henriquez y L. Muñoz, «3D Thermal and Electrical Analysis of Copper Electrowining Intercell Bars,» de *IAS Annual Meeting*, 2015.

26] COMSOL Inc., *"AC/DC Module User's Guide*, 2013.

27] COMSOL Inc., *Heat Transfer Module User's Guide*, 2013.

28] COMSOL Inc., «*Electrochemistry Module User's Guide*,» 2013.

G. Barton y A. Scott, «Industrial Applications of a Mathematical Model for the Zinc

- 29] Electrowining Process,» *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 24, n° 5, pp. 377-383, 1994.
- E. Wiechmann, P. Aqueveque, G. Vidal y J. Henriquez, «Contact System Design to
30] Improve Energy Efficiency in Copper Electrowinning Processes,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, n° 6, pp. 2461 - 2465, 2013.
- COMSOL Inc., *Computational Fluid Dynamics Module User's Guide*, 2013.
- 31]
- J. A. Henriquez, "Estudio de Eficiencia Energética Utilizando Tecnología Optibar,
32] Concepción: Universidad de Concepción, 2011.
- E. P. Wiechmann, A. Morales, P. Aqueveque y R. Mayne-Nicholls, «Reducing
33] Specific Energy to Shrink the Carbon Footprint in a Copper Electrowining Facility,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, n° 3, pp. 1175-1179, 2011.
- E. P. Wiechmann, G. Vidal, A. Pagliero y J. Gonzalez, «Copper Electrowining using
34] Segmented Intercell Bars for Improved Current Distribution,» *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 41, n° 4, pp. 425-432, 2002.
- J. R. Davis, *Copper and Copper Alloys*, United States: ASM Specialty Handbook, 2001.
- 35]
- E. Wiechmann, «Barra Intercelda Para Procesos Electrolíticos, Compuesta Por Una
36] Combinación Entre Una Disposición En Zig-Zag De Piezas Conectoras De Anodo-Catodo Con Una Parte De Una Barra Equipotencial Del Tipo Walker, Donde Las Piezas Son Para Conectar Un Solo Anodo D». Chile Patente 201000472, 21 11 2013.
- E. P. Wiechmann, P. Aqueveque, J. A. Henriquez, L. G. Muñoz y A. Morales, «BMC:
37] A Modulating Bar for Copper Electrowining Designed for Heavy Duty and High Reliability,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n° 4, pp. 2375-2381, 2014.
- M. Björck, «Oxidation kinetics of copper at reduced oxygen partial pressures,» *SKB, Ragna Elger, Swerea KIMAB*, 2013.
- 38]
- E. Denny y M. O'Malley, «Wind generation, power system operation and emission

39] reduction,» *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, n° 1, pp. 341 - 347, 2006.

40] E. Wiechmann, L. Muñoz, P. Aqueveque, G. Vidal y J. Henriquez, «Introducing a bypass-backup connection system for current mode copper electrowinning intercell bars,» de *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting 2012*, Las Vegas, NV., 2012.



Anexo A: Resistencias de Electrolito

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [mΩ]	Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [mΩ]
1	0,667	341,7	1,952	31	0,645	329,9	1,955
2	0,655	341,7	1,917	32	0,655	329,9	1,985
3	0,662	323,0	2,050	33	0,67	304,0	2,204
4	0,653	323,0	2,022	34	0,678	304,0	2,230
5	0,665	282,7	2,352	35	0,68	362,2	1,877
6	0,679	282,7	2,402	36	0,676	362,2	1,866
7	0,641	364,4	1,759	37	0,613	379,7	1,614
8	0,636	364,4	1,745	38	0,634	379,7	1,670
9	0,645	328,1	1,966	39	0,66	338,2	1,952
10	0,648	328,1	1,975	40	0,651	338,2	1,925
11	0,647	337,1	1,919	41	0,677	320,0	2,116
12	0,627	337,1	1,860	42	0,677	320,0	2,116
13	0,639	343,1	1,862	43	0,653	384,0	1,701
14	0,662	343,1	1,929	44	0,635	384,0	1,654
15	0,614	369,6	1,661	45	0,625	368,3	1,697
16	0,601	369,6	1,626	46	0,648	368,3	1,759
17	0,649	300,8	2,158	47	0,657	339,5	1,935
18	0,687	300,8	2,284	48	0,653	339,5	1,923
19	0,685	289,1	2,369	49	0,64	342,6	1,868
20	0,68	289,1	2,352	50	0,644	342,6	1,880
21	0,636	331,3	1,920	51	0,604	341,5	1,769
22	0,639	331,3	1,929	52	0,626	341,5	1,833
23	0,634	333,0	1,904	53	0,677	358,4	1,889
24	0,636	333,0	1,910	54	0,688	358,4	1,920
25	0,652	317,0	2,057	55	0,669	342,3	1,954
26	0,658	317,0	2,076	56	0,648	342,3	1,893
27	0,655	352,2	1,860	57	0,678	279,5	2,426
28	0,657	352,2	1,865	58	0,678	279,5	2,426
29	0,631	359,7	1,754	59	0,669	356,5	1,877
30	0,647	359,7	1,799	60	0,682	356,5	1,913

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [mΩ]	Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [mΩ]
61	0,629	298,2	2,109	91	0,658	334,2	1,969
62	0,699	298,2	2,344	92	0,673	334,2	2,014
63	0,646	353,5	1,827	93	0,632	412,8	1,531
64	0,648	353,5	1,833	94	0,65	412,8	1,575
65	0,675	321,2	2,101	95	0,64	320,4	1,998
66	0,657	321,2	2,045	96	0,632	320,4	1,973
67	0,616	338,4	1,820	97	0,628	411,9	1,525
68	0,674	338,4	1,992	98	0,682	411,9	1,656
69	0,694	282,9	2,453	99	0,655	351,3	1,865
70	0,667	282,9	2,358	100	0,656	351,3	1,867
71	0,666	322,4	2,066	101	0,668	330,7	2,020
72	0,642	322,4	1,991	102	0,66	330,7	1,996
73	0,642	315,6	2,034	103	0,671	307,1	2,185
74	0,65	315,6	2,060	104	0,682	307,1	2,221
75	0,644	336,5	1,914	105	0,653	353,1	1,849
76	0,648	336,5	1,926	106	0,648	353,1	1,835
77	0,642	333,8	1,923	107	0,666	319,9	2,082
78	0,658	333,8	1,971	108	0,667	319,9	2,085
79	0,623	351,0	1,775	109	0,679	304,9	2,227
80	0,616	351,0	1,755	110	0,706	304,9	2,316
81	0,63	322,9	1,951	111	0,683	367,2	1,860
82	0,682	322,9	2,112	112	0,66	367,2	1,797
83	0,678	300,0	2,260	113	0,641	323,5	1,981
84	0,625	300,0	2,083	114	0,645	323,5	1,994
85	0,638	324,7	1,965	115	0,671	366,3	1,832
86	0,665	324,7	2,048	116	0,661	366,3	1,805
87	0,648	302,6	2,141	117	0,653	331,7	1,969
88	0,643	302,6	2,125	118	0,667	331,7	2,011
89	0,634	354,2	1,790	119	0,669	319,8	2,092
90	0,618	354,2	1,745	120	0,689	319,8	2,154

Anexo B: Resistencias de Contacto

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]	Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]
1	0,0459	847,4	54,166	31	0,0229	477,0	48,008
2	0,0484	819,8	59,041	32	0,0463	635,9	72,811
3	0,0238	785,6	30,296	33	0,0316	669,0	47,236
4	0,0403	834,9	48,269	34	0,0327	680,1	48,083
5	0,0357	894,7	39,902	35	0,0866	741,1	116,854
6	0,032	496,2	64,490	36	0,0516	632,9	81,526
7	0,0302	824,3	36,637	37	0,0443	719,1	61,606
8	0,0575	783,2	73,413	38	0,0291	671,3	43,347
9	0,0332	665,9	49,860	39	0,021	782,0	26,854
10	0,0664	569,4	116,613	40	0,0211	748,3	28,198
11	0,0253	696,5	36,327	41	0,0254	760,9	33,381
12	0,0769	749,7	102,577	42	0,0569	711,1	80,013
13	0,0362	661,2	54,750	43	0,0271	641,7	42,233
14	0,0289	651,5	44,359	44	0,0299	833,0	35,893
15	0,0238	713,5	33,358	45	0,0303	754,1	40,183
16	0,0224	651,0	34,407	46	0,0365	689,4	52,942
17	0,0266	846,0	31,442	47	0,0453	682,7	66,352
18	0,0315	697,6	45,158	48	0,0792	676,5	117,077
19	0,0239	742,8	32,175	49	0,023	718,3	32,020
20	0,0395	690,1	57,242	50	0,0783	742,7	105,432
21	0,0228	759,7	30,013	51	0,0233	625,8	37,235
22	0,0303	721,6	41,991	52	0,078	702,4	111,050
23	0,0409	765,3	53,444	53	0,0369	681,3	54,160
24	0,0223	533,8	41,775	54	0,0383	705,2	54,311
25	0,0313	621,7	50,346	55	0,027	725,3	37,224
26	0,027	674,8	40,014	56	0,025	677,7	36,888
27	0,0275	725,5	37,905	57	0,0499	549,3	90,848
28	0,0597	688,5	86,711	58	0,064	661,7	96,728
29	0,0345	699,1	49,348	59	0,0269	751,4	35,800
30	0,0364	535,1	68,029	60	0,0264	689,9	38,266

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]	Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]
61	0,0487	734,5	66,300	101	0,048	677,0	70,903
62	0,0957	762,6	125,485	102	0,0412	635,9	64,794
63	0,0379	607,5	62,388	103	0,0271	732,1	37,017
64	0,0634	767,2	82,642	104	0,0195	705,1	27,655
65	0,0209	545,1	38,345	105	0,0196	717,7	27,310
66	0,0427	768,5	55,562	106	0,0236	669,4	35,253
67	0,045	738,5	60,938	107	0,0529	607,6	87,070
68	0,0221	738,5	29,925	108	0,0252	775,2	32,508
69	0,0375	747,1	50,192	109	0,0278	696,7	39,903
70	0,0332	555,9	59,720	110	0,0282	655,4	43,024
71	0,0297	726,6	40,874	111	0,034	634,6	53,577
72	0,0281	782,2	35,925	112	0,0422	635,8	66,377
73	0,0534	636,2	83,940	113	0,0736	670,3	109,807
74	0,0309	528,5	58,470	114	0,0214	690,2	31,007
75	0,0618	660,1	93,615	115	0,0728	588,3	123,743
76	0,0236	705,8	33,436	116	0,0217	667,3	32,521
77	0,0715	633,0	112,951	117	0,0726	651,1	111,504
78	0,0337	628,0	53,665	118	0,0343	662,8	51,751
79	0,0268	681,5	39,325	119	0,0356	664,7	53,561
80	0,0222	620,3	35,788	120	0,0251	650,3	38,597
81	0,0208	809,5	25,694	121	0,0232	513	45,234
82	0,0247	669,4	36,901	122	0,0464	646	71,813
83	0,0293	706,2	41,488	123	0,0595	702	84,762
84	0,0222	661,0	33,583	124	0,025	645	38,746
85	0,0367	722,0	50,833	125	0,0245	687	35,659
86	0,0212	693,2	30,584	126	0,0453	706	64,132
87	0,0282	737,4	38,241	127	0,089	574	155,131
88	0,038	435,0	87,357	128	0,0353	729	48,437
89	0,0208	539,6	38,547	129	0,059	502	117,495
90	0,0291	661,8	43,973	130	0,0194	693	27,984
91	0,0251	691,9	36,279	131	0,0429	741	57,922
92	0,0256	654,5	39,116	132	0,0346	704	49,114
93	0,0555	689,8	80,459	133	0,034	664	51,181
94	0,0321	521,1	61,602	134	0,1682	682	246,731
95	0,0338	456,4	74,055	135	0,0367	695	52,826
96	0,0213	606,6	35,114	136	0,0659	515	128,071
97	0,0431	633,0	68,092	137	0,0425	672	63,275
98	0,0294	652,7	45,042	138	0,048	714	67,272
99	0,0304	692,0	43,933	139	0,0521	593	87,785
100	0,0805	621,5	129,529	140	0,067	477	140,485

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]	Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]
141	0,0409	602	67,924	181	0,0442	544	81,195
142	0,0643	633	101,544	182	0,0532	618	86,063
143	0,0377	574	65,629	183	0,0493	576	85,578
144	0,0295	583	50,603	184	0,0311	633	49,109
145	0,0666	629	105,935	185	0,0464	614	75,583
146	0,0371	569	65,233	186	0,0649	589	110,148
147	0,0351	740	47,444	187	0,0456	480	95,031
148	0,0363	607	59,825	188	0,1083	572	189,378
149	0,055	658	83,567	189	0,0508	657	77,352
150	0,04	616	64,952	190	0,0619	595	103,967
151	0,0429	672	63,822	191	0,1018	623	163,457
152	0,0494	647	76,406	192	0,0666	680	97,926
153	0,0478	677	70,640	193	0,0709	524	135,293
154	0,0332	395	84,058	194	0,0558	666	83,816
155	0,0398	504	79,023	195	0,0459	468	98,167
156	0,0431	598	72,066	196	0,0466	824	56,547
157	0,0414	633	65,386	197	0,0328	751	43,657
158	0,0415	597	69,566	198	0,0456	731	62,380
159	0,0361	632	57,092	199	0,1506	743	202,635
160	0,0435	479	90,775	200	0,0344	744	46,215
161	0,0396	425	93,121	201	0,0437	700	62,463
162	0,0479	561	85,406	202	0,0651	674	96,592
163	0,0433	588	73,599	203	0,0422	735	57,444
164	0,0423	591	71,596	204	0,0467	696	67,111
165	0,0421	644	65,326	205	0,0987	727	135,846
166	0,0505	569	88,756	206	0,0421	635	66,340
167	0,0737	635	116,071	207	0,0959	635	151,114
168	0,0359	600	59,834	208	0,0477	541	88,229
169	0,0377	689	54,749	209	0,029	671	43,230
170	0,0899	658	136,552	210	0,0503	612	82,237
171	0,0376	668	56,294	211	0,0373	638	58,489
172	0,0412	623	66,155	212	0,0619	732	84,551
173	0,0475	574	82,702	213	0,0477	685	69,648
174	0,0717	725	98,866	214	0,0294	703	41,840
175	0,0519	655	79,287	215	0,0581	620	93,757
176	0,0545	597	91,327	216	0,0347	717	48,367
177	0,0682	598	113,982	217	0,0763	700	108,933
178	0,0481	595	80,883	218	0,066	664	99,412
179	0,0409	608	67,270	219	0,0296	469	63,163
180	0,0498	648	76,906	220	0,0381	516	73,903

Medición	Voltaje [V]	Corriente [A]	Resistencia [$\mu\Omega$]
221	0,0362	771	46,949
222	0,0396	481	82,380
223	0,0505	567	89,071
224	0,0376	717	52,445
225	0,0491	664	73,965
226	0,0489	731	66,853
227	0,0365	724	50,383
228	0,0432	705	61,269
229	0,0439	761	57,704
230	0,0415	656	63,256
231	0,0569	623	91,400
232	0,0587	540	108,731
233	0,0604	605	99,829
234	0,0314	633	49,609
235	0,0301	735	40,958
236	0,056	683	82,047
237	0,0302	548	55,083
238	0,0353	652	54,178
239	0,0424	709	59,839
240	0,0347	665	52,187
241	0,0388	645	60,198
242	0,0541	631	85,770
243	0,049	707	69,285
244	0,0719	598	120,277
245	0,0334	761	43,901
246	0,0584	659	88,572
247	0,042	656	63,990
248	0,0527	643	81,922
249	0,0376	687	54,723
250	0,0663	624	106,171
251	0,049	667	73,492
252	0,0647	669	96,727
253	0,0941	671	140,334
254	0,0951	621	153,094
255	0,0478	594	80,412
256	0,0843	562	150,092
257	0,1108	745	148,629
258	0,17	696	244,114
259	0,0823	651	126,436
260	0,0386	524	73,706

