



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Prof. Patrocinante:

Eduardo Wiechmann, PhD.

Estudio de Eficiencia Energética Utilizando Tecnología Optibar

Jorge Alberto Henríquez Muñoz

Informe de memoria de título para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico

Concepción, Chile.

Agosto 2011

A mis padres.



Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron durante todo este proceso. Comenzando por mi familia. Agradecerle a mis padres, Helga y Rodrigo, que siempre apoyaron mis decisiones y a mis hermanos, Camila y Alejandro.

Además quiero agradecer a Dr. Eduardo Wiechmann por su apoyo durante todo este largo proceso, mencionar también a Dr. Guillermo Vidal y Mónica Beltrán por todo el apoyo que me prestaron durante este proceso de la memoria.

A mis amigos y compañeros Luis, Carlos y Aníbal por toda la ayuda que me dieron durante el tiempo que estuvimos trabajando en el norte. También agradecer a tres personas especiales que me apoyaron y ayudaron en distintas etapas de mi carrera. A mi amigo de toda la vida, Camilo, a un amigo que conocí en la universidad, Nicolás y por último a mi compañera de trabajos, Natalia.

Agradecer también a todas las personas que colaboraron con nosotros en Minera Zaldívar: Roberto Rojas, Cristian Castro, Carolina Valdivia, Francisco Suntherland, Rodrigo Ormeño, Carolina Zuanic, Juan Carlos Alvarez, Luis Arriagada, Jorge Molina, Juan Cruz, José Otaiza, Claudio Ruiz, Marcelo Aracena, Javier Trujillo y a todo el personal de Minera Zaldívar en general.

Y por último un párrafo especial a Carola, que me aguantó durante todo el proceso de la memoria, que incluyó un periodo de 6 meses de trabajo en el norte. Gracias por estar siempre conmigo, escucharme y preocuparte por mí.

A todos uds. gracias.

Jorge Henríquez

Resumen

Este trabajo considera el estudio de impacto que tiene la tecnología Optibar sobre la eficiencia energética de una planta de electrowinning. El impacto se plantea en términos de aumento en la eficiencia de corriente y disminución del consumo específico. Con Optibar se logra disminuir el índice de dispersión lo que se traduce en un aumento de la eficiencia de corriente. La eficiencia de corriente promedio obtenida con las barras tipo Walker es de 90,26 % y con Optibar se logra una eficiencia del 92,92 % lo que representa un aumento de 2,66 %. En cuanto al consumo específico, con la barra Walker se logra un consumo de 1.964[kWh/TMF] y con Optibar se obtiene un consumo específico promedio de 1.887[kWh/TMF], lo que se traduce en una reducción del 77[kWh/TMF]. Además se plantea un análisis de la huella de carbono y la reducción de ésta al utilizar la tecnología Optibar.

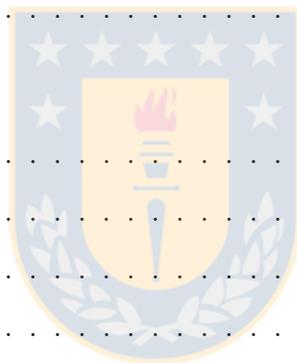
Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Abreviaciones	XV
Nomenclatura	XVI
1. Introducción	1
1.1. Producción Internacional de Cobre	1
1.1.1. Procesos del cobre	2
1.2. Trabajos Previos	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Alcances y Limitaciones	4
1.6. Temario y Metodología	4
2. Proceso del Cobre	6
2.1. Introducción	6



2.1.1.	Lixiviación (LX)	6
2.1.2.	Extracción por Solventes (SX)	7
2.1.3.	Electrowinning (EW)	7
2.2.	Planta de Electroobtención	9
2.2.1.	Alimentación de Nave Electrolítica	9
2.2.2.	Barras de Alimentación	9
2.2.3.	Celdas Electrolíticas	10
2.2.4.	Barras Intercelda	10
2.3.	Indicadores de Planta	14
2.3.1.	Índice de Dispersión	14
2.3.2.	Eficiencia de Corriente	15
2.3.3.	Consumo Específico	16
2.4.	Operación de Planta	17
2.4.1.	Cosecha y siembra de cátodos	17
2.4.2.	Cortocircuitos	18
2.4.3.	Circuitos Abiertos	19
2.4.4.	Marco Cortocircuitador	21
3.	Modelos Eléctricos	22
3.1.	Introducción	22
3.2.	Resistencia de Contacto	23
3.2.1.	Distribución de Resistencia	23
3.2.2.	Simulación de Resistencia	26
3.3.	Resistencia de Electrolito	26
3.3.1.	Distribución de Resistencia	28
3.3.2.	Simulación de Resistencia	29
3.3.3.	Influencias del ánodo sobre la eficiencia	31
3.4.	Planta de Eletrowinning	32
3.4.1.	Celda electrolítica básica	32
3.4.2.	Celdas Electrolíticas	33

3.5. Limitaciones de los Modelos	36
3.6. Conclusiones	36
4. Simulaciones	37
4.1. Introducción	37
4.2. Alcances y Limitaciones	37
4.3. Operación de Planta	38
4.3.1. Operación Normal	38
4.3.2. Circuito Abierto	41
4.3.3. Cortocircuito	50
4.3.4. Contacto Sucio	52
4.3.5. Cosecha	55
4.4. Conclusiones	58
5. Mediciones de Planta	60
5.1. Introducción	60
5.2. Implementación	60
5.2.1. Materiales	61
5.3. Resultados	61
5.3.1. Distribución de Corriente	61
5.3.2. Corriente del Rectificador	65
5.3.3. Voltaje de Celda	67
5.3.4. Eficiencia de corriente	71
5.3.5. Consumo Específico	74
5.3.6. Calidad del Cobre	77
5.4. Conclusiones	80
6. Huella de Carbono	81
6.1. Introducción	81
6.2. Definición	81
6.3. Cálculo de Huella	82



6.4. Panorama Nacional	86
6.4.1. Emisiones por Suministro	87
6.4.2. Emisiones por Área	87
6.5. Influencia Optibar	89
6.6. Conclusiones	89
7. Conclusiones	91
7.1. Conclusiones	91
Bibliografía	96
A. Resistencias de Contacto	97
B. Resistencias de Electrolito	100
C. Especificaciones Técnicas	102
C.1. Tenaza de Corriente AC/DC i1010	102
C.2. Multímetro Fluke 287	103
C.3. Termómetro Infrarrojo 62mini	105
D. Datos de Planta	106
D.1. Tabla 1	106
D.2. Tabla 2	112
E. Regresiones Lineales	120
E.1. Voltajes de Celda	120
E.2. Eficiencia de Corriente	121
E.3. Consumo Específico	122



Índice de figuras

1.1. Distribución de la producción mundial de cobre refinado. Año 2009	1
1.2. Proceso tratamiento del cobre de baja ley.	2
2.1. Proceso de electrólisis producido en una celda.	8
2.2. Planta de Ew de Compañía Minera Barrick Zaldívar (Zaldívar).	9
2.3. Configuración de una Barra Walker.	11
2.4. Configuración de una Barra Doble Contacto.	12
2.5. Configuración de una Barra Optibar.	13
2.6. Configuración de una Barra Whitehead.	14
2.7. Paquete de cobre de alta calidad.	18
2.8. Nodulación producida por un cortocircuito metalúrgico.	19
2.9. Nodulación producida por un circuitos abierto en un ánodo.	20
2.10. Marco Cortocircuitador.	21
3.1. Plano de un cátodo.	23
3.2. Zona de contacto de hangerbar del ánodo.	24
3.4. Distribución de Resistencias de Contacto de Cátodo.	24
3.3. Perfil de hangerbar de ánodo.	25
3.5. Resistencia de Contacto real y simulada.	26
3.6. Distribución de Resistencias de Electrolito.	29
3.7. Distribución de Resistencias de Electrolito reales y simuladas.	30
3.8. Resistencia en la celda electrolítica.	32
3.9. Modelo de Randles simplificado, con inclusión distribuciones de resistencias. . .	33

3.10. Celda electrolítica.	33
3.11. Interconexión de una Celda Walker.	34
3.12. Interconexión de una Celda.	35
4.1. Dispersión de las Corrientes.	39
4.2. Vista 3D en operación normal: Optibar.	40
4.3. Vista 3D en operación normal: Walker.	40
4.4. Vista 3D en operación Circuito Abierto (<i>ciab</i>): Optibar.	42
4.5. Vista 2D en operación <i>ciab</i> : Optibar.	42
4.6. Vista 3D en operación <i>ciab</i> : Walker.	43
4.7. Vista 2D en operación <i>ciab</i> : Walker.	44
4.8. Vista 3D en operación múltiples Circuitos Abiertos (<i>ciab's</i>): Optibar.	45
4.9. Vista 2D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Optibar.	45
4.10. Vista 3D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Walker.	46
4.11. Vista 2D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Walker.	47
4.12. Vista 3D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Optibar.	48
4.13. Vista 2D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Optibar.	48
4.14. Vista 3D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Walker.	49
4.15. Vista 2D en operación múltiples <i>ciab's</i> : Walker.	49
4.16. Vista 3D en operación Cortocircuito (<i>coci</i>): Walker	50
4.17. Vista 3D en operación <i>coci</i> : Optibar	51
4.18. Vista 3D en operación cátodo sucio: Optibar.	53
4.19. Vista 2D en operación cátodo sucio: Optibar.	54
4.20. Vista 3D en operación cátodo sucio: Walker.	54
4.21. Vista 2D en operación cátodo sucio: Walker.	55
4.22. Comparación de índices de dispersión por celda.	56
4.23. Vista 3D en operación cosecha: Optibar.	56
4.24. Vista 2D en operación cosecha: Optibar.	57
4.25. Vista 3D en operación cosecha: Walker.	57
4.26. Vista 2D en operación cosecha: Walker.	58

5.1. Vista 3D de corrientes reales: Optibar.	62
5.2. Vista 2D de corrientes reales: Optibar.	63
5.3. Vista 3D de corrientes reales: Walker.	63
5.4. Vista 2D de corrientes reales: Walker.	64
5.5. Índices de dispersión de una configuración Optibar Simulada (rojo) y Real (azul).	65
5.6. Corriente del Rectificador.	66
5.7. Corriente del Rectificador en grupos Optibar y Walker.	67
5.8. Voltajes de Celda para grupos Optibar (azul) y Walker(rojo).	68
5.9. Regresión lineal para los voltajes de celda Walker.	69
5.10. Regresión lineal para los voltajes de celda Optibar.	70
5.11. Regresión lineal para los voltajes de celda Optibar y Walker.	71
5.12. Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Walker.	72
5.13. Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Optibar.	72
5.14. Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Optibar y cosecha con pesos promedio de cátodos mayor a 42,5 kg.	73
5.15. Regresiones lineales.	73
5.16. Consumo Específico v/s Corriente grupo Walker.	75
5.17. Consumo Específico v/s Corriente grupo Optibar.	76
5.18. Consumo Específico v/s Corriente en grupo Optibar y cosecha con pesos promedio de cátodos mayor a 42,5 kg.	76
5.19. Regresiones lineales.	77
5.20. High Grade según tecnología.	79
6.1. Participación de emisiones directas e indirectas según sistema de generación	87
6.2. Emisiones según área de la minería.	88

Índice de tablas

2.1. Detalle de circuitos abiertos	20
3.1. Parámetros para calcular la resistencia de electrolito	28
3.2. Diferencias en R_{el} según ancho de electrodos	30
4.1. Comparación Walker-Optibar: Operación Normal	39
4.2. Comparación Celda 7 Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto	41
4.3. Datos de un <i>ciab</i> en una barra Optibar.	41
4.4. Datos de un <i>ciab</i> en una barra Walker.	43
4.5. Comparación Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto Múltiples	44
4.6. Comparación Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto Múltiples	47
4.7. Comparación Walker-Optibar	51
4.8. Disminución de la eficiencia en función de la duración de un <i>coci</i>	52
4.9. Comparación Walker-Optibar: Operación Contactos Sucios	53
5.1. Dispersión de corrientes en planta	62
5.2. Eficiencia de corriente por Tecnología.	74
5.3. Consumo específico en [kWh/TMF] por Tecnología.	75
5.4. Clases químicas del cobre.	78
5.5. Resumen técnico-económico.	80
6.1. Equivalentes entre Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Carbono equivalente.	82
6.2. Participación de la minería del cobre en el consumo eléctrico.	84
6.3. Matriz energética del Sistema Interconectado del Norte Grande (<i>SING</i>).	84
6.4. Matriz energética del Sistema Interconectado Central (<i>SIC</i>).	85

6.5. Tabla de factores de emisión por fuente de generación.	85
6.6. Factores de emisión por sistema interconectado.	86
6.7. Cargas Unitarias de Emisión por Área. Año 2009.	88
6.8. Valores Carga Unitaria de Emisión (CUE) para productos comerciales. Año 2009.	89
6.9. Disminución de CUE para los sistemas interconectados utilizando Optibar en producción de cátodos Eletrowinning (EW).	89
C.1. Especificaciones técnicas de tenaza i1010 AC/DC.	102
C.2. Especificaciones de seguridad de tenaza i1010 AC/DC.	102
C.3. Especificaciones de mecánicas y general de tenaza i1010 AC/DC.	103
C.4. Especificaciones técnicas de multímetro Fluke 287.	103
C.5. Especificaciones de seguridad de multímetro Fluke 287.	103
C.6. Especificaciones ambientales de multímetro Fluke 287.	104
C.7. Especificaciones mecánicas y generales de multímetro Fluke 287.	104
C.8. Especificaciones técnicas de multímetro Fluke 287.	105
E.1. Factores de regresión lineal para E_c Walker	120
E.2. Factores de regresión lineal para E_c Optibar	121
E.3. Factores de regresión lineal para η Walker	121
E.4. Factores de regresión lineal para η Optibar	121
E.5. Factores de regresión lineal para η Optibar > 42,5[kg]	122
E.6. Factores de regresión lineal para E_s Walker	122
E.7. Factores de regresión lineal para E_s Optibar	122
E.8. Factores de regresión lineal para E_s Optibar > 42,5[kg]	123

Abreviaciones

COCHILCO	:	Comisión Chilena del Cobre
EW	:	Eletrowinning
SX	:	Extracción por Solventes
LX	:	Lixiviación
CONC	:	Cobre Concentrado
FUND	:	Cobre Fundido
ER	:	Electrorefinación
Zaldívar	:	Compañía Minera Barrick Zaldívar
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
<i>coci</i>	:	Cortocircuito
<i>ciab</i>	:	Circuito Abierto
<i>SING</i>	:	Sistema Interconectado del Norte Grande
<i>SIC</i>	:	Sistema Interconectado Central
<i>ML</i>	:	Manual Liso
<i>MG</i>	:	Manual Granulado
<i>ML-E</i>	:	Manual Liso Especial
<i>MG-E</i>	:	Manual Granulado Especial
<i>HG</i>	:	High Grade
Fe	:	Fierro
S	:	Azufre
Pb	:	Plomo



MDL : Mecanismos de Desarrollo Limpio

CUE : Carga Unitaria de Emisión

LME : London Metal Exchange



Nomenclatura

- η : eficiencia de corriente
- Q : carga eléctrica [C]
- q : carga eléctrica de un electrón $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C]
- N_A : número de Avogadro $6,022 \cdot 10^{23}$ [mol⁻¹]
- n : número de valencia : +2
- M : masa atómica cobre 63,536[u]
- \hat{I} : corriente acumulada [A · h]
- $\hat{\sigma}_i$: índice de dispersión
- \overline{E}_c : voltaje de celda [V]
- E_s : consumo específico [kWh/ton]
- $\Gamma(k)$: función gamma



Capítulo 1

Introducción

1.1. Producción Internacional de Cobre

Chile es reconocido a nivel mundial por ser un país minero. De hecho el 7,1 % del PIB de Chile es producto de la minería, siendo el 5,9 % producto específicamente de la minería del cobre. Además la minería en Chile concentra el 57,7 % de las exportaciones del año 2009, siendo la minería del cobre responsable del 87,0 % de las exportaciones mineras.

A nivel mundial se produce 18,959 millones de toneladas de cobre refinado, donde Chile sólo aporta con el 3,271 millones de toneladas, lo que es equivalente al 17,6 % de la producción mundial[1].

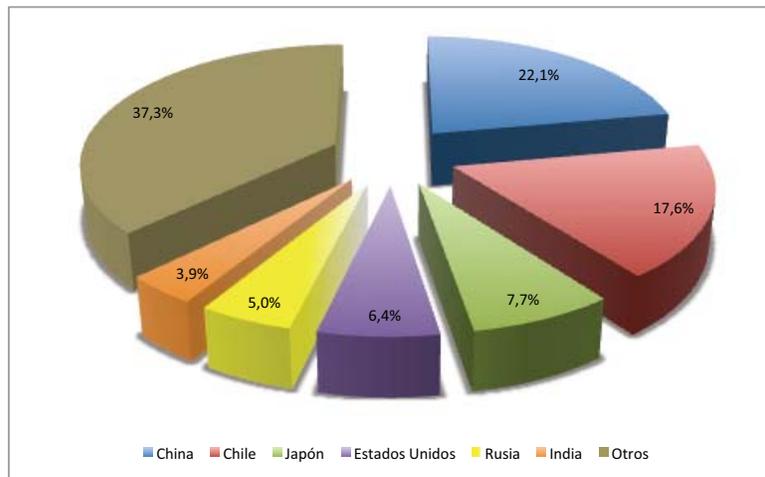


Fig. 1.1: Distribución de la producción mundial de cobre refinado. Año 2009

1.1.1. Procesos del cobre

En la minería existen distintos procesos para obtener cobre. Por lo general, el proceso depende del origen del mineral, es decir si es un mineral sulfatado u oxidado. En cada proceso se obtienen distintos productos con distintos niveles de pureza. Los procesos más comunes son:

- Para minerales oxidados:
 - Eletrowinning (EW).
- Para minerales sulfatados:
 - Cobre Concentrado (CONC).
 - Cobre Fundido (FUND), que considera blíster y ánodos.
 - Electrorefinación (ER).

Para la obtención de los minerales oxidados, se utiliza EW. En la fig. 1.2 se muestra a grandes rasgos el proceso para obtener un cátodo SX-EW el cual será descrito con mayor detalle en el capítulo 2.

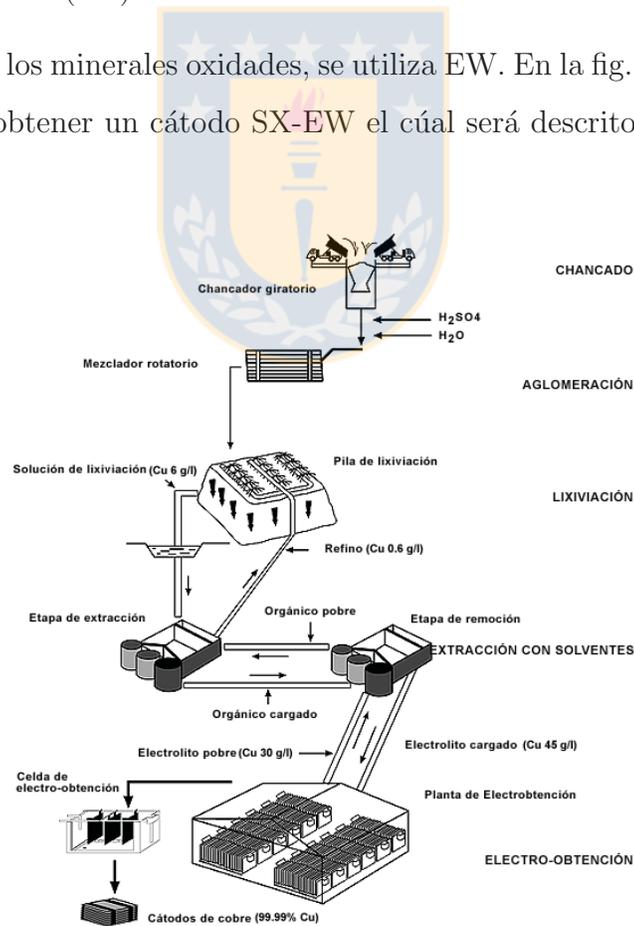


Fig. 1.2: Proceso tratamiento del cobre de baja ley.

Los cátodos obtenidos mediante EW tienen una pureza de 99,99% a igual que los cátodos producidos mediante ER, que es la pureza más alta que se puede lograr. Luego están los ánodos y blíster que tiene una pureza de 99,6% y luego el concentrado con una pureza de 35%.

1.2. Trabajos Previos

Son varios los trabajos que existen introduciendo nuevas tecnologías para optimizar el proceso de electroobtención y específicamente nuevas configuraciones de barras intercelda. La barra más común – y que es utilizada en casi todas las plantas de EW y ER- es la barra tipo Walker o Convencional[2], que es una barra equipotencial, creada en 1901 por Arthur L. Walker. Esta es la forma básica de conexión que no considera ningún tipo de optimización ni en la forma de transmitir la corriente ni en los contactos. Otro tipo de barra es la barra Outokumpu[3], que presenta un doble contacto. Esta barra fue patentada en 2002 por Outotec y es utilizadas en algunas naves electrolíticas. Por ultimo está Optibar[4], que es una barra patentada en 2007 por la Universidad de Concepción, la cual genera un cambio completo en la forma de transmitir la corriente. Esta barra está siendo utilizada actualmente en Zaldívar.

La diferencia entre las barras radica esencialmente en la distribución de corriente que presentan en los electrodos. La configuración Optibar ha demostrado tener una distribución de corriente menor, por lo tanto mejor, que las otras barras intercelda, tanto en simulaciones como en mediciones en plantas reales.

Las comparaciones realizadas entre las distintas configuraciones de las barras siempre se han basado en datos teóricos, demostrando erróneamente la superioridad de la configuración de Doble Contacto por sobre la configuración Optibar[5].

1.3. Hipótesis

La utilización de la tecnología Optibar permite el aumento de la eficiencia energética, disminuyendo la energía específica utilizada en la planta de electroobtención y disminuyendo de esta forma también la huella de carbono por ella producida.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Realizar un estudio de la eficiencia al utilizar tecnología Optibar en una planta de electroobtención.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el impacto sobre la eficiencia energética de la tecnología Optibar.
- Obtener un modelo eléctrico del proceso.
- Determinar la reducción de la huella de carbono que se obtiene con la tecnología.
- Comparar el consumo de energía con Optibar frente al consumo promedio que se obtiene en Chile.

1.5. Alcances y Limitaciones

Se realizará un trabajo teórico sobre los modelos que existen, y en caso de no existir se crearán. Luego se corroborarán los datos con mediciones realizadas en una planta de electroobtención.

1.6. Temario y Metodología

El trabajo se ha organizado en 6 capítulos.

En el primer capítulo se realiza una introducción al trabajo, donde se expone producción de cobre mundial y a grandes rasgos el proceso. Además se detallan las hipótesis, objetivos y limitaciones del trabajo.

En el segundo capítulo se explica el proceso de la minería del cobre. Se describen en más detalle las barras utilizadas y los componentes de una planta de EW

En el tercer capítulo definirán los modelos eléctricos que definen el sistema. Se utilizarán modelos teóricos existentes y se ajustarán a los parámetros de una planta de EW real.

El cuarto capítulo muestra los resultados de las simulaciones, en distintos estados. Se simulará para operación normal y operación con fallas de distinto nivel, para ver las ventajas que puede presentar una tecnología sobre otra.

El quinto capítulo es de Resultados de una planta real. Se muestran los resultados de una planta real utilizando tecnología Optibar y tecnología Walker, realizando además las comparaciones entre los resultados.

El sexto capítulo trata de la huella de Carbono, el cálculo de esta, el nivel de reducción y la comparación con el promedio de Chile.

El séptimo capítulo es de conclusiones finales del trabajo y se proponen trabajos futuros.



Capítulo 2

Proceso del Cobre

2.1. Introducción

En la minería del cobre existen dos formas de obtener cobre de alta pureza (99,99 %). Una de ellas es mediante ER y la otra es utilizando EW. Si bien son procesos bastante parecidos en su etapa final, la preparación anterior es bastante distinta. En este trabajo nos enfocaremos en el proceso de EW.

2.1.1. Lixiviación (LX)

Es el proceso en que un líquido disolvente se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de unos de los componentes del sólido. En la industria minera del cobre la lixiviación se realiza en pilas, que son regadas por ácido sulfúrico distribuido homogéneamente por cañerías a través de todos los paños. El ácido es recolectado en el fondo de las pilas por sifones, los cuales dirigen todo el flujo aportado por todos los paños a distintas piscinas, para luego ser enviado al proceso de Extracción por Solventes (SX)[6].

Además de la Lixiviación en pilas anteriormente mencionada, existen otras formas de lixiviación, como la Lixiviación en botaderos, Lixiviación in Place y Lixiviación In Situ.

2.1.2. Extracción por Solventes (SX)

Es un proceso que permite purificar y concentrar soluciones. Este proceso se realiza con una fase orgánica, que posee un extrayente, que entra en contacto con una fase acuosa, que posee el metal de interés. En este caso la fase acuosa es el ácido sulfúrico cargado con cobre en una concentración entre 2gpl y 3gpl. El extrayente reacciona químicamente con el metal de la fase acuosa, adhiriendo el metal a la fase orgánica y manteniendo las impurezas en la fase acuosa. Luego por un proceso inverso se inyecta el metal nuevamente en una fase acuosa a una concentración cercana a los 40gpl. Esta fase acuosa, también llamada electrolito rico, es enviado a EW para su posterior refinación (obtención)[6].

2.1.3. Electrowinning (EW)

Es un proceso electroquímico donde se tiene un cátodo y un ánodo sumergidos en el electrolito proveniente de SX con una concentración típica de 40gpl. La reacción producida se puede explicar por separado, tomando la reacción que ocurre en el cátodo y la que ocurre en el ánodo[6].

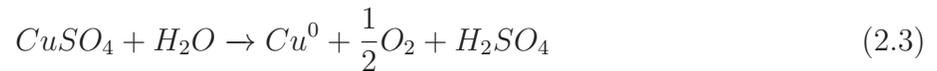
En el cátodo, el ión de cobre capta electrones pasando a ser un átomo de cobre de carga neutra. Luego ese átomo de cobre se adhiere a la placa del cátodo. La reacción anterior se puede resumir en la siguiente ecuación:



Luego la reacción que ocurre en el ánodo es la de oxidación del agua, es decir que el agua libera oxígeno en forma de gas y además libera un ion hidrógeno al electrolito. La reacción anódica se puede resumir en la siguiente ecuación:



Al resumir las ec. (2.1) y ec. (2.2) podemos ver que en presencia de un potencial dado, el sulfato de cobre liberará el cobre, y los hidrógenos se adherirán a él formando ácido sulfúrico. La reacción química completa de la electrolisis se puede ver en la siguiente ecuación:



En la fig. 2.1 se ilustra la forma en que se produce la reacción química. El cobre se adherirá al cátodo una vez que este haya liberado 2 electrones. Estos electrones se liberarán siempre y cuando la corriente que pasa a través del cátodo logre generar una tensión de polarización superior a $0,34[V]$, que es el voltaje de polarización del cátodo. Por otro lado, en el ánodo que genera la reacción descrita por la ec. (2.2) se liberará oxígeno e hidrógeno y entregará dos electrones que serán captados por el ánodo. Esta reacción solo se producirá si existe un potencial necesario para poder polarizar el ánodo, que debe ser mayor o igual a $-1,23[V]$.

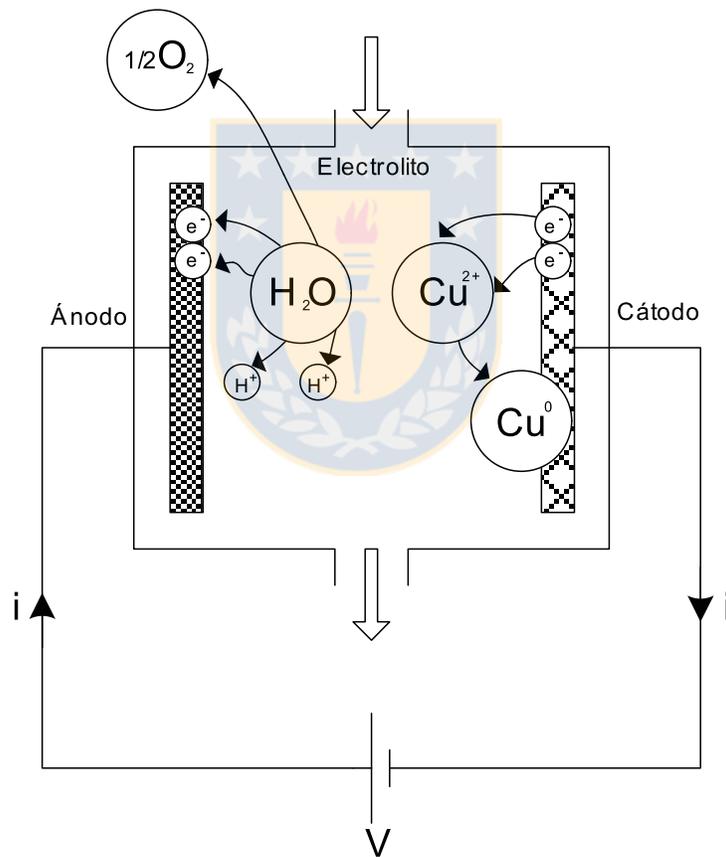


Fig. 2.1: Proceso de electrolisis producido en una celda.

2.2. Planta de Electroobtención

Las plantas de electroobtención son la forma más limpia de obtener cobre de alta pureza, son altamente eficientes y tienen un impacto ambiental mínimo.



Fig. 2.2: Planta de Ew de Zaldívar.

2.2.1. Alimentación de Nave Electrolítica

La alimentación de una nave electrolítica consiste en uno o más rectificadores de altas corrientes. Los rectificadores deben ser capaces de entregar $370[A/m^2]$ a cada cátodo. Si cada cátodo tiene 2 caras, y tenemos aproximadamente 65 cátodos por celda, entonces la corriente total que debe suministrar el rectificador es de $48[kA]$. Estos números varían en cada faenas.

2.2.2. Barras de Alimentación

Las barras de alimentación son las que conectan el rectificador con las celdas electrolíticas. Estas barras inciden en el circuito de distribución eléctrica como una inductancia importante que reduce la distorsión en la corriente del proceso y entrega una dinámica lenta a las variaciones de corriente. La inductancia típica de las barras varía entre $3[\mu H/m]$ a $4[\mu H/m]$.

2.2.3. Celdas Electrolíticas

Las celdas electrolíticas son piscinas por donde transita el electrolito. Este electrolito ingresa por el fondo de la celda, de forma uniforme, y sale por un lado de la celda, generalmente el lado que está hacia el centro de la nave. Las celdas están compuestas generalmente por un polímero resistente al ácido. Una nave de electroobtención normal tiene entre 90 y 100 celdas.

2.2.4. Barras Intercelda

Existen en la actualidad varias barras [7] intercelda que presentan distintas ventajas y desventajas. Para analizar la eficiencia energética obtenida con Optibar es necesario tener un punto de comparación, por lo que se hace fundamental obtener los modelos de otras barras. Se nombrán 4 tipos de barras: Optibar, Outokumpu – o doble contacto –, Whitehead y Walker pero sólo se modelarán 2 - Optibar y Walker - debido a que éstas son las barras utilizadas en la planta real.

Barra Walker

La barra Walker es la barra más utilizada en la industria minera. Se encuentra bajo la patente de Arthur L. Walker, U.S. Pat. 687,800 del 3 de diciembre de 1901[2]. En este tipo de barras, los extremos de los ánodos y cátodos se depositan por gravedad en la barra, permitiendo así el flujo de corriente. El otro extremo de estos cátodos y ánodos se encuentra aislado. Cada cátodo se encuentra alternado con un ánodo, produciéndose así la electrólisis. En la fig. 2.3 se muestra el prototipo presentado en la patente.

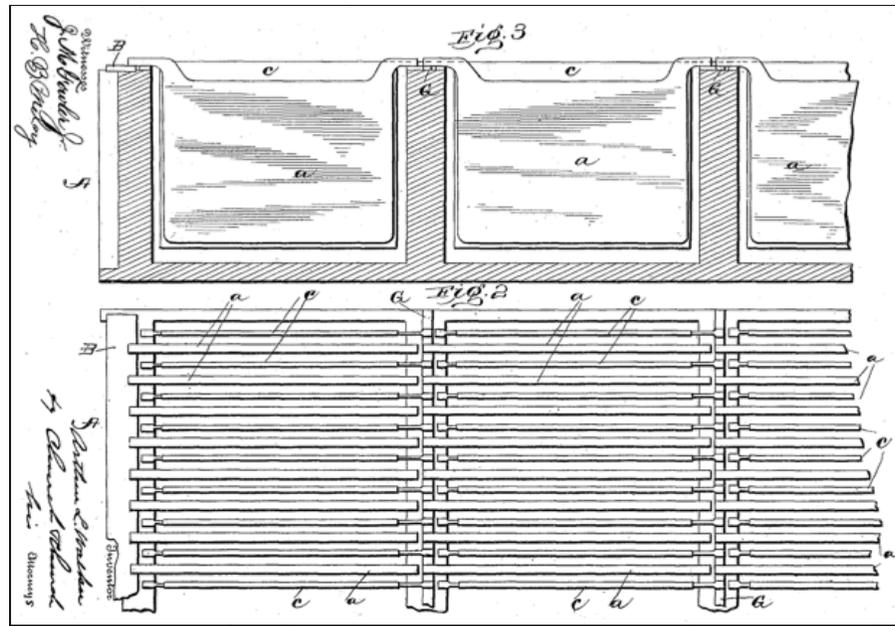


Fig. 2.3: Configuración de una Barra Walker.

Las principales ventajas de este modelo es que es fácil de implementar y no requiere gastos adicionales, como pago por derechos, debido a que fue patentado en 1901. Sin embargo, esta configuración no presenta ninguna forma de limitación de corriente. Como es sabido, la corriente siempre busca el camino de menor resistencia eléctrica, por lo tanto al momento de existir un cortocircuito metalúrgico, la corriente será propensa a circular por un solo cátodo, disminuyendo de esta forma la eficiencia de corriente y afectando la calidad física del cobre.

Barra Doble Contacto

La barra patentada en el año 2002[3], ofrece ciertas ventajas por sobre la barra convencional Walker. El principal problema de las barras Walker es que los contactos son deficientes, por lo que los voltajes de contacto entre el hangerbar y el busbar varían de gran manera. Outokumpu pretende solucionar este problema utilizando un doble contacto, el primero es el contacto entre el cátodo de una celda con el ánodo de la siguiente. Esta conexión es del mismo tipo que la barra Walker. Además se propone un contacto adicional en el extremo aislado de los ánodos, conectándolos todos entre sí y otro contacto en el extremos aislado de los cátodos contactándolos también todos entre sí, pero manteniendo la aislación entre los ánodos y cátodos (esencial para

producir el proceso de electrolisis). En la fig. 2.4 se muestra la forma es que están conectados los cátodos y ánodos de 2 celdas contiguas.

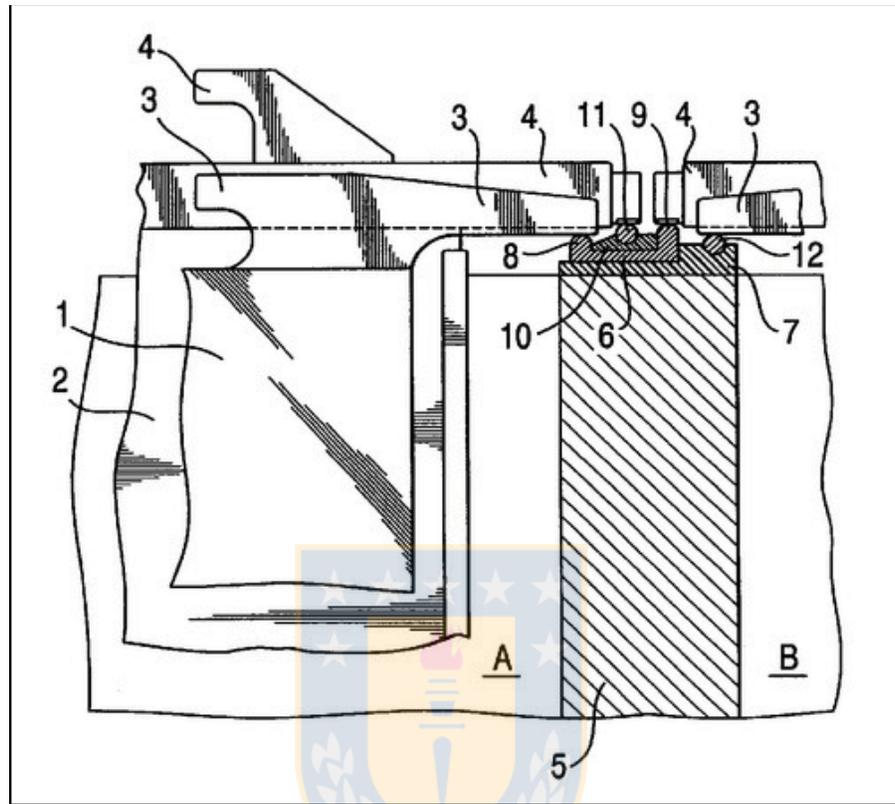


Fig. 2.4: Configuración de una Barra Doble Contacto.

El modelo presenta varias ventajas en la distribución de corriente, debido a la barra compensadora en el lado aislado de los ánodos y cátodos. Sin embargo, es por esta misma barra que los cortocircuitos metalúrgicos presentados tienen un nivel superior a cualquier otro tipo de barra. La corriente disponible para los cortocircuitos aumenta debido a la compensación que realiza la barra en el segundo contacto.

Barra Optibar

La tecnología utilizada por Optibar [7], modifica completamente el concepto de barra intercelda. La barra deja de utilizar un modo de fuente de voltaje y se cambia por un modo fuente de corriente. En este tipo de barras, los electrodos no están todos conectados entre sí, sino que el ánodo de una celda pasa a estar conectado únicamente a un solo cátodo en la celda siguiente.

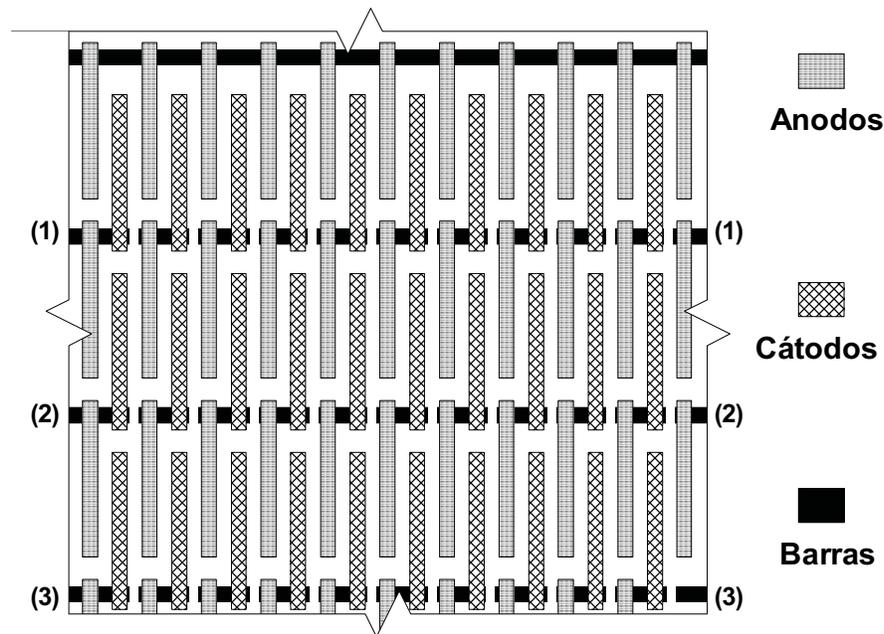


Fig. 2.5: Configuración de una Barra Optibar.

En la fig. 2.5 se muestra la configuración de la conexión entre celdas. En la figura se conectan, mediante un cable de cobre, el punto (1) de la izquierda con el punto (1) de la derecha, el punto (2) de la izquierda con el (2) de la derecha y por último el (3) de la izquierda con el (3) de la derecha.

De esta forma la corriente va formando caminos y genera limitaciones para la corriente.

Interconexión Whitehead

Whitehead [8] propone la eliminación de un contacto, reduciendo bastante las pérdidas por contacto, aumentando de esta forma la eficiencia energética. En la patente además de ser especificada la barra, está especificado un contacto mejorado, con lo cual las pérdidas por contacto se reducen casi a la mitad. En la fig. 2.6 se muestra la configuración de la barra Whitehead.

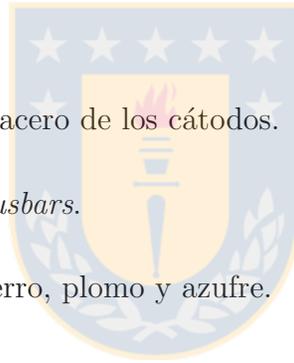
al promedio teórico y se asegura que la depositación del cobre se hará de la misma forma. Sin embargo, cuando el índice comienza a alejarse de 0, las corrientes comienzan a ser cada vez más dispersas, empeorando de esta forma la depositación y haciendo que los cátodos estén más susceptibles a generar problemas.

En la ec. (2.4) se muestra como se calcula el índice de dispersión.

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

Existen diversas variables que afectan a la dispersión de corriente, como por ejemplo:

- Desborre de celda.
- Antigüedad de las placas de acero de los cátodos.
- Tecnología y estado de los *busbars*.
- Concentraciones de cobre, fierro, plomo y azufre.
- Temperatura del electrolito.
- Eventos ocurridos durante el ciclo, como pueden ser desborres o paradas de planta.



2.3.2. Eficiencia de Corriente

La eficiencia de corriente es un factor que determina el porcentaje de aprovechamiento de la corriente en el proceso de electroobtención. 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 [9].

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

Ley de Faraday

El peso real se obtiene en la romana de la planta, donde se pesan todos los cátodos que son cosechas, sin importar la calidad de estos. El peso teórico es calculado utilizando la ley de Faraday.

La ley de Faraday permite calcular la cantidad de metal que se debiere obtener en un proceso de electólisis. En ella se dice que la masa obtenida en dicho proceso es proporcional a la carga que se hace pasar a través de las placas. La ecuación se presenta a continuación[10]

$$m_{teórico} = \frac{Q}{q \cdot n} \frac{M}{N_A} \quad (2.6)$$

La carga eléctrica que se hace pasar a través de las placas se define como la corriente eléctrica, en Amperes, durante un periodo de tiempo en segundos, sin embargo en planta se utilizan los valores de kiloAmperes y horas, por lo que se debe hacer la modificación respectiva. El resto de las variables son constantes en el proceso del cobre por lo que se puede expresar la ec. (2.6) en función en la corriente acumulada.[6]

$$m_{teórico} = \frac{\hat{I}}{q \cdot n} \frac{N}{N_A} \cdot 1.000 \cdot 3.600 \quad (2.7)$$

Reemplazando las constantes de la ec. (2.7) y ajustando a las magnitudes utilizadas en la industria de la minería, obtenemos el peso teórico de una celda en función de la corriente acumulada.

$$m_{teórico} = 1,18576 \cdot \hat{I} \quad (2.8)$$

2.3.3. Consumo Específico

La eficiencia de corriente por sí sola no da un panorama completo la momento de referirse a la energía utilizada en el proceso. Es por esto que el definir el consumo específico es tan relevante, pues indica la relación entre la energía utilizada y la cantidad de cobre producido.

El consumo específico se define como la cantidad de energía utilizada en un proceso para producir una cierta cantidad de masa del metal a evaluar. En este caso la energía se mide en

Kilo-Watts-hora y la cantidad de metal en toneladas. Lo anterior se resume de la siguiente forma.

$$E_s = \frac{\overline{E}_c}{m_{real}} \cdot \hat{I} \quad (2.9)$$

Si reemplazamos la ec. (2.8) en la ec. (2.5) y despejamos en función de m_{real} obtenemos,

$$m_{real} = 1,18576 \cdot \hat{I} \cdot \eta \quad (2.10)$$

Luego, reemplazamos la ec. (2.10) en la ec. (2.9)

$$E_s = 843,52 \left[\frac{kWh}{ton \cdot V} \right] \cdot \frac{\overline{E}_c}{\eta} \quad (2.11)$$

2.4. Operación de Planta

En la nave de electroobtención se tienen distintos fenómenos que afectan de una u otra forma el consumo específico y eficiencia de corriente en la nave de electroobtención. Es necesario por lo tanto identificar cada uno de estos fenómenos y procesos, para así determinar las condiciones de contorno necesarias para la simulación de estos procesos.

2.4.1. Cosecha y siembra de cátodos

La cosecha se le llama a la operación de levantar los cátodos, con un puente grúa, desde las celdas y llevarlos hasta la máquina despegadora de cátodos o *stripping machine*. Este proceso se realiza por tercios para que los niveles de corriente no sean tan altos.

En la planta de Zaldívar se tienen 65 cátodos por piscina y la cosecha se produce en tres "lingadas". La primera y la segunda son con 22 cátodos y la tercera con 21. Nominalmente la planta opera con $47[kA]$ por nave, por lo que la densidad de corriente nominal es de $361,5[A/m^2]$. Al sacar un tercio de los cátodos la densidad de corriente aumenta a $546,5[A/m^2]$, efecto que sólo dura un par de minutos.

Una vez finalizado este proceso, se tiene obtiene el producto final, como se muestra en la fig. 2.7, listo para ser vendido, según los valores de London Metal Exchange (*LME*).



Fig. 2.7: Paquete de cobre de alta calidad.

2.4.2. Cortocircuitos

Un fenómeno muy perjudicial son los cortocircuitos. Cuando los cátodos reciben corrientes muy elevadas, estos tienden a formar protuberancias de cobre. Estas protuberancias hacen que la distancia entre el cátodo y el ánodo disminuya, disminuyendo la resistencia del electrolito y así aumentando la corriente. Cuando un cátodo presenta corriente por sobre los 1000[A] se puede determinar que existe un cortocircuito metalúrgico, que incluso puede llegar a los 2500[A]. En caso de que la protuberancia del cátodo toque el ánodo, se produce un cortocircuito eléctrico que se puede manifestar por la carbonización total del capping board o bien por una llama entre la barra y el capping board.

La formación de cortocircuitos afecta lo siguiente:

- Disminución de la eficiencia de corriente
- Disminución de la calidad física y química de los cátodos

Además existe factores que influyen en la formación de este tipo de anomalías, las cuales son:

- Concentración de impurezas en el electrolito
- Cátodo de acero pandeado.
- Nivel de corriente disponible. (Barra doble contacto)
- Circuitos abiertos.
- Alta dispersión de corriente.

En la fig. 2.8 se puede ver un cortocircuito metalúrgico pequeño.



Fig. 2.8: Nodulación producida por un cortocircuito metalúrgico.

2.4.3. Circuitos Abiertos

Los circuitos abiertos se producen por 2 razones. La primera es cuando uno de los 2 electrodos no hace contacto con el *busbar* y la segunda es cuando el contacto es defectuoso producto de suciedad o corrosión. Estos 2 tipos de circuitos abiertos tienen las siguientes características, presentadas en la tabla 2.1.

		Circuitos Abierto	Baja Corriente
Corriente	[A]	0	< 200
Voltaje Operación	[V]	< 1,57	< 1,95
Temperatura	[°C]	< 30	> 80

Tabla 2.1: Detalle de circuitos abiertos

Este tipo de operación produce dos daños. El primero es que no se deposita cobre en 2 placas (incluso 4 dependiendo de la tecnología a utilizar) disminuyendo así la eficiencia de corriente.

El segundo daño se produce por un desbalance en las corrientes, generando esto que la corriente que no se conduce por el circuitos abierto tienda a irse por los cátodos adyacentes. Este efecto es más acentuado aún cuando el circuito abierto se produce en un ánodo, donde la corriente si fluye por el cátodo, pero sólo por una cara de éste. Esto genera una nodulación en esa cara "conductora" del cátodo, disminuyendo no sólo la calidad física, sino que también la eficiencia de corriente, puesto que esa nodulación se manifiesta como un cortocircuito. En la fig. 2.9 se ve la nodulación producida por un circuitos abierto de ánodo.



Fig. 2.9: Nodulación producida por un circuitos abierto en un ánodo.

2.4.4. Marco Cortocircuitador

El marco cortocircuitador es un marco de cobre masizo que se utiliza para aislar celdas. Existen de varios tamaños, pero en Zaldívar se utiliza uno que cubre 3 celdas. Tiene un peso aproximado de 10ton y a través de él pueden pasar $50[\text{kA}]$.

Para instalar el marco se debe bajar la corriente del rectificador a $0[\text{A}]$, para no producir arcos electricos. Cuando la corriente está en $0[\text{A}]$ se deja caer con suavidad el marco sobre los cátodos, aislando de esta forma las 3 celdas que cubre el marco y 1 adicional, debido a que se posiciona sobre los cátodos, siendo la corriente by-paseada por el hangerbar hacia el busbar.



Fig. 2.10: Marco Cortocircuitador.

Capítulo 3

Modelos Eléctricos

3.1. Introducción

Para comparar la eficiencia entre dos plantas, lo principal es tener un punto de inicio o referencia. En este caso, las referencias serán las simulaciones que ayudan a entender de mejor forma las ventajas y desventajas de cada modelo, para luego enfocar los análisis en estos puntos.

La potencia disipada en una celda electrolítica se puede definir como la suma de las pérdidas de cada uno de sus componentes. Las pérdidas están asociadas a:

- Caída de tensión en contactos.
- Caída de tensión en *busbar*.
- Caída de tensión en la reacción química.
- Caída de tensión en el electrolito.

Además de modelar las barras intercelda, se hace necesario considerar los modelos de las resistencias de contactos, resistencia de electrolito y el modelo de una celda electrolítica.

Se presentarán varios modelos eléctricos de distinta complejidad, sin embargo no todos se utilizan en las simulaciones y quedará como un trabajo futuro incorporar algunos de los modelos a las simulaciones realizadas.

3.2. Resistencia de Contacto

La resistencia de contacto se produce por la caída de tensión debido a la conexión física que hay entre la barra intercelda y el *hangerbar*. Esta resistencia está demostrada ser dependiente de forma no lineal de la corriente y temperatura, sin embargo el modelo a utilizar no contempla estas no linealidades, sino que se realiza un modelo de distribución probabilística. Esta distribución se ha obtenido mediante datos reales y en condiciones de operación normales.

3.2.1. Distribución de Resistencia

Las resistencias de ánodos y cátodos tienen distintos valores (valores medios). Esto se produce por la forma de cada una de las resistencias. En el cátodo se tiene un contacto simple, donde el *hangerbar* cae por gravedad hacia el contacto del *busbar*, que tiene una forma arqueada, por lo que la zona de contacto es idealmente una línea de contacto que con el tiempo y el desgaste natural, se transforma en un área muy pequeña. Además, el *hangerbar* del cátodo es de acero con un revestimiento de cobre, mostrado en la fig. 3.1, lo que hace que la resistencia aumente, puesto que el revestimiento no es parejo.

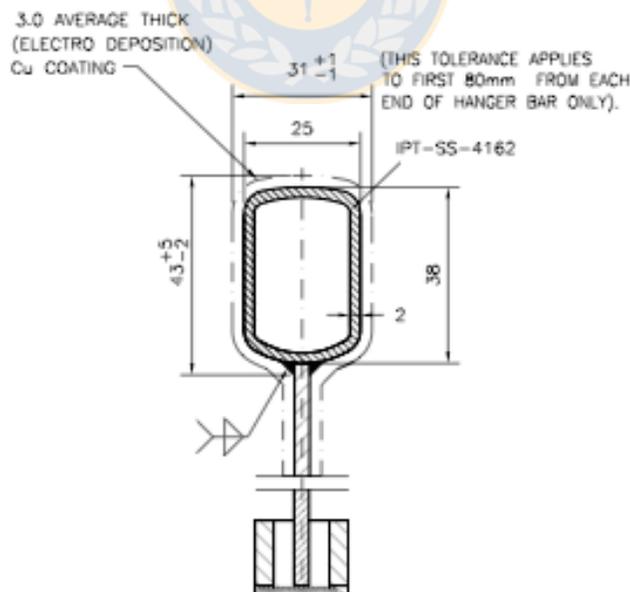


Fig. 3.1: Plano de un cátodo.

A diferencia de lo que pasa en el cátodo, el ánodo tiene una superficie de contacto, pues éste

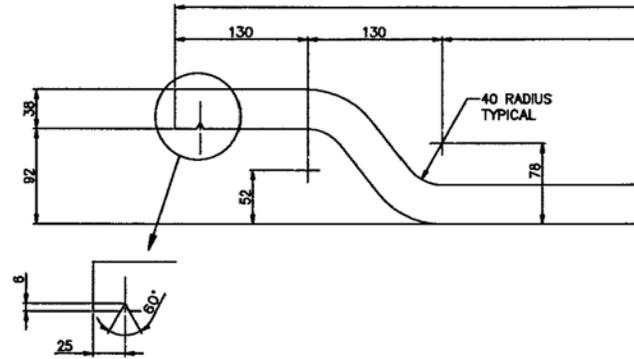


Fig. 3.2: Zona de contacto de hangerbar del ánodo.

es triangular y en el *hangerbar* del ánodo existe un espacio para hacer encajar el *hangerbar* con el contacto, permitiendo de esta forma que el ánodo no se mueva y que la zona de contacto sea una superficie (ver fig. 3.2). Además el *hangerbar* del ánodo es de cobre macizo, lo que disminuye considerablemente las pérdidas, puesto que el cobre es más puro (ver fig. 3.3).

Para calcular la resistencia de contacto se realizó la medición de los contactos catódicos durante 4 días. De acuerdo a esto, se obtuvo la distribución total de la resistencia de contacto como se aprecia en la fig. 3.4.

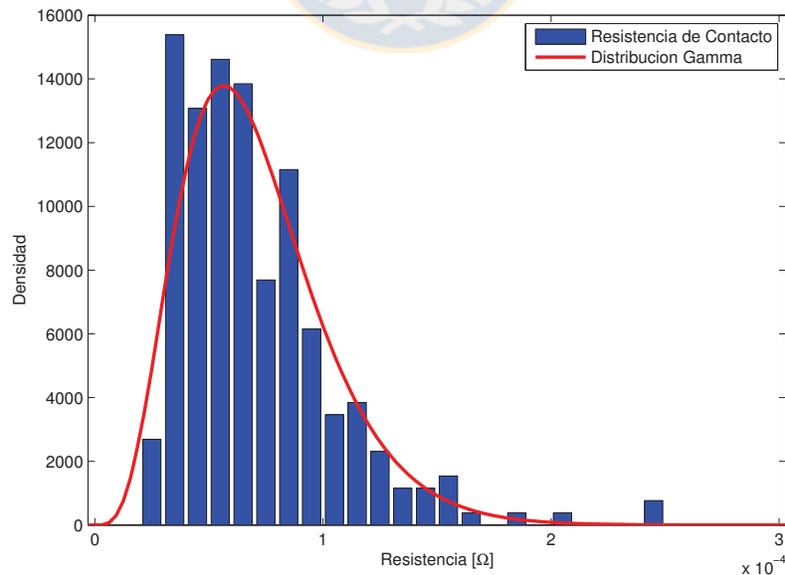


Fig. 3.4: Distribución de Resistencias de Contacto de Cátodo.

3.2.2. Simulación de Resistencia

Se utiliza la función descrita en la ec. (3.3) para generar las resistencias de forma aleatoria. Estas resistencias pueden verse en la fig. 3.5,

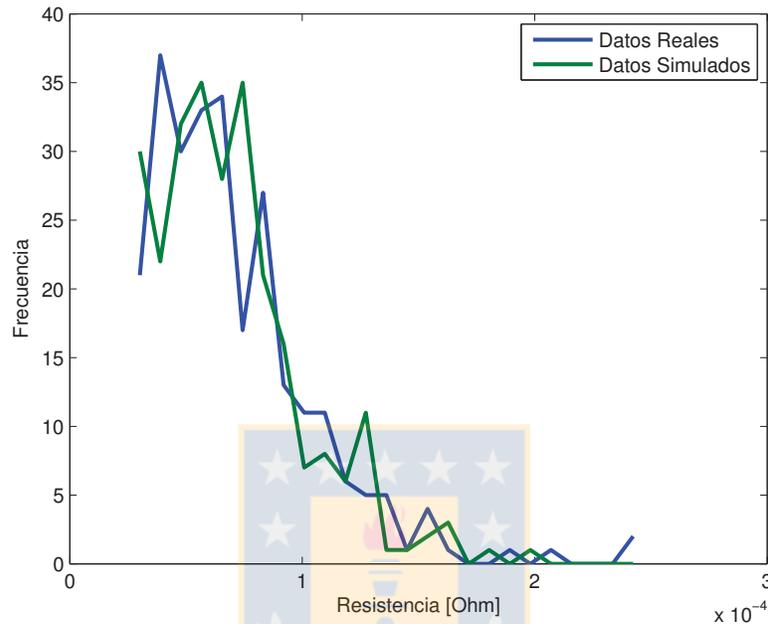


Fig. 3.5: Resistencia de Contacto real y simulada.

Los datos se encuentran en el Anexo A.

3.3. Resistencia de Electrolito

La resistencia del electrolito se produce por la caída de tensión que existe entre los electrodos, descontando los voltajes de polarización para producir la reacción en el ánodo y en el cátodo. El modelo utilizado considera las variables de concentración de cobre, concentración de ácido y temperatura[5]. La resistencia R a través de un conductor de largo L y área transversal A [12] es,

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} \quad (3.4)$$

donde σ es la conductividad eléctrica. Utilizando la ec. (3.4), la resistencia de electrolito aproximada \tilde{R}_{el} queda como,

$$\tilde{R}_{el} = \frac{1}{\sigma_{el}} \frac{d_{el}}{A_{ca}} \quad (3.5)$$

donde d_{el} es la distancia entre las cara de los electrodos y A_{ca} es la supercifie "cara a cara" de los electrodos. La conductividad eléctrica del electrolito es calculada utilizando la función empírica de Price y Davenport [13]

$$\sigma_{el} = 13,4 - 0,356c_{Cu} + 0,249c_{H_2SO_4} + 0,426T_{el} \quad (3.6)$$

La distancia entre los electrodos es,

$$d_{el} = \frac{D_a - (d_a + d_c)}{2} \quad (3.7)$$

donde D_a es la separación que existe entre los ánodos, d_a y d_c es el ancho de las placas del ánodo y cátodo respectivamente.

Para el caso de ánodos permanentes, que son los que se utilizan en la planta Zaldívar, el ancho es de 7,5[mm]. Cuando estos ánodos son removidos el ancho es inferior a los 3[mm]. Esta variación se produce en un promedio de 5 años, por lo que es importante realizar una comparación de los estados de los ánodos. En el caso de la placa de acero inoxidable del cátodo, el ancho varia con un período de 100[h] en el caso de EW. Los cátodos se siembran con un ancho de 3,25[mm] y son cosechados con un ancho de cátodo de 5[mm] de cobre, por lo que son 10[mm] por cátodo.

La superficie "cara a cara" es teóricamente una constante por el área del cátodo. Esta constante se calcula de forma empírica y de acuerdo a los datos recolectados en planta, ajustaremos este modelo teórico a los valores reales de R_{el}

$$A = \sigma_{el} A_c \quad (3.8)$$

Si reemplazamos la ec. (3.8) y la ec. (3.6) en la ec. (3.5),

$$R_{el} = \frac{d_{el}}{13,4 - 0,356c_{Cu} + 0,249c_{H_2SO_4} + 0,426T_{el}} \cdot \frac{1}{\sigma_{el} A_c} \quad (3.9)$$

En la tabla 3.1 se muestran los parámetros para calcular la resistencia de electrolito,

Parámetros	Unidad	Valor
c_{Cu}	$[g/L]$	40
$c_{H_2SO_4}$	$[g/L]$	160
T_{el}	$[^{\circ}C]$	42
D_a	$[m]$	0,1
d_a de ánodo nuevo	$[m]$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
d_a de ánodo viejo	$[m]$	$3 \cdot 10^{-3}$
d_c inicio de cosecha	$[m]$	$3,25 \cdot 10^{-3}$
d_c fin de cosecha	$[m]$	$13,25 \cdot 10^{-3}$
A_c	$[m^2]$	$0,985 \pm 0,045$

Tabla 3.1: Parámetros para calcular la resistencia de electrolito

3.3.1. Distribución de Resistencia

La resistencia de electrolito, al igual que la resistencia de contacto, tiene una distribución de probabilidad asociada. Esta distribución se produce debido a que la distancia entre los electrodos no es igual y además la superficie "cara a cara" tampoco es igual para todos los electrodos. Estas imperfecciones se ven reflejadas en una distribución normal como se ve en la fig. 3.6.

La función de distribución está dada por[14],

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.10)$$

donde μ es la media y σ es la desviación estándar. Ajustando la función de probabilidad a los datos ajustados, tenemos que μ es $1,3206[m\Omega]$ y σ es $0,1080[m\Omega]$, por lo que la ec. (3.10) queda,

$$f(x) = 1,4733e^{-\left(\frac{x-1,3206}{0,2160}\right)^2} \quad (3.11)$$

Si se reemplaza en la ec. (3.9) los parámetros de la tabla 3.1, considerando el inicio del ciclo y ánodos nuevos, se puede dejar expresada en función de la constante σ_{el} ,

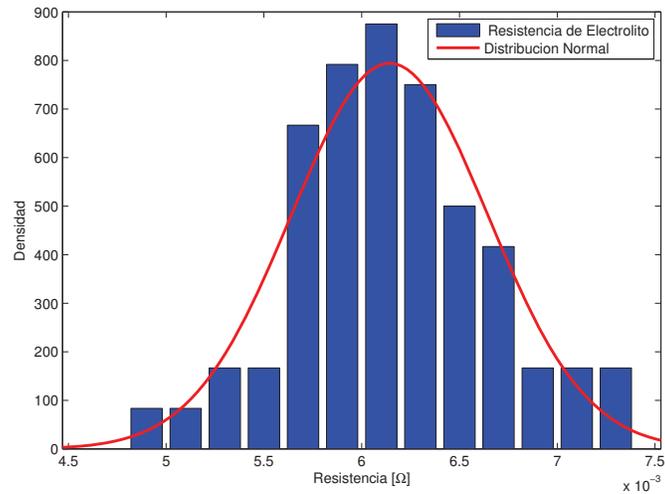


Fig. 3.6: Distribución de Resistencias de Electrolito.

$$R_{el}(\sigma_{el}) = \frac{0,69372 \cdot 10^{-3}}{\sigma_{el}} \quad (3.12)$$

Si igualamos $R_{el}(\sigma_{el})$ a μ , se puede calcular la constante σ_{el} ,

$$R_{el}(\sigma_{el}) = 1,3206 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{0,69372 \cdot 10^{-3}}{\sigma_{el}} = 1,3206 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{el} = 0,5253 \quad (3.13)$$

3.3.2. Simulación de Resistencia

La distribución del electrolito corresponde a una distribución normal, como lo indica la fig. 3.6. Utilizando esta distribución normal dada por la ec. (3.11) para generar las resistencias de electrolito aleatorias, se tiene la distribución de la fig. 3.7,

Condición	d_a	d_c	R_{el}
Inicio de cosecha, con ánodos nuevos	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	$1,6408[m\Omega]$
Inicio de cosecha, con ánodos viejos	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	$1,7235[m\Omega]$
Fin de cosecha, con ánodos nuevos	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$13,25 \cdot 10^{-3}$	$1,4569[m\Omega]$
Fin de cosecha, con ánodos viejos	$3 \cdot 10^{-3}$	$13,25 \cdot 10^{-3}$	$1,5397[m\Omega]$

Tabla 3.2: Diferencias en R_{el} según ancho de electrodos

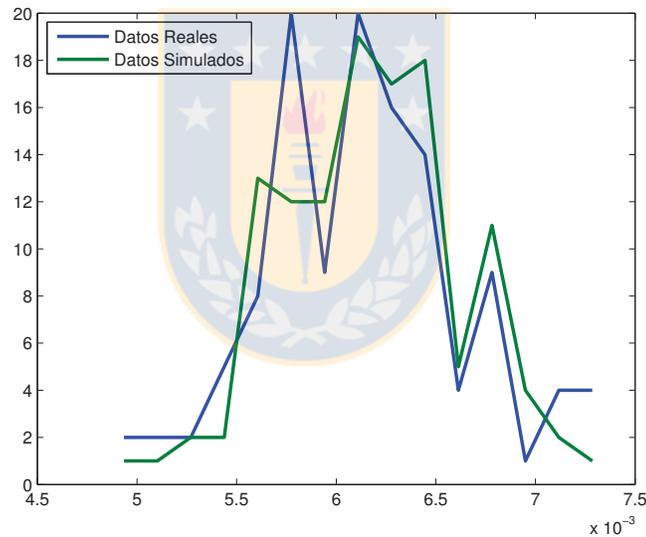


Fig. 3.7: Distribución de Resistencias de Electrolito reales y simuladas.

Si se considera que la depositación se genera de forma uniforme, se puede concluir que R_{el} durante un ciclo de cosecha es,

$$R_{el,ciclo} = \frac{R_{el,inicio} + R_{el,fin}}{2} \quad (3.14)$$

Por lo que para los ánodos nuevos $R_{el,ciclo}$ es $1,5489[m\Omega]$ y para los ánodos desgastados $R_{el,ciclo}$ es $1,6316[m\Omega]$. (ver table 3.2)

Según los datos anteriores, el aumento en R_{el} durante la vida útil de un ánodo es de $82,7[\mu\Omega]$, lo que representa un aumento del $5,34\%$.

3.3.3. Influencias del ánodo sobre la eficiencia

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 3.2, el ancho del ánodo influye directamente en la resistencia total de una celda. De acuerdo con la ec. (2.11), el consumo depende del voltaje promedio del grupo controlado y de la eficiencia de corriente. Considerando que el voltaje está dado por la resistencia de electrolito y la densidad de corriente, si se mantiene la eficiencia de corriente constante y se considera el deterioro de los ánodos, es posible calcular la pérdida de eficiencia por año de uso del ánodo.

$$\Delta V_{el} = \Delta R_{el} \cdot \bar{J} \cdot A \quad (3.15)$$

donde ΔR_{el} es la variación de la resistencia durante la vida útil de un ánodo y \bar{J} es la densidad de corriente estándar, es decir $330[A/m^2]$ y A es el área del cátodo que es $1[m^2]$. Luego, la diferencia de voltaje es $27,3[mV]$. De acuerdo a la ec. (2.9), si se mantiene η constante, entonces la variación del consumo específico estará dado por la variación del voltaje. Al considerar que el voltaje de operación se maneja entre $2,0[V]$ y $2,1[V]$, la variación del consumo va a estar entre $1,30\%$ y $1,37\%$. Al considerar el tiempo de deterioro, se puede apreciar que la variación en el consumo específico al año estará entre $0,2600[\%/año]$ y $0,2740[\%/año]$

Se asume que durante todo el ciclo el nivel de eficiencia de corriente es constante, es decir durante todo el proceso, la misma cantidad de cobre se adhiere al cátodo y que lo único que varía es la cantidad de energía necesaria para realizarlo. Se puede deducir de la ec. (2.8) que a una densidad de corriente de $330[A/m^2]$, el tiempo necesario para obtener $39kg$ de cobre en un cátodo es de $108,3[h]$. De acuerdo a esto, se tiene una razón de cambio de ancho de placa de cátodo de $0,0415[mm/h]$.

3.4. Planta de Eletrowinning

3.4.1. Celda electrolítica básica

El modelo más básico de una celda electrolítica contempla una resistencia de contacto de cátodo, una resistencia de electrolito, un capacitor en paralelo con una resistencia para simular la polarización de los electrodos y una resistencia de contacto del ánodo. El modelo básico se muestra en la fig. 3.8 [7].

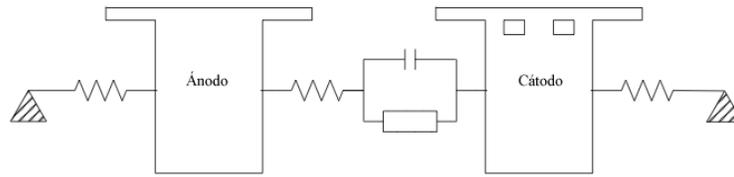


Fig. 3.8: Resistencia en la celda electrolítica.

$$R_{celda} = R_{cc} + R_{el} + \left(\left(\frac{1}{j\omega C_d} \right)^{-1} + (R_d)^{-1} \right)^{-1} + R_{ca} \quad (3.16)$$

La representación anterior se basa en la simplificación de Randles. Considerando el estado estacionario y que el voltaje es continuo, entonces $\omega = 0$, por lo que la ec. (3.16) queda,

$$R_{celda} = R_{cc} + (R_{el} + R_d) + R_{ca} \quad (3.17)$$

Como R_{el} es mucho mayor que R_d , podemos realizar la siguiente aproximación,

$$R_{el} + R_d \approx R_{el} \quad (3.18)$$

Al aplicar los modelos obtenidos en las secciones anteriores, se obtienen un modelo como el que se muestra en la fig. 3.9

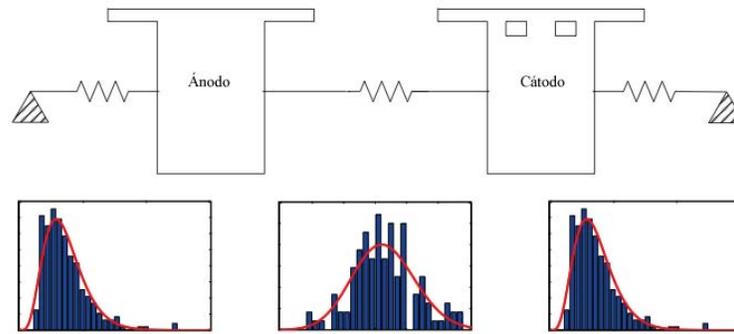


Fig. 3.9: Modelo de Randles simplificado, con inclusión distribuciones de resistencias.

3.4.2. Celdas Electrolíticas

En las piscinas de EW, también llamadas celdas, es donde se produce la electrolisis. En una celda se depositan varios cátodos y ánodos, típicamente 60 cátodos y 61 ánodos.

En una celda de p cátodos, se tienen p resistencias de contacto de cátodos (R_c), $p+1$ ánodos y resistencias de contactos de ánodo (R_a), además de $2 \cdot p$ resistencias de electrolito (R_{el}). En la fig. 3.10 se muestra una celda de 2 cátodos.

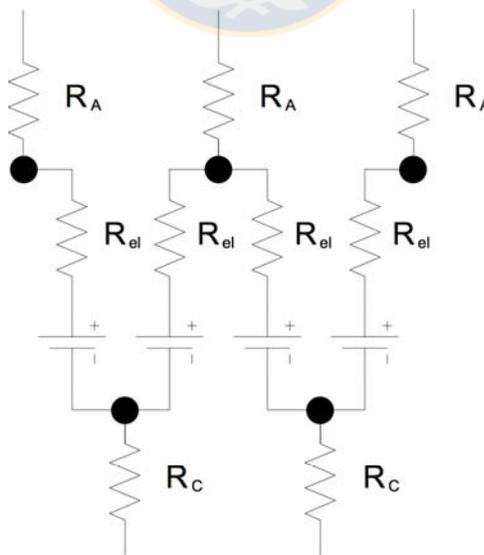


Fig. 3.10: Celda electrolítica.

Interconexión Walker

En una conexión Walker, todos los cátodos de una celda están conectados a una barra masiza de cobre, que a su vez está conectada a todos los ánodos de la celda siguiente, como se ve en la fig. 3.11. La corriente se redistribuye en cada celda de acuerdo a los parámetros de operación. Esta redistribución está basada en lo siguiente:

- Distancia entre electrodos, que influye directamente en R_{el}
- Nivel de limpieza de los contactos, que influye en la generación de circuitos abiertos de baja corriente.
- Alineamiento entre caras de los electrodos, pudiendo variar la superficie "cara a cara" y con esto también R_{el}
- Cortocircuitos que fuerzan a la corriente a pasar por un cátodo. Sin embargo este fenómeno tiene una "duración de una celda", pues en la celda siguiente se redistribuye nuevamente la corriente.
- Temperatura por cortocircuito, que se propaga a través de la barra de cobre, afectando a los electrodos vecinos y produciéndose un deterioro del estado de los contactos.

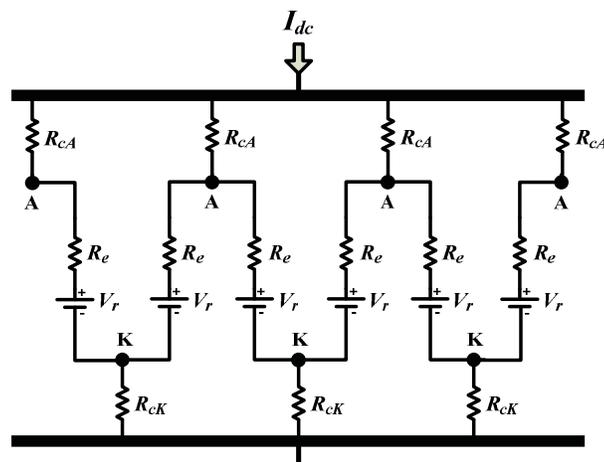


Fig. 3.11: Interconexión de una Celda Walker.

Interconexión Optibar

En una conexión Optibar, un cátodo está conectado directamente a un ánodo. Entonces teniendo una celda de p cátodos, el cátodo n está conectado al ánodo n y el ánodo p está conectado mediante una barra al ánodo 1 y al cátodo 1. La fig. 3.12 muestra esta conexión. La corriente fluye a través de los segmentos de barra, pasando de un ánodo a un cátodo y se "redistribuye" en el electrolito de forma gradual. La redistribución está basada en los mismos criterios que en la barra Walker, exceptuando algunos puntos:

- Cortocircuitos, que si bien disminuye R_{el} , el nivel de corriente disponible está dado por el ánodo anterior, por lo que reduce drásticamente el nivel de cortocircuito.
- Temperatura por Cortocircuitos, que no se propaga a través de la barra, sino que se concentra en un sólo segmento, produciendo un efecto aislado y fácil de identificar.
- Circuitos Abiertos, que eliminan un camino para la corriente, tendiendo esta que redistribuirse en los cátodos vecinos.

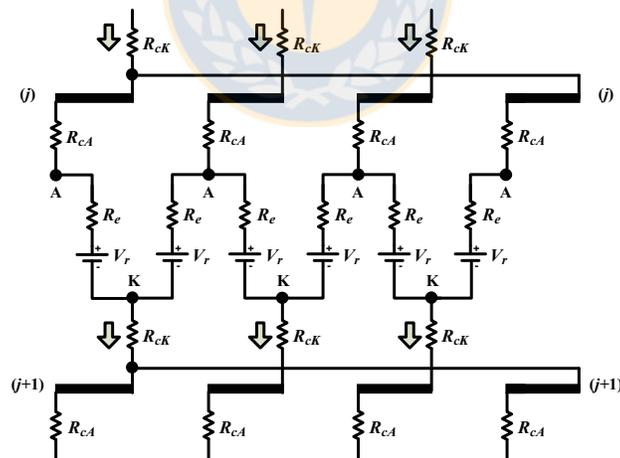


Fig. 3.12: Interconexión de una Celda.

Otras Interconexiones

Existen otras interconexiones, que vienen dadas por las barras intercelda. La más común es la barra de Doble Contacto, que agrega a una barra tipo Walker, una barra adicional que contacta

los lados aislados de los electrodos. Este tipo de barra, si bien es utilizado en algunas empresas mineras, no se ha incorporado en esta memoria, debido a la no disponibilidad de recolectar datos de planta de esta barra.

3.5. Limitaciones de los Modelos

Los modelos anteriormente señalados sólo son aplicables para estados estacionarios. Además sólo reflejan la condición eléctrica del sistema y adiciona componentes como eficiencia de corriente en el proceso.

Estos modelos no contemplan la inclusión de la temperatura como un factor que afecta la conductividad y resistividad de los materiales.

Los modelos obtenidos fueron sintonizados para ajustarse a los parámetros de planta de Zaldívar, por lo que estos no necesariamente corresponderían a modelos para otras plantas. Sin embargo, el sistema de adecuación de datos es universal y podría sin ningún problema ajustarse estos mismos modelos a otras plantas.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se sintonizaron los modelos para obtener las resistencias de contacto y de electrolito. Estos modelos se ajustan bastante bien a los datos reales obtenidos en planta, por lo que podemos asegurar que las modificaciones que se realicen en el modelo, tendrán un efecto concordante con las modificaciones realizadas en la planta.

Capítulo 4

Simulaciones

4.1. Introducción

El el capítulo anterior se sientan las bases teóricas para la simulación de una planta de EW. La simulación se realizará para distintos tipos de operación; operación normal, circuito abierto, cortocircuito y cátodo sucio. Estas operaciones son las operaciones típicas que se encuentran en una planta de EW. Se plantearán las diferencias entre los dos tipos de barras a simular, para cada una de los tipos de operaciones de la planta y además se plantarán conclusiones preliminares con respecto al desempeño de las barras en cuestión.

4.2. Alcances y Limitaciones

Estas simulaciones son basadas en modelos ya existentes y que han sido modificados para que representen la operación real de una planta de EW. Sin embargo, estos modelos presentan algunas limitaciones las cuales se detallan a continuación:

1. Para la simulación se utilizará un grupo de celdas del mismo tamaño que los grupos en Zaldívar, es decir 15 celdas con 65 cátodos cada una.
2. Se considerará sólo el estado estacionario, por lo que cualquier análisis en el tiempo debe hacerse de forma aislada e indicando las consideraciones especiales del caso.

3. No se considerará el efecto de la temperatura del cátodo, aunque si se considerará el efecto de la temperatura del electrolito. Cabe señalar que esta última se considerará constante a $42[^\circ C]$ para todas las simulaciones.

4.3. Operación de Planta

Los modos de operación se dividen de acuerdo a las anomalías u operaciones que se puedan presentar.

1. Operación Normal.
2. Circuito Abierto.
 - Un solo circuito abierto.
 - Circuitos abiertos adyacentes.
 - Múltiples circuitos abiertos.
3. Cortocircuito.
4. Cátodo Sucio (Circuito Abierto de Baja Corriente).
5. Cosecha.



4.3.1. Operación Normal

Durante la operación normal, la densidad de corriente es de $307,5 [A/m^2]$, lo que significa que en el caso de la simulación, el rectificador deberá inyectar $40 [kA]$.

Al simular la operación normal, se muestra que con Optibar se obtiene un índice de dispersión menor que al utilizar Walker. En la tabla 4.1 se muestran los indicadores del grupo. De acuerdo con esta tabla, la dispersión con Optibar corresponde al 61.14 % de la dispersión con Walker. Esto se puede ver en la fig. 4.1.

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	36,05[A]	22,04[A]
Índice de Dispersión	5,86 %	3,58 %
Máximo	719[A]	684[A]
Mínimo	494[A]	547[A]

Tabla 4.1: Comparación Walker-Optibar: Operación Normal

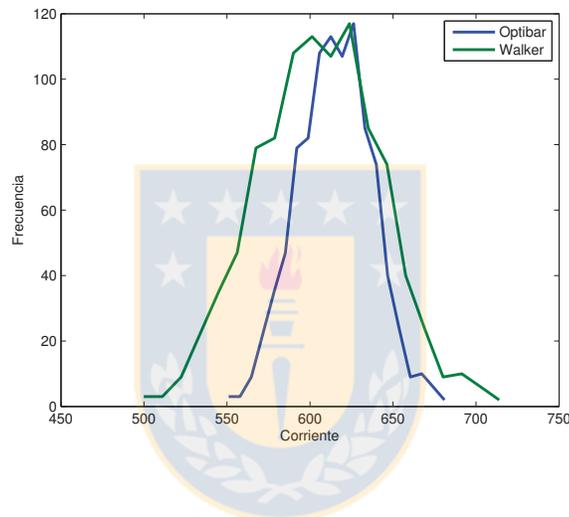


Fig. 4.1: Dispersión de las Corrientes.

Como se puede ver en la fig. 4.2 y la fig. 4.3, la distribución de la corriente varía bastante menos en el grupo Optibar. Esta menor variación se produce por un efecto "serie", que correlaciona las corrientes entre las celdas, manteniéndolas dentro de ciertos límites.

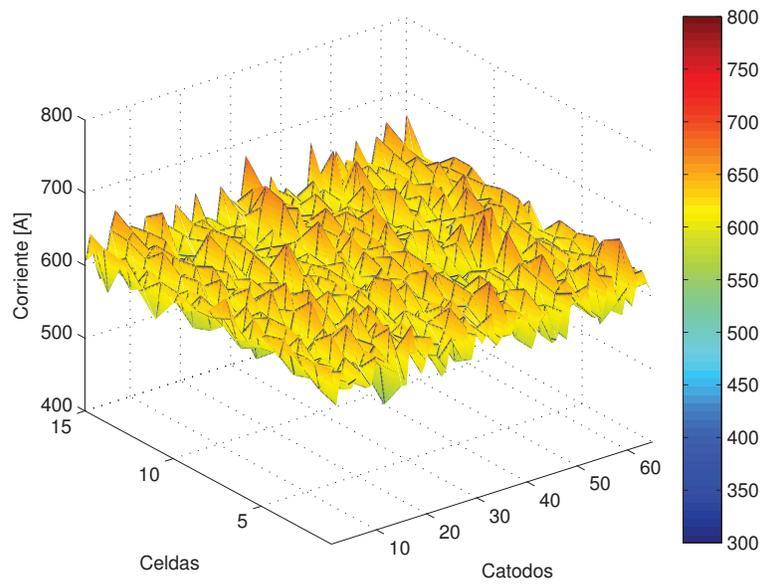


Fig. 4.2: Vista 3D en operación normal: Optibar.

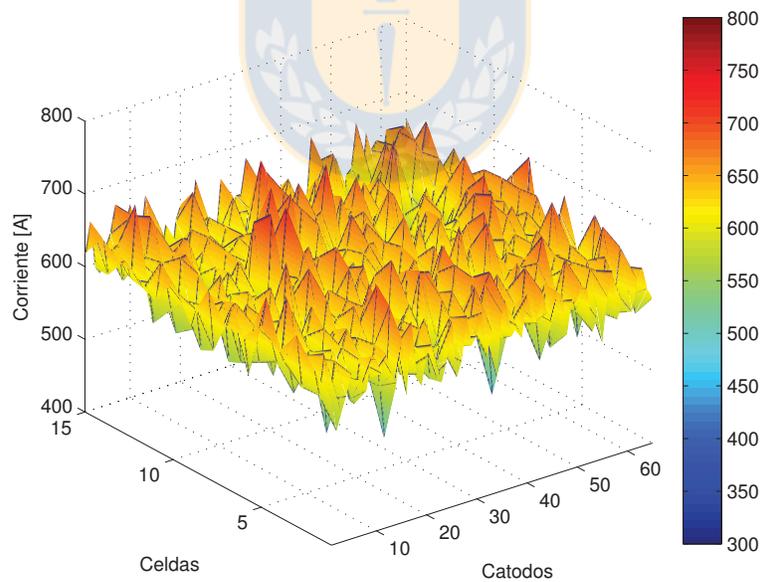


Fig. 4.3: Vista 3D en operación normal: Walker.

4.3.2. Circuito Abierto

Para que se produzca un *ciab*, la corriente por el cátodo debe ser 0. Esto se produce generalmente por la falla en el contacto en el ánodo o en el cátodo.

Un solo circuito abierto

Se realiza un *ciab* en la celda 7, en el cátodo 32. Los indicadores se muestran en la tabla 4.2

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	87,07[A]	87,73[A]
Índice de Dispersión	14,16 %	14,27 %
Máximo	724,7[A]	829,7[A]
Mínimo	0[A]	0[A]

Tabla 4.2: Comparación Celda 7 Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto

Se aprecia que la dispersión con ambas tecnologías es prácticamente igual, sin embargo la corriente máxima es mayor en Optibar.

Cátodo	Celda 5	Celda 6	Celda 7	Celda 8	Celda 9
29	629,2	601,3	603,1	586,2	525,3
30	614,1	626,2	582,6	524,4	583,9
31	619,5	678,9	493,4	487,0	659,5
32	640,9	829,7	0,0	800,3	671,7
33	643,5	493,1	468,6	660,1	647,8
34	612,4	515,2	555,7	627,2	650,2
35	556,1	558,9	603,8	630,9	621,1

Tabla 4.3: Datos de un *ciab* en una barra Optibar.

En la tabla 4.3 se observa claramente como las corrientes de los cátodos, que están adyacentes al *ciab* en la misma celda, aumentan. Además, se observa una disminución considerable en la corriente de los cátodos que están adyacentes al *ciab*, pero en las celdas contiguas.

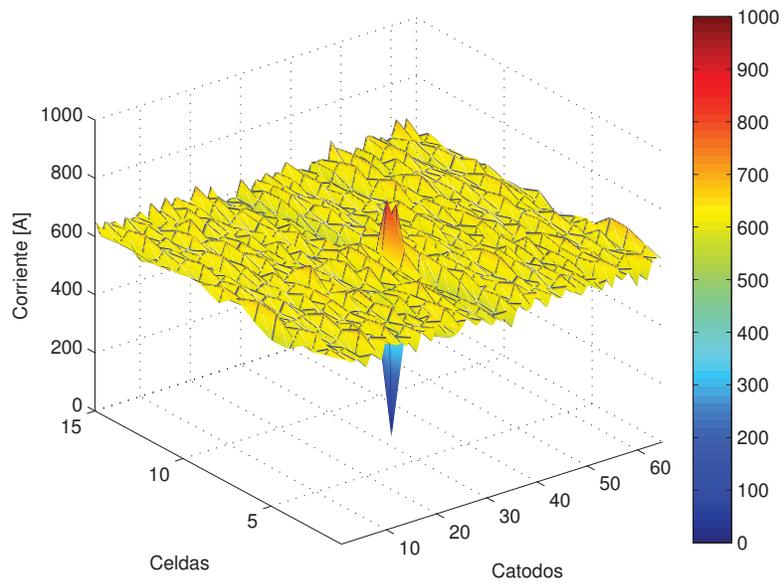


Fig. 4.4: Vista 3D en operación *ciab*: Optibar.

Se observa además un pequeño efecto en cadena, que se prolonga hasta aproximadamente 2 celdas, aunque éste es muy acotado.

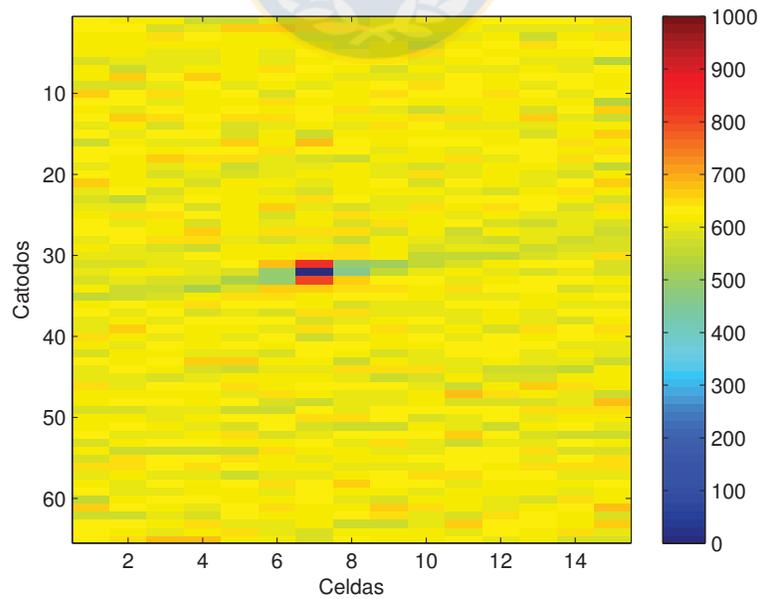


Fig. 4.5: Vista 2D en operación *ciab*: Optibar.

La situación anterior no se presenta en la barra Walker, como se puede ver en la tabla 4.4. Es necesario decir que en las mediciones reales se puede apreciar que existe un pequeño desvío de corriente por lo cátodos adyacentes de una misma celda, efecto que no se aprecia en esta simulación.

Cátodo	Celda 5	Celda 6	Celda 7	Celda 8	Celda 9
29	648,1	611,5	613,8	587,8	631,7
30	611,3	573,8	601,8	653,8	582,0
31	610,0	698,7	639,1	618,9	607,7
32	638,9	709,3	0,0	607,2	588,4
33	552,2	620,8	656,0	575,0	613,7
34	612,4	554,2	647,9	644,8	646,1
35	658,9	587,1	603,4	663,2	632,2

Tabla 4.4: Datos de un *ciab* en una barra Walker.

A continuación se muestran las vistas 2D y 3D cuando se presentan un *ciab*, para una barra Walker.

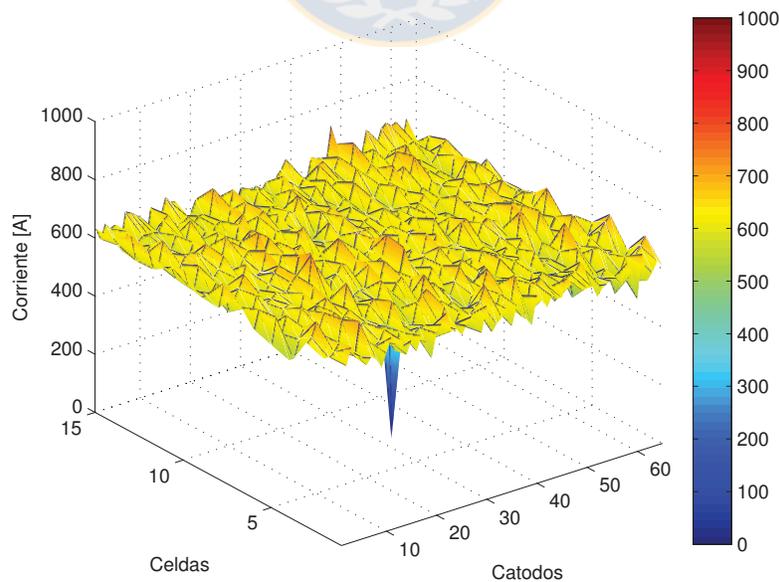


Fig. 4.6: Vista 3D en operación *ciab*: Walker.

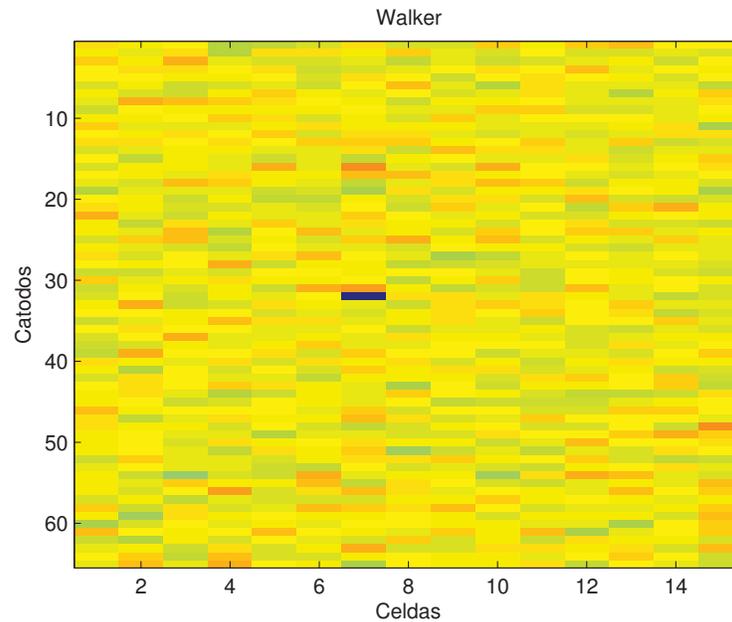


Fig. 4.7: Vista 2D en operación *ciab*: Walker.

Circuitos abiertos adyacentes

En casos extremos, se puede dar el caso que en una celda exista más de 1 *ciab* en una celda, provocando un efecto potenciado entre ellos. En la fig. 4.9 se puede ver claramente este efecto, en la tecnología Optibar. Se ve claramente un efecto más nocivo sobre los índices de dispersión de la tabla 4.5

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	44,71[A]	51,53[A]
Índice de Dispersión	7,27 %	9,03 %
Máximo	737,8[A]	937,9[A]
Mínimo	0[A]	0[A]

Tabla 4.5: Comparación Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto Múltiples

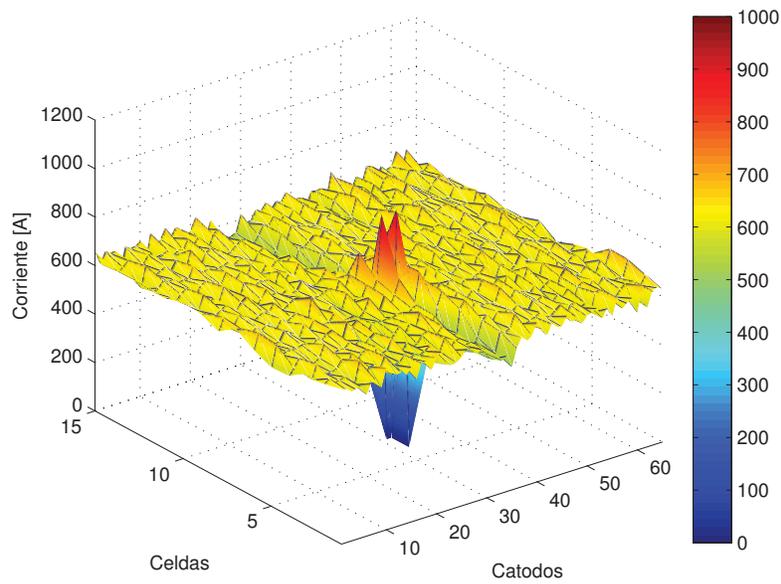


Fig. 4.8: Vista 3D en operación múltiples *ciab*'s: Optibar.

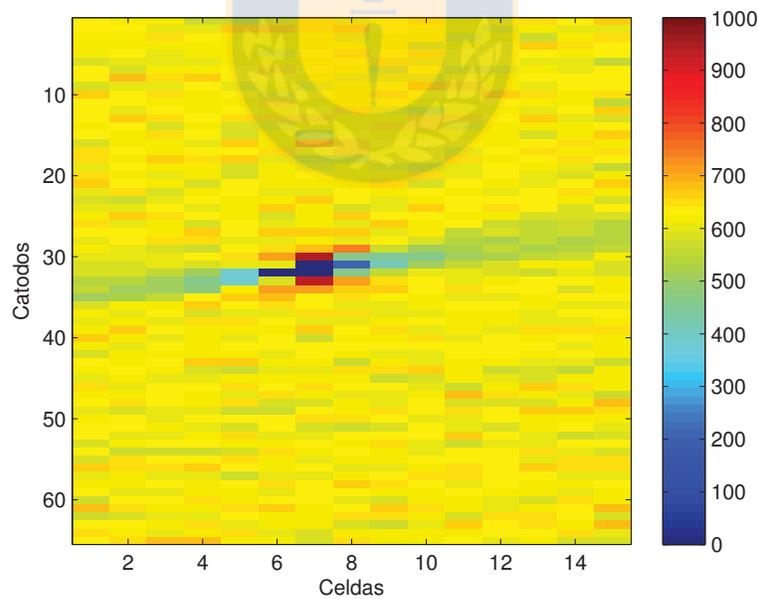


Fig. 4.9: Vista 2D en operación múltiples *ciab*'s: Optibar.

Se puede ver que el efecto de un *ciab* bajo una configuración Walker no se extiende a las demás celdas (ver fig. 4.11). Sin embargo, por la naturaleza de la configuración, en Optibar el

efecto se propaga tres celdas hacia adelante y hacia atrás. En este caso se puede apreciar que los cátodos 30 y 34 en la celda 7 de la fig. 4.9 aumentan su corriente y disminuye la corriente en los cátodos 31, 32 y 33 de la celda 8 y el cátodo 33 de la celda 6.

Se puede ver que el efecto en la barra Walker es focalizado, como ya quedó claro en la fig. 4.7. En Optibar el efecto se propaga nuevamente, la misma cantidad de celdas que la cantidad de circuitos abiertos adyacentes. Para que el efecto no se propague más allá, no deben existir *ciab's* en las siguientes $3/2 \cdot n$ cátodos y celdas. Es decir, si existen 3 *ciab's* juntos, no debe existir ninguna áa en los 5 cátodos adyacentes, ni en las 5 celdas adyacentes.

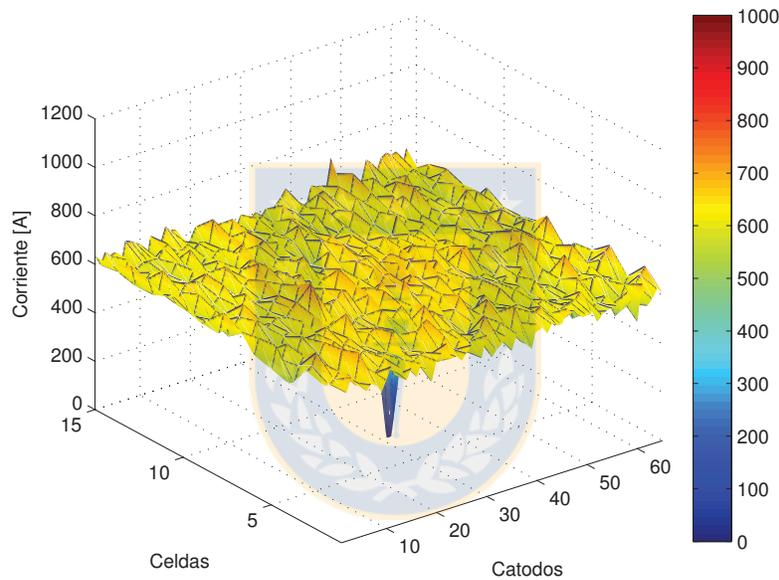


Fig. 4.10: Vista 3D en operación múltiples *ciab's*: Walker.

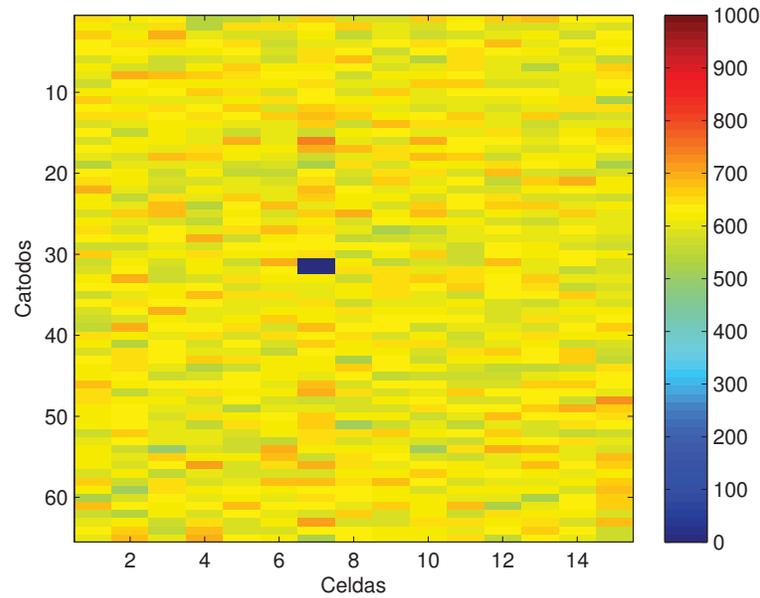


Fig. 4.11: Vista 2D en operación múltiples *ciab*'s: Walker.

Circuitos abiertos múltiples

En algunos casos más extremos aún, pueden detectarse varios *ciab*'s agrupados o individuales en varias celdas de un grupo. Se simularán varios circuitos abiertos al inicio del grupo, para ver el efecto que puede tener sobre todo el resto. Los índices se muestran en la tabla 4.6, donde se ha considerado todo el grupo.

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	62, 11[A]	73, 58[A]
Índice de Dispersión	10, 11 %	11, 97 %
Máximo	773, 4[A]	1.117, 0[A]
Mínimo	0[A]	0[A]

Tabla 4.6: Comparación Walker-Optibar: Operación Circuito Abierto Múltiples

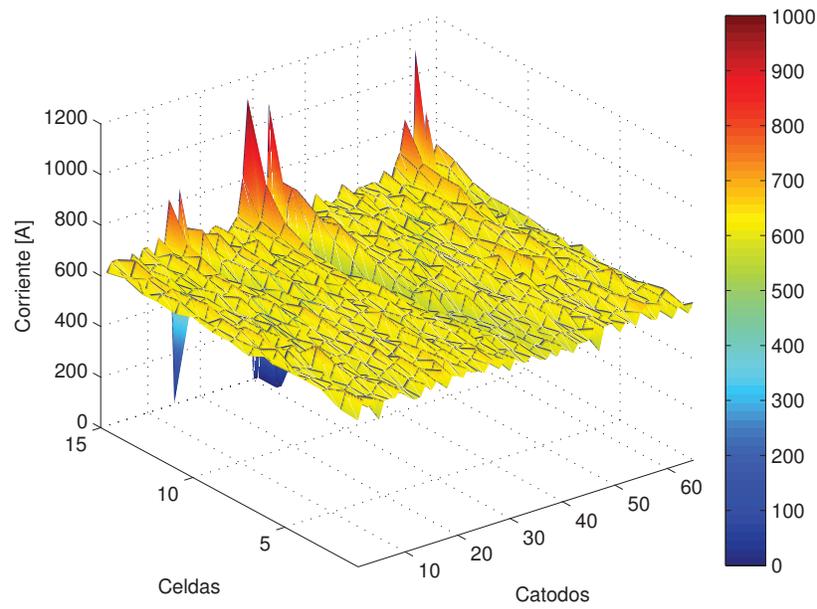


Fig. 4.12: Vista 3D en operación múltiples *ciab*'s: Optibar.

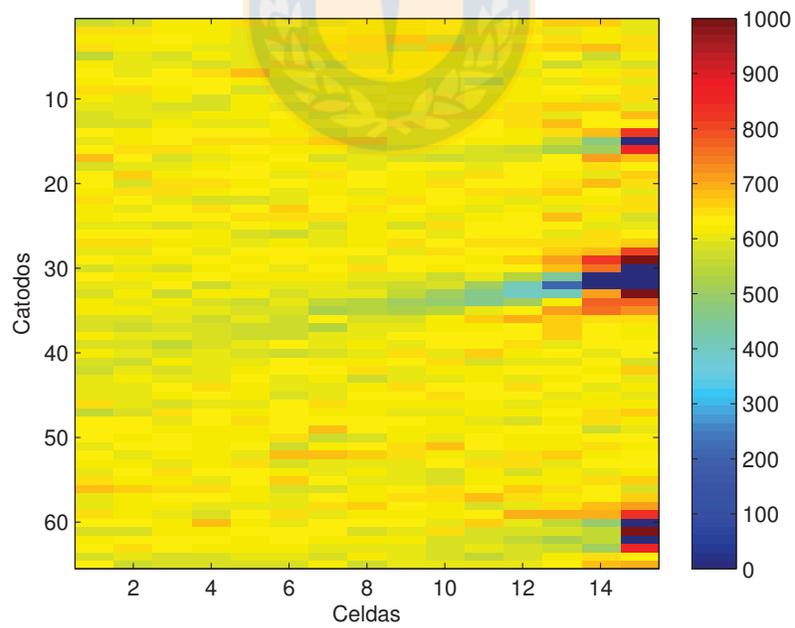


Fig. 4.13: Vista 2D en operación múltiples *ciab*'s: Optibar.

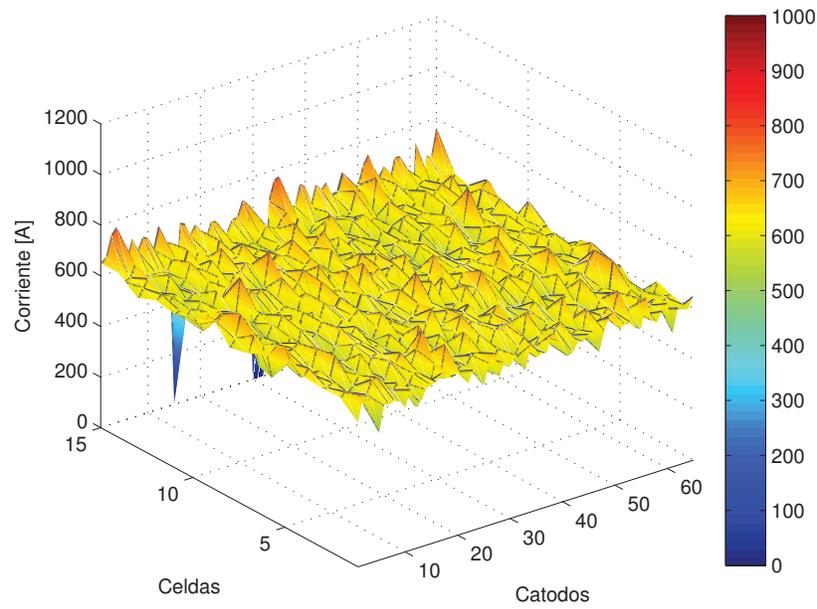


Fig. 4.14: Vista 3D en operación múltiples *ciab*'s: Walker.

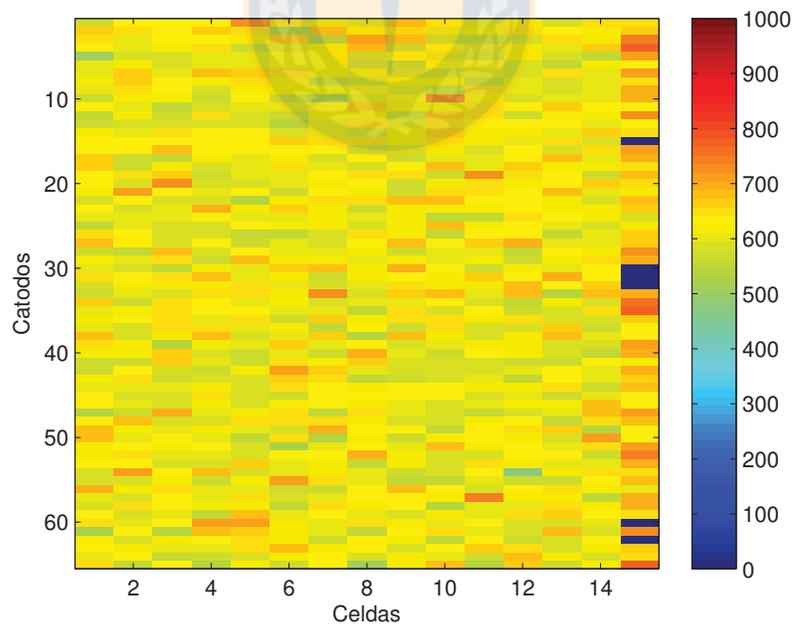


Fig. 4.15: Vista 2D en operación múltiples *ciab*'s: Walker.

4.3.3. Cortocircuito

El cortocircuito es el problema más recurrente en la gran mayoría de las plantas de EW. En estos casos, la resistencia de electrolito se reduce entre 4 a 5 veces.

Un *coci* tiene distintos niveles, que pueden ir de 2 hasta 4 veces la corriente cátodica promedio. Además, estos efectos son efectos en cadena, pues cuando un cortocircuito se comienza a formar, la velocidad de progresión de éste es mucho mayor a medida que pasa el tiempo. Es decir, mientras más tiempo esté el cortocircuito, su nivel aumentará proporcionalmente.

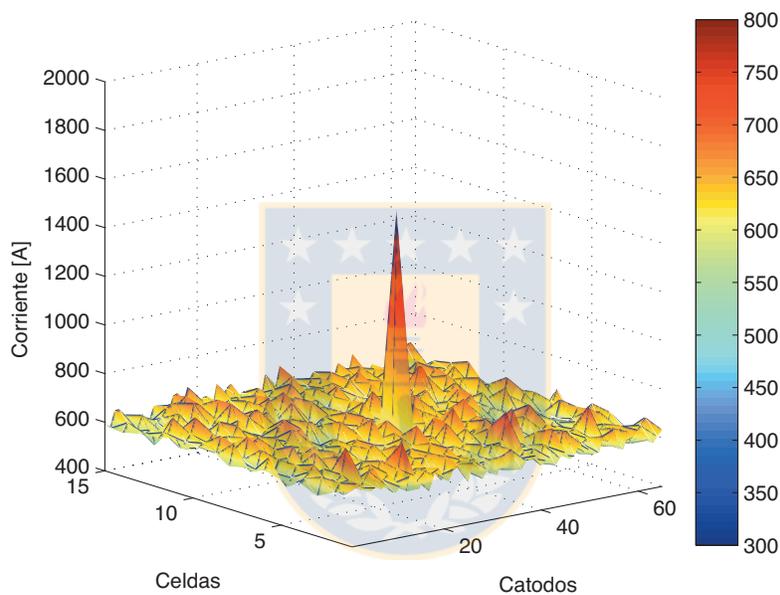


Fig. 4.16: Vista 3D en operación *coci*: Walker

Se puede ver claramente que los efectos de un cortocircuito son mucho menos nocivos en Optibar que en Walker. En la fig. 4.16 se muestra un *coci* en Walker de nivel 2.5, es decir que la corriente en ese cátodo es 2,5 veces la corriente promedio. Si este *coci* no es detectado a tiempo se afectan los niveles de producción. Esto es debido a que la distribución de corriente empeora y además, la corriente disponible para los otros cátodos disminuye. En cambio, para una misma disminución de la resistencia de electrolito en un grupo Optibar, el nivel del cortocircuito es sólo de 1,2.

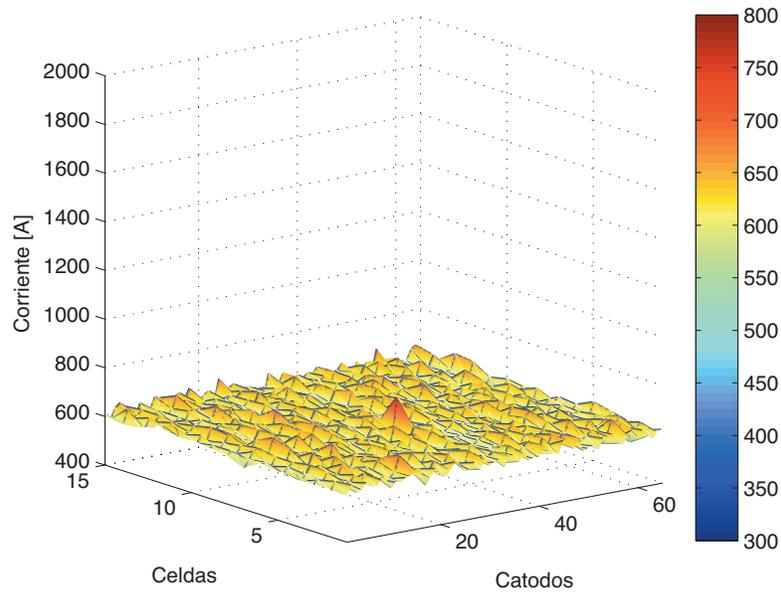


Fig. 4.17: Vista 3D en operación *coci*: Optibar

En la tabla 4.8 se ve claramente la diferencia en la influencia sobre los indicadores en cada una de las tecnologías.

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	108,9[A]	29,42[A]
Índice de Dispersión	17,7%	4,78%
<i>coci</i>	1433[A]	738[A]
Promedio Disponible	602[A]	613[A]

Tabla 4.7: Comparación Walker-Optibar

Influencia sobre Eficiencia

De acuerdo con la tabla 4.8 se puede apreciar que la corriente promedio disponible para los demás cátodos (no-*coci*) es considerablemente menor al promedio. Esto repercute de forma directa en la eficiencia de corriente. La eficiencia de corriente no es lineal, es decir si la corriente aumenta considerablemente, la eficiencia de corriente no aumenta proporcionalmente ni menos

linealmente.

De acuerdo a esta suposición, se puede analizar el efecto directo que tiene un cortocircuito en la eficiencia de corriente, sin considerar el efecto de una mayor dispersión de corriente.

Si consideramos la ec. (2.8), una corriente promedio de $615[A]$, un tiempo total de ciclo de $155[h]$ y distintos tiempo de duración del *coci*, obtenemos la tabla 4.8, donde se muestra la eficiencia de corriente. Se considera que el *coci* no aumenta ni disminuye su nivel, pero si varía la duración de éste y además se considera que un cátodo que estaba afectado por un *coci* tiene un peso promedio de $50[kg]$, se tiene que:

	Cantidad de <i>coci</i>	Duración <i>coci</i>	Walker	Optibar
1		24[hrs]	0,096 %	0,005 %
		36[hrs]	0,3294 %	0,0407 %
		48[hrs]	0,5627 %	0,0766 %
		60[hrs]	0,7959 %	0,1125 %
		72[hrs]	1,0292 %	0,1483 %
2		24[hrs]	0,115 %	0,0473 %
		36[hrs]	0,574 %	0,1180 %
		48[hrs]	1,037 %	0,1886 %
		60[hrs]	1,493 %	0,2593 %
		72[hrs]	1,952 %	0,3299 %

Tabla 4.8: Disminución de la eficiencia en función de la duración de un *coci*

Se ve claramente que un cortocircuito es mucho más nocivo para celdas tipo Walker que para celdas tipo Optibar, resaltando de esta forma una de las características más poderosas de esta barra.

4.3.4. Contacto Sucio

Se le llama contacto sucio al contacto defectuoso. Esto puede producirse por varias razones. Una razón es que entre el *hangerbar* y el *busbar* quede algún elemento extraño que no permita el contacto óptimo. Otra razón, es que se acumule suciedad en el contacto, producto de tem-

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	615[A]	615[A]
Desv. Estándar	38,07[A]	24,26[A]
Índice de Dispersión	6,19 %	3,95 %
Máximo	777,5[A]	733,1[A]
Mínimo	170,2[A]	335,1[A]

Tabla 4.9: Comparación Walker-Optibar: Operación Contactos Sucios

peraturas altas (producidas generalmente por otros contactos sucio o bien cortocircuitos) o de corrosión del contacto.

Un contacto sucio se comporta generalmente como un cortocircuito en cuanto a temperatura, pero como un circuito abierto en cuanto a corriente, produciendo un efecto bastante difícil de identificar utilizando sólo un parametro de búsqueda.

En la tabla 4.9 se pueden apreciar los índices para cada una de las tecnologías.

A continuación se puede ver en las fig. 4.18 y 4.19 el efecto en la corriente de un contacto sucio en una celda Optibar.

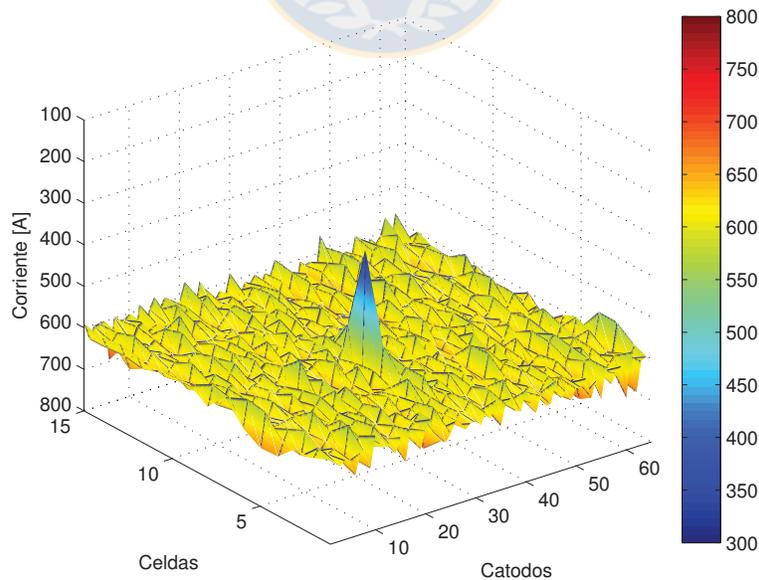


Fig. 4.18: Vista 3D en operación cátodo sucio: Optibar.

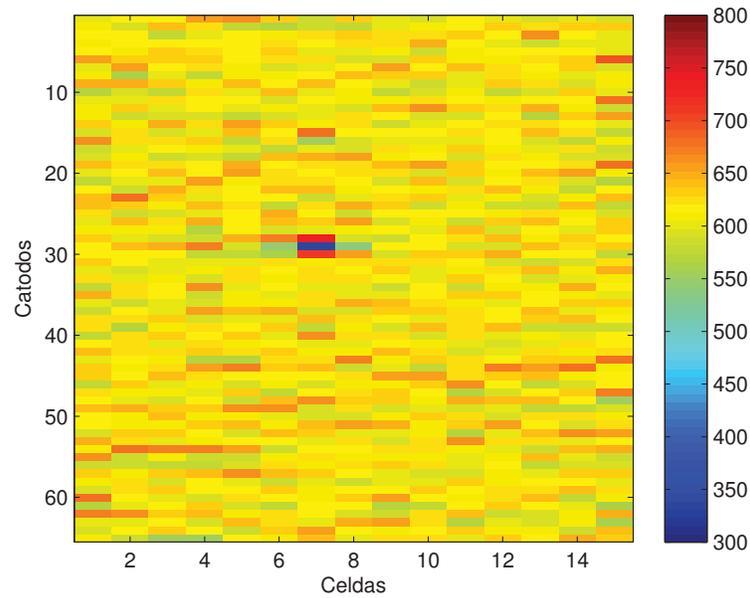


Fig. 4.19: Vista 2D en operación cátodo sucio: Optibar.

Como se muestra en la fig. 4.20, el contacto sucio es mucho más nocivo en las barras tipo Walker que en las barras Optibar, al igual que los cortocircuitos.

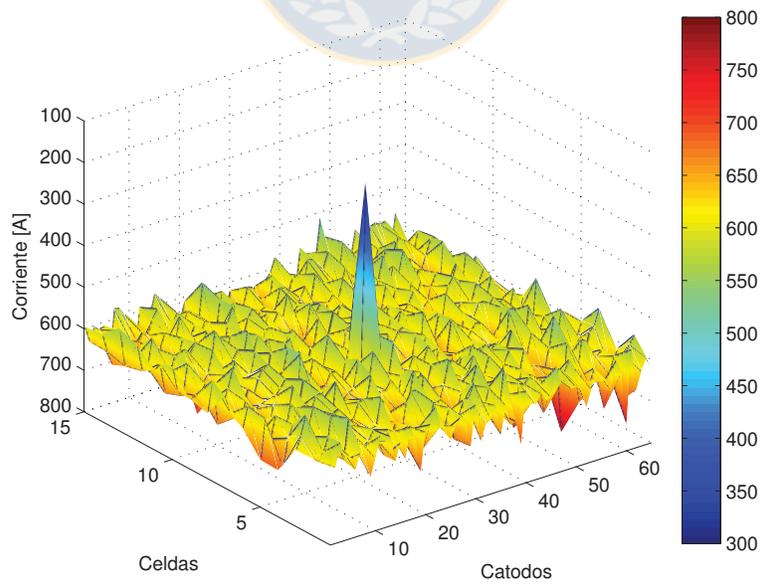


Fig. 4.20: Vista 3D en operación cátodo sucio: Walker.

Sin embargo, el efecto en Optibar se prolonga a las celdas siguientes y a los cátodos adyacentes, situación que no se da en Walker.

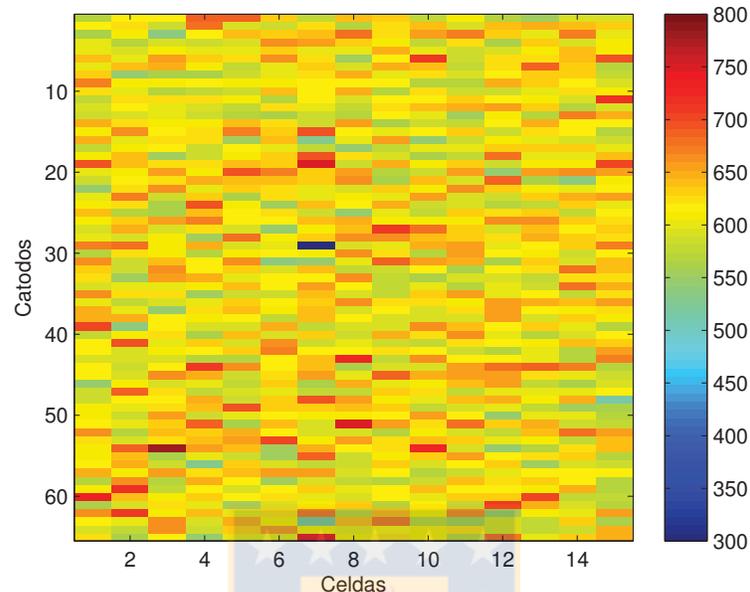


Fig. 4.21: Vista 2D en operación cátodo sucio: Walker.

4.3.5. Cosecha

Cuando se cosechan los cátodos, este proceso se realiza en 3 tercios. Cuando se levanta el primer tercio se producen circuitos abiertos que generan sobrecorrientes en los cátodos adyacentes. En la tecnología Optibar, este efecto se propaga a las celdas siguientes, como se vio en las secciones anteriores. Sin embargo, al ser este efecto simétrico, la propagación se cancela y sólo se propaga 2 celdas antes y 2 celdas después.

Este efecto queda muy claro en la fig. 4.22, donde se ve como los índices de dispersión van disminuyendo hasta llegar a valores normales luego de pasado 2 celdas.

En las fig. 4.23 y 4.24 se pueden ver las corriente durante una cosecha para una configuración tipo Optibar. En las fig. 4.25 y 4.26 se pueden ver las corriente para una configuración tipo Walker. Se ve que no existen diferencias sustanciales en la distribución.

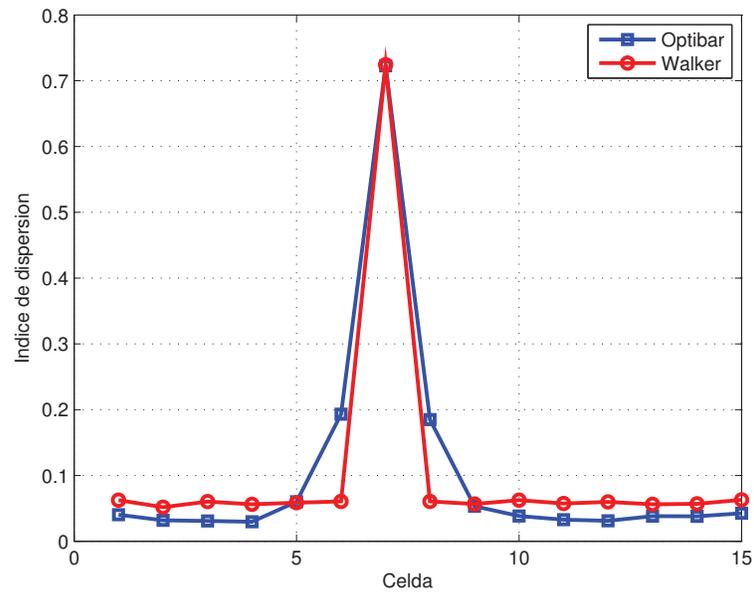


Fig. 4.22: Comparación de índices de dispersión por celda.

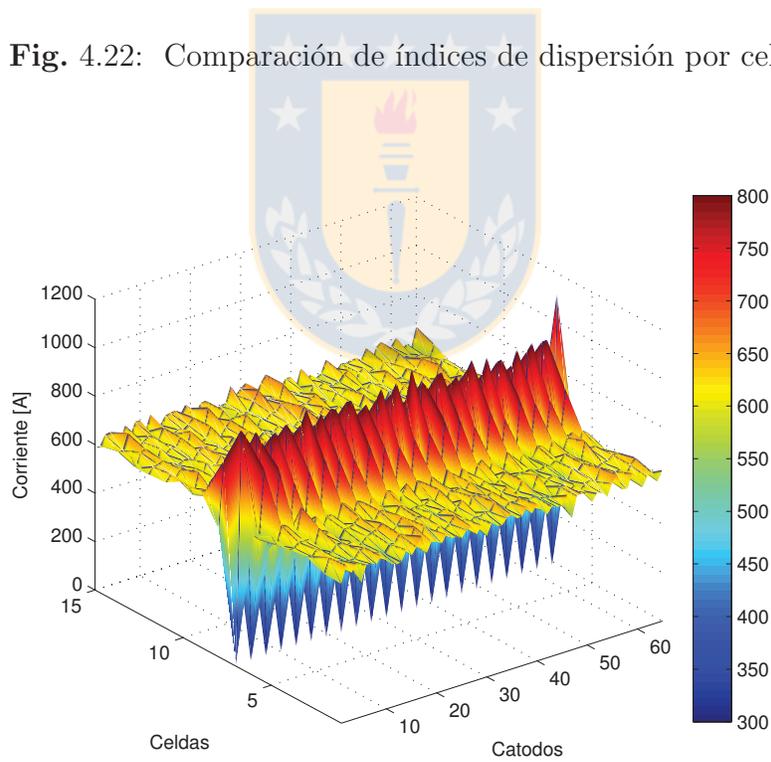


Fig. 4.23: Vista 3D en operación cosecha: Optibar.

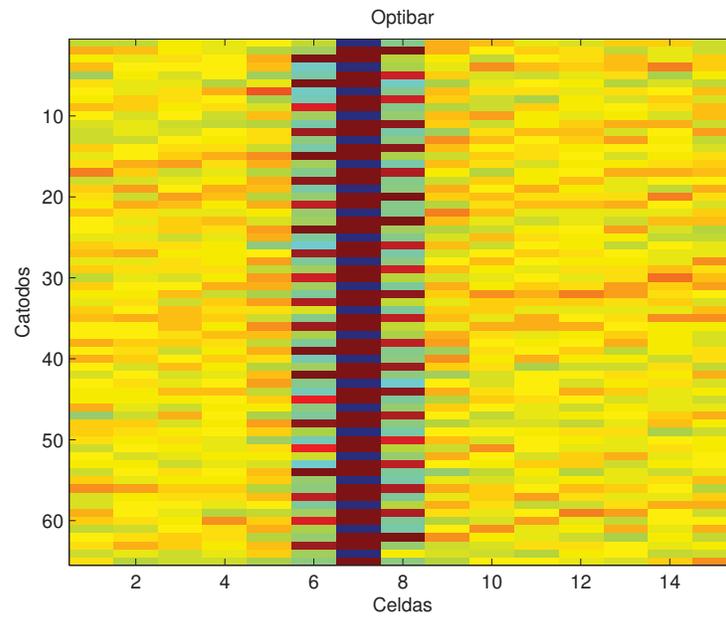


Fig. 4.24: Vista 2D en operación cosecha: Optibar.

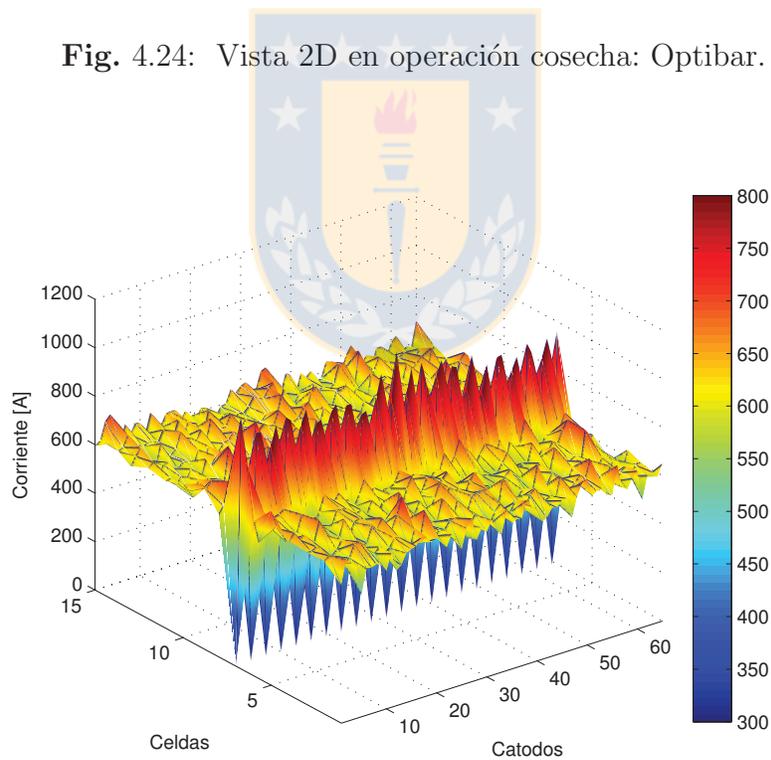


Fig. 4.25: Vista 3D en operación cosecha: Walker.

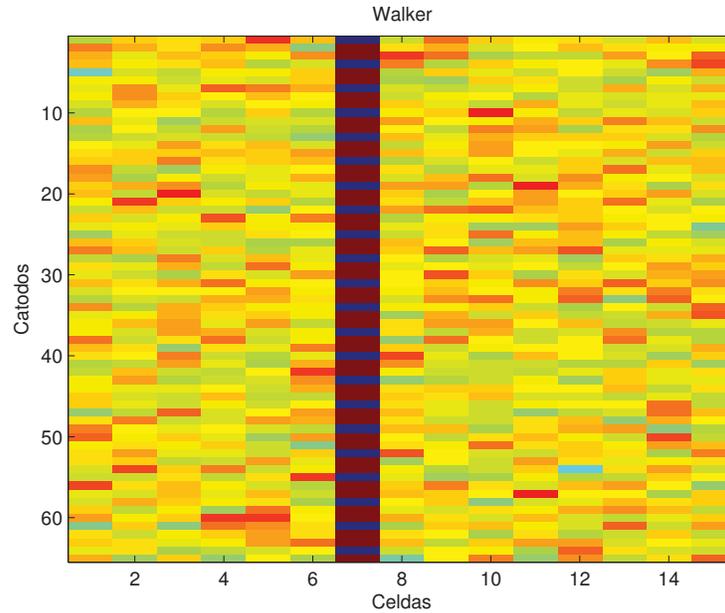


Fig. 4.26: Vista 2D en operación cosecha: Walker.

4.4. Conclusiones

Cada una de las barras simuladas presenta sus ventajas y desventajas. Para Walker, un circuito abierto produce sólo un efecto focalizado, sin generar grandes sobresaltos de corrientes ni bajas considerables en los cátodos adyacentes. En cambio, la presencia de un circuito abierto para Optibar es realmente dañino, puesto que es una configuración *Current-Source*, por lo que el daño no es sólo focalizado, sino que se traspa a otros cátodos y celdas. Sin embargo, la presencia de los circuitos abiertos es fácil de detectar y una vez que el problema de circuito abierto es solucionado, no debería volverse a repetir durante el ciclo. Es por esto que si bien el daño que genera es bastante amplio - lo que no quiere decir que sea muy significativo - éste es fácil de detectar, resolver y prevenir.

Por otro lado están los efectos del contacto sucio y cortocircuito. Estos efectos son bastante nocivos, perjudicando directamente la eficiencia de corriente y por ende el consumo específico de la planta de EW. Además es necesario comentar que en esta simulación no se ha considerado el efecto de la temperatura, que en el caso de la barra Walker se propaga con facilidad por la barra,

afectando la distribución de corriente en los cátodos adyacentes y celdas contiguas, además de ayudar a la formación de cátodos sucios. Estos efectos, si bien, son relativamente fáciles de detectar, son muy difíciles de prevenir, por lo que en caso de no ser despejado a tiempo, causan un daño irreparable a la cosecha del ciclo.



Capítulo 5

Mediciones de Planta

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan las mediciones realizadas en la planta de EW de Zaldívar. Las mediciones realizadas contemplan lo siguiente:

- Mediciones de corrientes catódicas.
- Medición diaria del voltaje.
- Control de los ciclos de cosecha.
- Control del peso de las cosechas.

Los datos obtenidos en la planta de encuentran en el anexo [D](#) y las regresiones lineales utilizadas en este capítulo se encuentran en el anexo [E](#).

5.2. Implementación

Las mediciones realizadas en Zaldívar se hicieron dentro de un marco de control y supervisión del proyecto Optibar. La primera etapa del proyecto contempló la instalación de las barras en una nave completa, es decir la instalación de 76 barras intercelda, adicionales a las 14 barras previamente instaladas en la planta.

En el mes de octubre se dio comienzo a la instalación de Barras Optibar en los 5 grupos restantes - grupo 5 de la nave A ya había sido instalado con anterioridad- del circuito A que no contaban con esta tecnología. La instalación y entrada en operación de las nuevas barras se llevó a cabo sin presentar mayor inconvenientes. El día 25 de enero se confirmó el término de la instalación de las barras Optibar en toda la nave A.

Desde la primera semana de Febrero se comenzó a cosechar los grupos A (Optibar) con un peso promedio objetivo de 43 [kg]. Para Walker se miden diariamente las corrientes y se corrigen las anomalías para asegurar la óptima operación. Esta supervisión requiere 3 horas al día por grupo. En el caso de Optibar, estos resultados fueron obtenidos manteniendo un rol de supervisión sobre las celdas (30 minutos al día por grupo).

5.2.1. Materiales

Las herramientas y materiales utilizados en la captación de los datos se detalla a continuación:

1. Tenaza de Corriente i1010
2. Multímetro Fluke 287
3. Termómetro Infrarrojo 62Mini



Las especificaciones de los instrumentos se encuentran en el anexo C.

5.3. Resultados

5.3.1. Distribución de Corriente

La primera medición que se realizó en faena fue la de las corrientes catódicas. Se debe comprobar primero que Optibar tiene índice de dispersión menor que Walker, por lo que se realizaron diversas mediciones de corrientes.

Sin embargo, debido a que en los grupos Walker generalmente habían problemas –circuitos abiertos y cortocircuitos– estas mediciones contienen un poco de ruido. Se calculan los índices de dispersión sin considerar los circuitos abiertos y cortocircuitos.

Parámetro	Walker	Optibar
Corriente Media	707[A]	646[A]
Desv. Estándar	95,2[A]	65,4[A]
Índice de Dispersión	13,46 %	10,1 %
Máximo	1.457,3[A]	684[A]
Mínimo	0[A]	379[A]

Tabla 5.1: Dispersión de corrientes en planta

Como se puede ver en la tabla 5.1 existe un desnivel con respecto a la corriente promedio, puesto que cuando se realizó la medición del grupo Optibar la corriente del rectificador estaba en $42[kA]$ y cuando se midió el grupo Walker la corriente había subido hasta $46[kA]$. Sin embargo, las escalas de color de las fig. 5.2, ??, 5.3 y 5.4 están ajustadas para que el "efecto" visual sea similar.

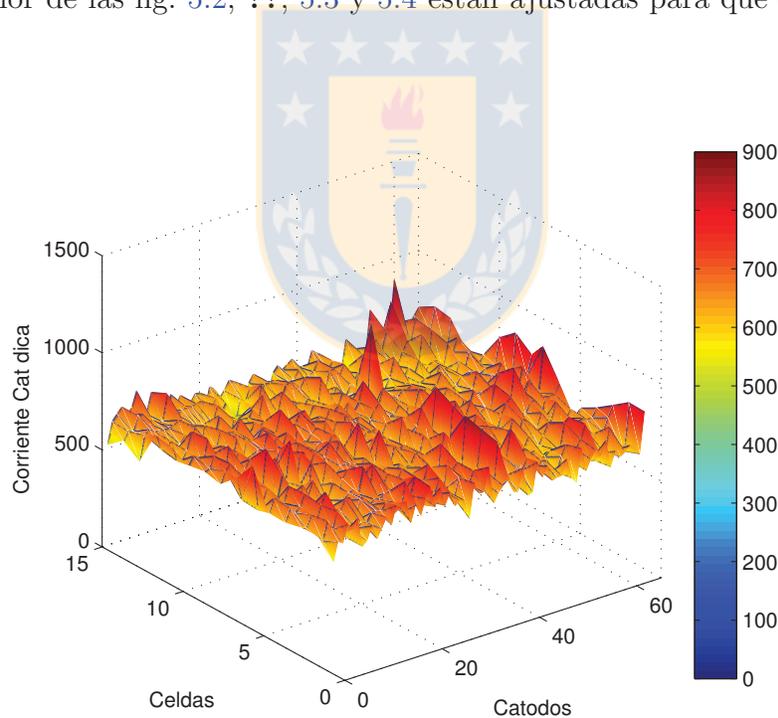


Fig. 5.1: Vista 3D de corrientes reales: Optibar.

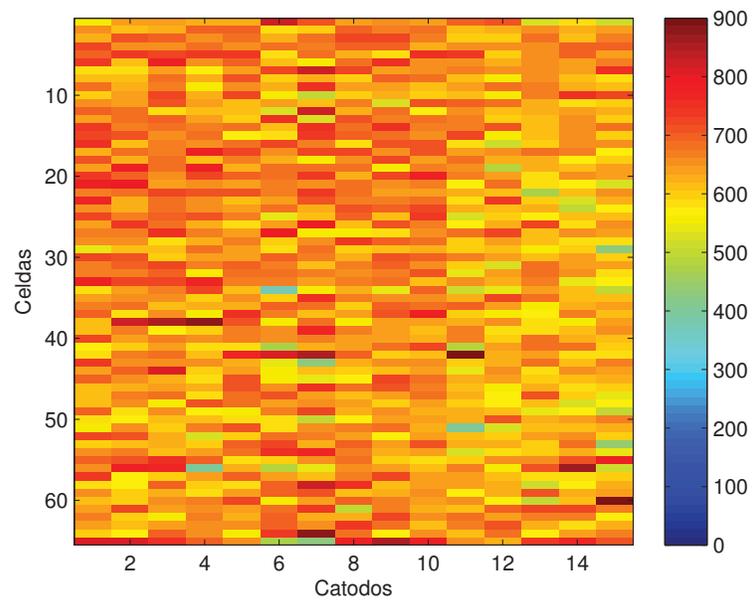


Fig. 5.2: Vista 2D de corrientes reales: Optibar.

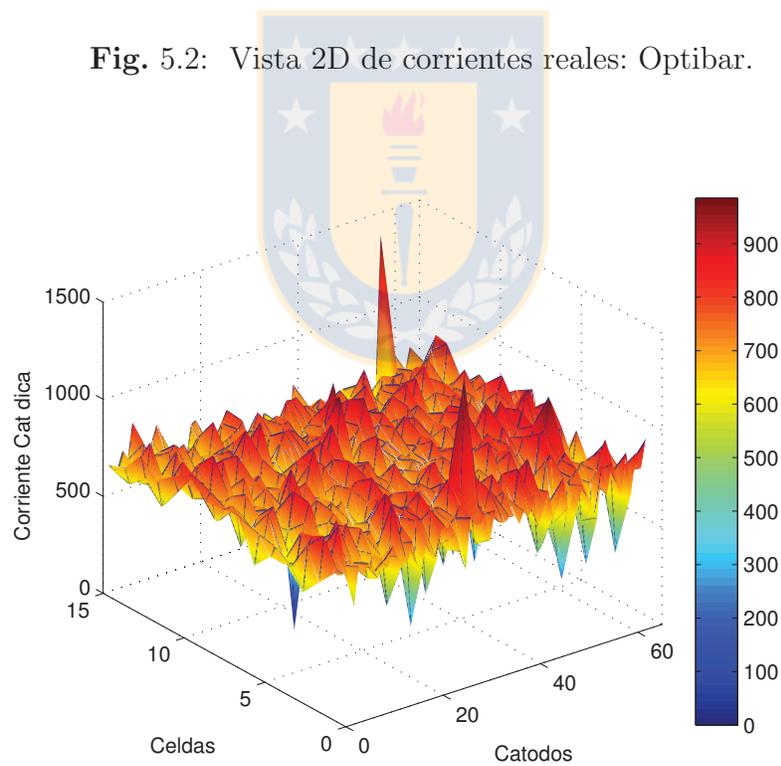


Fig. 5.3: Vista 3D de corrientes reales: Walker.

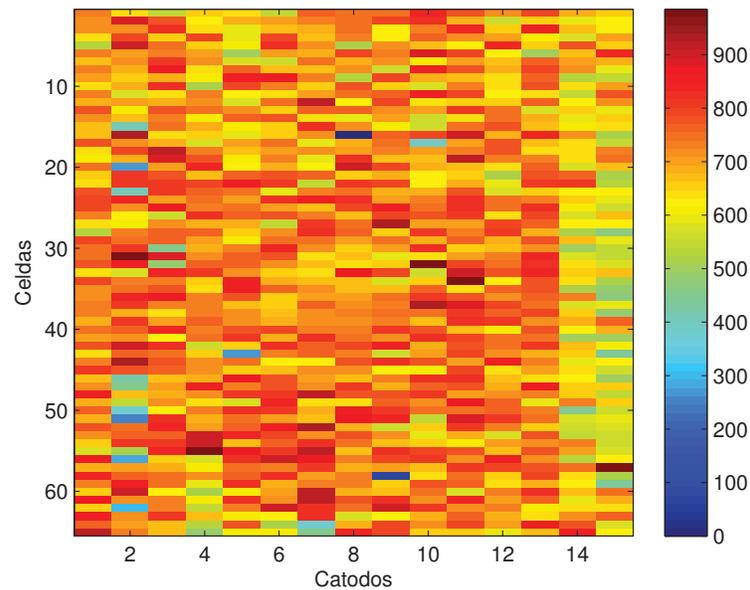


Fig. 5.4: Vista 2D de corrientes reales: Walker.

Dispersión en Cosecha

En el capítulo 4.3.5 se simuló la dispersión de la corriente durante la cosecha, para dejar en claro que al cosechar no se aísla todo el circuito. Además de eso se tomaron mediciones de corrientes durante una cosecha. Debido a que el proceso de cosecha es un proceso productivo esencial y no puede ser atrasado o manipulado, las mediciones que se pudieron tomar fueron escasas pero suficientes para ilustrar el punto hecho en la sección 4.3.5.

La corriente aumenta en los cátodos restantes de la celda, y tiene un efecto en las celdas adyacentes. Sin embargo este efecto se desvanece en las celdas siguiente, como se muestra en la simulación.

En la fig. 5.5 se muestran los índices de dispersión por celda para una configuración Optibar con datos simulados y datos reales. Para los datos reales no se encuentran las mediciones completas de las 15 celdas, debido a que la toma de esta medición demora aproximadamente 2 horas, por lo que es operacionalmente inviable para la cosecha 2 horas para realizar una medición.

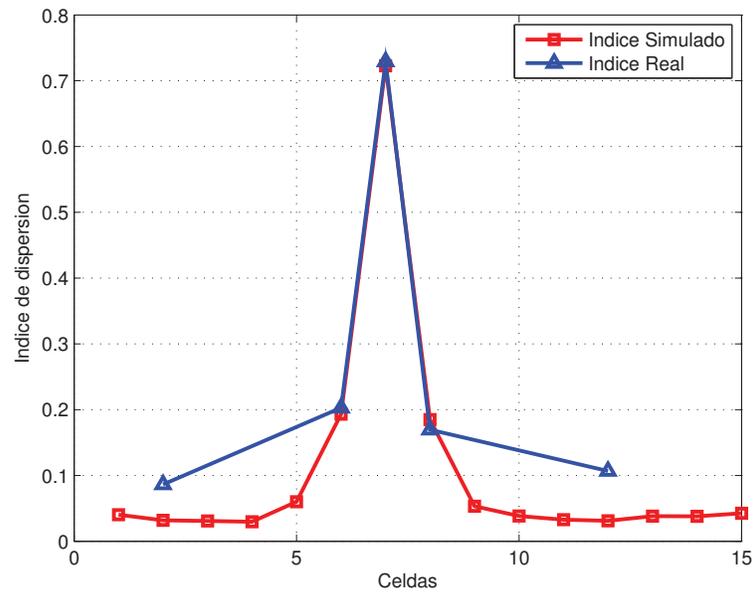


Fig. 5.5: Índices de dispersión de una configuración Optibar Simulada (rojo) y Real (azul).

5.3.2. Corriente del Rectificador

La corriente del rectificador es una variable importante. La producción tiene una dependencia lineal con respecto a la corriente, por lo que una corriente mayor, disminuye la duración del ciclo, permitiendo producir más cobre en un mismo lapso de tiempo. Sin embargo, la relación entre la corriente del rectificador y la eficiencia de corriente no está claramente establecida, y existen varias hipótesis al respecto. Las hipótesis son claras y opuestas entre ellas:

1. **La corriente del rectificador tiene una influencia negativa sobre la eficiencia de corriente.** Esto se produce debido a que los "eventos" como *coci* y cátodos sucios tiene una mayor influencia. Un *coci* al tener una mayor corriente disponible, es de mayor nivel, y los cátodos sucios tienden a formarse con mayor facilidad debido a esto.
2. **La corriente del rectificador tiene una influencia positiva sobre la eficiencia de corriente.** Esto es debido a que con una corriente mayor, el tiempo de cosecha es menor, y los efectos negativos de los cortocircuitos y cátodos sucios tiene un menor efecto sobre la eficiencia.

La corriente del rectificador no se mantiene constante durante un ciclo, ésta se cambia con un periodo de 6[hrs] como mínimo. Esta variación de la corriente está dada por la concentración y nivel de la piscina de PLS. Como no se tiene acceso a la medición de la corriente cada seis horas, se utiliza la corriente promedio del ciclo para realizar el análisis. Como se ve en la fig. 5.6 la corriente promedio mensual fue decayendo, llegando incluso a valores bajo los 36[kA], por lo que se puede realizar un análisis bastante completo y no sesgado.

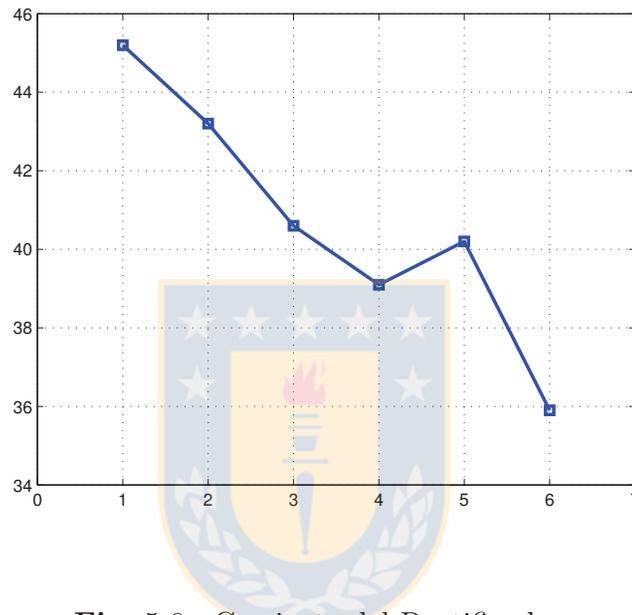


Fig. 5.6: Corriente del Rectificador.

Al separar los cosechas por tecnología, se obtiene el promedio mensual de corriente del rectificador aplicado a cada tecnología. En la fig. 5.7 se muestra el promedio histórico mensual de la corriente del rectificador.

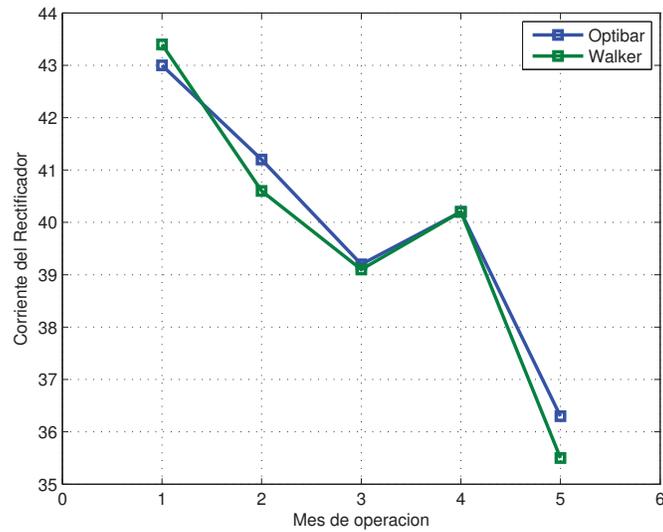


Fig. 5.7: Corriente del Rectificador en grupos Optibar y Walker.

5.3.3. Voltaje de Celda

El voltaje de celda está compuesto, como fue explicado anteriormente, por 3 voltajes principales. Estos voltajes son:

1. Voltaje de la reacción catódica y anódica, que es constante e igual a 1,57[V].
2. Voltajes de contacto de cátodo y ánodo, típicamente entre 30[mV] y 50[mV].
3. Voltajes de electrolito, que se maneja entre 0,4[V] y 0,5[V].

Como se analizó en el capítulo 4, a medida que aumenta el tiempo en el ciclo la distancia entre los electrodos disminuye, debido a que el cátodo se adhiere a la placa de acero. Sin embargo, este voltaje no solo es función del tiempo, sino que también de la corriente, por lo que es interesante analizar la relación entre \overline{E}_c (voltaje de celda), t (hora del ciclo) y I (corriente del rectificador).

A medida que la corriente se hace mayor, el voltaje es mayor, pero este último disminuye con el tiempo.

El análisis se realizó de forma indirecta, con valores obtenidos para calcular el voltaje de operación promedio de un ciclo. Este registro de voltaje se realizaba 2 veces por día y además se

registraba la corriente del rectificador, por lo que luego analizando la hora a la cual fue tomada la medición y el inicio del ciclo se calculaban los tríos tiempo-corriente-voltaje.

Se aprecia claramente en la fig. 5.8 que el promedio del voltaje de celda con Optibar es menor. Con Optibar el promedio de voltaje de celda es de 2,056[V] en cambio con Walker este valor asciende a 2,091[V].

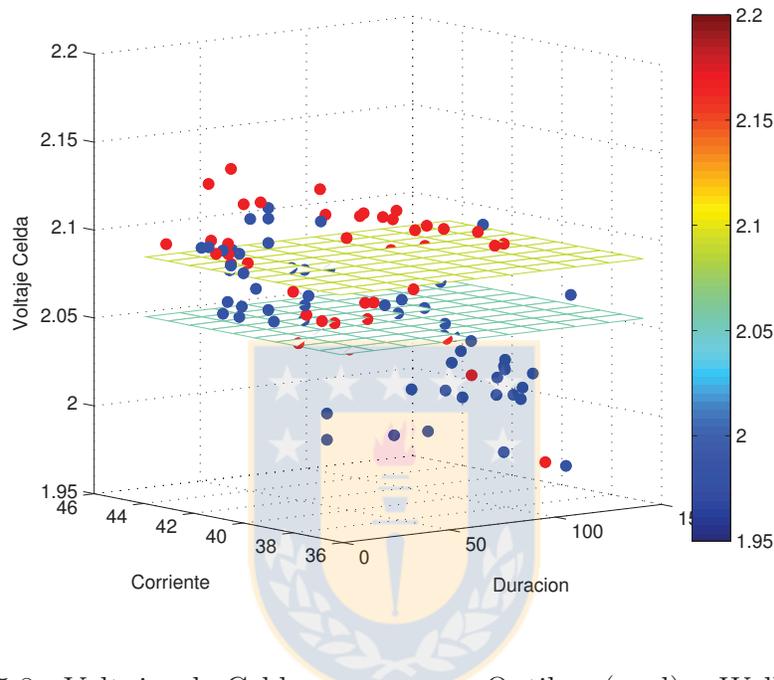


Fig. 5.8: Voltajes de Celda para grupos Optibar (azul) y Walker(rojo).

Para analizar el comportamiento de los voltajes en función de la corriente del rectificador y el tiempo de cosecha asociado es necesario realizar una regresión lineal para ver las tendencias. La regresión lineal utilizada, se puede ver en el anexo E. Para los voltajes de grupos Walker (ver fig. 5.9) el voltaje aumenta a medida que aumenta la corriente y disminuye el tiempo del ciclo. La regresión presentada considera hasta tiempos de 150 horas, sin embargo en la práctica eso es irreal, puesto que con la tecnología Walker si bien es posible realizar esto, la calidad física disminuye considerablemente producto de cortocircuitos. Típicamente la duración de los ciclos Walker varía entre 100 y 120 horas.

Para los voltajes de los ciclo Optibar (ver fig. 5.10), se produce un efecto muy parecido. El voltaje disminuye conforme baja la corriente y aumenta el tiempo del ciclo. Sin embargo se observa una pequeña alza de voltaje al terminar el ciclo. Esto se debe a distintas anomalías

presentadas en planta, que por la cantidad reducida de datos que hay no pueden ser filtrados. Aún así, el perfil de voltaje de Optibar es bastante mejor, ofreciendo voltajes de operación casi $40[mV]$ más bajos.

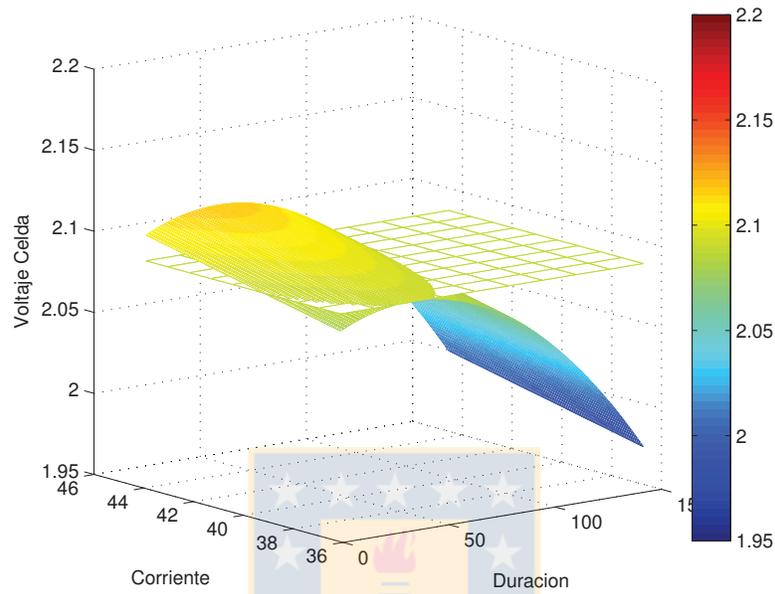


Fig. 5.9: Regresión lineal para los voltajes de celda Walker.

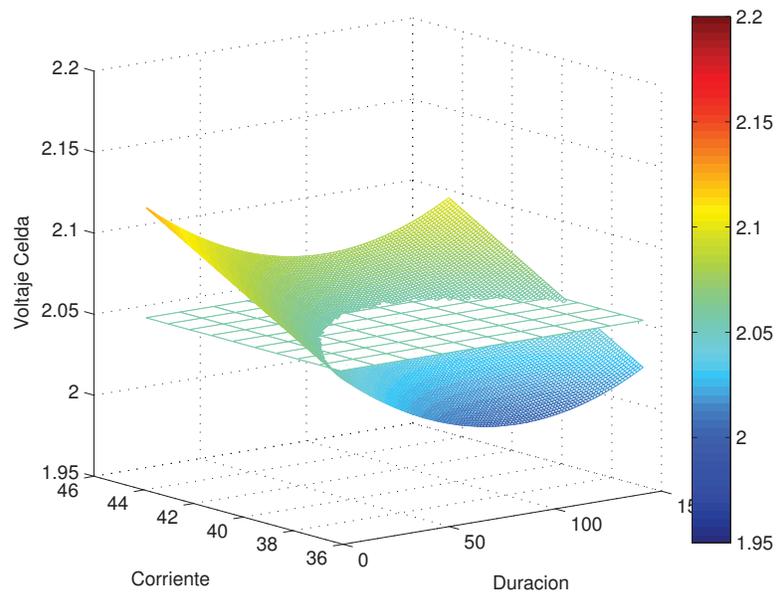


Fig. 5.10: Regresión lineal para los voltajes de celda Optibar.

Al comparar ambas regresiones lineales (ver fig. 5.11), se ve claramente que Optibar presenta un voltaje menor en todo momento. Optibar sólo supera los voltajes Walker para los tiempos en que el modelo de Walker no es válido.

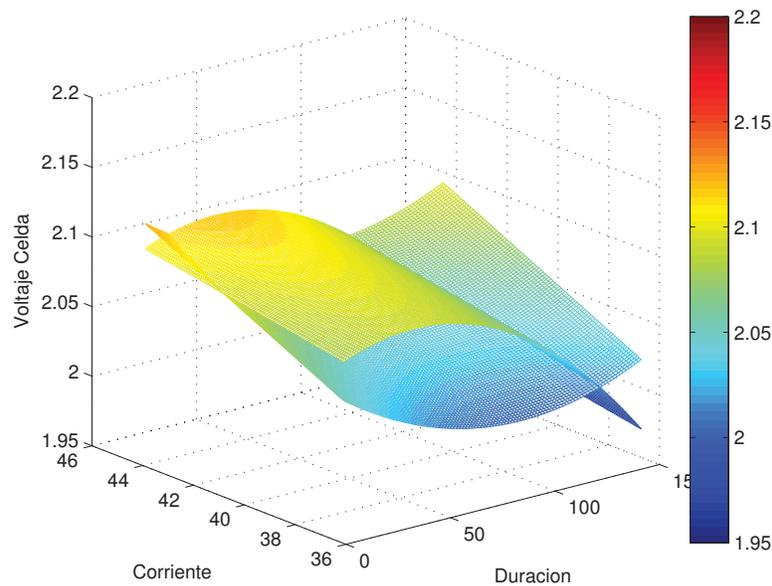


Fig. 5.11: Regresión lineal para los voltajes de celda Optibar y Walker.

5.3.4. Eficiencia de corriente

Los resultados obtenidos con tecnología Optibar son considerablemente mejores que los obtenidos con Walker. La eficiencia de corriente aumenta a medida que aumenta la corriente promedio del ciclo, es decir que aumenta a medida que la corriente del rectificador aumenta. La relación se puede ver en las fig. 5.12 y 5.13.

Además se propone la idea de que mientras mayor sea el peso de los cátodos, mayor será la eficiencia de corriente puesto que la distancia entre los cátodos disminuye. Es por eso que se consideró un grupo de muestra especial, utilizando sólo los grupos con peso promedio de cátodos mayores a 42,5[kg].

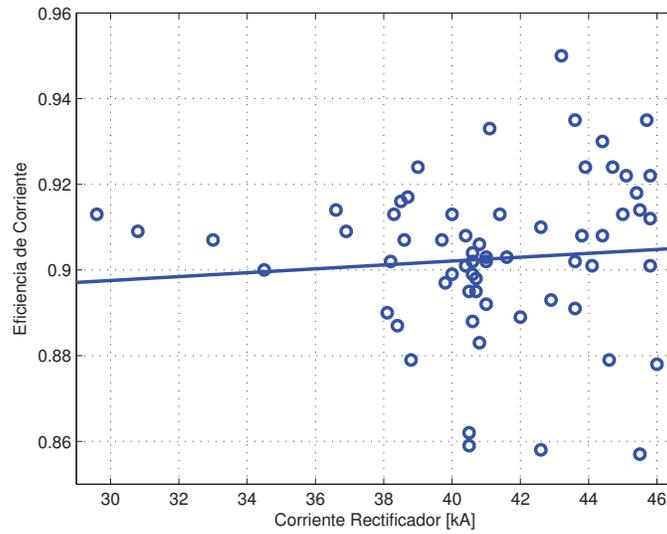


Fig. 5.12: Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Walker.

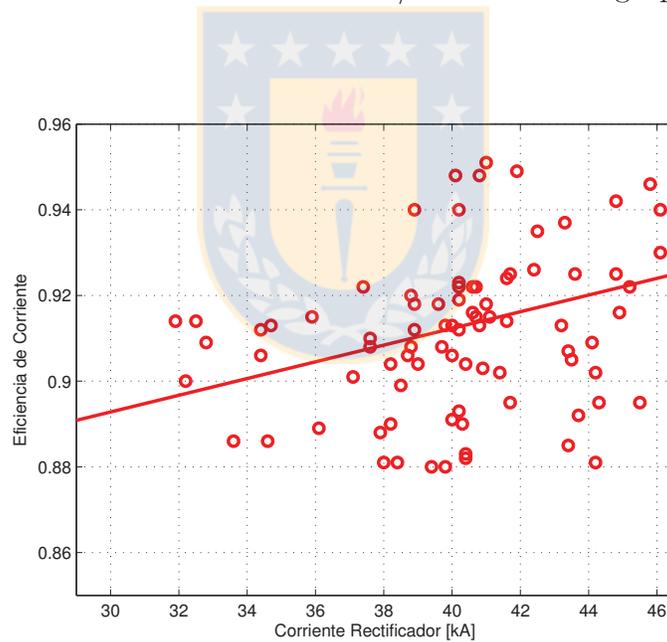


Fig. 5.13: Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Optibar.

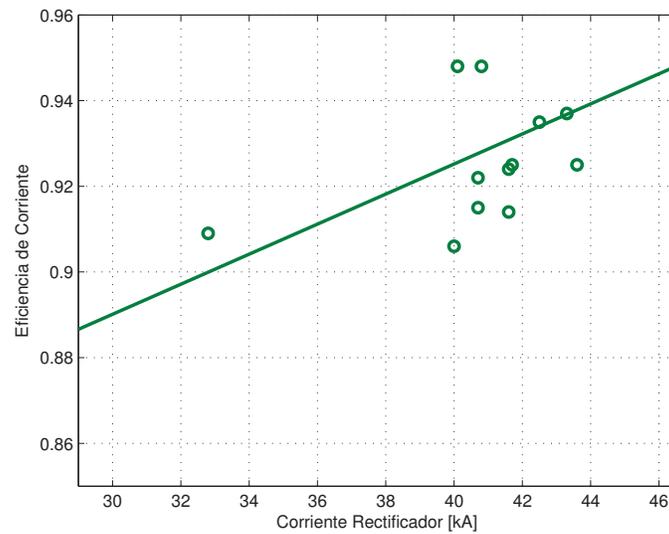


Fig. 5.14: Eficiencia de corriente v/s Corriente en grupo Optibar y cosecha con pesos promedio de cátodos mayor a 42,5 kg.

En las figuras 5.12, 5.13, 5.14 además de mostrar la relación entre la eficiencia de corriente y la corriente del rectificador, se muestra una regresión lineal utilizando un polinomio de grado 1. En la fig. 5.15 se muestran las tres regresiones lineal, mostrando claramente las tendencias de cada una de las relaciones.

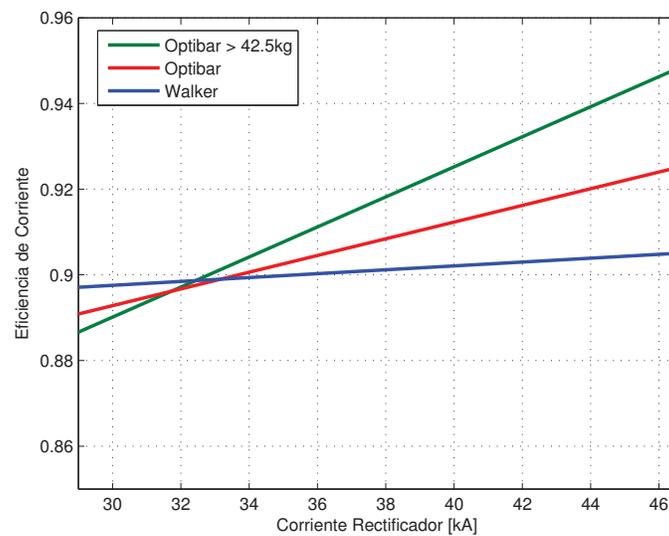


Fig. 5.15: Regresiones lineales.

De la fig. 5.15 se desprende que a medida que la corriente aumenta, la eficiencia de corriente aumenta. Esto es bastante lógico, puesto que la resistencia de electrolito R_{el} disminuye y los efectos dañinos para las cosechas tienen un tiempo de exposición menor. Además cuando se consideran sólo las cosechas con un promedio de peso de cátodo superior a 42,5 [kg] este efecto es más acentuado, debido a que R_{el} es aún más pequeño.

En la tabla 5.2 se encuentra el resumen de los datos en cuanto a la eficiencia de corriente por tecnología. Se puede apreciar claramente que Optibar tiene un aumento en promedio de un 1,02%. Si sólo se consideran las cosechas donde el peso promedio de los cátodos superaron los 42,5[kg] entonces la diferencia es más notoria. Optibar supera en este ámbito por un 2,66%.

Tecnología	$\bar{\eta}$	η_{max}	η_{min}
Walker	90,26 %	95,00 %	84,20 %
Optibar	91,28 %	97,20 %	88,00 %
Optibar > 42,5[kg]	92,92 %	97,20 %	90,60 %

Tabla 5.2: Eficiencia de corriente por Tecnología.

5.3.5. Consumo Específico

El consumo específico, como se definió en el capítulo 2.3.3, es la forma de medir que tan eficiente es una planta. En consumo relaciona la cantidad de energía que se invierte en el proceso en función de la cantidad de material obtenido.

Como se ve en la tabla 5.3 el consumo específico en celdas con barras Optibar es menor que en celdas con barras tipo Walker. Para las celdas con barras Walker el promedio del consumo específico fue de 1.964[kWh/TMF] y para las celdas tipo Optibar el promedio del consumo específico obtenido fue de 1.916[kWh/TMF]. Esto considera una disminución de 48,85[kWh/TMF] en el consumo específico.

Cuando se consideran sólo las cosechas con un promedio de peso de cátodo superior a 42,5[kg], el promedio del consumo específico obtenido fue de 1.887[kWh/TMF], lo que corresponde a una disminución de 77,04[kWh/TMF] con respecto a las celdas con barras tipo Walker.

Tecnología	\overline{E}_s	$E_{s,max}$	$E_{s,min}$
Walker	1.964	2.136	1.854
Optibar	1.916	2.022	1.831
Optibar > 42,5[kg]	1.887	1.939	1.844

Tabla 5.3: Consumo específico en [kWh/TMF] por Tecnología.

Es importante señalar también que el consumo específico también varía de acuerdo a la corriente del promedio del ciclo. La tendencia se puede ver en las fig. 5.16, 5.17 y 5.18.

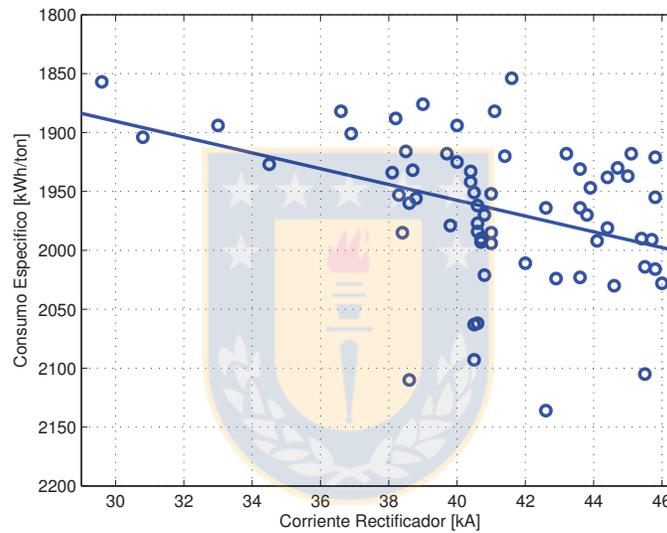


Fig. 5.16: Consumo Específico v/s Corriente grupo Walker.

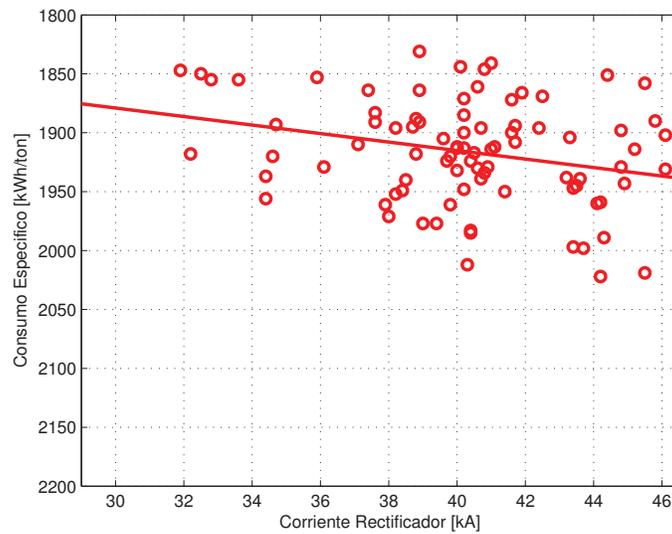


Fig. 5.17: Consumo Específico v/s Corriente grupo Optibar.

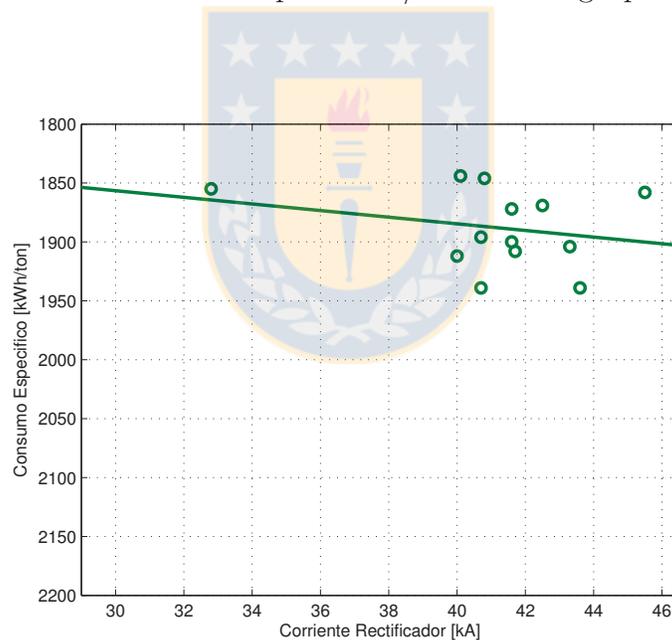


Fig. 5.18: Consumo Específico v/s Corriente en grupo Optibar y cosecha con pesos promedio de cátodos mayor a 42,5 kg.

El consumo disminuye al utilizar tecnología Optibar. Este efecto es aún más notorio cuando se consideran solo las cosechas con un peso promedio de cátodo menor a 42,5[kg].

En la fig. 5.19 se aprecia la tendencia de las 3 regresiones lineales. Se ha utilizado, al igual

que en el caso de la eficiencia de corriente, un polinomio de grado 1.

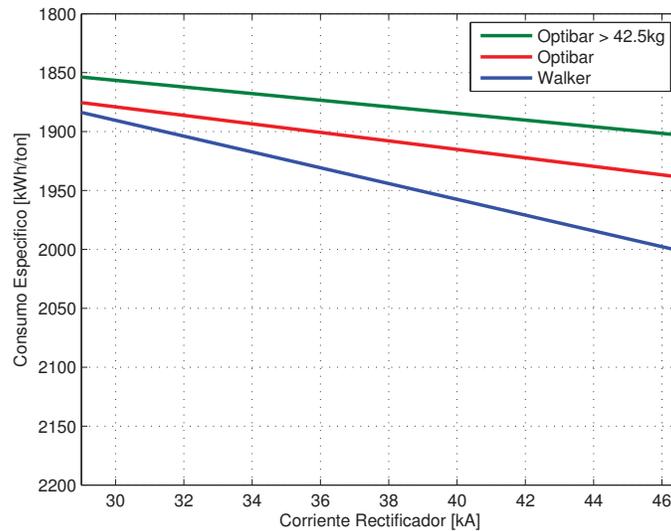


Fig. 5.19: Regresiones lineales.

5.3.6. Calidad del Cobre

Definiciones

La calidad física del cobre obtenido se define en dos áreas. La primera es la calidad física del cobre y la segunda es la calidad química.

La calidad física del cobre se define como:

- Cosecha: los paquetes catalogados como "cosecha" puede ser paquetes especiales lisos o corrugados, dependiendo de las necesidades de los clientes, sin embargo no hay diferencia en su calidad. Estos cátodos se despegan en una *stripping machine*. Esta calidad se le considerará High Grade (*HG*).
- Manual Liso (*ML*): cuando algún cátodo presenta algún problema y no puede ser despegado por la *stripping machine* éste debe ser despegado de forma manual. Estos son los que se despegan de forma manual, pero no presentan ningún problema del punto de vista de la calidad física, y son despegados en la planta baja de la *stripping machine*. Estos cátodos serán considerados como *HG*

Clase	Grado	Pb/ppm	S/ppm	Fe/ppm
0	LME Gr. A.	≤ 2	≤ 5	≤ 4
1	LME Gr. A.	$2 < \text{Pb} \leq 3$	$5 < \text{S} \leq 8$	$4 < \text{Fe} \leq 6$
2	LME	$4 \leq \text{Pb} \leq 5$	$9 \leq \text{S} \leq 15$	$6 < \text{Fe} \leq 10$
3	STANDAR	$6 \leq \text{Pb} \leq 8$	$16 \leq \text{S} \leq 20$	$10 < \text{Fe} \leq 15$
4	STANDAR	$9 \leq \text{Pb} \leq 15$	$21 \leq \text{S} \leq 25$	$16 \leq \text{Fe} \leq 25$
5	STANDAR	$\text{Pb} \geq 16$	$\text{S} \geq 26$	$\text{Fe} \geq 26$

Tabla 5.4: Clases químicas del cobre.

- Manual Granulado (*MG*): corresponden a los cátodos despegados de forma manual pero que presentan algún grado de nodulación, no son de la mayor calidad física y se les considerará del tipo estándar.
- Manual Liso Especial (*ML-E*): son los cátodos que por diversos motivos no pueden ingresar a la máquina para ser trasladados a la planta baja, por lo que deben ser despegados en la planta alta de la nave de EW, sin embargo no presentan problemas de tipo físico, por lo que se les considera del tipo *HG*.
- Manual Granulado Especial (*MG-E*): Al igual que los cátodos *ML-E*, estos presentan algún problema mayor y no pueden ingresar a la máquina, por lo que deben ser despegados en la planta alta. Sin embargo estos cátodos si tienen problemas del tipo físico, por lo que se catalogan como cátodos estándar.
- Scrap: estas son placas o laminillas que no se alcanzaron a formar bien, por lo que no se consideran como cátodos. Estas láminas se catalogan como Scrap, que es la categoría física más baja posible.

Por otro lado está la calidad química, que si bien no será controlada es necesario tener claro su relación con la calidad física. La calidad química se define en clases y su relación con la cantidad de Hierro (Fe), Azufre (S) y Plomo (Pb). Las clases van de 0 a 5, siendo la clase 0 la de mayor calidad. Las clases y los niveles se muestran en la tabla 5.4.

Es importante puntualizar que sólo los paquetes considerados físicamente como *HG* pueden aspirar a ser clase 0 o 1. Luego los paquetes estándar – es decir los que no son ni *HG* ni Scrap– pueden alcanzar una clasificación máxima de 2. Es necesario recalcar que las clases LME Gr. A. reciben un bono en la bolsa de metales de Londres, que es de US\$100 por cada tonelada transada.

Resultados de Planta

Los resultados obtenidos con Optibar en cuanto a la calidad del cobre demuestran un leve aumento en la calidad física, sin embargo cuando se utilizan sólo las cosechas con peso de cátodos promedio superior a los 42,5[kg], la diferencia es un poco menor. En la fig. 5.20 se pueden ver el porcentaje de cobre *HG* con respecto al cobre total obtenido en la cosecha.

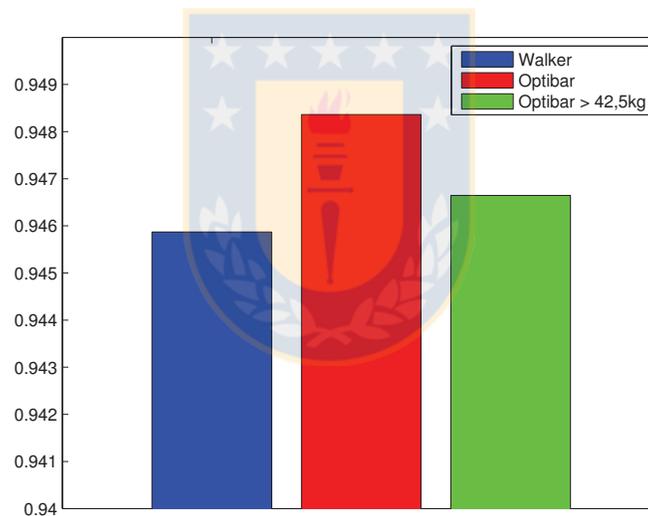


Fig. 5.20: High Grade según tecnología.

Según estos datos, el *HG* obtenido con Walker es en total de 94,56 %, mientras que el obtenido con Optibar es de 94,84 %. Si sólo se consideran las cosechas de 42,5[kg] de peso promedio de cátodo, tenemos que el porcentaje de *HG* es 94,66 %. Esto representa un aumento de 0,25 % con Optibar y 0,07 % con las cosechas mayor a 42,5[kg].

5.4. Conclusiones

En conclusión podemos decir que con Optibar se produce más, mejor y a menor costo.

En tabla 5.5 siguiente podemos ver un resumen de todos los indicadores productivos. Este cuadro fue realizado en base a una producción anual de 140.000 toneladas, con el 100% de la planta de EW utilizando Optibar.

Producción Base	<i>tonCu</i>	140.000	140.000	140.000
Eficiencia	%	90,26	91,28	92,92
Producción Total	<i>tonCu</i>	140.000	141.428	142.296
Precio Cobre	<i>US\$/tonCu</i>	9.300	9.300	9.300
Ganancia Producción	<i>MUS\$</i>	0	13,28	21,35
Consumo Específico	<i>MWh/TMF</i>	1,964	1,916	1,887
Consumo Total	<i>MWh/año</i>	274.960	270.976	268.513
Precio Energía	<i>US\$/MWh</i>	150	150	150
Ahorro	<i>MUS\$</i>	0	0,060	0,97
Porcentaje <i>HG</i>	%	94,56	94,84	94,66
Producción <i>HG</i>	<i>tonCu</i>	132.384	134.130	134.697
Bono <i>HG</i>	<i>US\$/tonCU_{HG}</i>	100	100	100
Ganancia <i>HG</i>	<i>MUS\$</i>	0	0,17	0,23
Total	<i>MUS\$</i>	0	14,05	22,55

Tabla 5.5: Resumen técnico-económico.

Capítulo 6

Huella de Carbono

6.1. Introducción

La Huella de Carbono es un tema muy recurrente hoy en día en la industria. Las empresas deben mostrarse como ambientalmente responsables y para ello es imperativo que reduzcan la cantidad de contaminación que liberan al ambiente. Esta contaminación hoy en día es medida y controlada en algunos países desarrollados y es esperable que la tendencia de esto no cambie, lo que hace imprescindible que Chile gire hacia ese lado también.

6.2. Definición

La Huella de Carbono se define como la cantidad de $CO_2 - eq$ (ver tabla 6.1) que se libera al ambiente para producir un producto o generar un servicio. Esta huella tiene 2 grandes implicancias.

La primera es la derivación ambiental que se hace de ella, es decir que tanto una empresa contamina o que tanto "descontamina" para producir el producto o generar el servicio.

La segunda es la derivación económica que se hace de la huella de Carbono. Una empresa tiene intrínsecamente asociado una cantidad dada de contaminación que puede generar y por lo tanto si por algún motivo produce menos contaminación, puede entonces vender este "delta" a favor. Esto quiere decir que si una empresa, gobierno o persona natural genera Mecanismos

Gases de Efecto Invernadero	Equivalencia en $CO_2 - eq$	
Dióxido de Carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	21
Oxido Nitroso	N_2O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC	740
Perfluorocarbonos	PFC	1.300
Hexafluoruro de azufre	SF_6	23.900

Tabla 6.1: Equivalentes entre GEI y Carbono equivalente.

de Desarrollo Limpio (MDL), lo que generaría menos GEI, entonces la institución –empresa, gobierno o persona– puede vender estas reducciones en un mercado especial llamado ”Mercado del Carbono”

El ”Mercado del Carbono” es un sistema de comercio mediante el cual las empresas, gobiernos o personas pueden vender o comprar las reducciones de emisiones de GEI. Este mercado se basa en 2 puntos:

- No importa en que lugar del mundo se genere la reducción de GEI, el efecto es global y por lo tanto se pueden realizar compras y ventas entre países muy lejanos.
- No importa el tiempo en que se generen las reducciones, siempre y cuando éstas se generen. Debido a la duración de los GEI, no es relevante si la reducción se hace hoy o en 1 año más, lo importante es que la reducción realmente se genere.

Un punto importante dentro del mercado del Carbono son los CER o ”Bonos de Carbono”. Un ”Bono de Carbono” es equivalente a reducir 1 $tonCO_2 - eq$. La equivalencia se realiza para poder contabilizar cualquier GEI, y su potencial daño al medio ambiente. En la tabla 6.1 se muestran las equivalencias.

6.3. Cálculo de Huella

Para calcular el factor de emisión por la energía que se consume, se debe considerar lo siguiente:

1. La matriz energética del sistema interconectado del cual se obtiene la energía.
2. Factor de emisión de las fuentes de energía.

Según lo anterior, se deben analizar los sistemas interconectados que existen en Chile, que son los siguientes:

1. *SING*.
2. *SIC*.
3. Sistema Eléctrico de Aysén.
4. Sistema Eléctrico de Magallanes.

De estos sistemas, los que interesan en este análisis son el *SIC* y el *SING*, debido a que estos manejan los mayores volúmenes de energía y donde se concentran las actividades mineras del país. En la tabla 6.2 se encuentra la cantidad de energía que se consumió en total y cuanto de esto lo consumió la industria minera en los años 2000 y 2008 [15].

En los últimos años se ha visto una variación de la matriz energética en ambos sistemas interconectados, influidos principalmente por la crisis del gas natural. Esto ha producido que las plantas termoeléctricas que funcionaban con gas natural deban utilizar convertidores diesel para mantenerse en operación. Esto ha influido directamente en el precio de la electricidad y para contrapesar estas alzas han entrado en operación centrales a carbón, que es más barato que el diesel, pero también contamina más. En las tablas 6.3 y 6.4 se puede observar la distribución de la matriz energética del *SING* y *SIC* [15].

Sistema	2000	2008
SING (GWh)		
Minería	6.317	10.870
Total	8.398	13.220
Participación	75,2 %	82,2 %
SIC (GWh)		
Minería	4.030	6.920
Total	27.654	39.580
Participación	14,6 %	17,5 %
Total (GWh)		
Minería	10.347	19.790
Total	36.052	52.800
Participación	28,7 %	33,7 %

Tabla 6.2: Participación de la minería del cobre en el consumo eléctrico.

	2001	2009
Generación SING (GWh)	8.991	14.906
Generación Térmica	99,6 %	99,6 %
Diesel	1,5 %	20,1 %
Petróleo Combustible	0,4 %	2,1 %
Diesel + Petróleo Combustible	–	0,6 %
Carbón Bituminoso	29,0 %	40,1 %
Gas Natural	69,1 %	20,1 %
Carbón + Petcoke	–	16,5 %
Generación Hidráulica	0,4 %	0,4 %

Tabla 6.3: Matriz energética del SING.

	2001	2009
Generación SIC (GWh)	29.144	41.738
Generación Térmica	31,6 %	32,6 %
Diesel	0,01 %	40,5 %
Petróleo Combustible	–	0,1 %
Carbón Bituminoso	29,6 %	39,4 %
Petcoke	5,4 %	2,8 %
Gas Natural	61,1 %	11,2 %
Desechos forestales + Licor Negro	4,0 %	6,0 %
Generación Hidraulica	68,4 %	66,5 %
Generación Eólica	0 %	1,0 %

Tabla 6.4: Matriz energética del SIC.

Con estos datos, se puede calcular de acuerdo a los porcentajes de aporte al sistema interconectado, el factor de emisión. En la tabla 6.3 está la composición del SING y en la tabla 6.5 están los factores de emisión por cada fuente de generación [16, 17].

Fuente	Factor de emisión $\left[\frac{gCO_2-eq}{kWh}\right]$
Carbón	955
Diesel	893
Gas Natural	599
Geotérmica T_L	0-1
Geotérmica T_H	91-122
Nuclear	60-65
Hidroelectricidad	15
Fotovoltaica	106
Eólica	21

Tabla 6.5: Tabla de factores de emisión por fuente de generación.

T_H corresponde a alta temperatura y T_L a baja temperatura.

Para realizar el cálculo se utiliza la ec (6.1) para calcular los valores del sistema interconectado.

$$F.E. = \sum f_{participacion} * f_{emision} \quad (6.1)$$

donde $f_{participacion}$ corresponde al porcentaje de participación de una fuente en el sistema interconectado y $f_{emision}$ corresponde al factor de emisión correspondiente a una fuente energética.

Utilizando la información de las tablas 6.5, 6.4 y 6.3 se obtiene que los factores[18] de emisión son:

Sistema	Factor $[\frac{tonCO_2-eq}{MWh}]$
SIC	0,300
SING	0,861

Tabla 6.6: Factores de emisión por sistema interconectado.

Estos factores de emisión son proporcionados por Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) puesto que es la entidad que rige la industria minera en Chile.

6.4. Panorama Nacional

En Chile la situación de la Huella de Carbono, si bien aún no es alarmante, se acerca a niveles que no son adecuados para el mercado internacional.

Lo primero es identificar las distintas fuentes de emisiones que puede generar un producto. Estas fuentes pueden ser directas o indirectas.

El ejemplo de fuentes directas es la energía utilizada proveniente de sistemas de generación propia. Un generador diesel o centrales que pertenezcan específicamente a un empresa se consideran fuentes directas. Otro tipo de fuente directa es la contaminación producida por el combustible quemado para hacer funcionar calderas o vehículos dentro de una obra.

Las emisiones indirectas se consideran todas las emisiones que si bien son necesarias para generar el producto, no son producidas propiamente por él. Este tipo de emisiones considera

la movilización de los empleados –siempre que sea tercerizada–, energía eléctrica, transporte de productos o suministros.

6.4.1. Emisiones por Suministro

Se puede ver en la fig. 6.1 que las emisiones indirectas en el *SING* son mayores que en el SIC, esto básicamente por la matriz energética (tabla 6.3,6.4). Además se ve un cambio bastante notorio en la cantidad de $CO_2 - eq$ emitido, sobre todo en el *SING*, esto debido a la crisis del gas natural.

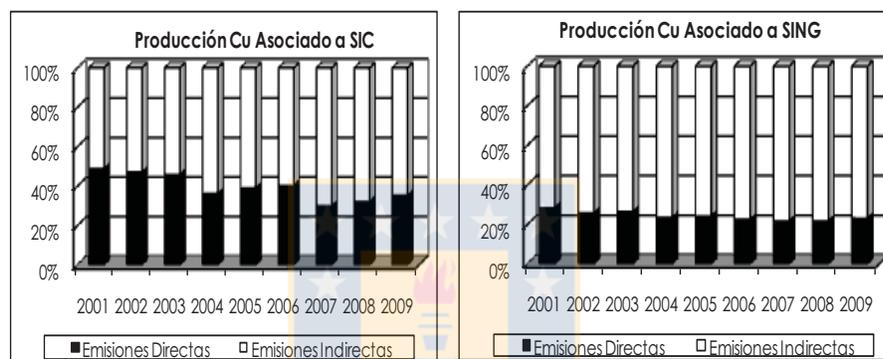


Fig. 6.1: Participación de emisiones directas e indirectas según sistema de generación

6.4.2. Emisiones por Área

Cada área de la minera produce emisiones GEI y es relevante determinar las emisiones de cada una de estas áreas para luego ver el impacto que tiene la tecnología sobre el proceso completo.

En la fig. 6.2 se ve claramente que el proceso de LX-SX-EW es el que más toneladas de $CO_2 - eq$ ha liberado, sin embargo, aquí aún no se considera que para generar un cátodo ER se debe pasar por los procesos de Fundición y Concentración. En la tabla 6.7 se indican las CUE para cada uno de los procesos de la minería del cobre.

Área	Unidades	SING	SIC	Ponderado
Mina Rajo	TM CO ₂ -eq/TMF mineral	0,64	0,65	0,65
Mina Subterránea	TM CO ₂ -eq / TMF mineral	0,95	0,26	0,28
Concentradora	TM CO ₂ -eq / TMF concentrado	1,90	0,92	1,46
Fundición	TM CO ₂ -eq / TMF ánodos	1,17	0,67	0,90
Refinería	TM CO ₂ -eq / TMF cátodos ER	0,40	0,18	0,29
LX-SX-EW	TM CO ₂ -eq / TMF cátodos EW	2,78	1,13	2,62
Servicios	TM CO ₂ -eq / TMF total producido	0,27	0,06	0,19

Tabla 6.7: Cargas Unitarias de Emisión por Área. Año 2009.

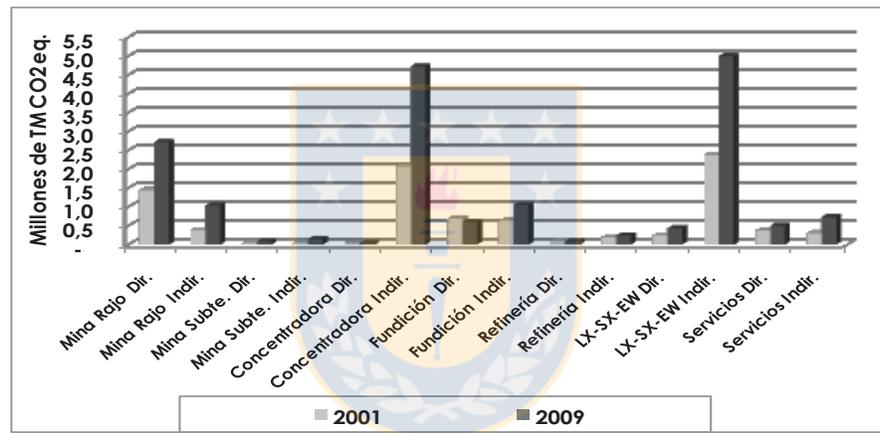


Fig. 6.2: Emisiones según área de la minería.

Para considerar la carga de emisión que tiene cada uno de los tipos de cátodos es necesario ver la Carga Unitaria de Emisión, que se mide en toneladas de $CO_2 - eq$ por tonelada manufacturada de cobre. En la tabla 6.8 se puede ver la CUE por cada una de las áreas de la minería y sistema interconectado. Al unificar las áreas necesarias para poder generar cátodos EW y ER, se obtiene la tabla 6.8. Se puede ver que los cátodos EW tiene una CUE mayor, debido a que la gran mayoría de los cátodos EW se generan en mineras que corresponden al *SING*.

Además es necesario decir que los cátodos EW se obtiene de materiales oxidados, los cuales han disminuido su ley en los últimos años, aumentando el nivel de material procesado para mantener la producción estable.

Área	Unidades	SING	SIC	Ponderado
Cátodos ER	TM CO ₂ -eq / TMF cátodos ER	4,12	2,42	3,30
Cátodos EW	TM CO ₂ -eq / TMF cátodos EW	4,10	2,38	3,94

Tabla 6.8: Valores CUE para productos comerciales. Año 2009.

6.5. Influencia Optibar

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en faena, se puede asegurar que en las condiciones óptimas, Optibar puede reducir $77[kWh/TM]$. La influencia que esto puede tener sobre la CUE de los cátodos EW se relaciona de forma directa a través de la energía del sistema interconectado de la cual se abastece la minera.

La influencia de Optibar como una CUE se calcula como:

$$CUE_{optibar} = ahorro \cdot f_{emision} \quad (6.2)$$

Considerando ambos sistemas interconectados, se obtienen los resultados de la tabla 6.9

Sistema	Disminución CUE
<i>SING</i>	0,066
<i>SIC</i>	0,023
Ponderado	0,062

Tabla 6.9: Disminución de CUE para los sistemas interconectados utilizando Optibar en producción de cátodos EW.

Esta disminución de la CUE significa una disminución en la emisiones de GEI de 1,57%.

6.6. Conclusiones

Como primer conclusión es que con Optibar se generan reducciones de las emisiones. Esta reducción hasta fines de mayo del 2011 representan una disminución de 0,40 % de las emisiones de la planta de EW. Si consideramos que esta tecnología se aplicase a toda la planta, se obtendría una reducción de 1,61 % de las emisiones GEI que corresponden a $9.240[tonCO_2 - eq]$.

Lo segundo es llevar los resultados a un plano macro, es decir utilizando como escenario el país completo. En Chile se producen 2,1127 millones de toneladas de cobre como cátodos SX-EW. Considerando el factor ponderado país de la reducción de Optibar, obtenemos que se disminuyen $130.987[tonCO_2 - eq]$, correspondiente al 1,57% de las emisiones de las que son responsables los cátodos EW. Es más, corresponde al 0,75% del total de las emisiones que genera la industria del cobre en un año.



Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Conclusiones

Las conclusiones serán agrupadas en tres ámbitos: simulación, técnicas y sociales. En cada uno de los grupos se observarán mejoras, sugerencias y trabajos futuros.

Modelación

En cuanto a la simulación, los resultados simulados se condicen con los resultados obtenidos en planta. Sin embargo, el modelo de Malla de Resistencias que se utilizó es bastante general y los resultados obtenidos tienen un cierto grado de error cuando se comparan con los resultados obtenidos en planta. Para mejorar este modelo, una opción viable es realizar una modelación de una celda electrolítica utilizando Modelación de Elementos Finitos (*FEM*). Con esto se pueden adecuar mejor los modelos e incorporar variables de temperatura asociada a la resistividad y conductividad de los materiales.

Técnicas

Como conclusión general de este trabajo se puede afirmar que, con datos obtenidos directamente de una planta y bajo supervisión de personal de la compañía minera, Optibar aumenta la eficiencia de una planta de EW. Este aumento de la eficiencia se hace notar en varios aspectos.

El primero, es el aumento de la eficiencia de corriente, lo que indica que utilizando la misma

cantidad de corriente, se obtiene más cobre con Optibar. Sin embargo, es necesario realizar una distinción. Se obtuvieron dos aumentos de eficiencia, el primero de 1,022 % y el segundo de 2,66 %. Esto corresponde a que para el segundo sólo se utilizaron las cosechas de cátodos con peso promedio mayor a 42,5[kg]. Esa consideración no sólo demuestra que a medida que aumenta el peso, la eficiencia de Optibar aumenta, sino que también sugiere que mientras más peso tiene el cátodo la distancia entre los electrodos disminuye y por lo tanto la resistencia del electrolito también lo hace, lo que lleva a una disminución del voltaje de operación. Esta disminución en el voltaje conduce al segundo aspecto a destacar, que es la reducción del voltaje de operación. El voltaje se redujo un 1,67 % produciendo dos efectos que son claros. El primero, es la influencia directa que esto tiene sobre el consumo específico, que combinada la disminución de voltaje y el aumento de la eficiencia, logra disminuirlo en un 3,92 % que corresponden a 77[kWh/TMF]. El segundo aspecto es la influencia directa que se produce en la temperatura, pues la potencia disipada por el proceso es menor.

Además, cabe destacar, de acuerdo a los datos simulados con Optibar, que los cortocircuitos pierden considerablemente su influencia sobre la eficiencia energética, en cambio los circuitos abiertos toman una gran relevancia. Esto presenta una ventaja sobre las barras convencionales actuales, puesto que un circuito abierto es más fácil de identificar y solucionar. Para despejar un cortocircuito es necesario levantar el cátodo, eliminar la protuberancia de cobre y luego devolver la placa a su posición original, en un proceso que está lejos de ser cuidadoso y contamina el electrolito con Pb, por el choque entre el cátodo y el ánodo al subir y bajar el cátodo. De forma contraria sucede con un circuito abierto en el ánodo, que para ser despejado sólo es necesario mover el *hangerbar* ligeramente para lograr el contacto.

Por otro lado existe un tema ambiental, donde la repercusión de Optibar es bastante considerable. Se realizó una proyección nacional con respecto al resto de las plantas con otros tipos de tecnologías. Con Optibar se logra disminuir la CUE de 4,1 [tonCO₂ – eq/TM] a 4,034 [tonCO₂ – eq/TM]. Esta disminución corresponde a un 1,61 % menos de contaminación liberada al ambiente. En términos prácticos, utilizar tecnología Optibar reduce en un 1,61 % la huella de carbono del cobre, proveniente de los cátodos SX-EW y en un 0,75 % la huella de la industria del cobre en general.

Como trabajos futuros, el área de eficiencia energética dentro de una planta de EW da para

muchos temas. Lo primero es la Bio-lixiviación, que logra tratar los minerales sulfatados como minerales oxidados. Esto representa una gran ventaja para la minería puesto que el proceso de LX-SX-EW es mucho más barato y limpio que su alternativa (Pirometalurgia). Con la Bio-lixiviación, se logra recuperar la ventaja perdida por la Hidrometalurgia en cuanto a la Huella de Carbono –que se vio afectada por las bajas de ley en los yacimientos– y la coloca nuevamente como una opción limpia, barata y duradera.

Otro tema importante es la disminución de los cortocircuitos y circuitos abiertos. Debido a que con Optibar los cortocircuitos pierden su poder de influencia, sólo es necesario enfocarse en los circuitos abiertos. Pueden generarse nuevas formas de contactos entre el *hangerbar* y el *busbar* y además generar procesos de limpieza de los contactos o disminución de su resistencia.

Sociales

Por último, hay beneficios sociales, pues Optibar reduce la cantidad de cosechas al mes en un turno. Esto se produce por la capacidad que tiene Optibar de poder ser cosechado con más peso, sin disminuir su calidad física. Si se consideran cuatro turnos, la cantidad de cosechas por turno con Optibar es de 33,35 cosechas al mes y con Walker es de 36,77 cosechas al mes. En la práctica esto significa que, cada 10 días con cosechas, se tiene un día sin cosecha. Es decir, que el equipo encargado de las cosechas camina entre 3,9 [km] y 7,8[km] menos dentro de la nave al mes y una disminución entre 10 a 20 horas al mes de exposición a ruidos, neblina ácida y otros peligros propios de una nave de electrowinning.

Finalmente concluir que este trabajo presenta la culminación de un trabajo desarrollado por años por distintas personas y, demuestra con datos obtenidos en planta y bajo supervisión del personal de esta, que Optibar es una tecnología eficiente, limpia y superior en todos los aspectos.

Bibliografía

- [1] J. Ocaranza, “Anuario Cochilco 2009,” tech. rep., Comisión Chilena del Cobre, 2009.
- [2] A. Walker, “Plant for the electrodeposition of metals,” 1901.
- [3] e. a. Virtanen, H., “Busbar construction for electrolytic cell,” 2002.
- [4] E. Wiechmann, G. Vidal, and A. Pagliero, “Current-source connection of electrolytic cell electrodes: an improvement for electrowinning and electrorefinery,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 851 – 855, May. - Jun. 2006.
- [5] I. Laitinen, *Modelling, Simulation and Optimization of a Copper Electrolysis Cell Group*. PhD thesis, Tampere University of Technology, 2009.
- [6] D. Munizaga, “Lixiviación - Extracción por Solventes - Electro-Obtención, Una alternativa no Contaminante para la Minería,” in *IV Seminario de Electrónica de Potencia*, 1992.
- [7] G. Vidal, “Avances en la Tecnología de EW de Cobre Barras Interceldas Segmentadas. Departamento de Ingeniería Metalúrgica,” 2000.
- [8] R. Whitehead, “Electrolytic Apparatus,” 1917.
- [9] E. Wiechmann, A. Morales, and P. Aqueveque, “Improving Productivity and Energy Efficiency in Copper Electrowinning Plants,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1264 –1270, Jul. - Ago. 2010.
- [10] R. Chang, *Química General*. McGraw Hill, 7ma ed., 2002.

- [11] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw Hill, 2da ed., 1984.
- [12] R. Dorf and J. Svoboda, *Circuitos Eléctricos*. Alfaomega, 6ta ed., 2006.
- [13] D. Prince and W. Davenport, “Densities, electrical conductivities and vis-cosities of $CuSO_4/H_2SO_4$ solutions in the range of modern electrorefining and electrowinning electrolytes,” *Metallurgical Transactions B*, vol. 11, pp. 159 – 163, 1980.
- [14] M. Spiegel, *Estadística*. Schaum, 2da ed., 1997.
- [15] V. Pérez, “Demanda de Energia Electrica en la Minería del Cobre y Perspectivas de Seguridad en su Abastecimiento,” tech. rep., Comisión Chilena del Cobre, 2010.
- [16] M. Bilek, C. Hardy, M. Lenzen, and C. Dey, “Life-cycle energy balance and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 8, pp. 2178 – 2199, 2008.
- [17] Fridleifsson, B. Ingvar, R. Bertani, E. Huenges, J. Lund, A. Ragnarsson, L. Rybach, O. Hohmeyer, and T. Trittin, “The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change,” pp. 59 – 80, 2008.
- [18] S. Pimentel, “Consumo de Energia y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Asociadas de la Minería del Cobre de Chile. Año 2009,” tech. rep., Comisión Chilena del Cobre, 2010.
- [19] C. Lagos and X. Guzmán, “Biolixiviación: Desarrollo Actual y sus Expectativas,” tech. rep., Comisión Chilena del Cobre, 2009.
- [20] ICONTEC, “Herramienta para calcular el Factor de Emisión de un Sistema Eléctrico,” tech. rep., Comisión Nacional de Energía, 2010.
- [21] P. Aqueveque, “Monitoreo de una Nave de Electroobtención de Cu con conexión Basada en Barras Intercelda Segmentadas,” 2002.
- [22] I. Laitinen, J. Tanttú, H. Virtanen, and O. Kumara, T. Järvinen, “Finite element Modeling of an electrolysis Cell,” *Copper Electrorefining and Electrowinning*, 2007.

- [23] E. Wiechmann, A. Morales, and P. Aqueveque, “Full Measuring System for Copper Electrowinning Processes Using Optibar Inter-Cell Bars,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE*, pp. 1–8, Oct. 2008.
- [24] A. Morales, E. Wiechmann, P. Aqueveque, and E. Pino, “Sliding Window Trend Analysis: A Method for Short and Open Circuit Detection in Copper Electrorefining,” in *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 IEEE*, pp. 1–5, Oct. 2010.
- [25] P. Aqueveque, E. Wiechmann, and R. Burgos, “Short-Circuit Detection for Electrolytic Processes Employing Optibar Intercell Bars,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1225–1231, Jul. - Ago. 2009.
- [26] P. Aqueveque, E. Wiechmann, and A. Morales, “System for the Measurement of Cathodic Currents in Electrorefining Processes That Employ Multicircuital Technology,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1764–1768, Sept.- Oct. 2010.
- [27] E. Wiechmann, A. Morales, and P. Aqueveque, “Full Measuring System for Copper Electrowinning Processes Using Optibar Intercell Bars,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1575–1582, Sept.- Oct. 2009.
- [28] E. Wiechmann, A. Pagliero, and G. Vidal, “Multicircuit approach for electrolytic cells, a novel method to force current balance in electrowinning plants,” in *Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on*, vol. 2, pp. 501–504 vol.2, 2000.
- [29] 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,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 1175–1179, May. - Jun. 2011.

Anexo A

Resistencias de Contacto

En este anexo se presentan las resistencia de contacto medidas en la planta de EW de Zaldívar. Las mediciones pertenecen a una misma celda, pero en 4 días consecutivos.

Las resistencias se encuentran en $[\mu\Omega]$.

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Cátodo 1	54,2	55,5	57,9	56,6
Cátodo 2	59,1	61,0	49,1	43,7
Cátodo 3	30,3	30,0	51,2	62,4
Cátodo 4	48,3	50,2	246,8	202,6
Cátodo 5	39,9	59,7	52,8	46,2
Cátodo 6	64,4	40,9	128,0	62,5
Cátodo 7	36,7	35,9	63,3	96,5
Cátodo 8	73,4	84,0	67,2	57,5
Cátodo 9	49,8	58,4	87,8	67,1
Cátodo 10	116,6	93,5	140,6	135,9
Cátodo 11	36,4	33,4	68,0	66,3
Cátodo 12	102,6	113,0	101,6	151,2
Cátodo 13	54,8	53,6	65,6	88,1
Cátodo 14	44,3	39,4	50,6	43,2
Cátodo 15	33,4	35,7	105,9	82,3

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Cátodo 16	34,3	25,7	65,2	58,5
Cátodo 17	31,4	36,9	47,4	84,5
Cátodo 18	45,2	41,5	59,8	69,7
Cátodo 19	32,2	33,6	83,5	41,8
Cátodo 20	57,2	50,9	64,9	93,8
Cátodo 21	30,0	30,6	63,8	48,3
Cátodo 22	42,0	38,3	76,4	108,9
Cátodo 23	53,4	87,5	70,7	99,5
Cátodo 24	41,8	38,5	84,0	63,2
Cátodo 25	50,4	44,0	79,1	73,9
Cátodo 26	40,0	36,3	72,0	46,9
Cátodo 27	37,9	39,1	65,4	82,4
Cátodo 28	86,7	80,4	69,6	89,1
Cátodo 29	49,3	61,5	57,1	52,4
Cátodo 30	67,9	74,1	90,7	73,9
Cátodo 31	48,1	35,2	93,2	66,8
Cátodo 32	72,8	68,1	85,4	50,4
Cátodo 33	47,2	45,0	73,7	61,3
Cátodo 34	48,1	44,0	71,6	57,7
Cátodo 35	116,8	129,6	65,3	63,3
Cátodo 36	81,5	70,8	88,7	91,5
Cátodo 37	61,6	64,8	116,1	108,8
Cátodo 38	43,4	37,0	59,8	99,8
Cátodo 39	26,8	27,7	54,7	49,5
Cátodo 40	28,1	27,3	136,6	41,0

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4
Cátodo 41	33,3	35,2	56,4	82,0
Cátodo 42	80,0	87,1	66,2	55,0
Cátodo 43	42,2	32,5	82,7	54,1
Cátodo 44	35,9	40,0	98,9	59,8
Cátodo 45	40,2	43,0	79,3	52,2
Cátodo 46	53,0	53,5	91,3	60,2
Cátodo 47	66,4	66,3	113,9	85,8
Cátodo 48	117,0	109,8	80,9	69,2
Cátodo 49	32,0	31,0	67,3	120,3
Cátodo 50	105,4	123,7	76,8	43,9
Cátodo 51	37,2	32,5	81,2	88,6
Cátodo 52	111,1	111,5	86,0	63,9
Cátodo 53	54,1	51,7	85,6	82,0
Cátodo 54	54,3	53,6	49,1	54,8
Cátodo 55	37,2	38,6	75,6	106,1
Cátodo 56	36,9	45,3	110,2	73,5
Cátodo 57	90,9	71,9	95,0	96,7
Cátodo 58	96,7	84,8	189,4	140,3
Cátodo 59	35,8	38,8	77,3	153,1
Cátodo 60	38,2	35,7	103,9	80,5
Cátodo 61	66,3	64,2	163,5	150,1
Cátodo 62	125,4	155,1	97,9	148,6
Cátodo 63	62,5	48,4	135,4	244,1
Cátodo 64	82,7	117,4	83,8	126,4
Cátodo 65	38,3	28,0	98,2	73,7

Anexo B

Resistencias de Electrolito

En este anexo se presentan las resistencias de electrolito medidas en la planta de EW de Zaldívar. Las resistencias se encuentran en [$m\Omega$].

Par ánodo-cátodo	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
1	1,4419	1,414	1,4601	1,4399
2	1,4071	1,4437	1,6938	1,4836
3	1,4853	1,5756	1,3503	1,1765
4	1,4572	1,6016	1,3545	1,2197
5	1,6408	1,4203	1,5319	1,4246
6	1,6907	1,4085	1,4774	1,3999
7	1,3058	1,1972	1,3019	1,1668
8	1,2946	1,2522	1,4724	1,2984
9	1,418	1,4337	1,7427	1,3815
10	1,4272	1,4076	1,6469	1,3829
11	1,3981	1,5434	1,4993	1,481
12	1,3382	1,5425	1,4254	1,4547
13	1,3584	1,2901	1,4457	1,5704
14	1,424	1,2435	1,4716	1,6062
15	1,221	1,2548	1,3915	1,3697

Par ánodo-cátodo	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
16	1,1852	1,3164	1,4025	1,357
17	1,5183	1,421	1,3917	1,5084
18	1,6447	1,4087	1,439	1,5115
19	1,684	1,3619	1,2917	1,6024
20	1,6663	1,3739	1,2709	1,692
21	1,3808	1,2599	1,3872	1,4136
22	1,3911	1,3226	1,5495	1,351
23	1,3718	1,424	1,6181	1,4186
24	1,3781	1,4533	1,4407	1,4326
25	1,4741	1,4459	1,4064	1,3841
26	1,4946	1,3857	1,4889	1,3566
27	1,3778	1,7008	1,5082	1,4315
28	1,3852	1,7008	1,4933	1,4734
29	1,292	1,4057	1,3135	1,5192
30	1,337	1,443	1,2694	1,5805

Anexo C

Especificaciones Técnicas

C.1. Tenaza de Corriente AC/DC i1010



Característica	Valor
Sensor	Sensor de efecto Hall
Corriente Nominal	1000[A_{dc}], 600[A_{ac}]
Máxima Corriente No-Destructiva	1000[A]
Mínima Corriente Medible	0,5[A]
Presición Básica	2% + 0,5[A]
Frecuencia de Uso	DC - 10[kHz]
Nivel de Salida	1[mV/A]
Ajuste de Cero Error	Si

Tabla C.1: Especificaciones técnicas de tenaza i1010 AC/DC.

Característica	Valor
Seguridad	CAT III, 600[V]
Voltaje Máximo	600[V]

Tabla C.2: Especificaciones de seguridad de tenaza i1010 AC/DC.

Característica	Valor
Vida de Batería	9[V], 6 horas
Diametro máximo del conductor	30[mm], 2 x 25[mm]
Largo de cable	1,6[m]
Conectores tipo Banana	Si

Tabla C.3: Especificaciones de mecánicas y general de tenaza i1010 AC/DC.

C.2. Multímetro Fluke 287

Característica	Valor
Tensión CC	0,025 %
Tensión CA	0,4 % (rms)
Corriente CC	0,15 %
Corriente CA	0,7 % (rms)
Temperatura	1,0 %
Resistencia	0,05 %
Capacitancia	1,0 %
Frecuencia	0,005 %

Tabla C.4: Especificaciones técnicas de multímetro Fluke 287.

Característica	Valor
Categoría de sobretensión	CAT III 1000 V / CAT IV 600 V
Cumple con	CSA, UL, TÜV, CE

Tabla C.5: Especificaciones de seguridad de multímetro Fluke 287.

Característica	Valor
Temperatura de Trabajo	-20°C a +55°C
Temperatura de Almacenamiento	-40°C a +60°C
Humedad Relativa	0 % a 90 % (0°C a +37°C), 0 % a 65 % (+37°C a +45°C), 0 % a 45 % (+45°C a +55°C)
Compatibilidad Electromagnética	IMC EN6 1326-1
Vibraciones	Vibraciones aleatorias conforme a MIL-PRF28800f, Clase 2
Impactos	Caída desde un metro, conforme a IEC/EN 61010-1 2ª edición

Tabla C.6: Especificaciones ambientales de multímetro Fluke 287.

Característica	Valor
Tensión máxima entre terminal y tierra	1000[V]
Tamaño	22,2[cm] x 10,2[cm] x 6[cm]
Peso	870,9 [g]
Duración de batería	100 horas mínimo, 200 horas máximo
Tipo de batería	6 pilas alcalinas AA, NEDA 1 5[A], IEC LR6

Tabla C.7: Especificaciones mecánicas y generales de multímetro Fluke 287.

C.3. Termómetro Infrarrojo 62mini

Característica	Valor
Rango	-18 a 275[°C]
Razon entre Distancia y medición	8:1
Emisividad	Fija a 0,95
Error	-18[°C] a -1[°C] \pm 3[°C], sobre -1[°C] \pm 2 %

Tabla C.8: Especificaciones técnicas de multímetro Fluke 287.



Anexo D

Datos de Planta

La cantidad de datos de planta es bastante, por lo que se ha preparado un resumen con los indicadores.

D.1. Tabla 1

Primer Grupo, contiene datos identificadores además de los 2 indicadores más importantes de una cosecha – eficiencia y consumo específico –.

1. Numero de la cosecha: que funcionará como identificador entre las 2 tablas.
2. Fecha de la cosecha.
3. Grupo y Circuito: El grupo va de I a VI y el circuito puede ser A o B.
4. Tecnología: identifica la tecnología utilizada en el grupo hasta la fecha de la cosecha. Este item puede ser Optibar o Walker.
5. Celdas: que son la cantidad de celdas del grupo. En los grupos III y VI son 16 celdas y en todo el resto son 15 celdas.
6. Eficiencia de Corriente: relación entre el peso obtenido de la cosecha y el peso teorico calculado según la corriente acumulada.
7. Consumo específico: relación entre la energía consumida en el ciclo y el peso real obtenido.

N° Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
1	26-oct	VI - A	Optibar	16	93,0 %	1.931
2	27-oct	V - A	Optibar	15	94,6 %	1.890
3	27-oct	I - A	Walker	15	93,5 %	1.991
4	28-oct	II - A	Walker	15	92,2 %	1.921
5	28-oct	III - A	Walker	16	91,2 %	1.955
6	29-oct	IV - A	Walker	15	91,8 %	1.990
7	31-oct	VI - A	Optibar	16	93,7 %	1.904
8	31-oct	V - A	Optibar	15	92,5 %	1.939
9	01-nov	I - A	Walker	15	93,5 %	1.931
10	01-nov	II - A	Walker	15	90,2 %	1.964
11	02-nov	III - A	Walker	16	92,4 %	1.947
12	02-nov	IV - A	Walker	15	90,1 %	1.992
13	04-nov	VI - A	Optibar	16	92,5 %	1.929
14	05-nov	V - A	Optibar	15	94,2 %	1.898
15	05-nov	I - A	Walker	15	92,4 %	1.930
16	05-nov	II - A	Walker	15	87,9 %	2.030
17	06-nov	III - A	Walker	16	90,8 %	1.981
18	07-nov	IV - A	Optibar	15	96,1 %	1.851
19	08-nov	VI - A	Optibar	16	91,6 %	1.943
20	09-nov	I - A	Walker	15	92,2 %	1.918
21	09-nov	V - A	Optibar	15	92,2 %	1.914
22	10-nov	II - A	Walker	15	91,3 %	1.937
23	11-nov	III - A	Walker	16	93,0 %	1.938
24	11-nov	IV - A	Optibar	15	88,1 %	2.022
25	14-nov	I - A	Walker	15	93,3 %	1.882
26	14-nov	V - A	Optibar	15	92,5 %	1.908
27	14-nov	VI - A	Optibar	16	93,5 %	1.869
28	15-nov	III - A	Walker	16	89,9 %	1.962

N° Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
29	15-nov	II - A	Walker	15	89,2 %	1.985
30	19-nov	V - A	Optibar	15	91,3 %	1.932
31	19-nov	I - A	Walker	15	90,8 %	1.942
32	19-nov	II - A	Walker	15	90,2 %	2.062
33	19-nov	III - A	Walker	16	85,9 %	2.063
34	21-nov	IV - A	Optibar	15	96,1 %	1.917
35	23-nov	VI - A	Optibar	16	89,0 %	2.012
36	24-nov	V - A	Optibar	15	92,2 %	1.930
37	24-nov	I - A	Walker	15	90,4 %	1.984
38	24-nov	II - A	Walker	15	86,2 %	2.093
39	24-nov	III - A	Walker	16	90,3 %	1.854
40	28-nov	VI - A	Optibar	16	89,5 %	2.019
41	28-nov	V - A	Optibar	15	97,2 %	1.858
42	29-nov	I - A	Walker	15	91,4 %	2.014
43	29-nov	II - A	Walker	15	90,1 %	2.016
44	30-nov	III - A	Walker	16	85,7 %	2.105
45	30-nov	IV - A	Optibar	15	94,0 %	1.902
46	02-dic	VI - A	Optibar	16	88,5 %	1.997
47	02-dic	V - A	Optibar	15	91,3 %	1.938
48	03-dic	I - A	Walker	15	89,3 %	2.024
49	03-dic	II - A	Walker	15	85,8 %	2.136
50	05-dic	IV - A	Optibar	15	94,9 %	1.866
51	07-dic	VI - A	Optibar	16	91,2 %	1.937
52	07-dic	V - A	Optibar	15	90,6 %	1.956
53	07-dic	I - A	Walker	15	91,0 %	1.964
54	08-dic	II - A	Walker	15	95,0 %	1.918
55	08-dic	III - A	Optibar	16	90,7 %	1.947
56	08-dic	III - A	Optibar	16	89,5 %	1.989

Nº Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
57	09-dic	IV - A	Optibar	15	90,5 %	1.945
58	11-dic	VI - A	Optibar	16	90,2 %	1.959
59	12-dic	V - A	Optibar	15	90,9 %	1.960
60	12-dic	I - A	Walker	15	90,8 %	1.970
61	13-dic	II - A	Walker	15	89,1 %	2.023
62	14-dic	IV - A	Optibar	15	89,2 %	1.998
63	16-dic	VI - A	Optibar	16	89,5 %	1.894
64	16-dic	V - A	Optibar	15	90,2 %	1.950
65	17-dic	I - A	Walker	15	90,3 %	1.952
66	18-dic	II - A	Walker	15	91,3 %	1.894
67	18-dic	III - A	Optibar	16	91,8 %	1.864
68	19-dic	IV - A	Optibar	15	90,4 %	1.977
69	21-dic	VI - A	Optibar	16	88,1 %	1.949
70	21-dic	V - A	Optibar	15	89,9 %	1.940
71	22-dic	I - A	Walker	15	84,2 %	2.110
72	23-dic	II - A	Walker	15	88,7 %	1.985
73	23-dic	III - A	Optibar	16	89,0 %	1.952
74	24-dic	IV - A	Optibar	15	88,1 %	1.971
75	26-dic	VI - A	Optibar	16	90,6 %	1.895
76	26-dic	V - A	Optibar	15	90,8 %	1.918
77	27-dic	I - A	Walker	15	87,9 %	1.956
78	28-dic	II - A	Walker	15	92,4 %	1.876
79	28-dic	III - A	Optibar	16	91,2 %	1.891
80	29-dic	IV - A	Optibar	15	94,0 %	1.831
81	31-dic	VI - A	Optibar	16	90,4 %	1.896
82	01-ene	I - A	Walker	15	90,0 %	1.927
83	02-ene	II - A	Walker	15	91,3 %	1.920
84	03-ene	III - A	Optibar	16	88,6 %	1.920

Nº Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
85	04-ene	IV - A	Optibar	15	91,3 %	1.893
86	06-ene	VI - A	Optibar	16	88,6 %	1.855
87	07-ene	I - A	Walker	15	91,4 %	1.882
88	08-ene	II - A	Walker	15	90,9 %	1.904
89	09-ene	III - A	Optibar	16	88,9 %	1.929
90	09-ene	IV - A	Optibar	15	91,5 %	1.853
91	11-ene	VI - A	Optibar	16	88,8 %	1.961
92	11-ene	V - A	Optibar	15	92,0 %	1.888
93	12-ene	I - A	Walker	15	91,6 %	1.916
94	13-ene	II - A	Walker	15	91,7 %	1.932
95	14-ene	III - A	Optibar	16	88,0 %	1.977
96	14-ene	IV - A	Optibar	15	91,3 %	1.920
97	16-ene	VI - A	Optibar	16	88,0 %	1.961
98	16-ene	V - A	Optibar	15	91,9 %	1.900
99	17-ene	I - A	Walker	15	88,8 %	1.977
100	18-ene	II - A	Walker	15	88,3 %	2.021
101	18-ene	III - A	Optibar	16	90,3 %	1.929
102	19-ene	IV - A	Optibar	15	91,3 %	1.934
103	20-ene	VI - A	Optibar	16	95,1 %	1.841
104	21-ene	V - A	Optibar	15	94,8 %	1.846
105	22-ene	I - A	Optibar	15	88,2 %	1.983
106	23-ene	III - A	Optibar	16	90,4 %	1.924
107	23-ene	II - B	Walker	15	87,8 %	2.028
108	24-ene	IV - A	Optibar	15	94,0 %	1.871
109	25-ene	VI - A	Optibar	16	88,3 %	1.985
110	26-ene	V - A	Optibar	15	91,2 %	1.913
111	27-ene	I - A	Optibar	15	92,2 %	1.885
112	28-ene	III - A	Optibar	16	92,3 %	1.885

N° Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
113	28-ene	II - B	Walker	15	88,9 %	2.011
114	29-ene	IV - A	Optibar	15	92,2 %!	1.896
115	30-ene	VI - A	Optibar	16	91,6 %	1.861
116	31-ene	V - A	Optibar	15	91,5 %	1.912
117	31-ene	V - B	Walker	15	89,8 %	1.993
118	01-feb	II - A	Optibar	15	92,6 %	1.896
119	04-feb	V - B	Walker	15	89,9 %	1.925
120	05-feb	V - A	Optibar	15	92,4 %	1.872
121	06-feb	II - A	Optibar	15	91,8 %	1.914
122	07-feb	II - B	Walker	15	89,5 %	1.951
123	11-feb	V - A	Optibar	15	89,3 %	1.948
124	12-feb	II - A	Optibar	15	90,8 %	1.924
125	12-feb	II - B	Walker	15	90,6 %	1.970
126	14-feb	V - B	Walker	15	89,5 %	1.990
127	16-feb	V - A	Optibar	15	91,5 %	1.939
128	17-feb	II - A	Optibar	15	91,4 %	1.900
129	19-feb	V - B	Walker	15	90,2 %	1.994
130	21-feb	V - A	Optibar	15	94,8 %	1.844
131	22-feb	II - B	Walker	15	90,1 %	1.933
132	23-feb	II - A	Optibar	15	90,6 %	1.912
133	24-feb	V - B	Walker	15	89,7 %	1.979
134	27-feb	II - B	Walker	15	91,3 %	1.953
135	27-feb	V - A	Optibar	15	92,2 %	1.864
136	28-feb	II - A	Optibar	15	91,0 %	1.891
137	01-mar	V - B	Walker	15	90,7 %	1.960
138	04-mar	II - B	Walker	15	90,7 %	1.918
139	05-mar	V - A	Optibar	15	89,1 %	1.913
140	06-mar	II - A	Optibar	15	91,8 %	1.905

Nº Cosecha	Fecha	Grupo	Tecnología	Celdas	Eficiencia de Corriente	Consumo Específico
141	09-mar	II - B	Walker	15	89,0 %	1.934
142	10-mar	V - A	Optibar	15	90,8 %	1.883
143	11-mar	II - A	Optibar	15	90,1 %	1.910
144	12-mar	V - B	Walker	15	90,2 %	1.888
145	16-mar	II - B	Walker	15	90,7 %	1.894
146	17-mar	V - A	Optibar	15	90,0 %	1.918
147	18-mar	II - A	Optibar	15	91,4 %	1.850
148	20-mar	V - B	Walker	15	91,3 %	1.857
149	23-mar	V - A	Optibar	15	90,9 %	1.855
150	25-mar	II - A	Optibar	15	91,4 %	1.847
151	26-mar	V - B	Walker	15	90,9 %	1.901

D.2. Tabla 2

Segundo grupo, contiene el resto de los datos que son de menor relevancia, pero aún así deben ser mencionados.

1. Numero de la cosecha: que funcionará como identificador entre las 2 tablas.
2. Corriente Acumulada: es la diferencia entre el inicio del ciclo y el fin del ciclo del marcador de corriente acumulada del rectificador.
3. Voltaje Celda: es el voltaje promedio durante un ciclo.
4. Energía Ciclo: es el producto entre la corriente acumulada, el voltaje promedio celda y la cantidad de celdas.
5. Peso real: que se refiere al peso obtenido en la romana de la planta en una cosecha.
6. Peso teórico: es el peso obtenido de la corriente acumulada.

7. High Grade: se refiere al porcentaje de cátodos de la mayor calidad física. Este indicador no considera la calidad química de los cátodos obtenidos, pues esto no tiene relación con las tecnologías utilizadas.
8. Corriente promedio: es la corriente promedio de un ciclo.



Nº Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
1	4.580	2,129	156.021	80.805	86.883	88,8 %	46,1
2	4.530	2,121	144.102	76.233	80.572	92,5 %	45,8
3	4.636	2,207	153.435	77.065	82.449	96,4 %	45,7
4	4.698	2,100	148.018	77.035	83.561	94,6 %	45,8
5	4.954	2,115	167.602	85.726	93.979	97,2 %	45,8
6	4.883	2,167	158.681	79.725	86.842	95,8 %	45,4
7	5.144	2,115	174.062	91.441	97.593	94,3 %	43,3
8	5.060	2,126	161.358	83.213	89.999	89,8 %	43,6
9	4.573	2,141	146.862	76.047	81.337	96,0 %	43,6
10	4.539	2,102	143.088	72.849	80.724	96,5 %	43,6
11	4.703	2,133	160.513	82.425	89.226	95,3 %	43,9
12	4.815	2,128	153.671	77.162	85.642	95,3 %	44,1
13	4.599	2,115	155.644	80.693	87.243	95,7 %	44,8
14	4.518	2,121	143.713	75.710	80.359	92,6 %	44,8
15	4.650	2,115	147.554	76.434	82.707	97,3 %	44,7
16	4.654	2,116	147.696	72.741	82.778	93,3 %	44,6
17	4.787	2,132	163.320	82.443	90.820	92,2 %	44,4
18	4.713	2,109	149.063	80.519	83.818	90,8 %	44,4
19	4.586	2,112	154.952	79.732	87.006	94,2 %	44,9
20	4.531	2,098	142.552	74.327	80.581	94,6 %	45,1
21	4.660	2,091	146.171	76.388	82.885	91,0 %	45,2
22	4.490	2,096	141.182	72.878	79.861	93,6 %	45,0
23	4.671	2,138	159.752	82.443	88.609	92,2 %	44,4
24	4.894	2,111	154.995	76.659	87.047	91,6 %	44,2
25	4.861	2,083	151.852	80.686	86.451	94,5 %	41,1
26	5.105	2,093	160.261	83.998	90.800	100,0 %	41,7
27	5.173	2,072	171.464	91.745	98.143	100,0 %	42,5
28	4.659	1,995	148.695	75.779	84.337	92,3 %	40,6

Nº Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
29	4.919	2,099	154.865	78.035	87.491	94,9 %	41,0
30	4.678	2,006	140.728	72.835	79.793	89,0 %	40,0
31	4.657	2,092	146.088	75.228	82.822	92,7 %	40,4
32	4.670	2,207	154.577	74.948	83.062	91,7 %	40,6
33	4.783	2,102	160.817	77.944	90.734	94,8 %	40,5
34	4.727	2,079	147.445	76.910	80.031	94,6 %	40,5
35	5.140	2,123	174.611	86.782	97.517	86,4 %	40,3
36	4.562	2,109	144.316	74.774	81.142	89,0 %	40,6
37	4.673	2,127	149.081	75.157	83.107	96,2 %	40,6
38	4.715	2,140	151.318	72.310	83.863	91,4 %	40,5
39	4.685	1,986	148.837	80.297	88.885	96,1 %	41,6
40	5.004	2,143	171.540	84.982	94.937	88,3 %	45,5
41	4.935	2,140	158.412	85.282	87.767	93,1 %	45,5
42	4.954	2,183	162.215	80.559	88.105	91,9 %	45,5
43	4.918	2,154	158.890	78.796	87.465	92,1 %	45,8
44	4.918	2,139	168.321	79.971	93.305	95,8 %	45,5
45	4.943	2,120	157.210	82.651	87.918	94,7 %	46,1
46	4.793	2,096	160.693	80.448	90.924	96,0 %	43,4
47	4.768	2,097	150.001	77.399	84.806	91,5 %	43,2
48	4.650	2,142	149.421	73.819	82.698	97,2 %	42,9
49	4.752	2,172	154.820	72.484	84.521	97,6 %	42,6
50	4.714	2,100	148.505	79.592	83.845	93,6 %	41,9
51	4.558	2,096	152.813	78.891	86.466	93,7 %	34,4
52	4.468	2,102	140.864	72.011	79.461	91,2 %	34,4
53	4.587	2,118	145.715	74.209	81.586	93,8 %	42,6
54	4.681	2,161	151.733	79.125	83.249	93,9 %	43,2
55	4.594	2,094	153.885	79.045	87.158	96,2 %	43,4
56	5.159	2,112	174.277	87.633	97.868	96,1 %	44,3

Nº Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
57	4.800	2,087	150.243	77.248	85.366	93,3 %	43,5
58	4.620	2,096	154.892	79.066	87.642	93,0 %	44,2
59	4.726	2,114	149.814	76.428	84.050	93,9 %	44,1
60	4.677	2,121	148.779	75.538	83.178	88,4 %	43,8
61	5.153	2,137	165.133	81.647	91.644	95,1 %	43,6
62	4.906	2,114	155.533	77.859	87.251	88,0 %	43,7
63	4.609	2,011	148.272	78.290	87.443	94,8 %	41,7
64	4.507	2,085	140.963	72.302	80.154	91,9 %	41,4
65	4.617	2,091	144.789	74.183	82.120	94,4 %	41,0
66	4.582	2,051	140.927	74.397	81.488	98,9 %	40,0
67	4.643	2,030	150.805	80.897	88.088	98,6 %	38,9
68	4.664	2,119	148.206	74.978	82.947	95,0 %	39,0
69	4.565	2,037	148.757	76.306	86.598	98,7 %	38,4
70	4.879	2,068	151.323	78.008	86.771	93,9 %	38,5
71	4.626	2,106	146.124	69.241	82.280	95,7 %	38,6
72	4.707	2,087	147.328	74.229	83.721	97,1 %	38,4
73	4.709	2,060	155.199	79.518	89.340	98,8 %	38,2
74	4.718	2,059	145.721	73.914	83.907	97,7 %	38,0
75	4.718	2,036	153.685	81.118	89.511	98,5 %	38,7
76	4.693	2,064	145.287	75.752	83.472	96,0 %	38,8
77	4.709	2,040	144.074	73.642	83.747	98,5 %	38,8
78	4.589	2,056	141.521	75.451	81.613	96,9 %	39,0
79	4.659	2,044	152.349	80.585	88.391	95,9 %	38,9
80	4.710	2,042	144.252	78.777	83.765	96,8 %	38,9
81	4.630	2,033	150.568	79.405	87.841	99,5 %	38,2
82	4.791	2,055	147.691	76.645	85.206	97,9 %	34,5
83	5.002	2,077	155.847	81.175	88.959	92,1 %	41,4
84	4.871	2,016	157.122	81.852	92.404	95,1 %	34,6

Nº Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
85	4.869	2,049	149.630	79.043	86.593	98,6 %	34,7
86	4.692	1,949	146.317	78.862	89.008	97,6 %	33,6
87	4.923	2,041	150.687	80.061	87.554	94,3 %	36,6
88	4.700	2,053	144.713	75.998	83.596	96,0 %	30,8
89	4.797	2,035	156.160	80.951	91.009	96,8 %	36,1
90	4.718	2,010	142.265	76.778	83.916	97,8 %	35,9
91	4.697	2,066	155.228	79.153	89.103	97,5 %	37,9
92	4.760	2,059	147.041	77.874	84.663	97,4 %	38,8
93	4.627	2,081	144.439	75.392	82.289	96,9 %	38,5
94	4.699	2,101	148.097	76.663	83.569	94,1 %	38,7
95	4.741	2,064	156.548	79.189	89.947	94,9 %	39,4
96	4.742	2,079	147.840	76.992	84.334	94,9 %	39,8
97	4.666	2,047	152.812	77.943	88.524	97,1 %	39,8
98	4.637	2,069	143.932	75.755	82.476	95,5 %	40,2
99	4.957	2,081	154.742	78.267	88.158	93,1 %	40,6
100	4.945	2,117	157.010	77.674	87.945	86,4 %	40,8
101	4.577	2,067	151.341	78.440	86.836	97,0 %	40,9
102	4.754	2,095	149.406	77.235	84.557	94,8 %	40,8
103	4.712	2,076	156.497	84.986	89.387	97,2 %	41,0
104	5.055	2,076	157.444	85.272	89.910	90,2 %	40,8
105	4.929	2,075	153.387	77.344	87.660	91,6 %	40,4
106	4.692	2,063	154.866	80.482	89.008	95,9 %	40,4
107	5.030	2,112	159.368	78.569	89.457	92,9 %	46,0
108	4.917	2,086	153.853	82.225	87.456	95,1 %	40,2
109	4.691	2,078	155.976	78.584	88.998	97,2 %	40,4
110	4.707	2,068	145.996	76.330	83.712	93,5 %	40,2
111	4.624	2,060	142.912	75.820	82.235	97,5 %	40,2
112	4.732	2,063	156.203	82.887	89.776	96,8 %	40,2

Nº Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
113	4.851	2,119	154.156	76.670	86.282	96,0 %	42,0
114	4.892	2,074	152.190	80.257	87.011	93,4 %	40,7
115	4.590	2,021	148.424	79.737	87.073	98,4 %	40,6
116	4.644	2,074	144.459	75.543	82.591	96,4 %	41,1
117	4.704	2,122	149.720	75.128	83.667	96,2 %	40,7
118	4.529	2,081	141.334	74.562	80.546	87,5 %	42,4
119	5.194	2,051	159.772	83.007	92.374	96,4 %	40,0
120	5.312	2,069	164.874	88.065	95.296	98,0 %	41,6
121	5.028	2,083	157.102	82.086	89.421	97,2 %	41,0
122	4.845	2,071	150.470	77.114	86.166	87,4 %	40,5
123	4.965	2,064	153.716	78.890	88.309	95,0 %	40,2
124	5.112	2,073	158.932	82.599	90.924	96,6 %	39,7
125	4.571	2,116	145.068	73.650	81.293	95,8 %	40,8
126	4.585	2,113	145.300	73.004	81.542	95,3 %	40,7
127	5.320	2,077	165.723	85.479	93.465	95,1 %	40,7
128	5.176	2,059	159.846	84.118	92.054	96,3 %	41,6
129	5.008	2,117	158.998	79.727	88.346	96,5 %	41,0
130	5.139	2,074	159.876	86.684	91.404	92,3 %	40,1
131	5.030	2,065	155.804	80.588	89.466	95,4 %	40,4
132	5.371	2,054	165.465	86.542	95.522	96,4 %	40,0
133	5.006	2,060	154.640	78.133	87.142	93,4 %	39,8
134	4.485	2,113	142.175	72.816	79.772	92,2 %	38,3
135	4.993	2,017	151.078	81.053	87.912	94,6 %	37,4
136	4.987	2,040	152.602	80.684	88.701	95,5 %	37,6
137	4.689	2,108	148.267	75.630	83.392	95,9 %	38,6
138	4.721	2,064	146.119	76.181	83.961	97,6 %	39,7
139	5.249	2,000	157.499	82.331	92.412	97,7 %	40,0
140	5.120	2,052	157.564	82.728	90.117	95,7 %	39,6

N° Cosecha	Corriente Acumulada	Voltaje Celda	Energía	Peso Real	Peso Teórico	High Grade	Corriente Promedio
141	5.162	2,041	158.055	81.745	91.805	91,7 %	38,1
142	5.161	1,993	154.314	81.964	90.236	95,5 %	37,6
143	5.171	1,997	154.877	81.081	90.039	97,8 %	37,1
144	5.118	2,019	154.980	82.090	91.031	94,6 %	38,2
145	5.040	2,036	153.951	81.296	89.643	94,8 %	33,0
146	5.083	2,046	155.996	81.342	90.399	97,0 %	32,2
147	5.084	1,972	150.387	81.271	88.883	97,1 %	32,5
148	5.276	2,010	159.085	85.646	93.841	97,5 %	29,6
149	5.165	2,000	154.934	83.542	91.858	91,1 %	32,8
150	5.077	2,003	152.513	82.555	90.302	95,1 %	31,9
151	5.245	2,049	161.194	84.811	93.281	91,7 %	36,9

Anexo E

Regresiones Lineales

Las regresiones mostradas en el capítulo 5.

E.1. Voltajes de Celda

Las regresiones mostradas en la sección 5.3.3 utilizan una regresión lineal de la siguiente forma:

$$E_c(t, i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot i + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot t^2$$

De acuerdo a los datos, la regresión lineal tiene los siguientes factores para cada una de las tecnologías.

Variable	Factor
β_0	1,95
β_1	$0,65 \cdot 10^{-3}$
β_2	$3,4 \cdot 10^{-3}$
β_3	$-9,63 \cdot 10^{-6}$

Tabla E.1: Factores de regresión lineal para E_c Walker

Variable	Factor
β_0	1,72
β_1	$-1,1 \cdot 10^{-3}$
β_2	$9,2 \cdot 10^{-3}$
β_3	$5,97 \cdot 10^{-6}$

Tabla E.2: Factores de regresión lineal para E_c Optibar

E.2. Eficiencia de Corriente

Las regresiones mostradas en la sección 5.3.4 utilizan una regresión lineal de primer grado, como la mostrada a continuación:

$$\eta(i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot i$$

Además se indica el factor de correlación R^2 .

Variable	Factor
β_0	0,88
β_1	$0,45 \cdot 10^{-3}$
R^2	0,006

Tabla E.3: Factores de regresión lineal para η Walker

Variable	Factor
β_0	0,83
β_1	$1,95 \cdot 10^{-3}$
R^2	0,102

Tabla E.4: Factores de regresión lineal para η Optibar

Variable	Factor
β_0	0,78
β_1	$3,5 \cdot 10^{-3}$
R^2	0,312

Tabla E.5: Factores de regresión lineal para η Optibar $> 42,5$ [kg]

E.3. Consumo Específico

Las regresiones mostradas en la sección 5.3.5 utilizan una regresión lineal de primer grado, como la mostrada a continuación:

$$E_s(i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot i$$

Además se indica el factor de correlación R^2 .

Variable	Factor
β_0	$1,68 \cdot 10^3$
β_1	6,7
R^2	0,149

Tabla E.6: Factores de regresión lineal para E_s Walker

Variable	Factor
β_0	$1,77 \cdot 10^3$
β_1	3,6
R^2	0,073

Tabla E.7: Factores de regresión lineal para E_s Optibar

Variable	Factor
β_0	$1,77 \cdot 10^3$
β_1	2,8
R^2	0,064

Tabla E.8: Factores de regresión lineal para E_s Optibar $> 42,5$ [kg]

