

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

Barra intercelda equipotencial de conectores
reemplazables para el proceso de electro-obtención de
cobre

por
Luis Gabriel Muñoz Quezada

Profesor guía
Eduardo Pieter Wiechmann Fernández

Concepción, Octubre de 2017

Tesis presentada a la

ESCUELA DE GRADUADOS
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



para optar al grado de
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
MENCION EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables para el proceso de electro- obtención de cobre

Luis Gabriel Muñoz Quezada

Becario Conicyt

Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano
Avanzado PAI de CONICYT N°7813110006



Una Tesis del
Departamento de Ingeniería Eléctrica

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

Octubre de 2017

© Luis Gabriel Muñoz Quezada, 2017

Resumen

Barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables para el proceso de electro-obtención de cobre

Luis Gabriel Muñoz Quezada, Doctor

Universidad de Concepción, 2017

El proceso de Electro-obtención (EW) se utiliza para obtener cobre de alta pureza mediante una reacción de óxido reducción, permitiendo el depósito de cobre en cátodos. Una operación eficiente del proceso de EW requiere ecualización de las corrientes catódicas, por esto uno de los indicadores clave del proceso es la dispersión de corrientes. Las barras intercelda distribuyen la corriente por celda y transfieren la corriente eléctrica de celda en celda, su desempeño depende del estado de sus contactos. Estos dispositivos experimentan fallas locales que deterioran progresivamente el desempeño de la barra, en particular la presencia de cortocircuitos metalúrgicos por tiempos prolongados recuecen sectores de la barra intercelda degradando los contactos involucrados, produciendo deformación mecánica y aumento de la resistencia de contacto conocida como falla local. La generación de calor local en los contactos de la barra afecta también a los contactos de los electrodos. Cuando estos electrodos dañados son cosechados y posicionados en otras celdas la falla local se “contagia” al resto de la nave. La operación con barras intercelda con fallas locales es una práctica común en la industria, debido al costo asociado al reemplazo de una barra intercelda.

En esta tesis se propone una tecnología de barras intercelda equipotencial de conectores reemplazables, que permita operar libre de fallas locales, con alta vida útil y buenos indicadores de desempeño. Para evaluar la hipótesis se utilizan modelos de parámetros concentrados y de elementos finitos. Los modelos fueron sintonizados con mediciones obtenidas en planta industrial de EW en Compañía Minera Zaldívar (AMSA).

La barra equipotencial de conectores reemplazables reduce la temperatura media de operación en 15°C, reduciendo el deterioro del cobre y la tasa de corrosión por acción de la neblina de ácido sulfúrico. Además, posee el atributo de hot-swappability, lo que permite reemplazar un conector dañado sin detener el proceso de depósito de cobre de las celdas involucradas, con tiempo de

reemplazo inferior a 10 minutos. Esto permite operar libre de hot-spots y mantener los indicadores clave del proceso dentro de valores nominales. Reduce el consumo específico de energía medio de 1.973kWh/Ton a 1.933kWh/Ton. La barra propuesta, presenta menor dispersión media de corrientes (17,2% versus 13,2%). Estas mejoras conllevan a menor ocurrencia de anomalías y mayor vida útil de la barra y de electrodos (desde 4 a 8 años). Finalmente, la barra propuesta reduce el costo de fabricación utilizando un 50% de cobre comparada con la convencional.





A mis padres y a mis Preciosas Paulina y Agustina

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo brindado durante mis años de estudio, a mi padre Luis y a quien me mira desde arriba mi madre Angélica, especialmente a mi esposa Paulina y nuestra hija Agustina, mis Preciosas, por su constante comprensión y apoyo en momentos difíciles, por siempre creer en mí y por darme alegrías cada día.

Agradecer también a mi supervisor de tesis Dr. Eduardo Wiechmann por la confianza y apoyo entregados durante todos estos años de estudio, tanto a nivel profesional como personal, permitiéndome ser parte de un grupo de investigación de alto nivel. Además, quiero agradecer al Dr. Guillermo Vidal, Dr. Sergio Sobarzo y Dr. Sebastián Godoy, por su disposición, dedicación y consejos.

Agradezco a quienes conforman el grupo de investigación por su constante apoyo y consejos Dr. Pablo Aqueveque, Dr. Aníbal Morales, Enrique Nusdel y en especial al Dr. Jorge Henríquez, quien fue mi compañero de doctorado y ha sido mi amigo durante estos años.

Finalmente. le agradezco a CONICYT por su apoyo económico para realizar mis estudios mediante su beca de doctorado nacional y al Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado PAI de CONICYT N°7813110006.

Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	VI
NOMENCLATURA.....	IX
ABREVIACIONES.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
1.3. OBJETIVOS	4
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.5. TEMARIO Y METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO 2. PROCESO DE ELECTRO-OBTENCIÓN DE COBRE	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. EL PROCESO DE ELECTRO-OBTENCIÓN DE COBRE	7
2.3. ANOMALÍAS PRODUCIDAS.....	10
2.4. INDICADORES CLAVE DE DESEMPEÑO (KPI'S) DEL PROCESO DE ELECTRO-OBTENCIÓN	13
2.5. COMPONENTES DE NAVE DE ELECTRO-OBTENCIÓN	14
2.6. CONCLUSIONES.....	21
CAPÍTULO 3. MODELACIÓN	22
3.1. INTRODUCCIÓN	22
3.2. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS	22
3.3. MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS	28
3.4. SINTONIZACIÓN DE MODELOS	30
3.5. CONCLUSIONES.....	31
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE BARRA EQUIPOTENCIAL DE CONTACTOS REEMPLAZABLES.....	32
4.1. INTRODUCCIÓN	32
4.2. EFECTOS DE DETERIORO DE LAS BARRAS INTERCELDA EQUIPOTENCIALES CONVENCIONALES	32
4.3. FACTORES DE ENVEJECIMIENTO Y DETERIORO DE BARRAS INTERCELDA.....	34
4.4. REEMPLAZO DE BARRAS INTERCELDA.....	39
4.5. DISEÑO PROPUESTO	41
4.6. CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA	45

4.7.	RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE SEGMENTO Y BARRA CONTINUA	48
4.8.	CONCLUSIONES	49
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....		51
5.1.	INTRODUCCIÓN	51
5.2.	DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES Y TEMPERATURA DE BARRAS INTERCELDA.....	51
5.3.	MANUFACTURA DE BARRA INTERCELDA	51
5.4.	MANTENCIÓN DE BARRA INTERCELDA	52
5.5.	EVOLUCIÓN DE DISPERSIÓN DE CORRIENTES	53
5.6.	REDUCCIÓN DE POTENCIA CONSUMIDA	55
5.7.	REDUCCIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE OPERACIÓN	56
5.8.	CONCLUSIONES	57
CAPÍTULO 6. CONCLUSIÓN.....		59
6.1.	CONCLUSIÓN	59
6.2.	TRABAJOS FUTUROS	60
CAPÍTULO 7. PUBLICACIONES		61
7.1.	PUBLICACIONES ISI (5)	61
7.2.	CONFERENCIAS (6).....	62
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....		63
ANEXO A:	RESISTENCIAS DE ELECTROLITO	66
ANEXO B:	RESISTENCIAS DE CONTACTO	68
ANEXO C:	CÁMARA FLUKE TI-55.....	72

Nomenclatura

Escalares

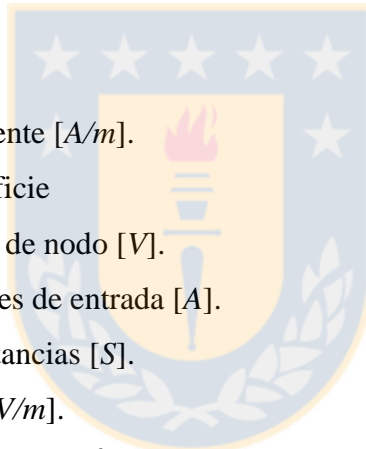
v_c	:	caída de voltaje medida entre el busbar una celda y la celda siguiente [V].
J_k	:	densidad de corriente en el cátodo [A/m].
\bar{j}	:	densidad de corriente media [A/m]
η	:	eficiencia de corriente [%].
m_t	:	masa teórica de acuerdo a la ley de Faraday [g].
m_{real}	:	masa real cosechada [g]
q	:	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_{barra}	:	resistencia de un segmento de cobre (o equivalente) [Ω].
σ_{bulk}	:	conductividad del cobre de un segmento (o equivalente) [S/m].
$l_{distancia}$:	largo de línea de corriente [m].
S	:	área de la línea de corriente [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: $8,314472 [J/(K \cdot mol)]$
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 [$s \cdot mol/s$].
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

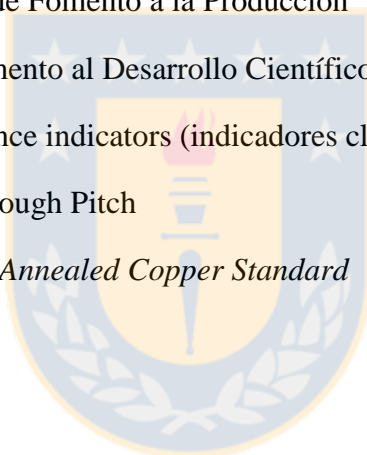
Vectoriales

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 [$mol/(m^2s)$].
u	:	vector de velocidad [m/s].



Abreviaciones

LX	:	proceso de lixiviación del cobre.
PIB	:	Producto Interno Bruto
SX	:	proceso de extracción por solventes.
EW	:	electro-obtención o electrowining del cobre
ER	:	Electro-refinación
FC	.	Fuente de corriente
FV	:	Fuente de voltaje
CORFO	:	Corporación de Fomento a la Producción
FONDEF	:	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico
KPI	:	key performance indicators (indicadores claves de rendimiento)
ETP	:	Electrolytic Tough Pitch
IACS	:	<i>International Annealed Copper Standard</i>



Índice de Figuras

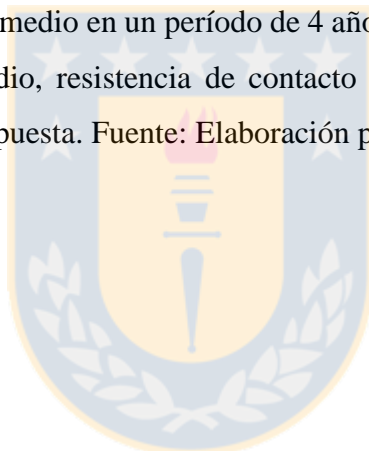
Figura 1.1 Leyes históricas de las minas en Chile. Extraído de [2].	2
Figura 1.2 Ejemplo de daño en hanger-bar de electrodos. Fuente: Elaboración propia.	3
Figura 2.1 Reacción química para depósito de cobre. Fuente: Elaboración propia.	8
Figura 2.2 Cátodo con cortocircuito metalúrgico (COCI). Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 2.3 Cátodo blanco (sin depósito de cobre), por CIAB. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 2.4 Cátodo con Nodulación excesiva debido a CIAB vecino. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 2.5 Rectificador Doble Puente Graetz de 12 pulsos. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 2.6 Celda de electro-obtención en proceso de reparación. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 2.7 Vista de barra intercelda equipotencial convencional tipo Dogbone. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 2.8 Electrodo; (a) Ánodo permanente de plomo; (b) Cátodo permanente de acero inoxidable. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 2.9 Conexión intercelda Convencional. Extraído de [19].	18
Figura 2.10 Barra intercelda convencional de configuración central con sección triangular. Se aprecia la ausencia de capping board. Modificada de [16].	19
Figura 2.11 Barra intercelda convencional de configuración dogbone. Se aprecia la presencia de capping board. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 2.12 Ejemplo de ánodos; (a) Ánodo asimétrico, (b) Ánodo simétrico. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 3.1 Modelo eléctrico de celda básica; (a) Modelo que considera todos los elementos que tienen caída de tensión, (b) Modelo simplificado de celda de EW. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 3.2 Modelo eléctrico de una celda de EW con 3 cátodos y 4 ánodos. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 3.3 Distribución de Resistencias de Contacto Catódicas medidas en industria. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.	25
Figura 3.4 Distribución de Resistencias de Electrolito medidas en industria. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.	26
Figura 3.5 Modelo resistivo de barra intercelda convencional. Modificada de [34]	27
Figura 3.6 Modelación eléctrica con elementos finitos de barra intercelda convencional. Fuente:	

Elaboración propia.	29
Figura 4.1 Termografía de barras intercelda equipotencial convencionales; (a) Barra equipotencial convencional nueva; (b) Barra equipotencial convencional con 4 años de antigüedad. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 4.2 Consumo específico de energía versus densidad de corriente catódica, (azul) Barra equipotencial convencional nueva; (naranja) Barra equipotencial convencional con 4 años de antigüedad. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 4.3 Ejemplo de capping boards; a) Sección nueva de capping board, b) Sección de capping deteriorada (quemada). Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 4.4 Ejemplo de contacto con sobre-temperatura. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 4.5 (a) Segmento de barra convencional dogbone al principio de su vida útil; (b) Segmento de barra convencional dogbone después de 4 años en servicio, se aprecian los efectos de la corrosión y deformación mecánica. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 4.6 Diagrama de densidad de disipación de potencia y perfil de temperatura para conector de barra intercelda convencional tipo dogbone; (a) Se aprecia mayor disipación de potencia en los bordes del conector; (b) temperatura de operación de conector dogbone. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 4.7 Vista superior de daños mecánicos de área de contacto de electrodos; (a) Conector sin daño mecánico; (b) Conector con deformación mecánica. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 4.8 Instalación de Marco Cortocircuitador. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 4.9 Preparación de celdas para reemplazo de barra intercelda. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 4.10 Barras equipotencial tipo Dogbone para el proceso de electro-obtención de cobre; (a) Barra convencional; (b) Barra de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 4.11 Vista de desarme de barras equipotencial tipo Dogbone para el proceso de electro-obtención de cobre; (a) Barra convencional; (b) Barra de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 4.12 Barra equipotencial con conectores reemplazables propuesta. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4.13 Diagrama de disipación total de potencia para conector en forma de “S”. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4.14 Modelo resistivo de barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.	46

Figura 4.15 Esquema de conexión de barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 4.16 Circuito de prueba para determinación de resistencia de contacto; (a) Vista superior; (b) Vista de zona de contacto. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 4.17 Curva de Corriente versus Voltaje de resistencia de contacto entre segmento y barra continua inferior. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 5.1 Manufactura de segmento conector, (a) Barra de sección rectangular estándar; (b) Segmento conector en forma de “S” doblado; (c) Segmento conector en forma de “S” doblado y fresado. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 5.2 Limpieza de contacto realizada con hidrolavadora. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 5.3 Secuencia de maniobra de reemplazo de un conector con falla local, (a) Desplazamiento lateral de electrodos afectados; (b) Extracción de segmento con falla local; y (c) Instalación de nuevo segmento conector y desplazamiento de electrodos a su posición original. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 5.4 Proyección de 4 años de dispersión de corrientes catódicas (rojo) barra equipotencial convencional, (verde) barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 5.5 Diagrama de densidad total de potencia disipada para (a) conector de barra equipotencial convencional y (b) conector de barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 5.6 Perfil de temperatura de barra intercelda, barra equipotencial convencional al principio de operación 45°C (a) y con 4 años de antigüedad 72°C (b), barra equipotencial de conectores reemplazables al principio de operación 42°C (c) y con 4 años de antigüedad 45°C (d). Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 5.7 Tasa de corrosión de cobre C11000 en función de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.....	57

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Variación promedio de eficiencia de energía y corriente, tasa de contactos dañados por año, para barra intercelda convencional tipo dogbone. Fuente: Elaboración propia.	13
Tabla 3.1 Resumen de Mediciones de Resistencia de Contacto. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.	25
Tabla 3.2 Resumen de Mediciones de Resistencia de Electrolito. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.	26
Tabla 3.3 Propiedades Físicas de cobre ETP C11000 @ 20°C. Modificada de [28].	28
Tabla 4.1 Valores de corriente y voltaje medidos de resistencia de contacto entre segmento en forma de “S” y barra continua de cobre inferior y resistencia calculada. Fuente: Elaboración propia.	48
Tabla 5.1 Resumen de valores promedio en un período de 4 años de desviación estándar de corriente, temperatura de operación promedio, resistencia de contacto de cátodo promedio y pérdidas para configuración convencional y propuesta. Fuente: Elaboración propia.	58



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La minería representa el 11,9% del PIB de Chile, donde el 10,7% corresponde a la minería del cobre [1]. La minería en Chile concentra el 56,8% de las exportaciones del año 2015, siendo la minería del cobre responsable del 49,5% de ellas. A nivel mundial se producen 18,52 millones de toneladas de cobre refinado, donde Chile aporta con 5,75 millones de toneladas, equivalente al 31,1% [1].

Para obtener cobre de alta pureza (99,99%) se utilizan los procesos de Electro-refinación (ER) y Electro-obtención (EW). La selección de uno u otro método depende de la composición de los minerales de cobre (sulfuros u óxidos). En sulfuros se utiliza el proceso de ER y en óxidos el de EW [4]. En menor escala se utiliza la biolixiviación de sulfuros para EW.

La producción de cobre electro-obtenido se realiza mediante el proceso hidrometalúrgico de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención (LX-SX-EW). Una planta de EW de tamaño medio produce 160.000 toneladas de cátodos de cobre por año. Este proceso utiliza 26.000 cátodos permanentes divididos en 4 circuitos eléctricos de 100 celdas cada uno. Se utilizan rectificadores de altas corrientes de 50kA para energizar cada uno de los circuitos. Con esto se obtiene una densidad de corriente de 330A/m² por cada una de las caras en los 65 cátodos de cada celda. El consumo específico de energía promedia 2.000kWh/ton [4]-[12].

En general, en las operaciones mineras de más de 10 años de operación disminuye la ley de los minerales. En específico, la ley del cobre se ha reducido desde 1% en el año 2004 hasta 0,7% el año 2014 [2] (ver Figura 1.1). Consecuentemente, para mantener su nivel productivo las empresas deben aumentar el procesamiento de mineral lo que impacta en el consumo energético y la huella de CO₂ [15]. Por lo tanto, el desafío es mantener la productividad lo que requiere controlar los costos de producción. Como la energía es un costo relevante, el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica es prioritario. En donde, la modulación de corrientes en el proceso puede aportar. Esto es, aumentar la corriente de día y disminuirla de noche. Las barras intercelda deben ayudar a la modulación.

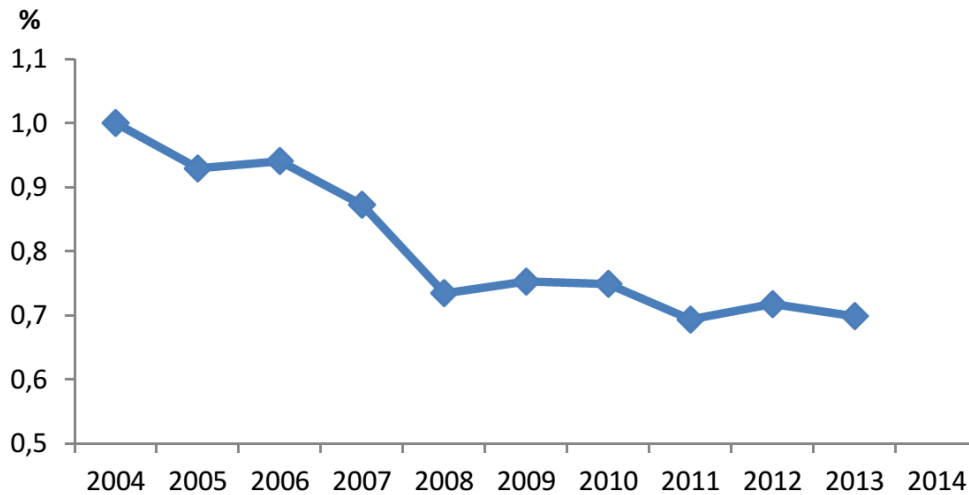


Figura 1.1 Leyes históricos de las minas en Chile. Extraído de [2].

La operación convencional de una nave de EW conlleva el tráfico de personal en su interior. La neblina ácida y el tránsito de cargas en suspensión ponen en riesgo la seguridad de los trabajadores. Además, el tránsito de operadores produce desplazamientos de los electrodos incentivando la ocurrencia de anomalías en el proceso. Por lo anterior, la tendencia de las plantas EW de cobre es la automatización total del proceso. En este contexto, los objetivos de desempeño son la tasa de accidentabilidad, la eficiencia energética y el nivel de producción [4]. Por lo tanto, las tecnologías integradas al proceso, entre ellas las barras intercelda, deben asegurar la calidad del cátodo depositado y los KPI del proceso.

Una operación eficiente del proceso de EW requiere ecualización de corrientes catódicas [4]-[13]. Entre otras tecnologías, las barras intercelda pueden ser utilizadas para cumplir con este requisito. Por lo tanto, las barras intercelda deben distribuir una corriente DC balanceada a cada uno de los ánodos de cada celda. Actualmente, existen dos tecnologías para el diseño de estas barras: Fuente de Corriente (FC) y Fuente de Voltaje (FV). Las pruebas industriales [8], muestran que la tecnología FC presenta mejor desempeño. Por otro lado, la tecnología de barras intercelda equipotenciales (FV) es ampliamente conocida y utilizada por los operadores del proceso de EW a nivel mundial. Por lo tanto, un desafío es desarrollar tecnologías en barras FV que compitan con la tecnología FC.

1.1.1. Problemática existente

Durante su vida útil, las barras intercelda están expuestas a deformación mecánica de sus contactos. Esta deformación se debe al impacto de los cátodos contra la barra intercelda durante la carga de los electrodos al comenzar el ciclo del proceso. De acuerdo a datos industriales, la tasa media de contactos dañados es de 13 contactos por barra-año. En terreno este fenómeno recibe el nombre de “falla local”. La presencia de una falla local afecta la ecualización de corrientes catódicas y provoca aumento en la temperatura en el contacto afectado. Esto compromete la barra y al hanger-bar respectivo (Figura 1.2). Las fallas locales, producen altas temperaturas que recuecen el cobre dejándolo propenso a deformarse, afectando a la barra y los hanger-bars de electrodo. Los hanger-bars afectados, son posteriormente depositados en otras celdas donde producen nuevos contactos deficientes. Estos contactos deficientes generarán nuevas fallas locales. Por lo tanto, las fallas locales resultan en un proceso de deterioro vicioso y contagioso.



Figura 1.2 Ejemplo de daño en hanger-bar de electrodos. Fuente: Elaboración propia.

La operación con fallas locales es tolerada debido al alto costo de reemplazo de una barra intercelda. El reemplazo de una barra intercelda es un proceso con grandes tiempos asociados. Para llevar a cabo esta operación es necesario redirigir la corriente de la celda utilizando un marco cortocircuitador de 20 toneladas. La operación requiere: reducir la corriente del proceso desde 50kA a 0,5kA, conectar el marco cortocircuitador a las celdas que se desean dejar fuera de operación, subir

la corriente del proceso, extraer el electrolito de las celdas, retirar todos los electrodos de las celdas (típicamente 262 electrodos), remover la barras intercelda deteriorada e instalar una barra intercelda nueva. Luego se realiza la secuencia inversa hasta poner en funcionamiento la barra instalada. Este proceso puede durar hasta 8 horas comprometiendo el itinerario de la operación, afecta la producción de cobre, disminuye la disponibilidad de personal calificado y aumenta los costos [12]. La operación de barras con presencia de fallas locales compromete severamente la productividad, sin embargo es una práctica industrial común. Por lo tanto, las barras son reemplazadas cuando su operación resulta impracticable. Esto ocurre aproximadamente cada 4 años [11]-[13].

1.1.2. Aporte de la tesis

En la Universidad de Concepción se ha investigado en tecnologías de barras intercelda segmentadas enfocadas en reducir el consumo energético y aumentar su confiabilidad. En este ámbito se efectuaron proyectos de investigación financiados por CORFO Programa I+D Aplicada Línea 2 N°11DL10819 “Tecnología CBF para Reducir el Consumo de Energía en Electroobtención de Cobre”, por Programa IdeA de FONDEF CONICYT N°2012CA12i10186 “Desarrollo de Barras Intercelda Moduladoras de Corriente (BMC) para Electroobtención de Cobre” y por CORFO 15ITE2-46304 [11]-[13]. Esta tesis aporta a esta línea de investigación con una tecnología de barras intercelda equipotencial de conectores reemplazables que permita operar libre de fallas locales, con alta durabilidad y confiabilidad. Para evaluarla se utilizan modelos de parámetros concentrados y de elementos finitos. Los modelos están sintonizados con datos industriales.

1.2. Hipótesis de Trabajo

Es posible diseñar una barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables que permita: (i) despejar una falla local sin detener el proceso; (ii) operar libre de fallas locales y (iii) mantener la eficiencia de la barra cerca del valor nominal durante su vida útil.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables para ser utilizada en el proceso de electro-obtención de cobre, para operar libre de fallas local al permitir el reemplazar

conectores sin detener el proceso.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Generar modelos eléctrico y térmico de las barra intercelda integrando los factores que producen deterioro de barras intercelda.
- Despejar una falla local sin detener el proceso.
- Reducir los tiempos de despeje de fallas locales.
- Mantener los indicadores clave del proceso de electro-obtención (KPI) cercanos al valor nominal durante la vida útil de las barras intercelda.

1.4. Alcances y Limitaciones

La tesis considera simulación y se realizó en las plataformas Matlab y COMSOL Multiphysics.

1.5. Temario y Metodología

1.5.1. Temario

El Capítulo 1, detalla la hipótesis y objetivos de la tesis.

El Capítulo dos, describe el proceso de electro-obtención de cobre, sus indicadores clave de desempeño y los principales componentes utilizados en el proceso.

El Capítulo 3, detalla la modelación del proceso de electro-obtención y de barras intercelda. Se describen dos modelos: el primero corresponde a un modelo de parámetros concentrados basado en un modelo eléctrico del proceso el que se lleva a cabo en plataforma Matlab. El segundo, corresponde a un modelo 3D de Elementos Finitos específico de la barra intercelda.

El Capítulo 4, muestra el diseño de una barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables. Además, estudia las causas de deterioro de las barras equipotenciales convencionales, utilizando muestras industriales y simulación de Elementos Finitos.

El Capítulo 5, muestra los resultados de evaluación del diseño propuesto en el Capítulo 4 contrastado con la barra equipotencial convencional. La evaluación considera distintos escenarios de operación, utilizando simulación de distribución de corrientes y de perfil de temperatura.

El Capítulo 6 corresponde a las conclusiones del trabajo de tesis y futuras líneas de trabajo que

se desprenden de la investigación.

El Capítulo 7, lista las publicaciones de indexación ISI y de congreso relacionadas con el trabajo de tesis.

El Capítulo 8 corresponde a la bibliografía utilizada en esta tesis.

1.5.2. Metodología

El trabajo de esta tesis contempla desarrollo teórico de las causas del deterioro de las barras intercelda del proceso de EW, apoyado con simulación del proceso mediante parámetros concentrados y elementos finitos. Las simulaciones se sintonizaron con datos de operación industrial obtenidos en Compañía Minera Zaldívar. Los datos comprenden información de los KPI de operación de barras de tecnología convencional y de eventos presentados. El desarrollo de este proyecto de tesis comprende:

- Búsqueda de bibliografía para conocer el estado del arte del proceso de EW de cobre y en particular de barras intercelda.
- Diseño conceptual de barras intercelda de conectores reemplazables.
- Modelación y simulación de modelo de parámetros concentrados para el proceso de EW.
- Modelación y simulación en mediante elementos finitos en software COMSOL Multiphysics de modelo de parámetros distribuidos para el proceso de EW.
- Comprobación de la hipótesis mediante contrastación de resultados de modelación.

Capítulo 2. Proceso de Electro-obtención de Cobre

2.1. Introducción

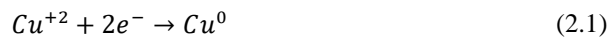
El proceso de Electro-obtención (EW) de cobre es un proceso electroquímico en el cual se tienen ánodos (positivo) y cátodos (negativo) sumergidos en un electrolito con cobre disuelto a una determinada concentración, por donde circula una corriente directa, proveniente de un rectificador. El cobre depositado en los cátodos, de acuerdo a la Ley de Faraday (Anexo C.1), es proporcional a la corriente circulante.

En la industria se lleva a cabo en naves de EW, las que comúnmente se encuentran divididas en 4 circuitos, con 100 celdas conectadas en serie en cada uno de ellos. En cada una de las celdas se depositan cerca de 65 cátodos y 66 ánodos. En este capítulo se describen los elementos de mayor interés del proceso de EW, los fenómenos de efecto nocivo para el proceso y las operaciones propias de una nave de EW.

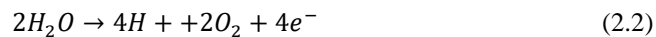
2.2. El proceso de Electro-obtención de cobre

El proceso de electro-obtención es un proceso electroquímico, en el cual, se hace circular una corriente entre ánodo-electrolito-cátodo, que permite una oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo (ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3)). En el cátodo se adhieren átomos de cobre provenientes del electrolito y en el ánodo se oxida agua [1], [16] y [17].

Reacción ánodo:



Reacción cátodo:



Reacción completa:

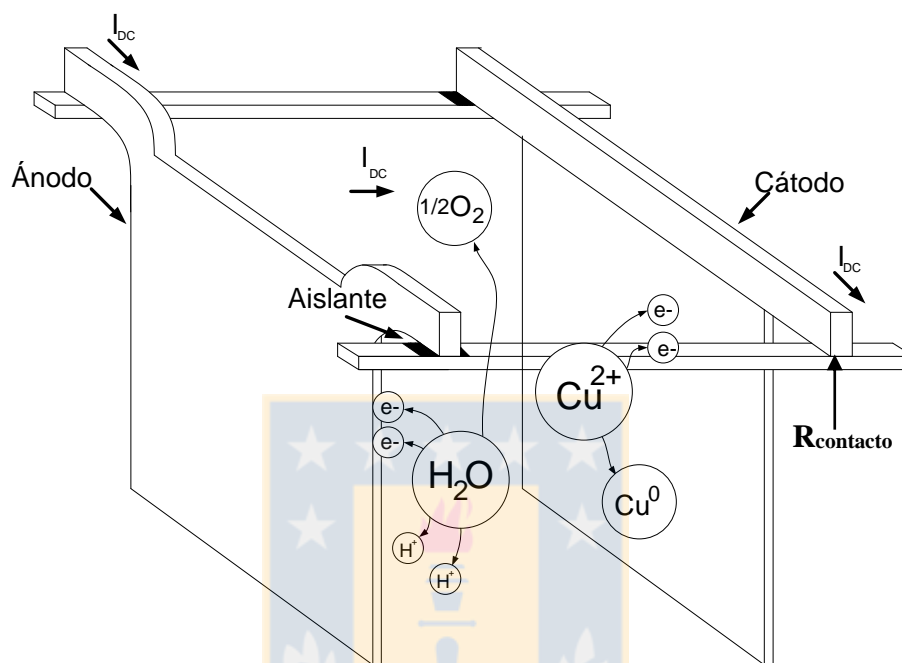
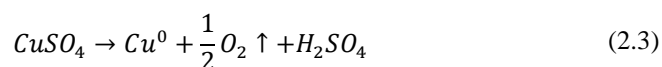


Figura 2.1 Reacción química para depósito de cobre. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2.1, se aprecia que la corriente dc fluye desde la barra intercelda, entra a la celda por el ánodo, sigue por el electrolito (llevando a cabo la reacción electroquímica), circula por el cátodo y finalmente sale de la celda fluyendo hacia la barra intercelda.

Los electrodos hacen contacto con la barra por simple descanso de ellos en esta última, por lo que se produce una resistencia [9], [12], [16]-[19]. El valor de la resistencia varía y depende del estado de las superficies que se conectan. Las resistencias de contacto influyen directamente en la distribución de corrientes [20]. Esto es de gran importancia para el proceso de EW, ya que una buena equalización de corrientes produce beneficio en el proceso, en aspectos tales como aumento de la calidad y uniformidad del producto, reducción de los costos de operación y aumento en el nivel de producción. Un alto desbalance de las densidades de corrientes catódicas incrementa el consumo específico de energía, disminuye el nivel de producción y afecta negativamente la calidad física y química de los cátodos de cobre [1], [8] y [19]. Naturalmente existe un punto de operación óptimo, que depende de la densidad de corriente catódica y de variables del electrolito, tales como:

concentración, temperatura y flujo [1], [16] y [18].

Las naves de EW utilizan un sistema de retro-alimentación de electrolito de las etapas previas de Lixiviación y Extracción por Solventes [1]. El sistema requiere un procedimiento de calentamiento de electrolito, extractores de aire para mitigar el nivel de neblina ácida (producida durante la reacción química de electro-depositación), grúas y máquinas de manejo de electrodos, barras intercelda, entre otros servicios en la instalación.

2.2.1. Lixiviación en pilas (LIX)

El mineral que proviene del chancado terciario es transportado mediante correas donde es curado, agregándose en esta etapa el 80% del ácido total requerido, y luego es apilado mediante equipos capaces de procesar un promedio de 60.000 toneladas/día de mineral. El apilado se realiza a través de capas de entre 9 y 11 metros de altura. Una vez ocurrida la lixiviación, la solución ácida generada es percolada a través de capas consecutivas desde la parte superior de la pila hasta su base. Cuando finaliza el ciclo de lixiviación de un paño, se descarga a través de una rotopala y el mineral se envía a botaderos o se apila nuevamente en el RAL según la ley de cobre que aún contenga.

El proceso de lixiviación dura entre 380 y 430 días según la disponibilidad de los equipos y la operación. Por último la solución rica que contiene el cobre disuelto, se recoge en canaletas en la base de la pila y fluye por pendiente natural hacia la piscina correspondiente, desde donde es enviada hasta la planta de extracción por solventes [1].

2.2.2. Extracción por Solventes (SX)

La planta de extracción por solventes (Solvent Extraction SX) permite que la solución acuosa obtenida de la lixiviación en pilas sea purificada y concentrada selectivamente, mediante reactivos líquidos de intercambio iónico. Esta solución acuosa está compuesta por agua, cobre disuelto, ácido sulfúrico residual del proceso de lixiviación y otros minerales en solución, incluyendo hierro. Los reactivos utilizados en la separación del cobre no son solubles en agua. Para esto, los reactivos se disuelven en kerosene. Esta mezcla es llamada solución orgánica.

El cobre contenido en la solución de lixiviación se mezcla con la solución orgánica en unidades especiales, que le permiten reaccionar con el reactivo de intercambio iónico. Producto de la mezcla anterior, el cobre es retenido por el reactivo y las impurezas permanecen en la solución acuosa. Así, el cobre es retirado en forma selectiva de la solución de lixiviación por decantación en conjunto con

la solución orgánica.

Posteriormente para que el cobre sea retirado de la solución orgánica, se le hace entrar en contacto con una solución de ácido sulfúrico de 170 gramos/litro. De esta manera la mayor acidez de la nueva solución, invierte la reacción anterior y el cobre es transferido una vez más a una solución acuosa, de la cual es extraído por electrólisis. Por lo tanto la planta de extracción por solventes, permite que el cobre sea transferido desde la solución rica impura a una solución purificada de grado adecuado para la electro-obtención. Finalmente, mediante el uso de mezcladores y decantadores, se recuperan aproximadamente el 90% del cobre de la solución rica de lixiviación, mientras que el 10% del cobre restante es reciclado a la lixiviación en pilas en el refino [1].

2.3. Anomalías producidas

El contacto de los electrodos con la barra intercelda se realiza simplemente al descansar los electrodos en el conector de la barra intercelda. Esto hace a la resistencia de contacto dependiente de la posición, geometría y peso del electrodo. Lo anterior influye directamente en la ecualización de corrientes pudiendo afectar la cantidad y calidad del cobre obtenido. Los fenómenos más comunes corresponden a: Cortocircuito metalúrgico, contacto abierto y contacto deficiente.

2.3.1. Cortocircuito Metalúrgico (COCI)

El COCI se genera por un depósito de cobre anormal en una pequeña área del cátodo. La Figura 2.2 muestra un electrodo afectado por un cortocircuito. Esto reduce la distancia entre par ánodo-cátodo y así la resistencia de electrolito también se reduce. Consecuentemente, la corriente es libre de circular a través de esta pequeña zona, produciendo calor excesivo y deterioro de electrodos y barras intercelda.. Finalmente, los COCI's se caracterizan por "extraer" las corrientes de los electrodos vecinos. La corriente en este caso puede aumentar hasta un 300% por sobre su valor nominal [19].



Figura 2.2 Cátodo con cortocircuito metalúrgico (COCI). Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.3 Cátodo blanco (sin depósito de cobre), por CIAB. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.4 Cátodo con Nodulación excesiva debido a CIAB vecino. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Circuito Abierto (CIAB)

Esta anomalía se produce por la ausencia de contacto eléctrico entre el hanger bar del electrodo y la barra intercelda. Esto conlleva a que no exista flujo de corriente a través del cátodo o ánodo, lo que resulta en cátodos sin depósito de cobre conocidos como “blanks” [9][10] (ver Figura 2.3). El CIAB aumenta la corriente en los electrodos vecinos al afectado provocando nodulación: La Figura 2.4, muestra ejemplo de cátodo cosechado con nodulación.

2.3.3. Falla local

Esta anomalía se genera por la deformación mecánica de los conectores de las barras intercelda y/o de los electrodos en el proceso. Esto ocurre por el impacto de los electrodos durante la cosecha. En este procedimiento, los cátodos son depositados en la celda utilizando un puente grúa, siendo liberados a una distancia de aproximadamente 1 pulgada, con el fin de asegurar contacto eléctrico de ellos con la barra intercelda.

Las fallas locales impiden la correcta circulación de corriente por los electrodos, ya que la deformación mecánica conlleva a aumento de la resistencia de contacto entre hanger bar de un electrodo [12][13]. Esto influye en el depósito de cobre, aumentando las pérdidas ($I^2 \cdot R_c$) y el calor producido. Este es un proceso vicioso que deteriora progresivamente el desempeño de las barras intercelda. Al deformarse el conector aumenta la temperatura de una sección de la barra intercelda,

recociendo el cobre haciéndolo propenso a deformación. Esto se traduce en operación con bajos KPI's, resultando en el reemplazo de la barra después de 4 años de servicio [10]-[13]. Datos industriales muestran que el consumo específico promedio aumenta a una tasa de 1,1% por año (ver Tabla 2.1)

TABLA 2.1 VARIACIÓN PROMEDIO DE EFICIENCIA DE ENERGÍA Y CORRIENTE, TASA DE CONTACTOS DAÑADOS POR AÑO, PARA BARRA INTERCELDA CONVENCIONAL TIPO DOGBONE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Parámetro	Barra intercelda convencional
Aumento promedio de consumo específico	1,1% / año
Aumento promedio de desviación de corrientes	16,5% / año
Tasa promedio de contactos deteriorados	13 contactos/año

2.4. Indicadores Clave de Desempeño (KPI's) del proceso de Electro-obtención

En el ámbito industrial, con el fin de evaluar y conocer el desempeño del proceso de EW, se utilizan típicamente los siguientes indicadores.

2.4.1. Dispersión de corriente

El índice de dispersión de corrientes es la relación que existe entre la desviación estándar y el promedio de la corriente (Ecuación (2.4)). Este índice toma valor 0 cuando las corriente a través de la celda son igual al valor medio. Esto asegura depósito de cobre homogéneo en los electrodos [1], [8]-[13].

$$DV_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (i_k - \bar{i})^2}{N}}}{\frac{\sum_{k=1}^N i_k}{N}} \quad (2.4)$$

2.4.2. Eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente es un factor que determina el porcentaje de aprovechamiento de la corriente en el proceso. Esto se define como la relación entre el peso obtenido en una cosecha determinada y el peso teórico que se debiese obtener de esa cosecha. Esta relación está directamente

afectada por la dispersión de corriente que existe en una celda o un grupo de celdas (Ecuación (2.5)). Típicamente las plantas de electro-obtención tienen una eficiencia de corriente de 91% [1].

$$\eta = \frac{m_{real}}{m_{teórico}} \quad (2.5)$$

2.4.3. Consumo específico

El consumo específico se define como la cantidad de energía utilizada en el proceso para producir una tonelada de cobre (Ecuación (2.6)). En este caso la energía se mide en kilo-Watts-hora por tonelada. Puede ser expresado en términos del voltaje medio de celda, la eficiencia de corriente y la constante electroquímica equivalente del cobre ($k = 1,18576 \cdot \frac{10^{-3}Ton}{kA} - h$) [1], [16].

$$w = \frac{\text{consumo de energía por ciclo}}{\text{producción de cobre por ciclo}} = \frac{v_{celda} (kWh)}{k \cdot \eta \left(\frac{Ton}{kA} \right)} \quad (2.6)$$

2.5. Componentes de Nave de Electro-obtención

2.5.1. Rectificador de altas corrientes

Para la realización del proceso electroquímico de EW, es necesario el uso de corriente continua, la cual se obtiene desde un rectificador controlado de altas corrientes. Para cada nave de EW se utilizan dos rectificadores controlados de 12 pulsos. Comúnmente, está compuesto por dos rectificadores de 6 pulsos conectados mediante un reactor de interfase (ver Figura 2.5). Cada uno de ellos entrega 25 [kA]. Finalmente, el rectificador provee 50 [kA] hacia la carga con un voltaje cercano a los 250 [V].

2.5.2. Celdas Electrolíticas

Las celdas electrolíticas, son básicamente el recipiente en el cual se realiza el proceso de electrólisis. Se encuentran construidas de concreto polimérico resistente al ácido. En ellas se encuentra el electrolito y los electrodos suspendidos. Comúnmente, cada una de ellas mide cerca de 1,5[m] de ancho, 7,0[m] de largo y 1,5[m] de profundidad, conteniendo 65 cátodos y 66 ánodos. En sus paredes

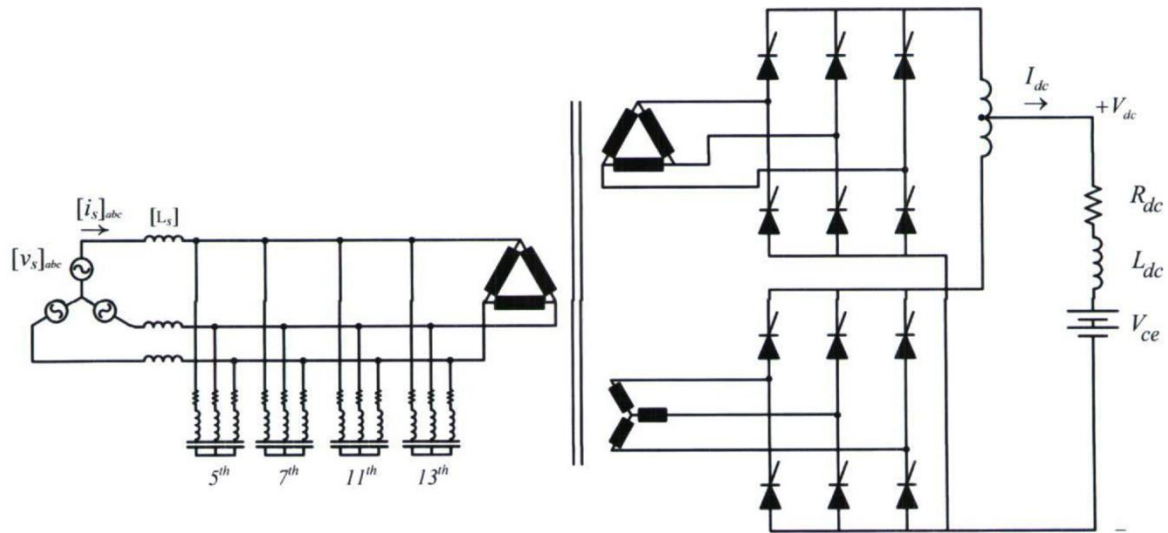


Figura 2.5 Rectificador Doble Punte Graetz de 12 pulsos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.6 Celda de electro-obtención en proceso de reparación. Fuente: Elaboración propia.

descansan las barras intercelda y el peso de todos los electrodos [8][12].

2.5.3. Electrolito

El electrolito utilizado en EW proviene desde los procesos de LX y SX. Esta solución es rica en cobre, el cual se encuentra en forma de sulfato de cobre ($CuSO_4$). La concentración de cobre en

este electrolito es de 45 [gpl] aproximadamente [1]. El electrolito es depositado dentro de las celdas

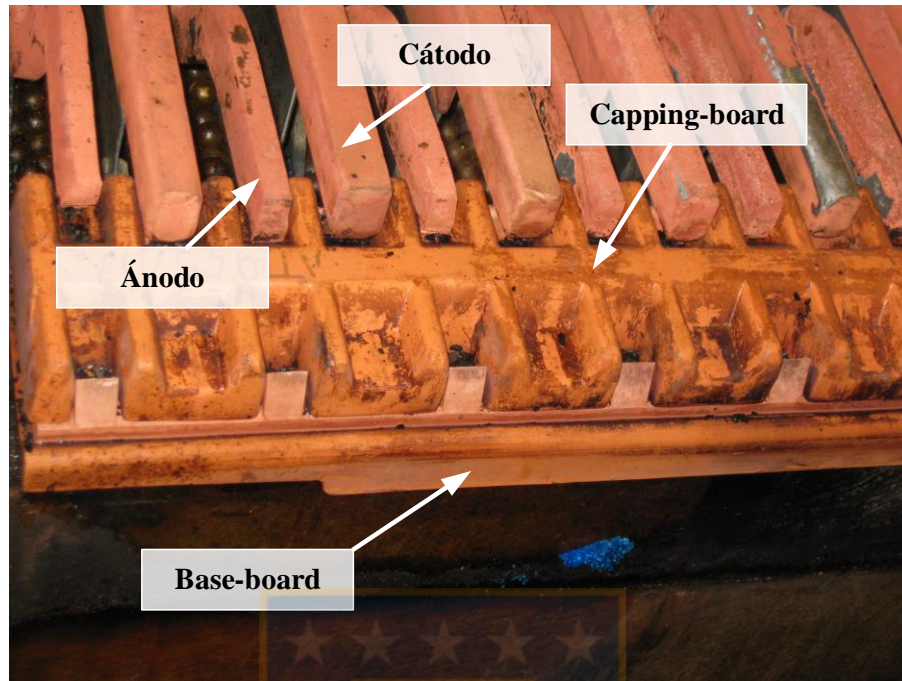


Figura 2.7 Vista de barra intercelda equipotencial convencional tipo Dogbone. Fuente: Elaboración propia.

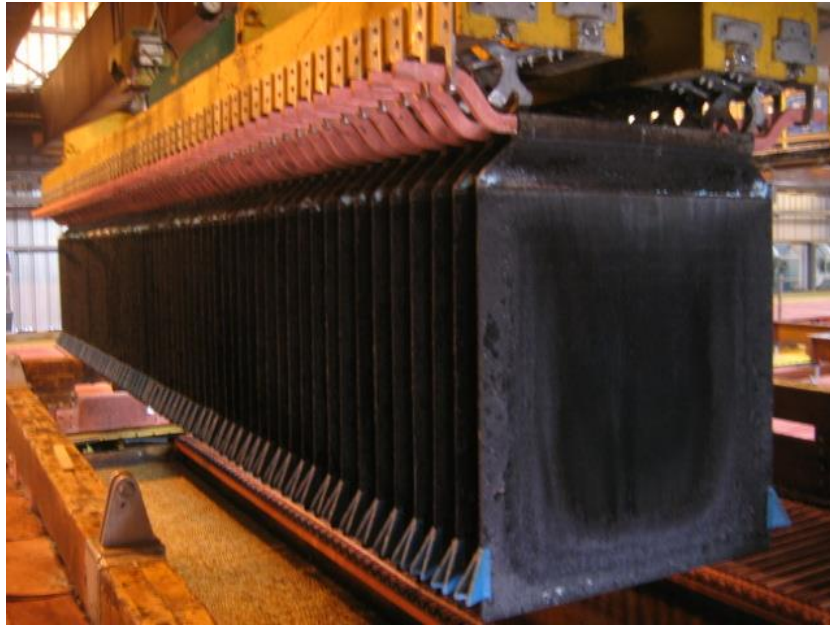
por medio de cañerías (manifold) ubicadas en el fondo de ellas y su salida ocurre por rebalse por uno de sus extremos. Durante el proceso de EW, se fuerza el paso de corriente dc entre ánodo-electrolito-cátodo, lo que permite que se deposite el cobre disuelto en el electrolito en las caras del cátodo [8][16].

2.5.4. Capping Board

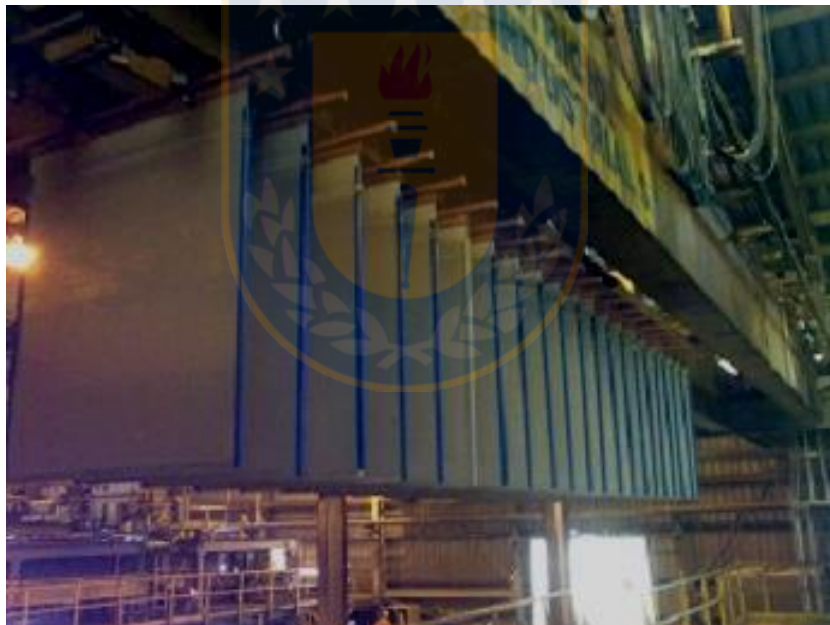
Los capping boards son elementos de concreto polimérico que se utilizan sobre la barra intercelda y cumplen la función de prestar la aislación necesaria entre los electrodos y la barra intercelda cuando corresponda. Además, se utilizan para posicionar y espaciar de manera correcta los electrodos lo que conlleva a una mejor distribución de corriente (Figura 2.7) [8]-[12].

2.5.5. Electrodo

En el proceso de EW el ánodo (Figura 2.8 (a)) es una placa insoluble construida de una aleación de plomo, calcio y estaño. Posee una vida útil de 5 años aproximadamente [13]-[19]. Los cátodos (Figura 2.8 (b)) son placas de acero inoxidable (316 o 316L) reutilizables llamados cátodos permanentes [16][20]. En estas placas ocurre el depósito de cobre en ambas caras. Comúnmente este



(a)



(b)

Figura 2.8 Electrodos; (a) Ánodo permanente de plomo; (b) Cátodo permanente de acero inoxidable. Fuente: Elaboración propia.

proceso toma 5 días. Luego se procede a despegar las placas de cobre con una máquina llamada Stripping Machine. Aquí, los cátodos son lavados, doblados, despegados y encerados para ser re-instalados en las celdas para comenzar un nuevo ciclo de EW.

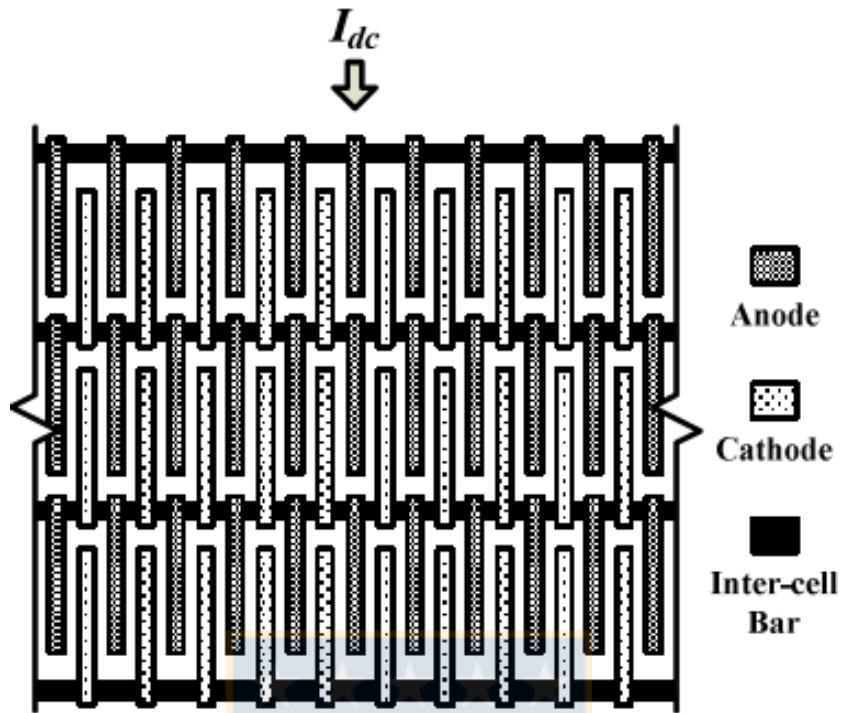


Figura 2.9 Conexión intercelda Convencional. Extraído de [19].

2.5.6. Barras intercelda

La tecnología de barras intercelda más conocida y ampliamente utilizada en el mundo corresponde a la conexión tipo Fuente de Voltaje (FV) [21]. Esta consiste en una barra equipotencial que conecta físicamente todos los ánodos de una celda con todos los cátodos de la celda siguiente estableciendo una conexión en serie de celdas (Figura 2.9). Esta topología conecta eléctricamente todos los cátodos de una celda (corriente salientes) con todos los ánodos de la siguiente celda (corrientes entrantes), produciendo una tensión común para todos sus ánodos (+) y una tensión común para todos sus cátodos (-) [18]. La distribución de corrientes dentro de una celda tiene una alta dependencia de las desviaciones de las resistencias de contacto y de electrolito. Además, la posición y separación de los electrodos también afectan la ecualización de corrientes. Finalmente, frente a la ocurrencia de cortocircuitos metalúrgicos la sobre-corriente puede alcanzar valores de hasta 300%, ya que toda la barra aporta con corriente [8][12][16].

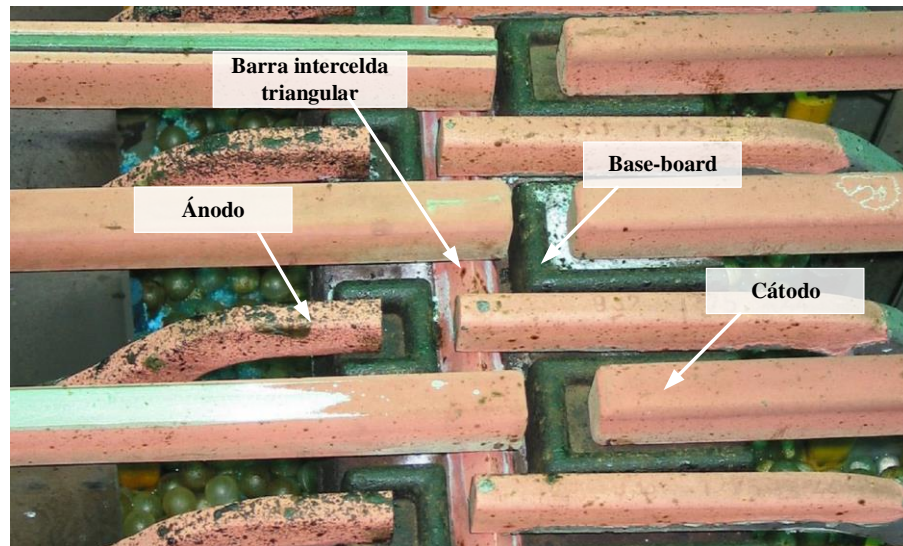


Figura 2.10 Barra intercelda convencional de configuración central con sección triangular. Se aprecia la ausencia de capping board. Modificada de [16].

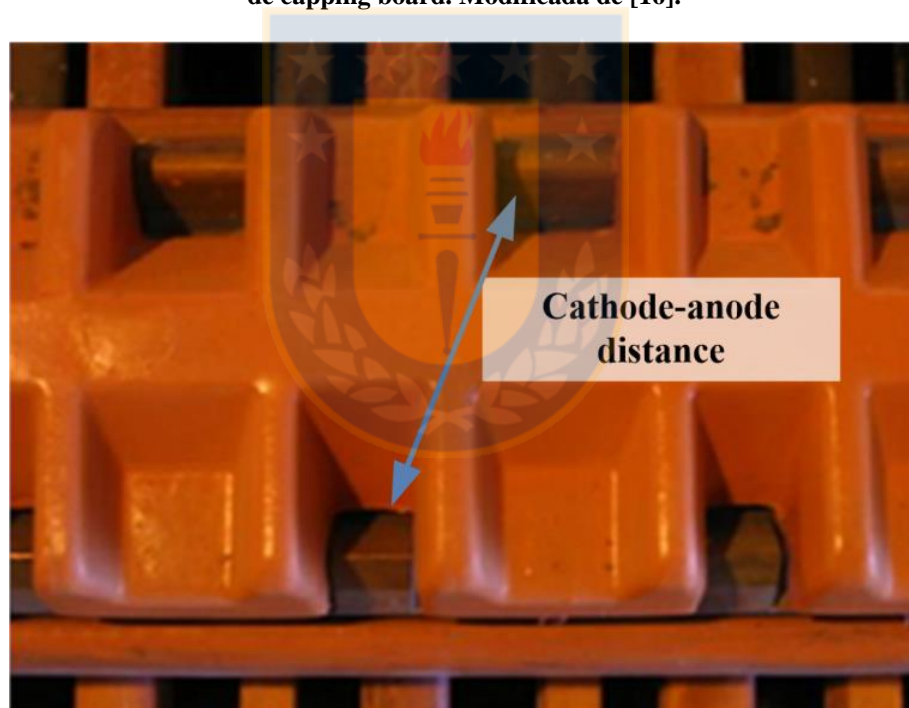


Figura 2.11 Barra intercelda convencional de configuración dogbone. Se aprecia la presencia de capping board. Fuente: Elaboración propia.

2.5.7. Configuración Central

La barra intercelda convencional de configuración central no utiliza capping board, lo que permite mejor ventilación (ver Figura 2.10). Sin embargo, los contactos de electrodos se encuentran

a corta distancia, lo que evita el enfriamiento y aumenta la temperatura de funcionamiento de la barra

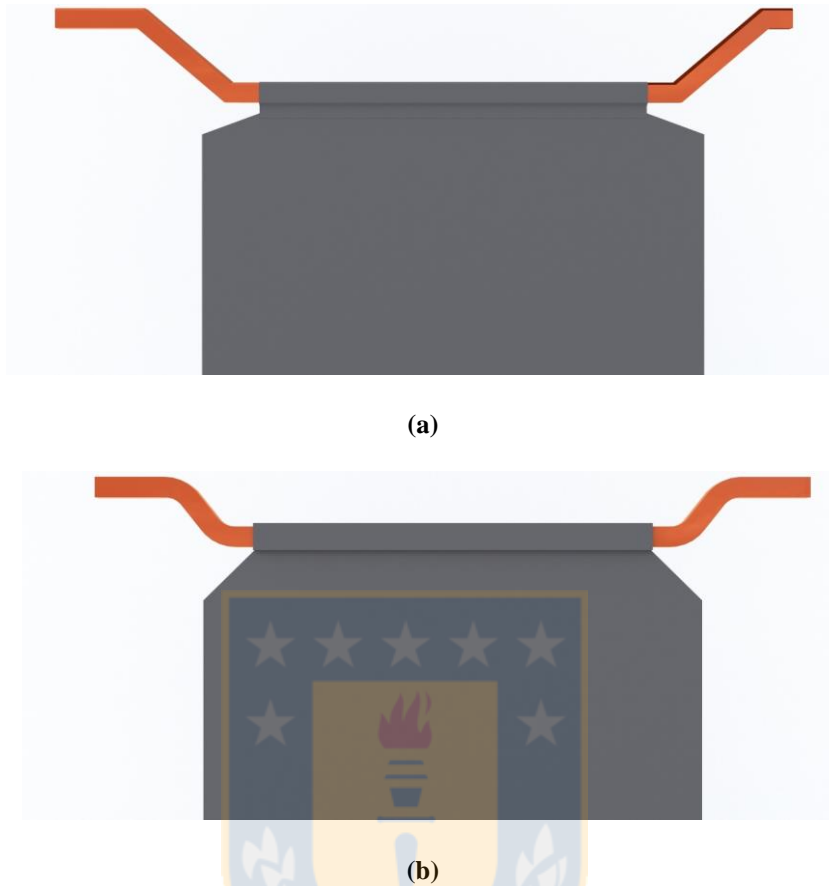


Figura 2.12 Ejemplo de ánodos; (a) Ánodo asimétrico, (b) Ánodo simétrico. Fuente: Elaboración propia.

intercelda. La distancia entre un contacto de cátodo de una celda y un contacto de ánodo de la celda siguiente es de sólo 2 pulgadas, proporcionando sólo 1 pulgada de barra expuesta a enfriamiento por convección de aire. Finalmente, esta configuración requiere hangers bars de electrodos asimétricos, los que son costosos y no se pueden girar en 180° para duplicar la vida útil del contacto (ver Figura 2.12 (a)).

2.5.8. Configuración Dogbone

La barra convencional de configuración Dogbone utiliza capping board (ver Figura 2.11). Esto reduce la ventilación por convección de la barra intercelda ya que actúan como aisladores térmicos [33]. A diferencia de la configuración central, la distancia entre un contacto de cátodo de una celda y un contacto de ánodo de la celda siguiente es 4 veces mayor (4 pulgadas). Finalmente, esta configuración utiliza electrodos simétricos que permiten su rotación en 180° doblando su vida útil

(ver Figura 2.12 (b)).

2.6. Conclusiones

La dispersión de corrientes catódicas, eficiencia de corrientes y consumo específico de energía, son indicadores de desempeño del proceso de EW. En particular, la dispersión de corrientes catódicas se relaciona con la homogeneidad del cobre depositado y la calidad de los cátodos electro-obtenidos. Las barras intercelda son las encargadas de distribuir las corrientes de una celda a otra. Por lo tanto, el nivel de deterioro de la barra influye en la ecualización de corrientes del proceso de EW.

Las barras equipotenciales de configuración central presentan mayor área expuesta a ventilación, sin embargo, poseen baja disipación de calor, debido a la cercanía que existe entre los puntos de contacto. Adicionalmente, estas barras requieren de electrodos asimétricos, los que tienen un costo elevado y no pueden ser rotados en 180° para alargar su vida útil. Por otro lado, la configuración dogbone no tiene ventilación, pues se encuentra encapsulada entre dos aisladores térmicos (baseboard y capping-board). La distancia entre puntos de conexión es mayor que en el caso de la central, por lo que potencialmente presenta mayor área de disipación de calor, pero se encuentra encapsulada. La barra tipo dogbone, permite el uso de electrodos simétricos, los que pueden ser rotados en 180°, aumentando su vida útil. Por lo tanto, es de interés eliminar el capping-board de esta configuración para aumentar la ventilación de la barra y reducir su temperatura de operación.

Los fenómenos de circuito abierto, corto-circuito metalúrgico y falla local, tienen efecto nocivo en el proceso de EW. En específico, las fallas locales aumentan el consumo específico promedio en 1,1% por año y la dispersión de corrientes en 16,5% por año, con una tasa promedio de 13 contactos/año deteriorados por barra. La falla local se propaga y deteriora progresivamente el desempeño de las barras intercelda hasta su reemplazo. Por lo tanto, es relevante eliminar las fallas locales de la barra intercelda.

Capítulo 3. Modelación

3.1. Introducción

Para evaluar el desempeño de las barras intercelda, se utilizan dos modelos distintos. El primero de ellos corresponde a un modelo de parámetros concentrados basado en un modelo eléctrico del proceso de EW, el que permite predecir el comportamiento de la distribución de corrientes catódicas del proceso. Estas corrientes son utilizadas como entradas en un segundo modelo que corresponde a un modelo 3D de Elementos Finitos, que permite determinar el comportamiento térmico de las distintas configuraciones de barras intercelda.

3.2. Modelo de parámetros concentrados

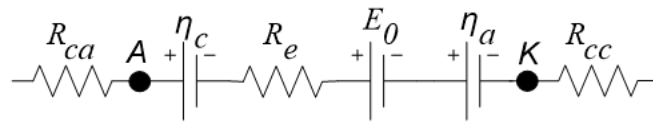
Para determinar un modelo eléctrico equivalente del proceso de EW, es necesario considerar todas las caídas de tensión que ocurren en los distintos elementos de una celda electrolítica.

3.2.1. Potenciales de reacción en celda de EW

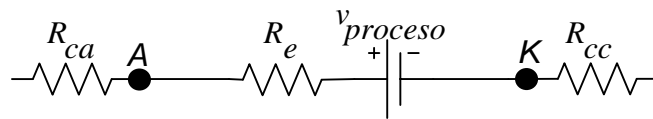
En el proceso de EW se fuerza a circular una corriente entre ánodo y cátodo. La corriente fluye desde un rectificador, pasa por la barra intercelda, seguidamente por el ánodo, luego por el electrolito (llevando a cabo la reacción electroquímica) y por último pasa por el cátodo volviendo a ingresar a la barra intercelda repitiendo todo el ciclo nuevamente, por lo que el voltaje de una celda queda determinado por la ecuación (3.1):

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

Donde v_c es el voltaje medio de celda, E_0 es el voltaje de reacción, η_c es el voltaje de polarización de cátodo-electrolito, η_a es el voltaje de polarización de ánodo-electrolito, v_e es el voltaje de la resistencia de electrolito, v_{cc} es el voltaje de la resistencia de contacto de cátodo y v_{ca} es el voltaje de la resistencia de ánodo. Estos voltajes son de tipo resistivo, con la excepción del voltaje de reacción. La Figura 3.1 muestra el modelo de voltajes de una celda simple. La Figura 3.2 muestra el modelo de voltajes generalizado para 3 cátodos y 4 ánodos.



(a)



(b)

Figura 3.1 Modelo eléctrico de celda básica; (a) Modelo que considera todos los elementos que tienen caída de tensión, (b) Modelo simplificado de celda de EW. Fuente: Elaboración propia.

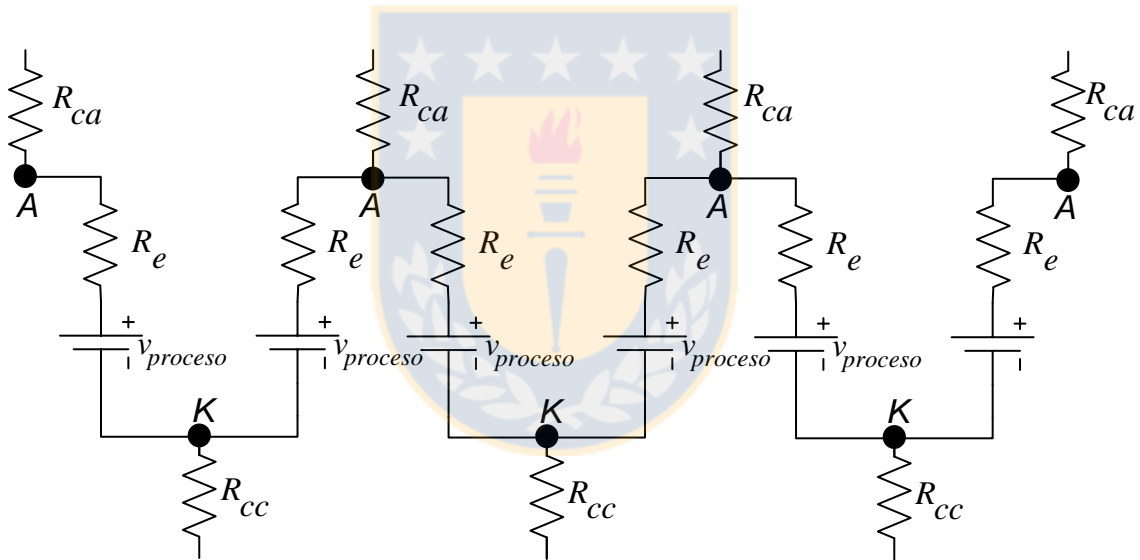
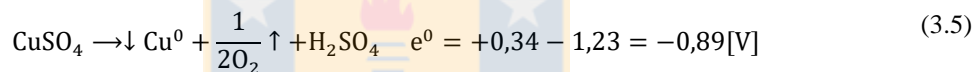


Figura 3.2 Modelo eléctrico de una celda de EW con 3 cátodos y 4 ánodos. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de la Figura 3.2 se generaliza para el tamaño de nave a evaluar. Utilizando el método directo de voltajes de nodos se genera la matriz de admitancias. El vector de corrientes del sistema de la ecuación (3.2) es nulo con excepción del primer valor que corresponde a la corriente del rectificador. Finalmente se resuelve el sistema mediante la Ley de Ohm obteniendo el voltaje de nodo del modelo para luego calcular las corrientes de cada rama.

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

El voltaje de reacción ocurre por acción de la corriente que fluye a través de la celda, la que permite reacción de oxidación en el ánodo y reducción del cátodo. En el cátodo se adhieren átomos de cobre provenientes del electrolito según la reacción de reducción de la ec. (3.3). En el ánodo se oxida agua de acuerdo a la ec. (3.4). Finalmente al considerar la reacción completa, se tiene que el voltaje de reacción es de $-0,89V$ (ver ec. (3.5)) [1][11]. Además, para producir depósito de cobre en el cátodo se debe aplicar una sobretensión $\eta_c = 0,1V$ y para producir oxígeno en el ánodo se debe aplicar una sobretensión de $\eta_a = 0,5V$.



3.2.2. Resistencia de Contacto

Los electrodos hacen contacto con la barra intercelda por simple descanso de ellos en esta última, produciendo una resistencia de contacto. Estas resistencias varían su valor por acción de nivel de corrosión del cobre, peso de los electrodos y deformación de los conectores.

El valor de la resistencia de contacto es determinado a partir de mediciones en terreno. En esta situación, no es posible medir de manera directa la resistencia, por lo que se hace de manera indirecta por medio de mediciones de corriente circulante por el electrodo y de voltaje de contacto. Las resistencias calculadas, corresponden a 260 mediciones de voltaje de contacto y 260 mediciones de sus correspondientes corrientes catódicas. La Figura 3.3 muestra que las resistencias de electrolito, estadísticamente, se comportan como una distribución gamma con media $62 [\mu\Omega]$ y sigue la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$f(x) = \frac{1}{b^a} e^{-\frac{x}{b}} \cdot x^{a-1} \cdot \frac{1}{\Gamma(a)} \quad (3.6)$$

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

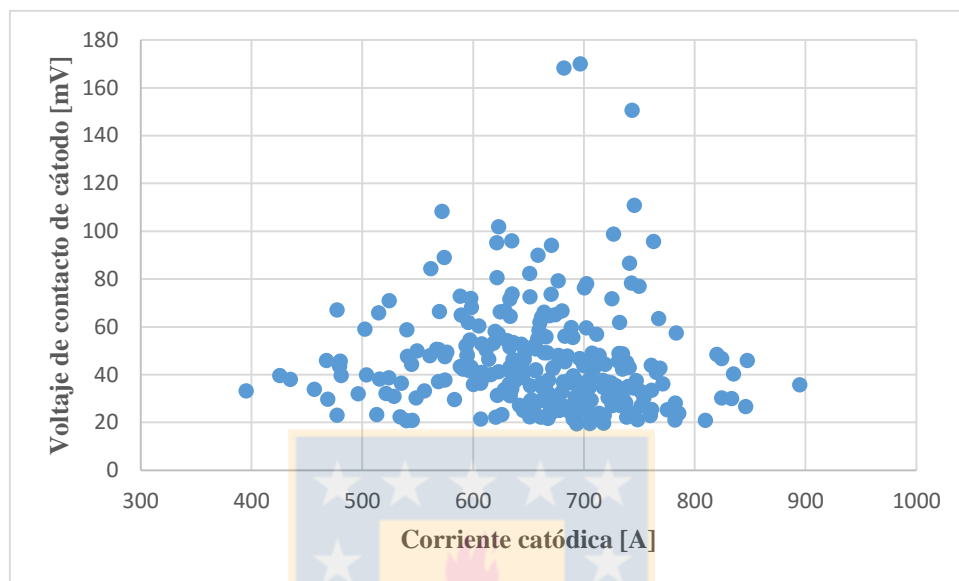


Figura 3.3 Distribución de Resistencias de Contacto Catódicas medidas en industria. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.

TABLA 3.1 RESUMEN DE MEDICIONES DE RESISTENCIA DE CONTACTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, CON MEDICIONES EN PLANTA EW EN MINERA ZALDÍVAR.

Parámetro	Valor
Máximo	246,76 [$\mu\Omega$]
Promedio	62 [$\mu\Omega$]
Mínimo	25,69 [$\mu\Omega$]
Desv. Std.	35,01 [$\mu\Omega$]
% Dispersión	49,51 [%]

3.2.3. Resistencia de Electrolito

Al igual que en el caso de la resistencia de contacto, la resistencia del electrolito varía su valor, ya que depende de la distancia entre electrodos (cátodo-ánodo), área de los electrodos,

temperatura , concentración y homogeneidad del electrolito [17]. De manera similar a la resistencia de contacto, la resistencia de electrolito a utilizar en el modelo se obtiene mediante mediciones en terreno industriales. Los datos corresponden a 120 mediciones de voltajes entre electrodos (ánodo-cátodo) y sus correspondientes corrientes catódicas (Anexo A:). La Figura 3.4 muestra que las resistencias de electrolito, estadísticamente, se comportan como una distribución normal con media 1,97 [$m\Omega$] y sigue la ec. (3.7).

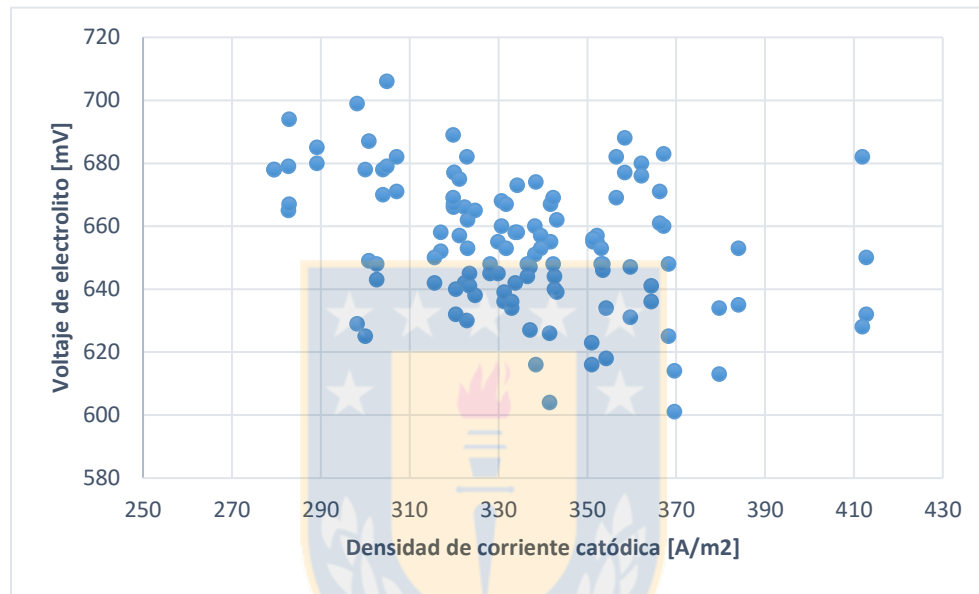


Figura 3.4 Distribución de Resistencias de Electrolito medidas en industria. Fuente: Elaboración propia, con mediciones en planta EW en Minera Zaldívar.

TABLA 3.2 RESUMEN DE MEDICIONES DE RESISTENCIA DE ELECTROLITO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, CON MEDICIONES EN PLANTA EW EN MINERA ZALDÍVAR.

Parámetro	Valor
Máximo	2,45 [$m\Omega$]
Promedio	1,97 [$m\Omega$]
Mínimo	1,52 [$m\Omega$]
Desv. Std.	122,81 [$\mu\Omega$]
% Dispersión	8,58 [%]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_e}{\sigma} \right)^2} \quad (3.7)$$

Donde, μ es el valor medio de las resistencias de electrolito medidas y σ es la desviación estándar de las resistencias de electrolito medidas. La Tabla 3.2 muestra un resumen de las mediciones de resistencia de electrolito.

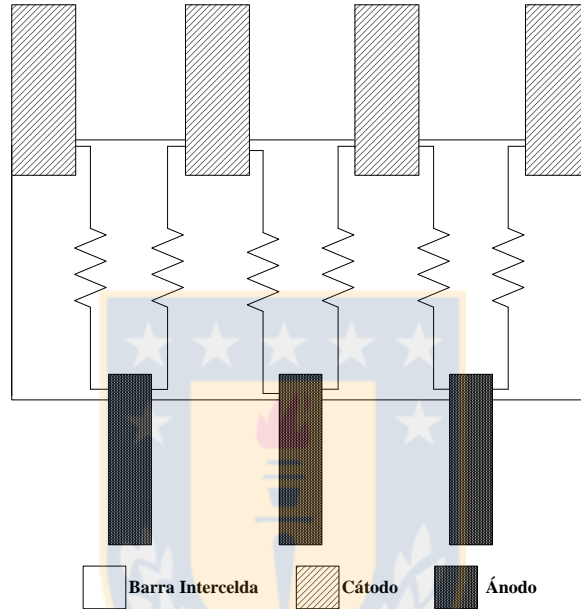


Figura 3.5 Modelo resistivo de barra intercelda convencional. Modificada de [34]

3.2.4. Modelo de Barra Intercelda

Para conocer el comportamiento de la barra intercelda dentro del modelo de parámetros concentrados del proceso de EW, se procede a modelarla mediante resistencias. Los valores resistivos dependen de la geometría de la barra y siguen la ecuación (3.8). La Figura 3.5, muestra el modelo resistivo de la barra intercelda equipotencial convencional tipo Dogbone:

$$R_{barra} = \rho \cdot \frac{l_{distancia}}{S} \quad (3.8)$$

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

3.3. Modelo de parámetros distribuidos

El comportamiento termo-eléctrico de las barras intercelda es de carácter multifísico. Por lo que un modelo eléctrico resistivo no tiene la capacidad de análisis de todas las variables. Un modelo 3D de Elementos Finitos (FEM) con parámetros distribuidos permite generar el perfil térmico de la barras intercelda considerando variables como ventilación y geometría de barras. Para la modelación de la barra se utiliza cobre ETP C11000. La Tabla 3.3, muestra las propiedades físicas correspondientes a este material.

TABLA 3.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE COBRE ETP C11000 @ 20°C. MODIFICADA DE [28].

Propiedades físicas	
Conductividad Térmica (BTU/ft ² -hr)	226
Expansión Térmica (per °F)	0,0000098
Densidad (lb per inch ³)	0,323
Conductividad eléctrica (%IACS)	100
Módulo de Elasticidad (KSI)	17.000

3.3.1. Modelo Eléctrico de Barra Intercelda

Para simplificación del modelo de elementos finitos, se define la referencia en el extremo de los hanger-bars de ánodos (ver Figura 3.6), donde se considera la condición de contorno de la ecuación (3.9).

$$\mathbf{V} = 0 \quad (3.9)$$

Las densidades de corrientes (\mathbf{J}), entran al sistema a través del extremo opuesto de los hanger-bars de cátodos (ver Figura 3.6), siguiendo la ecuación (3.10). Estas densidades de corrientes provienen del modelo de parámetros concentrados.

$$\oint_{\partial\Omega} -\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = I_0 \quad (3.10)$$

La ley de Ohm describe la densidad de corriente \mathbf{J} en conductores sólidos de acuerdo a la

ecuación (3.11).

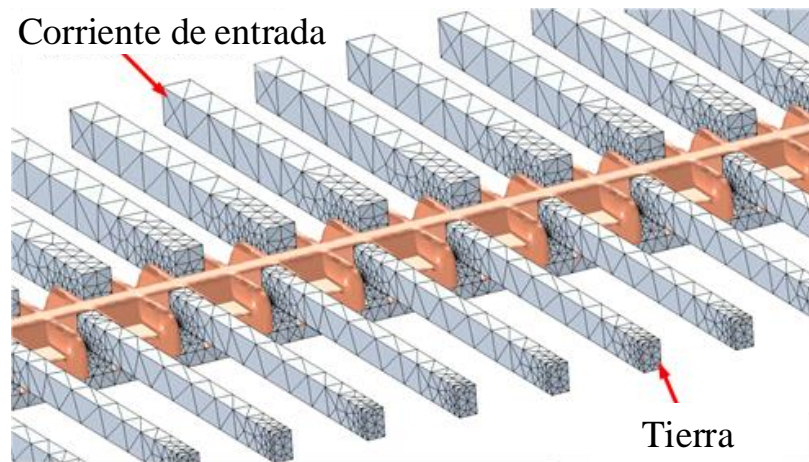


Figura 3.6 Modelación eléctrica con elementos finitos de barra intercelda convencional. Fuente: Elaboración propia.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla V \quad (3.11)$$

Donde \mathbf{J} 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. Para sistemas estacionarios de corriente dc, el potencial eléctrico en materiales conductores satisface la ecuación de Laplace (ecuación (3.12)).

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (-\sigma \nabla V) \quad (3.12)$$

3.3.2. Modelo Térmico de Barra Intercelda

La disipación de potencias por efecto Joule del modelo, considera todos los dominios y sigue la ecuación (3.13).

$$\rho C_p \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (3.13)$$

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.

El modelo incluye una fuente de calor como superficie, la que representa la disipación de calor por efecto de la resistencia de contacto entre barra y hanger-bars de electrodos, de acuerdo a la ecuación (3.14).

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = Q_s \quad (3.14)$$

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

Las condiciones de contorno de temperatura de la barra intercelda se fijan en los extremos opuestos de los hanger-bars de los electrodos. Se considera una temperatura igual a la temperatura de electrolito que corresponde a 50°C.

3.3.3. Modelo de ventilación de Barra Intercelda

La ventilación de la barra, dada en terreno por entrada pasiva y extracción forzada de aire, se lleva a cabo como un bloque con flujo laminar de aire perpendicular a los electrodos. El sistema de ventilación es descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes para la continuidad (ecuación (3.15)) y el momento (ecuación (3.16)), para fluidos de una fase.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.15)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (3.16)$$

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 fuerza volumétrica [N/m^3]; μ es la viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].

En la entrada, la velocidad del aire es fijada en 1,0m/s con una temperatura de 20°C y una salida de calor en el otro extremo.

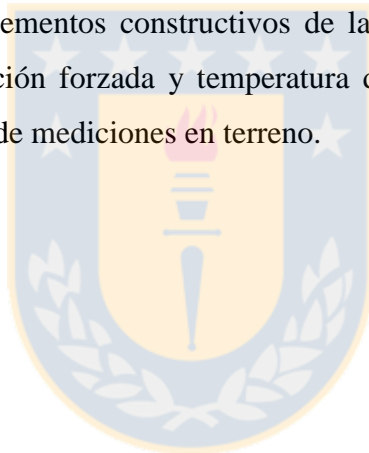
3.4. Sintonización de modelos

Los modelos fueron sintonizados con mediciones en planta industrial en la nave de EW en Compañía Minera Zaldívar (AMSA). Las mediciones consideran recopilación diaria 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 EW, corriente del rectificador, voltaje del rectificador y peso de cátodos cosechados. Estas mediciones se llevaron a cabo entre los años 2005 y 2012, bajos distintas condiciones de operación.

3.5. Conclusiones

Las principales variables que determinan la distribución de corrientes de una nave de EW corresponden a las resistencias de contacto que existen entre barra y hanger-bars de electrodos, y las resistencias de electrolito. Las resistencias de contacto dependen del estado de las barras intercelda y de los hanger-bars. Dentro de los aspectos que influyen en el estado de los contactos se encuentran la deformación mecánica, propiedades eléctricas y nivel de suciedad del cobre. Por otro lado, las resistencias de electrolito dependen de su homogeneidad y distancia entre electrodos. Por lo tanto, es necesario mantener la integridad de las barras intercelda y de los hanger-bars de electrodos para ecualizar las corrientes catódicas.

El modelo de parámetros concentrados permite conocer la distribución de corrientes del proceso. El modelo de parámetros distribuidos permite conocer el comportamiento térmico de las barras. Este modelo considera elementos constructivos de las barras (geometrías y materiales) y ambientales del proceso (ventilación forzada y temperatura de electrolito). Estos modelos fueron sintonizados con datos obtenidos de mediciones en terreno.



Capítulo 4. Diseño de Barra Equipotencial de Contactos Reemplazables

4.1. Introducción

Las barras intercelda cumplen la función de transferir la corriente eléctrica de una celda electrolítica a la siguiente. Los diseños de las barras intercelda dependen de la densidad de corriente (tamaño), del tipo de electrodo (forma) y de las condiciones de operación de la nave de EW (material) [27]. Las barras se fabrican típicamente con cobre de grado electrolítico-Pitch (grado ETP) con especificaciones de fabricación según la norma ASTM B-187 [28]. Las propiedades del cobre incluyen: a) conductividad eléctrica superior (100% IACS mínimo, International Annealed Copper Standard, una unidad de conductividad eléctrica para metales y aleaciones con respecto a un conductor de cobre recocido estándar, IACS valor del 100% corresponde a 58.0 [MS/m] @ 20°C); b) capacidad para soportar esfuerzos mecánicos repetidos; c) tolerancia a altas temperaturas de operación; d) menos propensos a falla por fatiga térmica; e) menos probabilidades de fallar por fluencia o relajación de estrés; f) contactos más confiables a largo plazo; g) resistencia a la corrosión adecuada; Y h) productos de corrosión más conductores [29]. Las barras intercelda presentan deterioro, lo que afecta su desempeño. En este capítulo, se estudian y determinan las principales causas de este deterioro, en base a esto, se propone un diseño de barra intercelda equipotencial capaz de mitigar el deterioro de las barras intercelda.

4.2. Efectos de deterioro de las barras intercelda equipotenciales convencionales

Las anomalías típicas del proceso son circuitos abiertos y corto-circuitos metalúrgicos. Los circuitos abiertos producen corrientes más altas en ambos lados de la anomalía. Las corrientes más altas aumentan la probabilidad de un corto-circuito metalúrgico que generalmente se produce después de aproximadamente 8 horas de iniciado el ciclo. Un corto-circuito metalúrgico produce sobre temperatura en un contacto electrodo-barra [19] Esto recoce el cobre de los contactos, reduciendo su límite elástico [33]. Naturalmente, esta debilidad favorece la deformación mecánica caracterizada por una pérdida de su geometría original debido al proceso de carga de los cátodos. Esto conlleva aumento

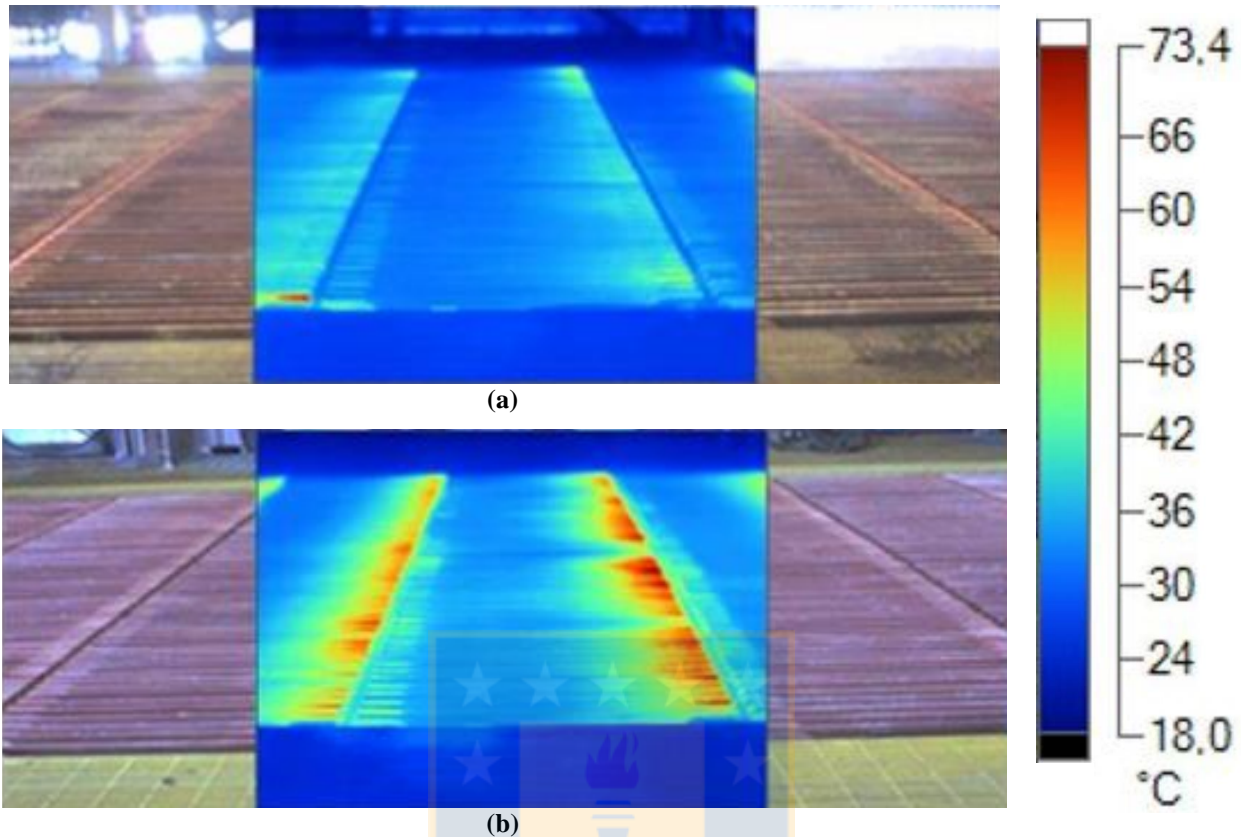


Figura 4.1 Termografía de barras intercelda equipotencial convencionales; (a) Barra equipotencial convencional nueva; (b) Barra equipotencial convencional con 4 años de antigüedad. Fuente: Elaboración propia.

de las pérdidas de potencia en los contactos. Además de esto, la tasa de corrosión aumenta [34]. Este es un problema contagioso porque los contactos dañados perjudicarán a los hanger-bars de cátodo, los que serán dispuestos en una posición diferente de la planta después de la cosecha.

De acuerdo a datos industriales, en cuatro años, la distribución de la densidad de corriente se deteriora debido a la creciente dispersión de las resistencias de contacto. El aumento en la dispersión de corrientes, produce reducción en la eficiencia de corriente y aumento en el consumo específico de energía del proceso [8][11]. La temperatura media de contacto de la barra intercelda es un síntoma del aumento del consumo de energía. Mediciones simultáneas realizadas en EW CMZ muestran el impacto del envejecimiento y deterioro de las barras intercelda equipotenciales convencionales, en la eficiencia del proceso. Una barra intercelda equipotencial nueva opera con una temperatura media de contacto de aproximadamente 45°C y el consumo específico de energía medido es de 1.939kWh/ton. Por el contrario, una barra equipotencial luego de 4 años de antigüedad opera con una temperatura media de contacto de 72°C y el consumo específico de energía medido es de 2.008kWh/ton (ver Figura 4.1y Figura 4.2). Las termografías obtenidas en terreno fueron capturadas con una Cámara

Termográfica Portátil Fluke Modelo Ti-55 (Cámara Fluke Ti-55Anexo C:).

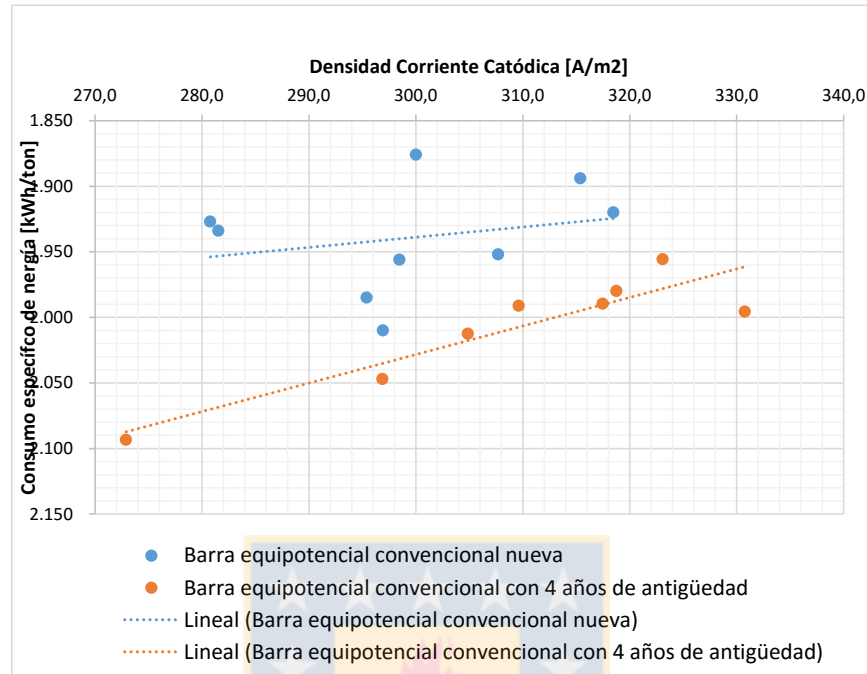


Figura 4.2 Consumo específico de energía versus densidad de corriente catódica, (azul) Barra equipotencial convencional nueva; (naranja) Barra equipotencial convencional con 4 años de antigüedad. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Factores de envejecimiento y deterioro de barras intercelda

Los componentes de una barra intercelda se someten a corrosión por neblina de ácido sulfúrico producida por el burbujeo de gas procedente de la reacción de descomposición de agua en ánodos, alto stress mecánico por el manejo regular de electrodos, deformación de contactos como consecuencia de la carga del electrodo, y stress térmico producido por la operación a altas densidades de corriente. La experiencia in situ indica que estos factores aceleran el envejecimiento y el deterioro de la barra intercelda. La configuración dogbone es particularmente afectada por las condiciones ambientales del proceso de EW debido a la presencia de capping boards [8]-[10] y[27].



(a)



(b)

Figura 4.3 Ejemplo de capping boards; a) Sección nueva de capping board, b) Sección de capping deteriorada (quemada). Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Temperatura de operación

La temperatura media de operación de una barra intercelda es aproximadamente 50°C. Desafortunadamente, la temperatura de algunas secciones de la barra intercelda puede alcanzar hasta 200°C durante la ocurrencia de cortocircuitos metalúrgicos, contactos abiertos o contactos deficientes. Estos altos niveles de temperatura afectan el estado de los capping-boards y la conductividad, dureza y tasa de corrosión del cobre [32][33]. Por lo tanto, los contactos de la barra intercelda se encuentran más propensos a deformación mecánica permanente.

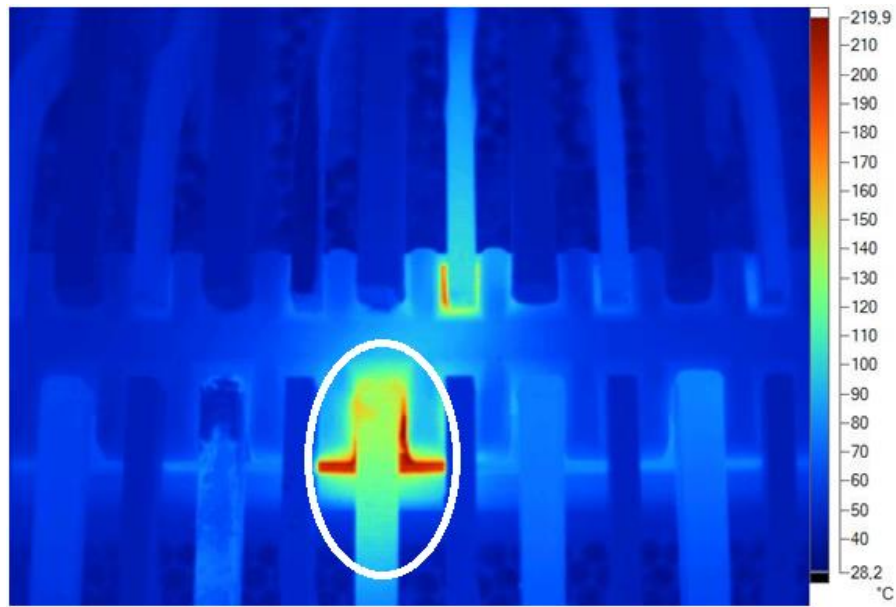
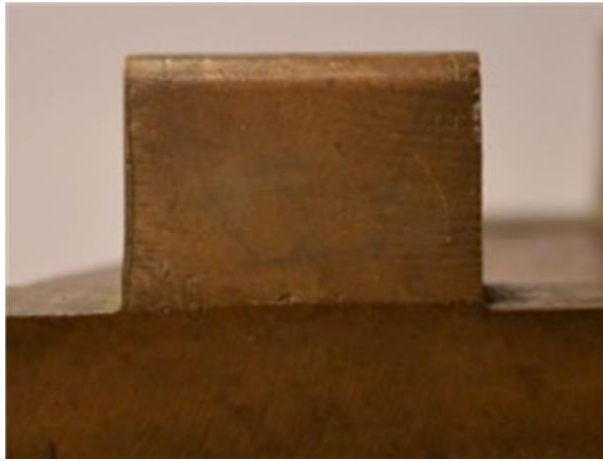


Figura 4.4 Ejemplo de contacto con sobre-temperatura. Fuente: Elaboración propia.

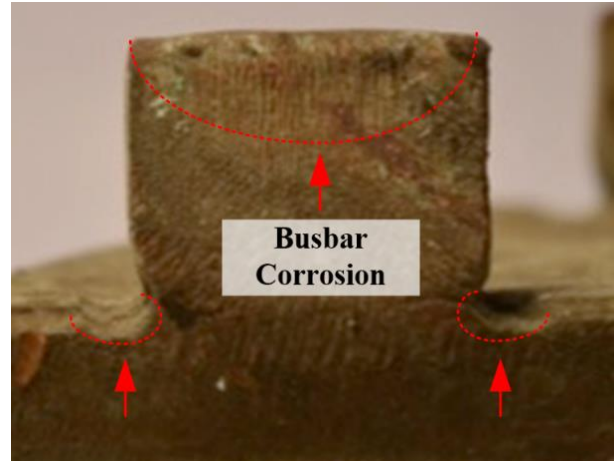
El cobre metálico es termodinámicamente inestable y desarrolla fácilmente una película de corrosión sobre su superficie. La reacción con la neblina de ácido sulfúrico forma una pátina de estructura gruesa de dos capas Cu_2O / Cu_2S , que crece linealmente con el tiempo [30]. La operación de celdas con barras interceldas y/o cappings boards deteriorados no ofrece equalización de corrientes. Por lo tanto, existe aumento del consumo específico de energía y compromete la producción debido a la ocurrencia de circuitos abiertos y corto circuitos metalúrgicos. Esto resulta en operación fuera de los nominales de eficiencia de corriente y reduce la vida útil de la barra intercelda.

4.3.2. Neblina de ácido sulfúrico

La neblina ácida presente en el proceso de EW se produce por la liberación de oxígeno debido a la reacción de descomposición del agua en ánodos sumergidos en el electrolito $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ [1]. Las burbujas de oxígeno ascienden atrapando partículas de ácido sulfúrico formando una niebla, la que favorece la corrosión de la barra intercelda (Figura 4.5). Las sobre temperaturas locales en las secciones de la barra causan aumento en las tasas de corrosión en esas áreas [13]. La presencia del capping board impide una adecuada ventilación y refrigeración aumentando la corrosión. Además, durante la cosecha de cátodos, el ácido sulfúrico diluido cae entre la barra intercelda evaporándose gradualmente, lo que aumenta su concentración y poder de corrosión.



(a)



(b)

Figura 4.5 (a) Segmento de barra convencional dogbone al principio de su vida útil; (b) Segmento de barra convencional dogbone después de 4 años en servicio, se aprecian los efectos de la corrosión y deformación mecánica. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5 (b) se exhibe una muestra de una barra intercelda tipo dogbone después de 4 años en servicio bajo condiciones de operación típicas de EW. El segmento de barra presenta evidentes signos de envejecimiento, corrosión y deterioro de conectores. Los resultados de simulación FEM que se muestran en la Figura 4.6, muestran que la generación de calor es la fuente de este envejecimiento acelerado, en especial en las áreas en que la corriente cambia su dirección de manera abrupta. El diagrama de densidad de disipación de potencia total y el correspondiente perfil de temperatura permiten identificar la ubicación de las fuentes de calor y los hot spots de la barra intercelda. Las áreas de densidad de disipación de alta potencia resaltadas presentan mayor probabilidad de tener tasas de corrosión elevadas por la presencia de niebla de ácido sulfúrico. Además, el capping board aumenta la temperatura de operación, lo que se traduce en aumento de las tasas de corrosión de la barra completa reduciendo su vida útil.

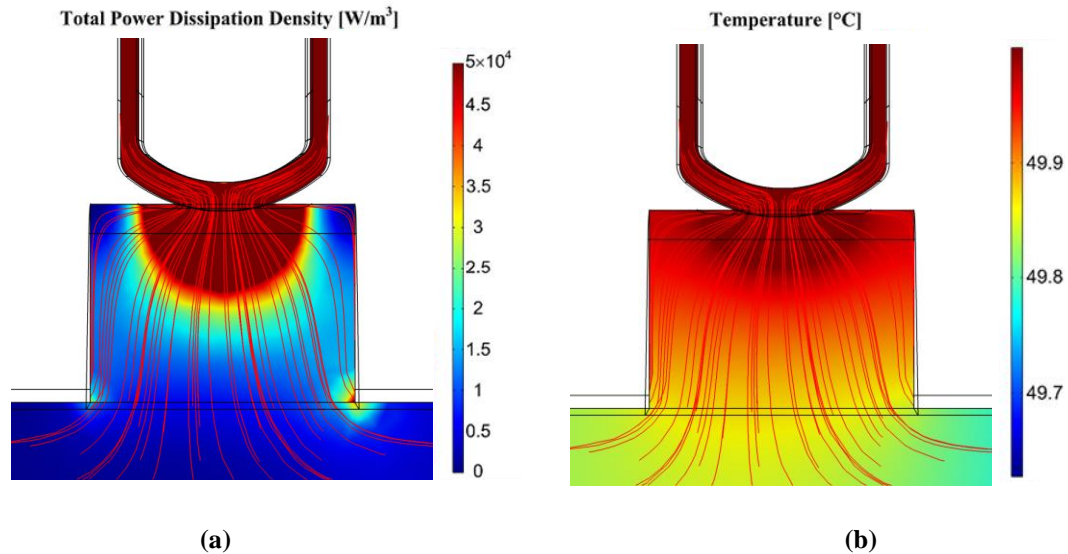
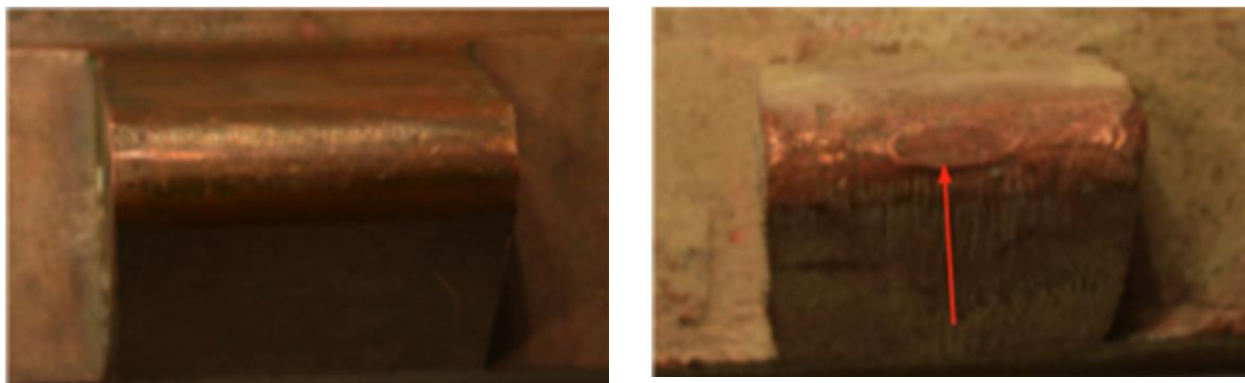


Figura 4.6 Diagrama de densidad de disipación de potencia y perfil de temperatura para conector de barra intercelda convencional tipo dogbone; (a) Se aprecia mayor disipación de potencia en los bordes del conector; (b) temperatura de operación de conector dogbone. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Deformación mecánica

El proceso de EW es cíclico y requiere la extracción de los cátodos con cobre depositado en sus caras al final de cada ciclo de producción. Esta acción se denomina cosecha y se realiza cada 110 horas aproximadamente [1]. Para extraer el cobre electrodepositado, todos los cátodos son levantados por una grúa y procesados en una máquina de extracción para cosechar el cobre [32]. Luego, las placas de cátodo de acero inoxidable son lavadas y puestas en servicio en las celdas (no necesariamente las mismas de las que fueron extraídas) para reiniciar el ciclo de producción de EW. Al reponerse los cátodos, son liberados desde una altura de aproximadamente 1 pulgada, con el fin de asegurar el contacto eléctrico de los hanger bars y la barra intercelda. Lo anterior, genera impactos que producen deformación mecánica de los conectores, la que aumenta progresivamente a lo largo del tiempo promovida por el recocido de cobre producido por efecto de hot spots (Figura 4.7).



(a)

(b)

Figura 4.7 Vista superior de daños mecánicos de área de contacto de electrodos; (a) Conector sin daño mecánico; (b) Conector con deformación mecánica. Fuente: Elaboración propia.

Las barras intercelda también experimentan stress mecánico en sus conectores como consecuencia del aumento de la carga de contacto durante el ciclo de producción de EW. El peso de cada cátodo que descansa sobre cada conector aumenta de 45 kg a 135 kg durante el ciclo EW [32]. Si la presión de contacto va más allá de la resistencia a la deformación del cobre, se producen pequeñas deformaciones plásticas en las zonas de contacto y elasto-plásticas en el entorno de las barras. Este fenómeno mecánico produce una degradación progresiva de los contactos del electrodo e incrementa el valor medio y la desviación estándar de las resistencias de contacto. A su vez, esto produce pérdidas de potencia adicionales ($i^2 \cdot R$) y consecuentemente hot spots. Esta degradación aumenta con el recocido del cobre a elevadas temperaturas de operación.

4.4. Reemplazo de barras intercelda

El deterioro de las barras intercelda afecta su desempeño. Cuando el daño es extenso, la solución es reemplazar la barra intercelda. El reemplazo de una barra intercelda y/o capping board es una operación compleja y de alto consumo de tiempo. Por lo tanto, la práctica industrial aceptada es tolerar la operación con fallas locales a pesar de pérdida de eficiencia de la barra. La vida útil de una barra intercelda es de aproximadamente 4 años, mientras que los capping boards requieren reemplazo cada 2 años [13].

Para llevar a cabo el reemplazo es necesario desviar la corriente que circula por la barra intercelda, para esto se utiliza un marco cortocircuitador de 10 toneladas de peso (ver Figura 4.8). El proceso requiere: reducir la corriente del proceso desde 50kA a 0.5kA, conectar el marco

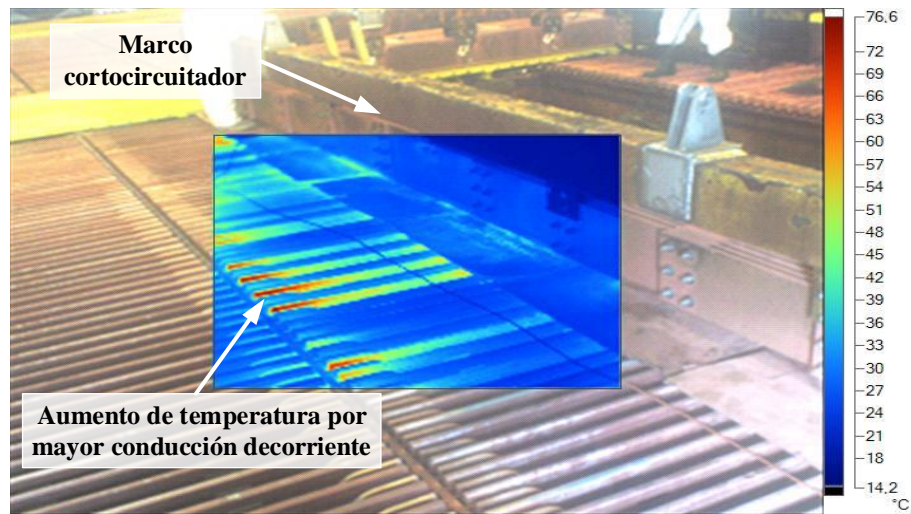


Figura 4.8 Instalación de Marco Cortocircuitador. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.9 Preparación de celdas para reemplazo de barra intercelda. Fuente: Elaboración propia.

cortocircuitador; aumentar la corriente del proceso; extraer el electrolito y todos los electrodos de las celdas adyacentes a la barra intercelda (262 electrodos); retirar el capping board para exponer y reemplazar la barra intercelda. Una vez instalada la nueva barra, esta secuencia es ejecuta de manera inversa para la puesta en operación normal. Este procedimiento puede durar hasta 8 horas, comprometiendo horarios de la nave de EW, producción de cobre, costos y disponibilidad de planta [33].

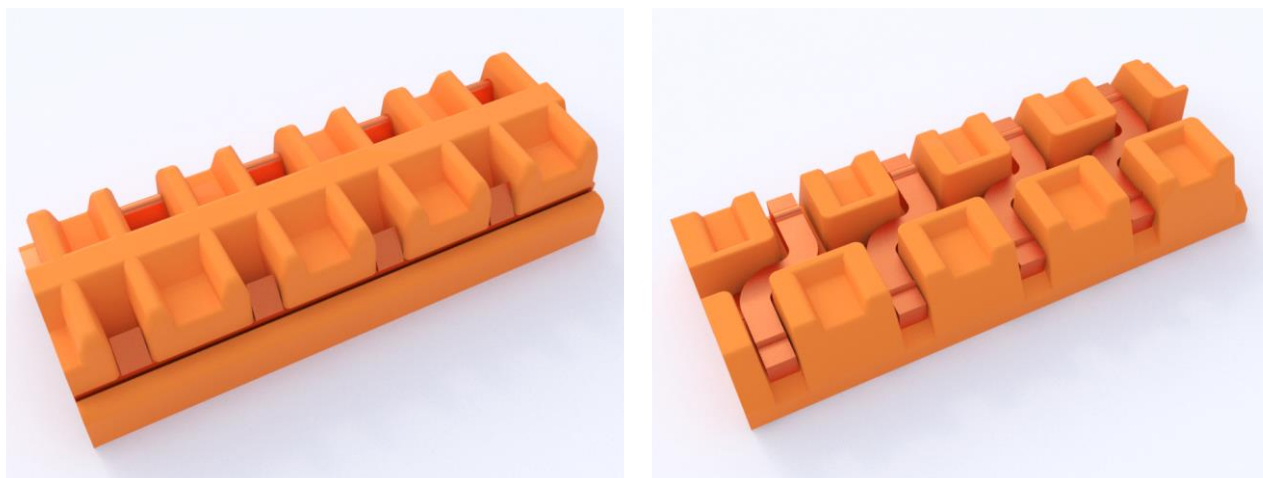
La distribución de corrientes catódicas puede resultar afectada por acción del marco cortocircuitador, ya que por diferencia de altura de electrodos puede no realizar contacto con todos ellos, lo que se aprecia en la Figura 4.8, en donde los puntos de calor implican mayor conducción de corriente.

4.5. Diseño propuesto

El análisis de las causas del deterioro de las barras intercelda convencionales tipo Dogbone, muestra que este es un efecto inherente del proceso de EW. El principal factor que incentiva el deterioro es la corrosión por efecto de la neblina ácida, el que se incrementa frente a operación con hot spots y alta temperatura. Se determinó que el diseño geométrico de la barras intercelda convencional tipo Dogbone produce hot spots y la presencia de capping boards eleva la temperatura de operación de las barras al actuar como aislador térmico. Es por esto que para mantener una operación dentro de rangos nominales por un tiempo prolongado, el deterioro de la barra intercelda en condiciones de operación típicas debe ser minimizado. Además, en caso de ocurrir una falla local, debe detenerse el proceso vicioso asociado a ella sin alterar la operación de una nave de EW. Por lo tanto, es necesario modificar el diseño de la barra intercelda convencional. Un diseño apropiado debe incluir los siguientes requisitos:

1. Operación libre de hot spots
2. Ausencia de capping board
3. Área de disipación amplia
4. Hot swappability

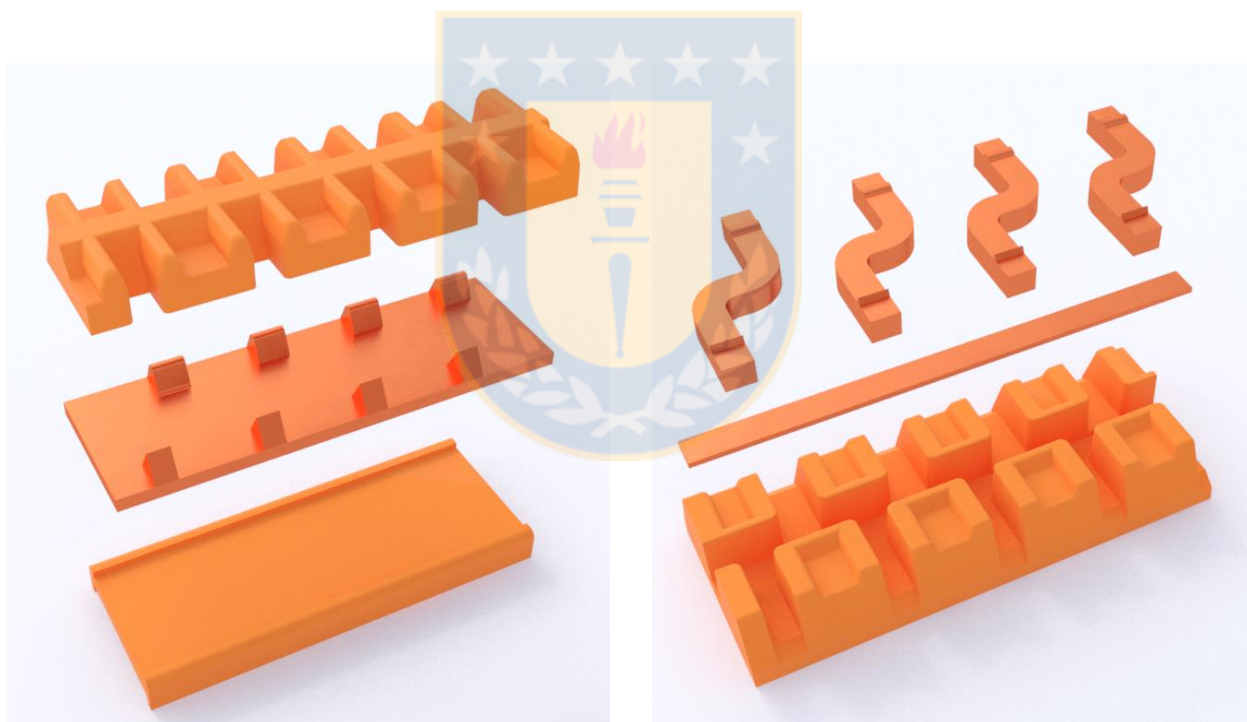
Con el fin de cumplir con los requisitos expuestos, se propone una configuración de barra intercelda equipotencial dotada de conectores reemplazables, lo que permite el hot-swapping. Para este propósito, el diseño considera una estructura libre de capping board, con conectores extraíbles posicionados sobre una barra continua de cobre (ver Figura 4.10, Figura 4.11 y Figura 4.12). Por lo tanto, es posible eliminar las fallas locales sin alterar el proceso.



(a)

(b)

Figura 4.10 Barras equipotencial tipo Dogbone para el proceso de electro-obtención de cobre; (a) Barra convencional; (b) Barra de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.



(a)

(b)

Figura 4.11 Vista de desarme de barras equipotencial tipo Dogbone para el proceso de electro-obtención de cobre; (a) Barra convencional; (b) Barra de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.12 Barra equipotencial con conectores reemplazables propuesta. Fuente: Elaboración propia.

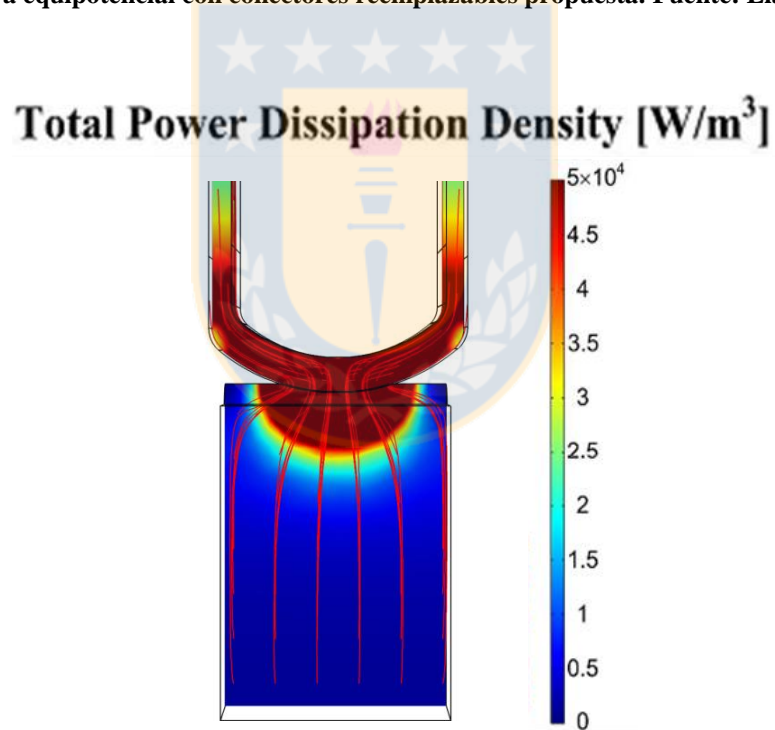


Figura 4.13 Diagrama de disipación total de potencia para conector en forma de "S". Fuente: Elaboración propia.

4.5.1. Cumplimiento requisito 1

Para lograr una operación libre de hot spots es obligatorio modificar la forma de las barras

intercelda para evitar bordes abruptos y consecuentemente las fuentes de calor. Un segmento conector en forma de “S” sin bordes abruptos entre los conectores y el cuerpo de la barra disminuye la densidad de disipación de potencia evitando hot spots. De esta manera, se minimiza el efecto de corrosión de la neblina ácida extendiendo la vida útil de la barra intercelda. La Figura 4.13 muestra el diagrama de disipación total de potencia de un conector de la barra equipotencial de conectores reemplazables, donde se aprecia disipación de calor solamente en el área de contacto del conector con el hanger-bar.

4.5.2. Cumplimiento requisito 2

Una sistema de barra intercelda debe proporcionar correcto alineamiento y posicionamiento de los electrodos. Para esto, el diseño de la base board debe ser modificado para proporcionar soporte a los electrodos. La eliminación del capping board permitirá una limpieza adecuada de la barra intercelda, eliminando todas las trazas de ácido sulfúrico sobre la barra intercelda usando limpieza por arrastre (ver Figura 4.12). Esto reduce la corrosión de la barra intercelda manteniendo las propiedades eléctricas del cobre durante un tiempo prolongado. Además, la ausencia de capping board permite la ventilación forzada de los conectores expuestos y la disipación de calor al ambiente de la nave EW.

4.5.3. Cumplimiento requisito 3

La utilización de barras intercelda tipo dogbone asegura un área amplia de disipación de calor (4 pulgadas) para la ventilación. En consecuencia, la temperatura de funcionamiento de la barra intercelda disminuye. Una temperatura de funcionamiento más baja impide el recocido y asegura que las características mecánicas y eléctricas (dureza y conductividad eléctrica) se mantengan dentro de valores nominales. Por lo tanto, los conectores de la barra intercelda serán más resistentes a los impactos repetitivos de los electrodos. Además, una temperatura de funcionamiento baja conlleva a baja resistencia eléctrica de las barras de cobre, lo que resulta en bajas pérdidas por conducción. Desafortunadamente, la niebla de ácido sulfúrico y deformación mecánica son factores intrínsecos del proceso de EW. La eliminación del capping board minimizará, pero no eliminará, estos factores.

4.5.4. Cumplimiento requisito 4

Para proporcionar la capacidad de hot swapping, es necesario un diseño de barra intercelda modular. Una barra intercelda modular permitirá el reemplazo de una sección en minutos sin la interrupción del funcionamiento normal del proceso de EW. Por lo tanto, la sustitución de los

conectores defectuosos eliminará el envejecimiento prematuro de la barra intercelda. Por consiguiente, la eficiencia de la barra estará más cerca de la nominal durante más tiempo. Un segmento conector ánodo-cátodo en “S” permite reemplazar una falla local sin detener el proceso de EW (ver Figura 4.11 y Figura 4.12).

4.6. Configuración eléctrica

El diseño propuesto, conecta todos los cátodos de una celda (corrientes salientes) con todos los ánodos de la celda siguiente (corrientes entrantes), a través de los segmentos conectores ánodo-cátodo y la barra continua inferior, de igual manera que la configuración de una barra intercelda equipotencial convencional. La conexión de los segmentos conectores ánodo-cátodo entre dos celdas (n y $n+1$) se realiza desde un solo cátodo al ánodo adyacente por la izquierda de la siguiente celda (///). La conexión de los segmentos conectores de la celda siguiente 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 zigzag.

La estructura modular del diseño propuesto agrega una resistencia de contacto entre conector ánodo-cátodo y barra equipotencial inferior, lo que en adición con una mayor área de conducción de los conectores con respecto de la barra de cobre continua, crea caminos preferentes para la circulación de corrientes a través de los segmentos en forma de “S”. La Figura 4.15 muestra un esquema de conexiones eléctricas para la barra intercelda propuesta y convencional.

El diseño de los segmentos en forma de “S” es específico para la densidad de corriente de operación del cátodo. Cada celda tiene 65 cátodos y la densidad media de corriente por cada uno es 330 A/m^2 . Esto implica 660 A fluyendo a través de cada segmento, por lo que deben dimensionarse para soportar esa corriente. La ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** entrega la capacidad de carga de corriente directa para barras de cobre, basada en el "Cadmold Copper Bus Bar Design Manual Copper" [31]. Los factores que se muestran en esta ecuación están destinados a una temperatura de nave de EW de 25°C , y temperatura de operación de segmentos en forma de S de 50°C . La restricción de diseño para segmentos en forma de “S” corresponde las dimensiones del área transversal del conector ánodo-cátodo. Un segmento de 22mm de ancho y $23,5\text{mm}$ de alto tolera una corriente de 687A para operar a una temperatura de 50°C . Este valor cumple con el nivel de corriente requerido por diseño.

$$I = 466,58 \cdot A^{0,5} \cdot P^{0,39} \quad (4.1)$$

Donde: A representa la sección transversal del conductor (pulgadas²); y P es el perímetro del conductor (pulgadas).

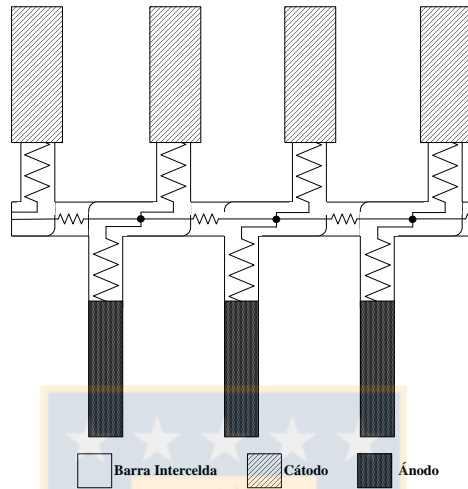


Figura 4.14 Modelo resistivo de barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.

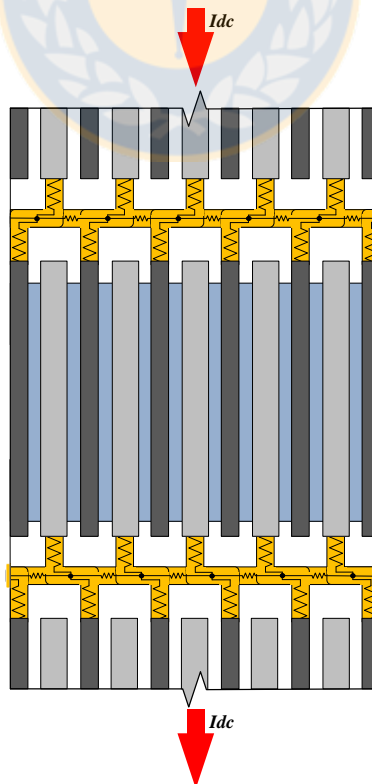
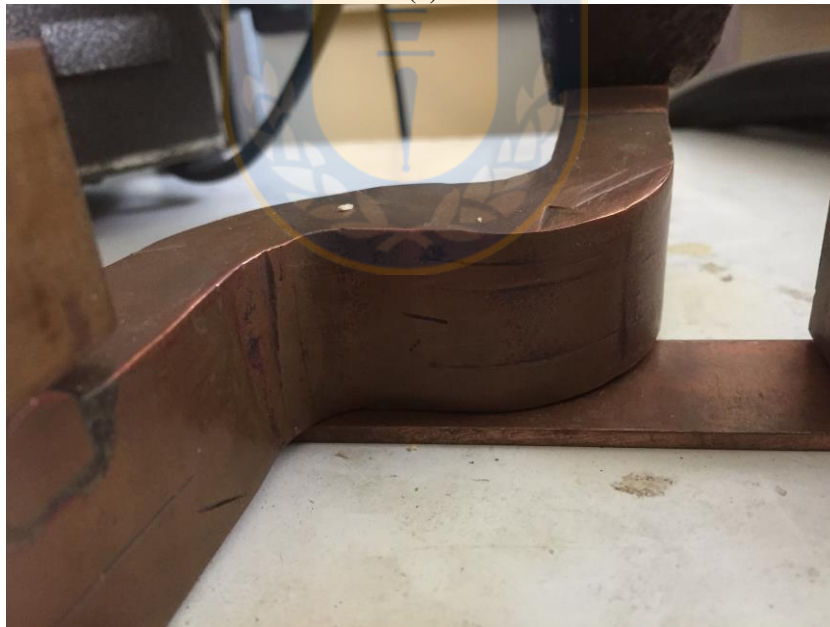


Figura 4.15 Esquema de conexión de barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 4.16 Circuito de prueba para determinación de resistencia de contacto; (a) Vista superior; (b) Vista de zona de contacto. Fuente: Elaboración propia.

4.7. Resistencia de contacto entre segmento y barra continua

La configuración propuesta posee segmentos conductores en forma de “S” que actúan como caminos preferenciales para el flujo de corriente. Adicionalmente, la barra continua inferior actúa

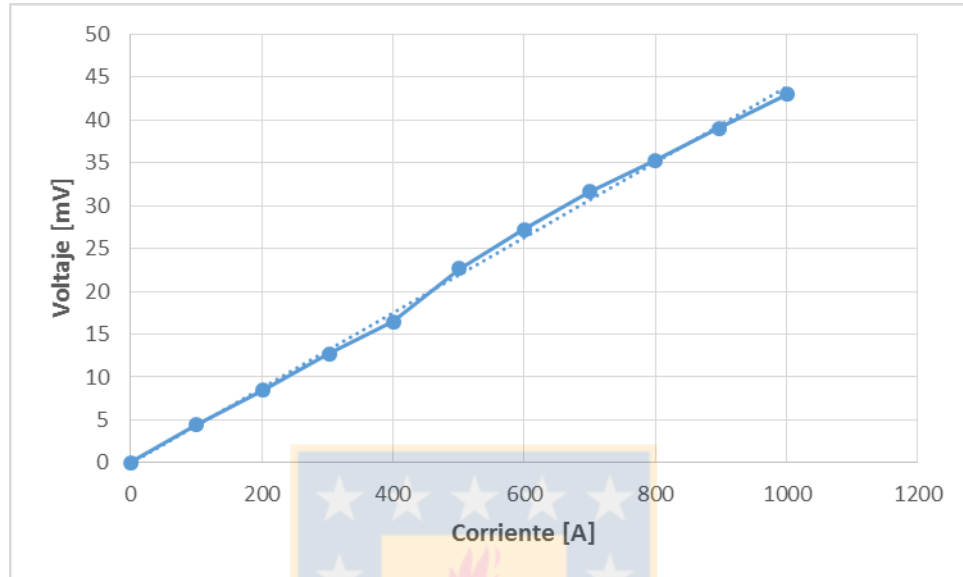


Figura 4.17 Curva de Corriente versus Voltaje de resistencia de contacto entre segmento y barra continua inferior. Fuente: Elaboración propia.

como camino alternativo entre segmentos. El contacto eléctrico entre ambos se produce por el descanso de los segmentos sobre la barra continua formando una resistencia de contacto. El valor de esta resistencia corresponde a $44 \mu\Omega$. Este valor se determinó mediante pruebas de laboratorio (ver Figura 4.16).

TABLA 4.1 VALORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE MEDIDOS DE RESISTENCIA DE CONTACTO ENTRE SEGMENTO EN FORMA DE “S” Y BARRA CONTINUA DE COBRE INFERIOR Y RESISTENCIA CALCULADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Corriente medida [A]	Voltaje medido [mV]	Resistencia calculada [$\mu\Omega$]
0	0	0
99,4	4,4	44
201,1	8,5	42
302,5	12,7	42
399,9	16,5	41
500,8	22,7	45
600	27,2	45
699	31,6	45
800	35,3	44
897	39,0	43

Las pruebas eléctricas se realizaron en un banco de pruebas (ver Figura 4.16) con transformador de altas corrientes de razón de vueltas de 220:1. Las variables eléctricas fueron medidas con un multímetro digital Fluke 287 y una tenaza de corriente Fluke i1010. El valor de resistencia se determinó de manera indirecta por medio de mediciones de voltaje y corriente. Para lo anterior, se reguló y midió la corriente cada 100A y su correspondiente voltaje (ver Figura 4.17 y Tabla 4.1).

4.8. Conclusiones

Las generación de fallas locales, es fomentada por tres factores:

- Altas temperaturas de operación de la barra intercelda que afecta las propiedades físicas del cobre de las barras intercelda, recociendo el cobre. Esto resulta en disminución de su conductividad y dureza. La presencia de capping-boards aumenta la temperatura de operación.
- Neblina ácida producida por la generación de oxígeno de la reacción redox que atrapa partículas de ácido. Esta neblina corroe el cobre afectando sus propiedades físicas. Las altas temperaturas de operación incrementan la tasa de corrosión y el daño que produce.
- Deformación mecánica producto del impacto de los electrodos con las barras intercelda en el proceso de siembra. La operación a altas temperaturas y la presencia de neblina ácida, hacen que el cobre sea propenso a deformación.

Esto se corrobora con muestras reales y modelación 3D de Elementos Finitos de barras intercelda equipotenciales convencionales, por lo que es necesario reducir la temperatura de operación, tasa de corrosión y eliminar conectores con deformación mecánica.

El análisis mediante modelación 3D de disipación de potencia y de líneas de corriente, identificó los puntos de mayor generación de calor. De acuerdo a muestras reales, estos puntos coinciden con los de mayor temperatura y nivel de corrosión de la barra equipotencial convencional. Específicamente, al área de contacto de barra con hanger-bar de electrodo y bordes con cambio de dirección de corriente en 90°. Para disminuir la generación de calor en las áreas identificadas, es necesario reducir la temperatura de operación y eliminar los bordes con ángulos de 90°. Para esto, se propuso un diseño de barra equipotencial con segmentos conectores independientes de ánodo-cátodo en forma de “S”. Este diseño elimina los bordes abruptos y permite eliminar el capping-board. Esto

reduce la temperatura de operación de la barra, al aumentar el área expuesta al ambiente. La ausencia de capping-board, permite realizar una limpieza más efectiva durante la cosecha, eliminando las trazas de ácido sulfúrico, contribuyendo a reducir la tasa de corrosión. Finalmente, el diseño propuesto permite reemplazar un conector con signos de deterioro, manteniendo la barra libre de fallas locales.

Constructivamente, el diseño considera una barra central de sección rectangular de menor dimensión y peso que la barra equipotencial convencional. Los segmentos conectores descansan sobre esta barra por lo que existe una resistencia de contacto entre segmento conector y barra central. Pruebas de laboratorio indican que el valor de esta resistencia de contacto tiene valor medio de $44 \mu\Omega$. Por lo tanto, se generan caminos preferenciales para la corriente, a través del segmento conector en forma de “S”. Además, la barra de sección rectangular actúa como ecualizador de temperatura de la barra.



Capítulo 5. Resultados

5.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de la simulación de parámetros concentrados y distribuidos de la barra equipotencial convencional y equipotencial de conectores reemplazables.

Para evaluar el desempeño de la barra propuesta, se utilizan los modelos expuestos en el capítulo 3. El modelo de parámetros concentrados considera un arreglo de 7 celdas con 65 cátodos y 66 ánodos en cada una de ellas. Este modelo permite conocer la distribución de densidades de corrientes circulantes en las celdas de EW. Para lo anterior, se realizan 100 simulaciones con parámetros resistivos aleatorios que siguen las distribuciones revisadas en las secciones 3.2.2 y 3.2.3, con densidad de corriente catódica nominal de $330A/m^2$. El modelo de parámetros distribuidos, corresponde al modelo 3D de Elementos Finitos (FEM) del Capítulo 3. Este modelo permite evaluar el comportamiento termo-eléctrico de la barra equipotencial convencional y de conectores reemplazables.

Los resultados presentados, corresponden a resultados de simulación, los que no han sido corroborados a nivel de planta piloto o industrial.

5.2. Distribución de corrientes y temperatura de barras intercelda

Para el propósito de contrastación, se utilizan los mismos valores resistivos para la tecnología de barra intercelda equipotencial convencional y la barra equipotencial de conectores reemplazables. Los software de simulación de los modelos de parámetros concentrados y distribuidos, corresponden a MATLAB 7.10.0 y COMSOL Multiphysics 5.2, respectivamente. Las salidas del modelo de parámetros concentrados se utilizan como entradas del modelo de parámetros distribuidos.

5.3. Manufactura de Barra Intercelda

Una barra equipotencial convencional se fabrica a partir de un bloque de cobre, el que es fresado hasta lograr la geometría requerida (ver Figura 4.11 (a)). El producto final es una barra continua de aproximadamente 130kg y 6,5m de largo. Usualmente, se fabrican de cobre ETP C11000. Por otro lado, la barra propuesta está compuesto de una barra conductora estándar de 10kg y por

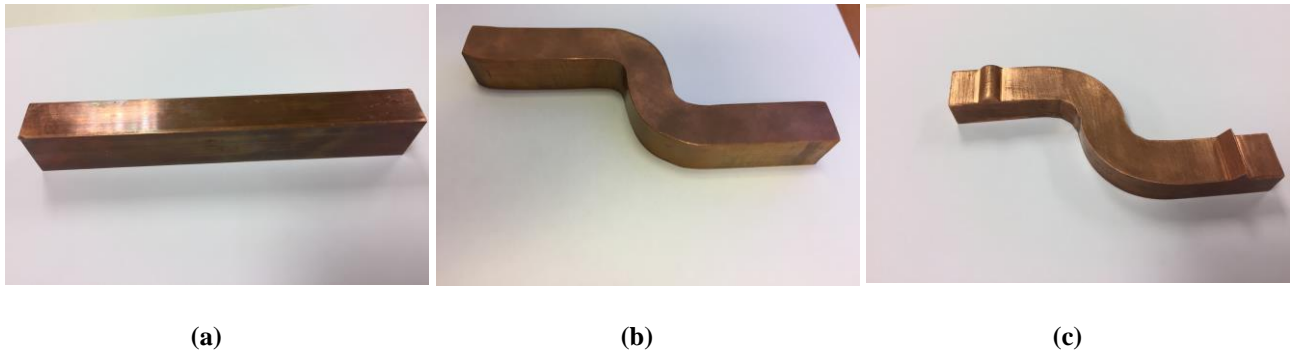


Figura 5.1 Manufactura de segmento conector, (a) Barra de sección rectangular estándar; (b) Segmento conector en forma de “S” doblado; (c) Segmento conector en forma de “S” doblado y fresado. Fuente: Elaboración propia.

conectores en forma de “S”, los que pueden ser fabricados al doblar una barra de cobre ETP C11000 de sección rectangular estándar y bajo requerimiento de fresado (ver Figura 5.1). Esto permite obtener segmentos de aproximadamente 0,7kg y 0,2m de longitud. El cobre necesario para la construcción de la barra propuesta es de aproximadamente 55kg. La reducción del peso de la barra y sus requerimientos de fabricación, permiten la reducción de costos de la misma. Finalmente, las dimensiones de la barra convencional conllevan a costo extra de transporte y de almacenamiento.

5.4. Mantenición de Barra Intercelda

La presencia de fallas locales en la barra equipotencial convencional impide la correcta conducción de la corriente. Para mitigar esto, la operación realiza periódicamente limpieza de contactos de la barra aumentando el costo por mano de obra. La limpieza se realiza en cada ocasión en que los cátodos son retirados para su cosecha, para esto se utiliza una escobilla metálica (limpieza abrasiva que daña el contacto) o una hidrolavadora (ver Figura 5.2).

El atributo de hot swappability de la barra equipotencial de conectores reemplazables, permite retirar cualquier conector dañado y reemplazarlo por uno nuevo. Esta maniobra se lleva a cabo sin detener el proceso (ver Figura 5.3) y en un tiempo de aproximadamente 10 minutos, por lo que la mantención y limpieza se puede realizar fuera de la línea del proceso. Finalmente, el reemplazo de un conector deteriorado por falla local, permite reducir tiempos de reemplazo y costos asociados a horas hombre y número de operadores y de horas de utilización de maquinarias (puente grúa y marco corto circuitador).



Figura 5.2 Limpieza de contacto realizada con hidrolavadora. Fuente: Elaboración propia.

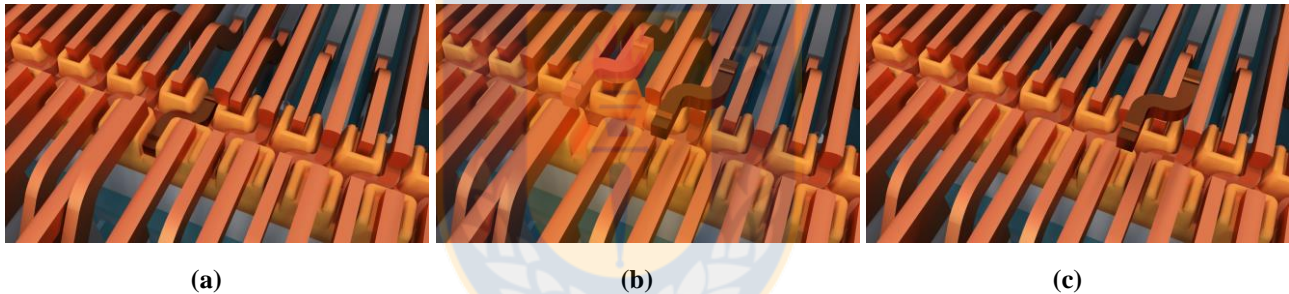


Figura 5.3 Secuencia de maniobra de reemplazo de un conector con falla local, (a) Desplazamiento lateral de electrodos afectados; (b) Extracción de segmento con falla local; y (c) Instalación de nuevo segmento conector y desplazamiento de electrodos a su posición original. Fuente: Elaboración propia.

5.5. Evolución de dispersión de corrientes

De acuerdo a la práctica industrial, las barras convencionales operan durante 4 años, con una tasa media de ocurrencia de fallas locales de 13 contactos de cátodo por barra por año. La ocurrencia de fallas locales es un proceso vicioso, por lo que su generación se incentiva en el tiempo. Por lo tanto, para efectos de simulación, la ocurrencia de fallas locales afecta a 6 contactos el primer año, 9 el segundo año, 15 el tercer año y 22 el cuarto año. Esto totaliza 52 contactos deformados que representan el 40% de los 131 contactos de una barra intercelda. En la configuración convencional, las fallas locales continúan en funcionamiento. Por otra parte, en la configuración propuesta, la sustitución de

conectores individuales elimina las fallas locales producidas. El nuevo conector toma un nuevo valor de

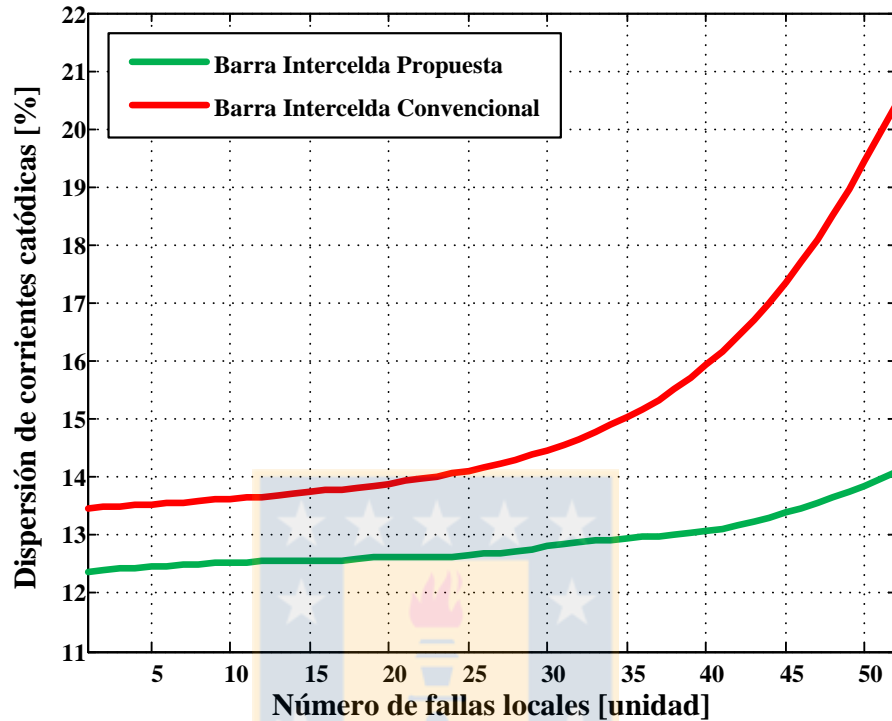


Figura 5.4 Proyección de 4 años de dispersión de corrientes catódicas (rojo) barra equipotencial convencional, (verde) barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.

resistencia de contacto aleatorio dentro del rango de operación normal (entre $20\mu\Omega$ y $100\mu\Omega$). Por lo tanto, la barra funciona sin fallas locales.

La Figura 5.4, muestra la evolución de la dispersión de corrientes catódicas de la barra equipotencial convencional y la barra equipotencial de conectores reemplazables. La ocurrencia de fallas locales aumenta la resistencia media de contacto de cátodo desde $61\mu\Omega$ hasta $161\mu\Omega$. La dispersión de corrientes catódicas de la barra equipotencial convencional aumenta desde 13,9% a 20,8% aproximadamente durante los 4 años de operación. Por otro lado, el atributo reemplazo de conectores de la barra equipotencial propuesta, permite eliminar la fallas locales, evitando el aumento de las resistencia de contacto y de esta forma, ecualizar las resistencias, variando su valor medio desde $61\mu\Omega$ hasta $72\mu\Omega$ por efecto del envejecimiento natural sufrido por el cobre . Esto se refleja en la variación de su dispersión de corrientes desde 12,3% a 14,1% aproximadamente.

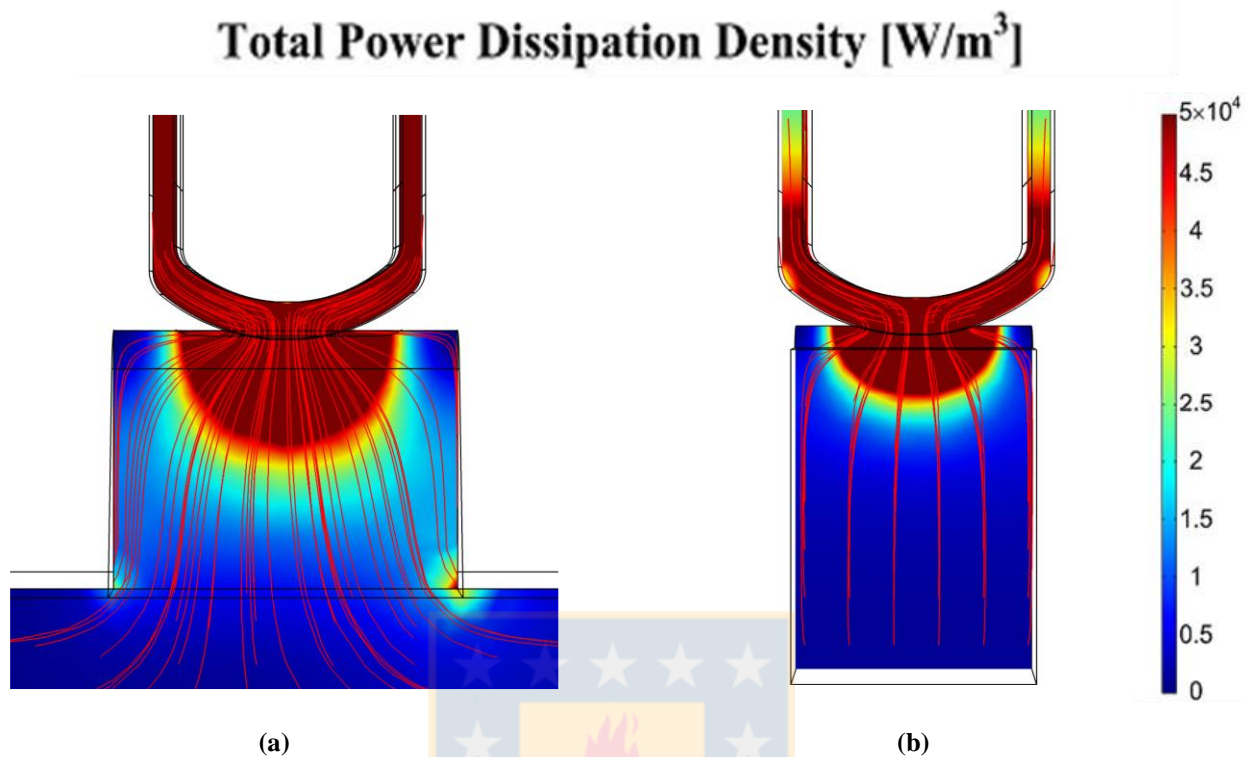


Figura 5.5 Diagrama de densidad total de potencia disipada para (a) conector de barra equipotencial convencional y (b) conector de barra equipotencial de conectores reemplazables. Fuente: Elaboración propia.

5.6. Reducción de potencia consumida

La barra propuesta, permite reducir la potencia media consumida, desde 3,1kW (barra convencional) a 2,5kW (barra propuesta). La potencia disipada por la barra equipotencial convencional al principio del ciclo es de 2.425W, mientras que para la barra equipotencial de conectores reemplazables es de 2.410W,. Luego de 4 años de operación, la potencia consumida por la barra convencional es de 3.926W versus 2.640W de la barra propuesta. Esta reducción se debe a la mejor dispersión de corrientes catódicas, el reemplazo de conectores dañados que permite ecuilibración de las resistencias de contacto de la barra, y la forma “S” de los conectores de la barra que reducen los puntos calientes por cambio en la dirección de las corrientes en el conector. La Figura 5.5, muestra la contrastación de la potencia de un contacto de barra equipotencial convencional y de barra propuesta, donde se aprecia la que no existe potencia disipada en los bordes de la barra propuesta.

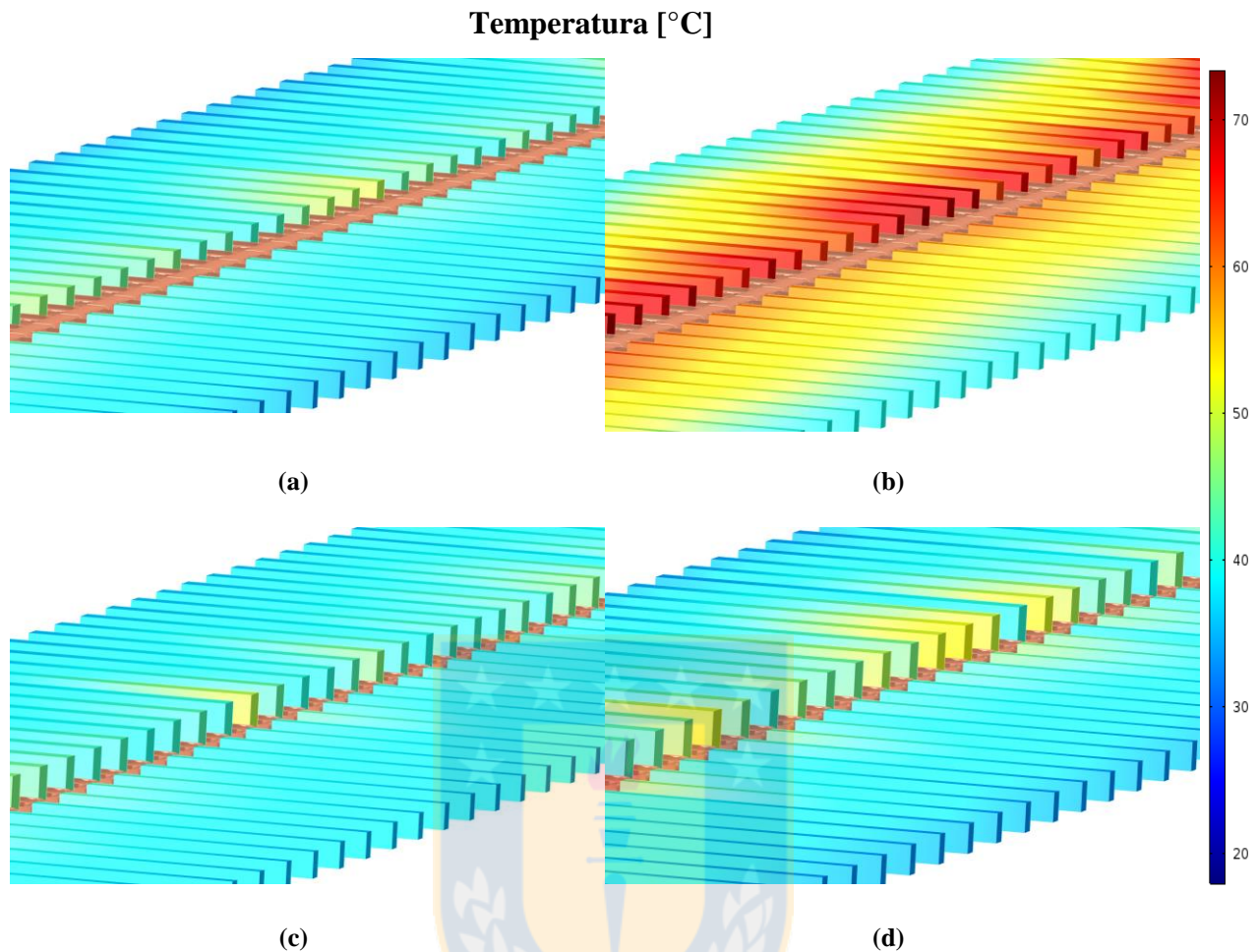


Figura 5.6 Perfil de temperatura de barra intercelda, barra equipotencial convencional al principio de operación 45°C (a) y con 4 años de antigüedad 72°C (b), barra equipotencial de conectores reemplazables al principio de operación 42°C (c) y con 4 años de antigüedad 45°C (d). Fuente: Elaboración propia.

5.7. Reducción de temperatura media de operación

Como se mencionó, el diseño propuesto permite una mejor disipación y ventilación de la barra. Esto en conjunto con una mejor distribución de corrientes reduce la temperatura de operación media en 15°C (desde 59°C convencional a 44°C propuesta). En específico, al principio de la operación, la temperatura se reduce de 45°C a 42°C. Por otro lado, al final de la operación de una barra equipotencial convencional (4 años), la temperatura se reduce desde 72°C a 45°C. La Figura 5.6, muestra el perfil de temperaturas de ambas configuraciones, se aprecia que la temperatura de operación de la barra propuesta es menor

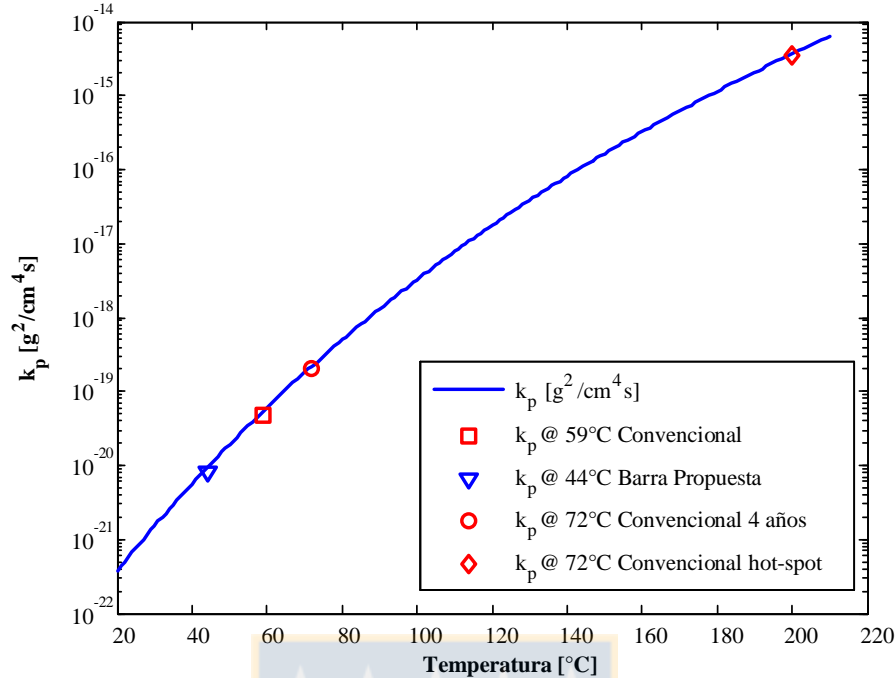


Figura 5.7 Tasa de corrosión de cobre C11000 en función de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.

La temperatura de operación tiene directa relación con la tasa de corrosión de la barra [34]. Como se ha indicado, la barra intercelda equipotencial convencional opera en promedio con una temperatura de 15°C superior que la barra intercelda propuesta (59°C versus 44°C). Esto significa que la tasa de corrosión de la barra convencional es 4 veces mayor que en la barra propuesta [34]. Véase la Figura 5.7. Además, el diseño del segmento en forma de “S” y la ausencia de capping-board mejora la ventilación de la barra propuesta. Esto reduce el sobrecalentamiento de los contactos de electrodo y de barra intercelda durante fallas locales y cortocircuitos metalúrgicos. Para temperaturas de operación locales superiores a 100°C (hot spots), la tasa de corrosión aumenta más de 60 veces (Figura 5.7). Por lo tanto, la barra intercelda propuesta libre de hot spots ayuda a preservar la conductividad eléctrica de barras colectoras de cobre y sus propiedades mecánicas.

5.8. Conclusiones

La barra intercelda equipotencial de conectores reemplazables propuesta proyecta una reducción de la temperatura de operación promedio de 15°C (desde 59°C a 44°C). La adición del atributo de hot-swapability ofrece mayor vida útil de las barras, operación libre de hot-spots y mejor desempeño. Además, permite el despeje de una falla local en tiempo reducido y sin detener el proceso

de electro-depositación de cobre en las celdas afectadas. La eliminación de fallas locales, mantiene ecualización de las resistencias de contactos entre barra y hanger-bars de electrodos, lo que conlleva a una disminución de la dispersión de corrientes catódicas promedio en 4 años, de 17,2% a 13,2%. Consecuentemente, reduce el consumo específico proyectado de energía promedio de 1.974kWh/ton a 1.933kWh/ton (ver Tabla 5.1). Finalmente, la barra propuesta reduce el peso de 130kg (barra equipotencial convencional) a aproximadamente 55kg, lo que reduce los costos de transporte y de almacenamiento.

Tabla 5.1 Resumen de valores promedio en un período de 4 años de desviación estándar de corriente, temperatura de operación promedio, resistencia de contacto de cátodo promedio y pérdidas para configuración convencional y propuesta. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros	Unidad	Configuración	Configuración
		Convencional	Propuesta
Dispersión de corrientes promedio	%	17,2	13,2
Valor medio de resistencia de cátodo	$\mu\Omega$	111	67
Pérdidas	kW	3,1	2,5
Temperatura media de operación	$^{\circ}\text{C}$	59	44
Consumo específico	kWh/ton	1.974	1.933

Capítulo 6. Conclusión

6.1. Conclusión

En este trabajo de tesis se estudiaron muestras industriales de corrosión y deformación de conectores de barras intercelda equipotenciales convencionales. Utilizando modelación 3D de Elementos Finitos, se determinaron las causas de este deterioro. Se propuso y se diseñó una barra equipotencial de conectores reemplazables para el proceso de electro-obtención de cobre, libre de capping-board, que mitiga el deterioro prematuro de las barras. Esta barra fue evaluada utilizando modelación de parámetros concentrados y de Elementos Finitos, sintonizada con valores industriales.

La barra equipotencial de conectores reemplazables reduce en 15°C la temperatura media de operación (59°C versus 44°C), reduciendo el recocido del cobre y la tasa de corrosión por acción de la neblina de ácido sulfúrico. Además, posee el atributo de hot-swappability, lo que permite reemplazar un conector dañado sin detener el proceso de depósito de cobre de las celdas involucradas, con tiempo reducido de maniobra de reemplazo (8 horas versus 10 minutos). Esto permite operar libre de hot-spots y mantener los indicadores clave del proceso dentro de valores nominales. Reduce el consumo específico de energía medio proyectado de 1.974kWh/Ton a 1.933kWh/Ton. Además, presenta menor dispersión media de corrientes en 4 años, desde 17,2% a 13,2%. Estas mejoras conllevan a menor ocurrencia de anomalías y mayor vida útil de la barra y de electrodos. Finalmente, la barra propuesta reduce el costo de fabricación utilizando un 50% menos de cobre comparada con la convencional (130kg vs 55kg).

6.2. Trabajos Futuros

Los trabajos futuros derivados de esta tesis son:

1. Pruebas a nivel de planta piloto y luego a nivel industrial de la barra equipotencial de conectores reemplazables propuesta en esta tesis.
2. Determinación del nivel de deterioro de barras intercelda in situ, para mantención preventiva de barras intercelda.
3. Estudio de operación del proceso de electro-obtención de cobre, con modulación de corrientes para integración ERNC.



Capítulo 7. Publicaciones

7.1. Publicaciones ISI (5)

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; L. Munoz, "3D FEM Thermal and Electrical Analysis of Copper Electrowining 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)

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 Realiability", 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)

7.2. Conferencias (6)

E. P. Wiechmann, P. E. Aqueveque and L. G. Muñoz, "Equipotential bars with Replaceable Connectors for Copper Electrowinning", Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE, Portland, OR, 2016, pp. 1-5.

E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, E. J. Pino, L. Muñoz and J. A. Henríquez, "Intercell busbar design for copper electrowining," 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 electrowining 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 electrowining 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.

Capítulo 8. Bibliografía

- [1] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), “Anuario de Estadísticas del Cobre y otros minerales 1996 - 2015”, 2015.
- [2] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), “Competitividad de la minería chilena del cobre”, 2015.
- [3] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), “Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2016-2027”, 2016.
- [4] M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole, W. G. Davenport, "Extractive Metallurgy of Copper (Fifth Edition)", Elsevier Ltd., UK, 2011
- [5] M. Free, M. Moats, G. Houlachi, E. Asselin, A. Allanore, J. Yurko, S. Wang, "Electrometallurgy 2012", John Wiley & Sons, USA, 2012.
- [6] M. Moats, and M. Free, “A Bright Future for Copper Electrowinning”, JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol 10, pp. 34 – 36, Oct. 2007.
- [7] T. Robinson, J. Jenkins, S. Rasmussen, M. King, and W. Davenport, “Copper Electrowinning—2003 World Tankhouse Operating Data”, in Proc. Copper - Cobre, J. E.
- [8] E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, and R. Mayne-Nicholls, "Reducing Specific Energy to Shrink the Carbon Footprint in a Copper Electrowinning Facility", IEEE Trans. On. Ind. Appl., vol.47, n°3, pp.1175-1179, 2011
- [9] E. P. Wiechmann, P. Aqueveque, G. A. Vidal and J. A. Henríquez, "Contact System Design to Improve Energy Efficiency in Copper Electrowinning Processes", IEEE Trans. On. Ind. Appl., vol.49, n°6, pp.2461-2465, 2013.
- [10] E. P. Wiechmann, P. Aqueveque, J. A. Henríquez, L. G. Muñoz and A. S. Morales, " BMC: A Modulating Bar for Copper Electrowinning Designed for Heavy Duty and High Reliability", IEEE Trans. On. Ind. Appl., vol.50, n°4, pp.2375-2381, 2013.
- [11] Wiechmann, E.P.; Munoz, L.G.; Aqueveque, P.E.; Vidal, G.A.; Henríquez, J.A., "Introducing a Bypass-Backup Connection System for Current-Mode Copper Electrowinning Intercell Bars," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.50, no.2, pp.1490,1495, March-April 2014.

- [12] E. Wiechmann; A. Morales; P. Aqueveque; E. Pino; L. Muñoz; J. Henríquez, “Intercell Busbar Design for Copper Electrowinning”, Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, 18-22 Oct. 2015, Dallas, Texas, USA.
- [13] E. Wiechmann; P. Aqueveque; J. Henríquez; L. Muñoz, “3D FEM Thermal and Electrical Analysis of Copper Electrowinning Intercell Bars”, Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE, 18-22 Oct. 2015, Dallas, Texas, USA.
- [14] S. Verdugo, R. Brantes y J. Cantallops, “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre año 2014”, Comisión Chilena del Cobre COCHILCO, 2015.
- [15] C. Montes y J. Cantallops, "Actualización de la información sobre emisiones de gases de efecto invernadero directos en la minería del cobre año 2013", Comisión Chilena del Cobre COCHILCO, 2014.
- [16] G. Vidal. “Avances en la Tecnología de EW de Cobre: Barras Interceldas Segmentadas”, Tesis de Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Escuela de Graduados de la Universidad de Concepción. Julio 2005.
- [17] Laitinen, J.T. Tantt, H.K. Virtanen, T.M. Kumara and O.T. Järvinen, "Finite Element Modelling of an Electrolysis Cell", Copper Electrorefining and Electrowinning 2007, vol 5, pp. 561-573, Canada., 2007.
- [18] E. P. Wiechmann, G. A. Vidal, J. A. Pagliero, “Current-Source Connection of Electrolytic Cell Electrodes: An Improvement for Electrowinning and Electrorefinery”, IEEE Trans. On Ind. Applications, Vol 42, N°3, pp. 851-855, May/June 2006.
- [19] P.E. Aqueveque, E.P. Wiechmann and R.P. Burgos, “Short-Circuit Detection for Electrolytic Processes Employing Segmented Intercell Bars”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 45, No 4, pp. 1225 – 1231, 2009.
- [20] E. Wiechmann, A. Morales, P. Aqueveque, E. Pino y L. Aburto, “On the Design Robutness and Long Term Performance of the Most Used Electrodes in the Copper Electrowining Industry”, Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2015 IEEE, Oct. 2015.
- [21] A. Walker, “Plant for the Electrodeposition of Metals”, U. S. Patent 687 800, Dec. 3, 1901.
- [22] E.P. Wiechmann, G.A. Vidal y A.J. Pagliero. “Celdas Electrolíticas de conexión eléctrica Multicircuital”, Patente N° 2608-1999, September 2007- válida hasta Septiembre de 2022. Instituto Nacional de Propiedad Industrial, INAPI, Chile, 2007.

- [23] Graham Lanktree, "Winning Electrowinning - Barrick's Zaldívar refinery puts Segmentada technology through its paces", Processing CIM Magazine, Volume 6, No.8, Upfront pp. 30 – 31, Dec 2011/Jan 2012.
- [24] H. Virtanen, I. Virtanen, T. Kivistö and T. Marttila, "Busbar Construction for Electrolytic Cell," United States Patent N° 6,342,136, Jan. 29, 2002.
- [25] E. Wiechmann, «Barra Intercelda Para Procesos Electrolíticos, Compuesta Por Una 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 2010-00472, 21 11 2013.
- [26] H. Virtanen, O. Jarvinen, L. Palmu y I. Laitinen, "Method for arranging electrodes in an electrolytic process and an electrolytic system" United States Patent N° 8,303,795, Nov. 6, 2012.
- [27] M. Free, M. Moats, G. Houlachi, E. Asselin, A. Allanore, J. Yurko, S. Wang, "Electrometallurgy 2012", John Wiley & Sons, USA, 2012.
- [28] ASTM B187/B187M-1, Standard Specification for Copper, Bus Bar, Rod, and Shapes and General Purpose Rod, Bar, and Shapes. <http://www.astm.org>
- [29] A. Gouch, "Metal for Busbars", 2010. <http://www.nesma.org.au>
- [30] K. Demirhan, G. E. Derkits, Jr, D. A. Fleming, J. P. Franey, K. Hannigan, R. L. Opila, J. Punch, W. D. Reents, Jr, M. Reid, B. Wright, C. Xu, "Corrosion of Cu under Highly Corrosive Environments", J Electrochem Soc, vol.157, pp.30-35, 2010.
- [31] Erico Products Inc; "Cadweld Copper Busbar Design Manual", pp. 8-11, Ohio, USA, 1980.
- [32] L. Muñoz. "Utilización de Termografía para detección de anomalías en procesos electrolíticos", Memoria de Título para obtener el Título de Ingeniero Civil Electrónico, Universidad de Concepción. Julio 2011.
- [33] E. P. Wiechmann, A. S. Morales, P. Aqueveque, E. J. Pino, L. Muñoz and J. A. Henríquez, "Intercell Busbar Design for Copper Electrowinning," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 5, pp. 4480-4488, Sept.-Oct. 2016.
- [34] 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.

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

Anexo C: Cámara Fluke Ti-55

	Fluke Ti55FT	Fluke Ti50FT	Fluke Ti45FT	Fluke Ti40FT
Imaging performance				
Field of view (FOV)*	23° horizontal x 17° vertical			
Spatial resolution (IFOV)*	1.30 mrad		2.60 mrad	
Min focus distance*	0.15 m (5.9 in)			
Thermal sensitivity (NETD)	± 0.06 °C at 30 °C (50 mK)	± 0.07 °C at 30 °C (70 mK)	± 0.08 °C at 30 °C (80mK)	± 0.09 °C at 30 °C (90mK)
Detector data acquisition/ image frequency	60 Hz/60 Hz		30 Hz/30 Hz	
Focus	SmartFocus; one finger continuous focus (manual)			
IR digital zoom	2x, 4x, 8x	2x	2x	—
Detector type	320 x 240 Focal Plane Array, Vanadium Oxide (VOx) Uncooled Microbolometer		160 x 120 Focal Plane Array, Vanadium Oxide (VOx) Uncooled Microbolometer	
Spectral band	8 µm to 14 µm			
Digital image enhancement	Automatic full time enhanced			
On camera operating modes	Full thermal, full visual light or merged thermal-visual images. Picture-in-Picture		Full thermal, full visual light or merged thermal-visual images. Picture-in-Picture	
Visible light camera	1280 x 1024 pixels, full color			
Visible light digital zoom	2x, 4x	2x	2x	—
Temperature measurement				
Calibrated temperature range	-20 °C to 600 °C (-4 °F to 1112 °F) in three ranges Range one = -20 °C to 100 °C (-4 °F to 212 °F) Range two = -20 °C to 350 °C (32 °F to 662 °F) Range three = 250 °C to 600 °C (482 °F to 1112 °F)	-20 °C to 350 °C (-4 °F to 662 °F) in two ranges Range one = -20 °C to 100 °C (-4 °F to 212 °F) Range two = -20 °C to 350 °C (32 °F to 662 °F)	-20 °C to 600 °C (-4 °F to 1112 °F) in three ranges Range one = -20 °C to 100 °C (-4 °F to 212 °F) Range two = -20 °C to 350 °C (32 °F to 662 °F) Range three = 250 °C to 600 °C (482 °F to 1112 °F)	-20 °C to 350 °C (-4 °F to 662 °F) in two ranges Range one = -20 °C to 100 °C (-4 °F to 212 °F) Range two = -20 °C to 350 °C (32 °F to 662 °F)
Optional—High temperature	—	—	Up to 1200 °C (2192 °F) Range 4 = 500 °C to 1200 °C (932 °F to 2192 °F)	—
Accuracy	± 2 °C or 2 % (whichever is greater)			
Measurement modes	Centerpoint, center box (area min/max, average), moveable spots/boxes, user defined field/text annotations, automatic hot and cold point detection, visible color alarm above and below	Centerpoint, center box (area min/max, average)	Centerpoint, center box (area min/max, average), moveable spots/boxes, user defined field/text annotations, automatic hot and cold point detection, visible color alarm above and below	Centerpoint, center box (area min/max, average)
Emissivity correction	0.1 to 1.0 (0.01 increments)			
Image presentation				
Digital display	13 cm (5 in) diagonal large high-resolution digital display			
LCD backlight	Sunlight readable color LCD			
Video output	RS170 EIA/NTSC or CCIR/PAL composite video			
Palettes	Grayscale, grayscale inverted, blue red, high contrast, hot metal, ironbow, amber, amber inverted			
Optical lenses				
54 mm telephoto lens	High precision Germanium lens Field of view (FOV): 8° horizontal x 6° vertical			
	Spatial resolution (IFOV): 0.47 mrad		Spatial resolution (IFOV): 0.94 mrad	
	Min focus distance: 0.6 m (1.97 ft)			