

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
QUIMICO

**"EVALUACIÓN TECNICO-ECONOMICA DE
UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍA EMEW® EN
PROCESO DE ELECTRO OBTENCIÓN EN
CODELCO DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC"**

Gonzalo Pizarro Morales

Profesores Guías:

Sr. Horacio Aros Meneses
Sr. José Torres Tittus

2014

AGRADECIMIENTOS

En la etapa final de este hermoso proceso llamado Universidad, se me vienen a la mente todos aquellos momentos vividos, momentos de alegría, de nostalgia, y un sin fin de experiencias ganadas. Pero este logro no habría sido posible sin el apoyo y el empuje incondicional de mis padres, Cristián y Sandra, y de mi hermana Camila, quienes a pesar de cualquier dificultad, a pesar que en un momento el camino se tornó difuso y nublado, y la meta se veía cada vez más lejana no dejaron de esforzarse y darme aliento para salir adelante, es en gran medida a ellos que esta etapa está llegando a su fin. También, por supuesto, dar las gracias a Dios, quién fuese mi apoyo espiritual en los momentos más complicados de mi carrera.

Sin duda alguna, dos de las personas que más influyeron en mí en esta vida universitaria fue mi abuelo Julio Pizarro (Q.E.P.D) y mi abuela Rosa Riquelme, quienes pusieron en mí todas sus esperanzas de triunfo. Es a mi abuelo a quien le debo prácticamente todo lo que he logrado hasta este momento, y es a él a quien dedico esta memoria, sin su ayuda y constante sacrificio esto no habría sido posible. Al fin estoy cumpliendo el sueño que él tuvo desde que inicié este camino.

Y como no agradecer a la persona que se encuentra acompañándome día a día, y que también con su apoyo, ánimo y motivación me dio la fortaleza, la constancia y la perseverancia para llevar a buen puerto esta historia. Gracias a mi novia Marisel, que fue pilar fundamental en este trayecto por conseguir el añorado título, te amo!!.

De modo especial agradecer a mis amigos, así como también a mis compañeros de universidad los cuales se transformaron en parte de mi familia, y que sin ellos, sin su apoyo y motivación, este proceso se hubiese tornado muy difícil. Gracias por todas las aventuras vividas, por esas largas noches de estudio, por todas las experiencias y por apoyarme cuando más los necesité. Esteban Soto, Matías Acuña, Jorge Campbell, Mauricio Miranda, Sebastián Malagueño, Montserrat Oyanedel, Anja Haberland, Andrea Lillo muchas gracias!!!.

Agradecer a la División Radomiro Tomic de Codelco por permitir desarrollar mi memoria de título en sus dependencias, y en forma especial al Sr. Miguel Meza quien fue la persona que me dio esta oportunidad, así como también al Sr. José Vallejo quien fuese mi tutor y el que guió mis pasos en este proceso.

Y por último agradecer a mis profesores guías, Sr. Horacio Aros y Sr. José Torres quienes aportaron con su experiencia y apoyo en todo momento para que este camino largo y difícil llegara a su fin de la mejor manera.

RESUMEN

El presente informe da cuenta del trabajo realizado en la división Radomiro Tomic de Codelco, en adelante RT, referente a la realización de un estudio de factibilidad técnico-económica al utilizar la tecnología EMEW® en el proceso de electro obtención de RT. Este trabajo fue realizado en el periodo comprendido entre abril de 2011 y marzo de 2012.

Luego de terminado el proceso de pruebas se logró determinar las mejores opciones para la construcción de una planta EMEW® industrial en RT. Se plantean dos opciones para el tratamiento de soluciones: la primera opción basada en dos etapas de proceso, y una segunda opción basada en tres etapas de proceso para tratar un flujo volumétrico de 20 [m³/h]. La concentración de cobre al inicio del proceso es de 42,5 [gr/l], produciendo 13,3 [ton Cu/día] operando a una densidad de corriente entre 500 – 600 [A/m²], esta etapa cuenta con 2070 celdas EMEW®. La solución resultante pasa a la segunda etapa que cuenta con 1080 celdas EMEW® con una concentración de cobre de 15 [gr/l] y que produce 4,5 [ton Cu/día] operando a una densidad de corriente de 350 [A/m²], resultando una solución que contiene aproximadamente 5 [gr/l] de cobre. Ambas opciones de proceso producirán 6480 toneladas de cobre fino e inyectarán 9980 toneladas de ácido sulfúrico al sistema por año. Dentro del informe se muestran los cálculos de diseño y producción para cada opción, para efectos de los cálculos de evaluación económica se tomará como diseño final la planta en dos etapas.

La planta EMEW® presenta ventajas en cuanto a sus condiciones operacionales, las eficiencias de corriente obtenidas fluctúan entre 85.4 y 94.7%, lo cual es considerado alto para el rango de concentración de cobre tratado (42.51-2.78 [gr/l]) y las densidades de corriente aplicadas 600-350 [A/m²]. En contraste con el actual proceso EW de RT que trabaja a un máximo de 300 [A/m²], que presenta una eficiencia de corriente de 89% y que logra una disminución de concentración de 54.31 a 38.47 [gr/l] de cobre en el electrolito de avance y spent respectivamente. Por otra parte el consumo de energía de esta planta fluctuó entre los 2.18 y 2.58 [Kwh/Kg Cu depositado] que en comparación con la EW convencional (1.8 a 2.2 [Kwh/Kg Cu depositado]) es mayor, pero que se justifica cuando se trabaja a una alta densidad

de corriente 300-600 [A/m²], rango que difícilmente puede ser alcanzado por las plantas EW convencionales y que genera variados beneficios como por ejemplo, un mejor despegue al momento de la cosecha ó una mejor calidad física de los cátodos.

La evaluación económica preliminar realizada entregó los siguientes resultados: construir la planta EMEW® resulta rentable para ambas opciones de configuración, necesitando una inversión inicial de U\$D 41.685.000, valor que considera los equipos principales: bombas, rectificadores de corriente y todas las cañerías del sistema hidráulico (pipping). El proyecto fue evaluado a 6 años de operación (vida útil del yacimiento RT) y se utilizó una depreciación lineal a 10 años, de acuerdo a esto, los valores obtenidos fueron de 46,26% para el TIR y de U\$D 5.348.841 para el VAN tomando en consideración una TMAR de 40%. Para realizar esta aproximación económica se consideró el precio del cobre en 2.0 U\$D/lb. El análisis de sensibilidad realizado arroja que para un precio inferior a 1,8 U\$D/lb el proyecto no se hace rentable.

- **INDICE**

AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN.....	III
INDICE DE TABLAS.....	9
INDICE DE FIGURAS.....	11
NOMENCLATURA.....	13
1 CAPITULO 1: PROYECTO DE OPERACIÓN PLANTA PILOTO UTILIZANDO	
TECNOLOGÍA EMEW®.....	16
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1.1 <i>Antecedentes del Proyecto</i>	16
1.1.2 <i>Problema a resolver^[1]</i>	16
1.1.3 <i>Aplicación en Codelco Radomiro Tomic</i>	18
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	18
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
1.3 ANTECEDENTES GENERALES CODELCO, DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC.....	19
1.3.1 <i>Ubicación y acceso</i>	19
1.4 MINERALIZACIÓN.....	20
1.5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO.....	21
1.6 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN ^[4]	21
1.6.1 <i>Etapa Extracción</i>	21
1.6.2 <i>Etapa Lixiviación</i>	23
1.6.3 <i>Etapa Extracción por Solvente</i>	24
1.6.4 <i>Etapa Electrowinning</i>	26
1.7 RESEÑA HISTORICA DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC.....	28
2 CAPITULO 2: CELDAS EMEW®.....	29
2.1 ¿QUE ES UNA CELDA EMEW®?.....	29
2.2 TIPOS DE CELDA EMEW® ^[7]	30
2.2.1 <i>Celda EMEW® para producir placas</i>	30

2.2.2	<i>Celda EMEW® para producir polvo.....</i>	31
2.2.3	<i>Tecnología EMEW®</i>	31
2.2.4	<i>Principales Aplicaciones.....</i>	32
2.3	MARCO TEORICO.....	33
2.3.1	<i>FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA TECNOLOGÍA EMEW®^[8].....</i>	33
2.4	CONCEPTOS BASICOS DE ELECTRO OBTENCION^[10]	36
2.4.1	<i>Ley de Faraday</i>	37
2.4.2	<i>Eficiencia de Corriente.....</i>	38
2.5	CELDA CONVENCIONAL V/S CELDA EMEW®	39
2.5.1	<i>Celda convencional.....</i>	39
2.5.2	<i>Celda EMEW®.....</i>	44
3 CAPITULO 3: PRUEBAS A ESCALA PILOTO PARA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGIA		
EMEW® EN PLANTA RADOMIRO TOMIC..... 47		
3.1	COMPOSICIÓN GENERAL DEL ELECTROLITO, CODELCO RADOMIRO TOMIC.	47
3.2	PRUEBAS PILOTO REALIZADAS EN CODELCO RT	48
3.2.1	<i>Instalación de la planta piloto</i>	49
3.3	PRUEBAS DE PILOTAJE.....	49
3.3.1	<i>Resultados obtenidos a partir de electrolito pobre de Electrowinning</i>	50
3.4	DISCUSIONES.....	55
3.4.1	<i>Resultados de las Pruebas de Compósito de Descarte de canaletas</i>	58
3.5	COSECHA DE CATODOS EN LAS PRUEBAS PILOTO.....	60
4 CAPITULO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA DE UTILIZAR TECNOLOGÍA EMEW® EN		
CODELCO RADOMIRO TOMIC 62		
4.1	EVALUACIÓN TECNICA USANDO ELECTROLITO POBRE	62
4.2	CÁLCULOS DE DISEÑO DE PLANTA EMEW® PARA EL ELECTROLITO POBRE	
	(DESCARTE)	65
4.2.1	<i>Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en dos etapas.....</i>	65
4.2.2	<i>Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en dos etapas</i>	68
4.2.3	<i>Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en tres etapas.....</i>	72
4.2.4	<i>Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en tres etapas</i>	74
4.2.5	<i>Beneficio de la generación de ácido sulfúrico en el sistema.....</i>	81

4.3	EVALUACION TECNICA PARA COMPOSITO DESCARTE (CANALETAS DEL AREA PATIO ESTANQUES Y SUMIDEROS)	82
4.4	CÁLCULOS DE DISEÑO PLANTA EMEW® PARA COMPOSITO DE DESCARTE DE CANALETAS.....	83
4.4.1	<i>Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en compósito de descarte....</i>	83
4.4.2	<i>Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en compósito de descarte de canales.....</i>	84
4.4.3	<i>Beneficio en el sistema la generación de ácido sulfúrico.....</i>	86
5 CAPITULO 5: EVALUACION ECONOMICA PARA USO DE TECNOLOGÍA EMEW® EN CODELCO RADOMIRO TOMIC.....		87
5.1	EVALUACIÓN ECONOMICA PARA TRATAR DESCARTE ELECTROWINNING ..	87
5.1.1	<i>Condiciones generales de operación</i>	87
5.1.2	<i>Costo y producción de una celda Convencional v/s una celda EMEW®</i>	89
5.1.3	<i>Costo de Inversión y Operación para una concentración de entrada a la Planta EMEW® de 42.5 gpl de Cu.....</i>	90
6 CAPITULO 6: CONCLUSIONES		94
6.1	RECOMENDACIONES.....	95
7 CAPITULO 7: ANEXOS.....		96
7.1	ANEXO 1: CELDAS EMEW®	96
7.1.1	<i>Funcionamiento de la celda EMEW®^[13].....</i>	96
7.1.2	<i>Apariencia Cátodos post-cosecha.....</i>	97
7.1.3	<i>Características de las celdas EMEW®.....</i>	97
7.1.4	<i>Estado Actual de las celdas EMEW®.....</i>	99
7.1.5	<i>Descripción de la Planta Piloto EMEW®.....</i>	100
7.2	ANEXO 2: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEPOSITACION DEL METAL....	103
7.2.1	<i>Nucleación y Crecimiento.....</i>	103
7.2.2	<i>Variables de operación^[15].....</i>	104
7.2.3	<i>Distribución de corriente.....</i>	106
7.2.4	<i>Calidad de los catodos producidos^[16].....</i>	107
7.2.5	<i>Calidad Física</i>	108
7.2.6	<i>Calidad Química.....</i>	109

7.2.7	<i>Aireación de Electrolito</i>	109
7.3	ANEXO 3: CARTILLAS DE DATOS DE PRUEBAS PILOTO	111
7.3.1	<i>Tabla 7.4: Cartilla de datos prueba 1</i>	111
7.3.2	<i>Tabla 7.5: Cartilla de datos prueba 2</i>	112
7.3.3	<i>Tabla 7.6: Cartilla de datos prueba 3</i>	113
7.3.4	<i>Tabla 7.7: Cartilla de datos prueba 4</i>	114
7.3.5	<i>Tabla 7.8: Cartilla de datos prueba 5</i>	115
7.3.6	<i>Tabla 7.9: Cartilla de datos prueba 6</i>	116
7.3.7	<i>Tabla 7.10: Cartilla de datos prueba 7</i>	117
7.3.8	<i>Tabla 7.11: Cartilla de datos prueba 8</i>	118
7.3.9	<i>Tabla 7.12: Cartilla de datos prueba 9</i>	119
7.3.10	<i>Tabla 7.13: Cartilla de datos prueba 10 (Compósito Canaletas)</i>	120
7.4	ANEXO 4: GRAFICOS RESUMEN DE PRUEBAS PILOTO REALIZADAS.....	121
7.5	ANEXO 5: DIMENSIONES DE PLANTA PILOTO	125
7.6	ANEXO 6: FACTORES PARA DISEÑO DE UNA PLANTA EMEW®	126
7.6.1	<i>Consideraciones de Diseño</i>	126
7.6.2	<i>Configuración de armado de una planta EMEW®</i>	129
7.7	ANEXO 7: CALIDAD FISICA.....	134
7.8	ANEXO 8: ESTANDARES FISICOS DE CALIDAD	136
7.9	ANEXO 9: CALCULOS EVALUACIÓN ECONÓMICA ^[18]	137
7.10	ANEXO 10: GRAFICOS ANALISIS DE SENSIBILIDAD	140
7.10.1	<i>Precio del Cobre</i>	140
7.10.2	<i>Precio de la Energía</i>	141
7.11	ANEXO 11: FOTOS PRUEBAS PILOTO PLANTA EMEW	142
8	CAPITULO 8: BIBLIOGRAFIA.....	145

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características flujo de descarte electrowinning Radomiro Tomic

Tabla 1.2: Datos electrolito de descarte división Radomiro Tomic año 2010

Tabla 1.3: Reacciones en la etapa de lixiviación con ácido de los minerales presentes en las pilas

Tabla 1.4: Flujos por cada tren en planta SX

Tabla 2.1: Tipos de celda EMEW®

Tabla 3.1: Resumen de pruebas a electrolito pobre de EW en primer Batch

Tabla 3.2: Resumen de pruebas a electrolito pobre de EW en segundo Batch

Tabla 3.3: Resumen de pruebas a electrolito pobre de EW en tercer Batch

Tabla 3.4: Resultados de análisis químico a cátodos EMEW® pruebas 1 a 9

Tabla 3.5: Peso de cátodos obtenidos a partir de electrolito pobre

Tabla 3.6: Resumen de parámetros operacionales en prueba con compuesto de canaleta

Tabla 3.7: Análisis químico de cátodos EMEW® correspondientes al compuesto de canaletas

Tabla 3.8: Peso de cátodos obtenidos a partir de compuesto de descarte de canaleta

Tabla 4.1: Caracterización del electrolito utilizado en pruebas piloto

Tabla 5.1: Composición química del electrolito tratado en las pruebas con celdas EMEW®

Tabla 5.2: Costo v/s producción de una celda EW convencional

Tabla 5.3: Costo v/s producción de una celda EMEW®

Tabla 5.4: Monto de inversión planta EMEW®

Tabla 5.5: Suposiciones realizadas para evaluación de costos

Tabla 5.6: Ingresos por venta de cobre y por ahorro en compra de ácido sulfúrico

Tabla 5.7: Flujo de caja preliminares con precio de cobre en 2.0 USD/lb

Tabla 5.8: Análisis de sensibilidad según precio del cobre

Tabla 5.9: Análisis de Sensibilidad según precio de la energía Kwh.

Tabla 7.1: Resumen principales características de las celdas EMEW®

Tabla 7.2: Estándares de calidad física de cátodos comerciales

Tabla 7.3: Estándares de calidad química de cátodos comerciales

Tabla 7.4: Cartilla de datos prueba 1

Tabla 7.5: Cartilla de datos prueba 2

Tabla 7.6: Cartilla de datos prueba 3

Tabla 7.7: Cartilla de datos prueba 4

Tabla 7.8: Cartilla de datos prueba 5

Tabla 7.9: Cartilla de datos prueba 6

Tabla 7.10: Cartilla de datos prueba 7

Tabla 7.11: Cartilla de datos prueba 8

Tabla 7.12: Cartilla de datos prueba 9

Tabla 7.13: Cartilla de datos prueba 10 (Compósito canaletas)

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1: Grafico flujo másico mensual de electrolito de descarte en la nave EW
- Figura 1.2: Diagrama de flujos de nave EW de Radomiro Tomic, donde se indica el punto de extracción de la solución alimentada a la planta piloto EMEW®
- Figura 1.3: Mapa geográfico de ubicación de la mina Radomiro Tomic
- Figura 1.4: Proceso productivo división Radomiro Tomic
- Figura 2.1: Celda EMEW®
- Figura 2.2: Cosecha celda EMEW® en producción de placas
- Figura 2.3: Cosecha celda EMEW® en producción de polvo
- Figura 3.1: Evolución de concentración de cobre en transcurso de pruebas de pilotaje EMEW®
- Figura 3.2: Agotamiento de cobre en pruebas de Batch 1
- Figura 3.3: Agotamiento de cobre en pruebas de Batch 2
- Figura 3.4: Agotamiento de cobre en pruebas de Batch 3
- Figura 3.5: Eficiencia de corriente en pruebas piloto EMEW® en codelco RT
- Figura 3.6: Cátodos obtenidos y decoloración de solución tratada
- Figura 3.7: Agotamiento de cobre en pruebas de Batch 4
- Figura 3.8: Cosecha de cátodos EMEW®
- Figura 3.9: Secuencia de decoloración de electrolito en el tiempo
- Figura 4.1: Diagrama esquemático de aplicación de celdas EMEW® en codelco RT para el tratamiento de EP en dos etapas
- Figura 4.2: Diagrama esquemático de aplicación de celdas EMEW® en codelco RT para el tratamiento de EP en tres etapas

Figura 4.3: Diagrama esquemático de aplicación de celdas EMEW® en codelco RT para el tratamiento de soluciones provenientes de canaleta

Figura 7.1: Celda convencional v/s Celda EMEW®

Figura 7.2: Cátodo obtenido en cosecha de celda EMEW®

Figura 7.3: Módulo de celdas en planta EMEW®

Figura 7.4: Esquema del sistema de pruebas de pilotaje EMEW® (con recirculación)

Figura 7.5: Planta piloto EMEW® instalada en Codelco Radomiro Tomic

Figura 7.6: Marco celda EMEW®

Figura 7.7: Marco celda EMEW®

Figura 7.8 Planta de 180 celdas EMEW®

Figura 7.9: Planta de 270 celdas EMEW®

Figura 7.10: Módulos de tecnología EMEW® dispuesto en galpón

Figura 7.11: Apilamiento de cátodos en bins

NOMENCLATURA

A	: Unidad de intensidad de corriente. Ampere
A/O	: Razón acuoso-orgánico
Atacamita	: Hidroxicloruro de cobre. Fórmula química: $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$
°C	: Unidad de temperatura. Grados Celcius
Caolinita	: Arcilla de Aluminio. Fórmula química: $\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
cm	: Unidad de longitud. Centímetro
Copper wad	: Óxidos e hidróxidos de manganeso con cobre
Crisocola	: Silicato de cobre hidratado
D.O.P	: Bomba ubicada delante de cada unidad mezclador-decantador
EMEW®	: En inglés Electro metal Electrowinning
EW	: En inglés Electrowinning (Electro obtención)
GELN	: Gerencia de Extracción y Lixiviación Norte
gpl	: Unidad de concentración. Gramos por litro
gr	: Unidad de masa. Gramo
h	: Unidad de tiempo. Hora
HDPE	: En inglés High density polyethylene (Polietileno de alta densidad)
Kamp	: Unidad de intensidad corriente. Kilo ampere
Kidd Creek	: Tecnología en que los cátodos con cobre cosechados en etapa EW, son inmediatamente repuestos por cátodos sin cobre (blancos)
Kg	: Unidad de masa. Kilogramo
Km	: Unidad de longitud. Kilometro

Kton	: Unidad de masa. Kilo tonelada
Kw	: Unidad de energía. Kilo watt
L	: Unidad de volumen. Litro
lb	: Unidad de masa. Libra
LME	: En inglés London Metal Exchange (Bolsa de metales de Londres)
LX	: Lixiviación
m	: Unidad de longitud. Metro
m ²	: Unidad de área. Metros cuadrados
m ³	: Unidad de volumen. Metros cúbicos
m.s.n.m	: Metros sobre el nivel del mar
Picket fence	: Obstáculos perpendiculares al movimiento de los fluidos, formadas por estacas contiguas que dejan pequeñas aberturas. Ayudan a la coalescencia
pie	: Unidad de longitud. Pie
PLC	: Control Lógico programable
PLS	: En inglés Pregnant Leach Solution (Solución de Cobre cargada)
ppm	: Partes por millón
pulg	: Unidad de longitud. Pulgada
PVC	: Policloruro de vinilo
ROM	: En inglés Mineral Run of Mine (Mineral directo de la mina)
Sericita	: Variedad de mica potásica o moscovita degradada (pérdida de potasio)
Spirok	: Dispositivo de agitación en los estanques mezcladores
SX	: En inglés Solvent Extraction (Extracción por solvente)
ton	: Unidad de masa. Tonelada

-
- V : Unidad de potencial eléctrico. Voltios
- VSF : En inglés Vertical Soft Fluid (Flujo vertical suave)
- yd³ : Unidad de volumen. Yards cúbicas; 1 yd³= 0,7645 m³

1 CAPITULO 1: PROYECTO DE OPERACIÓN PLANTA PILOTO UTILIZANDO TECNOLOGÍA EMEW®

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 Antecedentes del Proyecto

La propuesta del proyecto contempla un estudio a nivel piloto con celdas EMEW® sobre la solución de descarte proveniente de la nave de Electrowinning, en adelante EW, de la división de Codelco Radomiro Tomic, en adelante RT. El electrolito a estudiar es el descarte de EW (EW Bleed). El objetivo principal de estas pruebas es recopilar la información necesaria que permita dimensionar una planta EMEW® a nivel industrial para el tratamiento de la solución electrolítica de descarte EW, la cual a su vez permita incrementar la producción actual de cobre. Por otra parte, demostrar que al operar la tecnología EMEW se pueden mejorar las condiciones de operación normal de la planta SX y de EW convencional.

1.1.2 Problema a resolver^[1]

La propuesta se relaciona con la aplicación de la tecnología EMEW® a la recuperación de cobre a partir del electrolito de descarte de la nave de EW.

Este flujo se genera por la necesidad de disminuir la concentración del ión cloruro en la solución saliente (electrolito avance) de la etapa de extracción por solvente, en su reemplazo se ingresa un flujo de agua para así diluir el resto del avance que va a la etapa de EW. Las características del electrolito de descarte son las siguientes. (**Tabla 1.1**).

Flujo [m ³ /h]	20 - 26
Flujo [ton/mes]	500 - 800
Temperatura [°C]	Ambiente
Concentración Cu ⁺² [gpl]	36 - 54
Concentración H ⁺ [gpl]	180 - 210
Concentración Fe ⁺³ [gpl]	1,2 - 1,5
Concentración Cl ⁻ [ppm]	25 - 45

Tabla 1.1: Características flujo de descarte EW Radomiro Tomic.

El flujo de descarte es dirigido al sumidero n° 1 en el área de patio de estanques, donde se mezclará con electrolito pobre y rico, luego una parte de este irá a la piscina de refinación para luego ser procesado y enviado a regar las pilas de lixiviación primaria, generando un promedio de pérdida de solución de cobre de aproximadamente 7.789 [ton/año]^[2] (Tabla 1.2). Esta pérdida se genera principalmente por purgas realizadas al sistema o por rebose de las celdas.(Figura 1.1).

Fecha	m ³ /h	gpl Cu	ton/h	ton/día	ton/mes	ton/año
Ene-10	22,09	37,66	0,83	20	619	7.789
Feb-10	22,43	37,78	0,85	20	570	
Mar-10	23,29	37,99	0,88	21	658	
Abr-10	23,68	37,95	0,90	22	647	
May-10	23,41	37,84	0,89	21	659	
Jun-10	23,40	37,00	0,87	21	623	
Jul-10	24,20	36,55	0,88	21	658	
Ago-10	24,61	36,83	0,91	22	674	
Sep-10	23,38	36,63	0,86	21	617	
Oct-10	22,50	37,42	0,84	20	626	
Nov-10	25,18	38,57	0,97	23	699	
Dic-10	26,93	36,84	0,99	24	738	

Tabla 1.2: Datos electrolito de descarte División Radomiro Tomic año 2010.

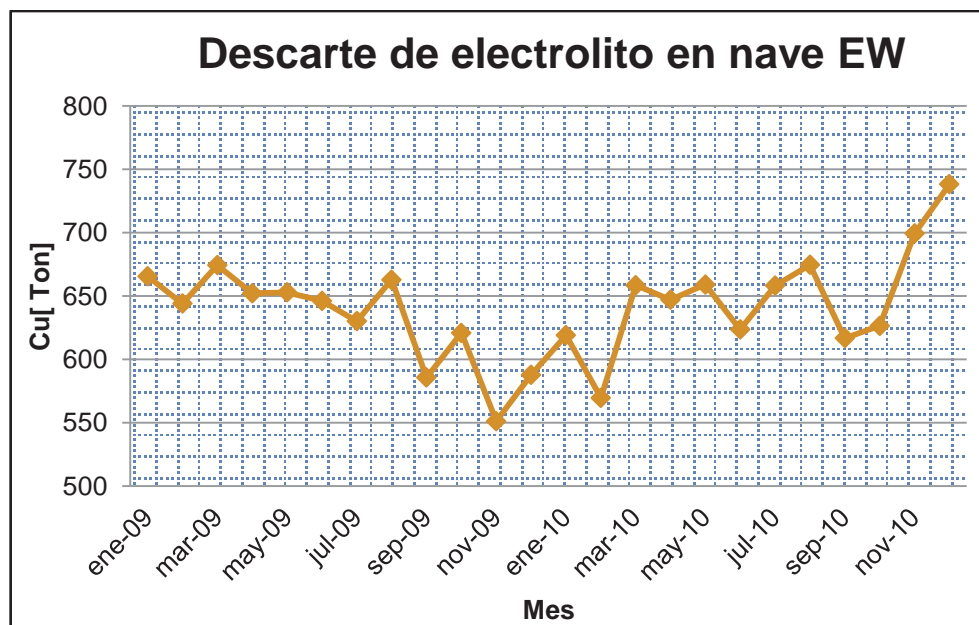


Figura 1.1: Gráfico Flujo másico mensual de electrolito de descarte de la nave de EW.

1.1.3 Aplicación en Codelco Radomiro Tomic

Las pruebas piloto en Codelco RT contemplaron el tratamiento de electrolito pobre proveniente del banco 6. Esto lo muestra el punto de color verde en la **Figura 1.2**.

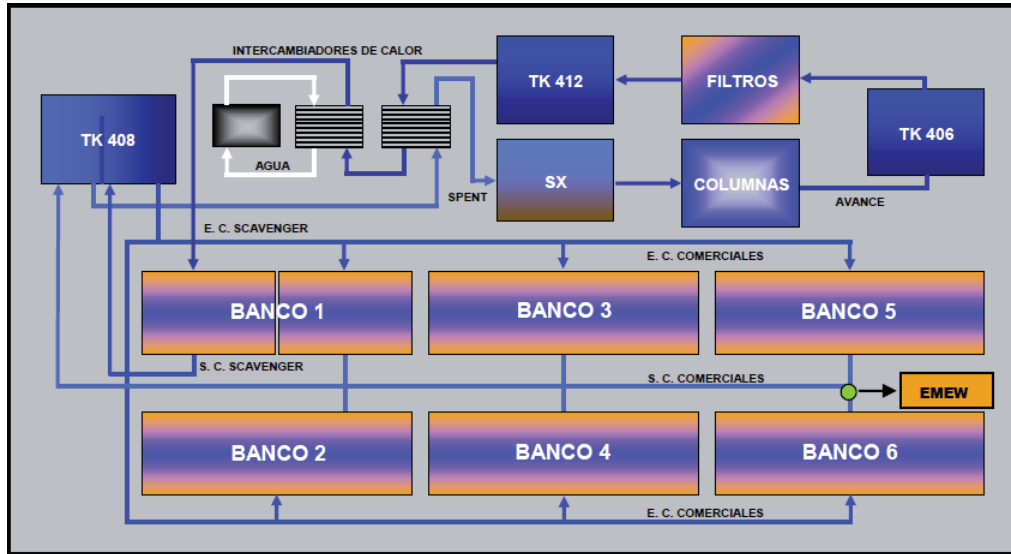


Figura 1.2: Diagrama de Flujos de nave EW en RT, donde se indica el punto de extracción de la solución alimentada a la Planta Piloto EMEW®.

Con la finalidad de obtener datos que permitieran realizar una evaluación técnica y económica para la obtención de cobre a partir de esta solución, se llevaron a cabo pruebas de pilotaje EMEW®. Las características de dicha solución se presentan en la sección 3.1.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general de las pruebas fue determinar la factibilidad técnica de implementar la tecnología EMEW® para el tratamiento de descartes de Electrowinning en Codelco Radomiro Tomic, la cual permitirá desarrollar una evaluación económica posterior.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Entregar detalles de tamaño, diseño y costos de una planta industrial EMEW® para Codelco Radomiro Tomic.
- Confirmar las óptimas condiciones de operación y funcionamiento de la tecnología EMEW®.
- Demostrar el aumento en la recuperación global de cobre y evaluar la posible incidencia de la tecnología en las etapas de LX, SX y EW.
- Confirmar la calidad del producto final post cosecha (cátodos EMEW®).

1.3 ANTECEDENTES GENERALES CODELCO, DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC

1.3.1 Ubicación y acceso

El yacimiento Radomiro Tomic se encuentra ubicado en la segunda región de Antofagasta, Chile, en la provincia de El Loa, a 40 [Km] al norte de la ciudad de Calama y a una distancia de 15 [Km] al Norte de Chuquicamata, a una altitud de 3000 m.s.n.m, localizado en un valle amplio con pendiente suave hacia el norte, limitado al Este por los cerros de Chuquicamata y al Oeste por Sierra San Lorenzo, formando parte de la subcuenca Pampa CERE de la hoya hidrográfica del río Loa. Para tener acceso al yacimiento se cuenta con un camino pavimentado que conecta la ciudad de Calama con la mina Radomiro Tomic, así como también con minera El Abra^[3] (**Figura 1.3**).

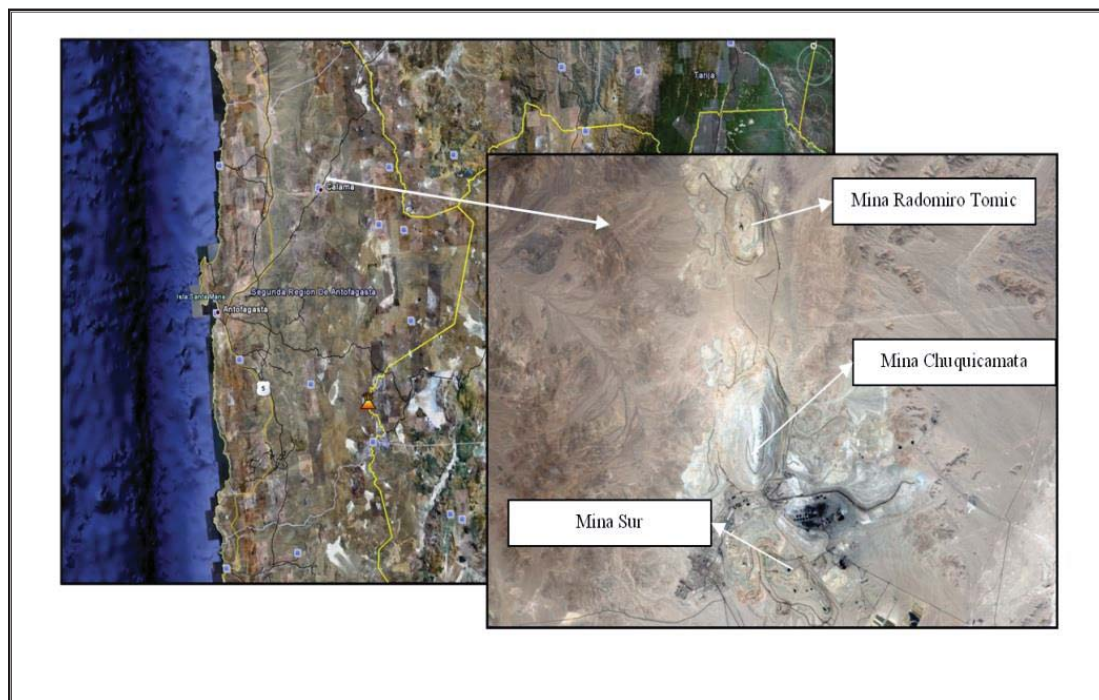


Figura 1.3: Mapa Geográfico de ubicación de la mina Radomiro Tomic.

1.4 MINERALIZACIÓN

El orden de predominancia de Mineralogía de mena en los óxidos totales se presenta de la siguiente forma:

- Atacamita, arcillas con cobre, crisocola, copper wad. Sin embargo, las proporciones de estos minerales varían notablemente entre óxidos inferiores y óxidos superiores. La atacamita es más abundante y menos variable en los óxidos inferiores, pero los otros minerales son escasos y más variables. Por otra parte en los óxidos superiores la atacamita es menos abundante pero es el mineral predominante y presenta mayor variabilidad que en los óxidos inferiores.

- Las arcillas con cobre, la crisocola y copper wad son más abundantes en los óxidos superiores y son menos variables que en los óxidos inferiores. En el ámbito global, los minerales arcillosos predominan por sobre la sericita, y entre ellos la caolinita es más abundante.

1.5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO



Figura 1.4: Proceso productivo División Radomiro Tomic.

1.6 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN^[4]

1.6.1 Etapa Extracción

El proceso productivo de la Gerencia Extracción y Lixiviación Norte (GELN), del Centro de Trabajo Radomiro Tomic que utiliza tecnologías de punta, se inicia, con la geología del yacimiento, cuyos datos son usados por planificación para diseñar y planificar la secuencia de explotación del yacimiento. Diariamente se extraen cerca 580 [Kton], con una relación media de lastre/mineral de 2.7, utilizando métodos convencionales en perforación, tronadura, carguío y transporte.

Entre los principales equipos con que cuenta la GELN del Centro de Trabajo Radomiro Tomic, se encuentran camiones de 330 [ton] y 255 [ton], palas de carguío de 58 [yd³] (44,3 m³) y 73 [yd³] (55,8 m³) y otros equipos de apoyo, como regadores,

perforadoras, motos niveladoras y cargadores frontales de capacidad de balde de 20 [yd³] (15,3 m³) y 26 [yd³] (19,9 m³) respectivamente.

El mineral procedente de la mina tiene dos vías de tratamiento, la primera consiste en la lixiviación de 31[Kton] de mineral Oxidado de Baja Ley (0,3% Cu), en una pila de lixiviación, denominado Dump 2. Estos minerales son acopiados con granulometría ROM (colpas de tamaño hasta 1500 [mm]), ocupando una superficie aproximada de 460.000 [m²], cuya altura es 60 [m], luego se lixivian en botadero mediante parrillas de riego conformadas por líneas de goteros distantes 75 [cm] cada una. Este riego se realiza bajo la aplicación de flujo intermitente con tasa de irrigación de 75 [l/h/m²] con un ciclo de lixiviación de 300 días. Las soluciones de lixiviación que se producen son procesadas posteriormente en las plantas de SX/EW, donde la recuperación de Cu es del 41,8%.

La segunda vía de tratamiento del mineral proveniente de la mina es la trituración de éste por el chancado primario, y tiene por función reducir el tamaño del mineral a menos de 10 [pulg]. La planta de chancado primario cuenta con un chancador giratorio, con capacidad para procesar 10500 [ton/h]. Desde ahí el mineral, es conducido por una correa transportadora hasta el acopio de mineral grueso. Este acopio, fue proyectado para una capacidad máxima de 60 [Kton] vivas de mineral.

Mediante alimentadores y correas que salen en túneles bajo el acopio de mineral grueso, se transporta a través de 7 líneas de alimentación hacia el edificio de chancado secundario, a fin; de ser reducido a un tamaño inferior a cuatro 4 [pulg]. Este proceso, utiliza 7 harneros vibratorios que clasifican el mineral y alimentan la fracción gruesa a los 7 chancadores de cono estándar de 7 [pies].

Por otro lado, el producto de los chancadores secundarios, es enviado vía correas transportadoras hacia el acopio intermedio, con capacidad de 40 [Kton] vivas. Posteriormente, el mineral es transportado hacia el edificio de chancado terciario mediante 5 líneas con capacidad de 1600 [ton/h]. Cada línea, está compuesta por una correa transportadora, un harnero terciario tipo banana y un chancador terciario tipo Swedala de cabeza corta. En esta etapa el tamaño de partículas es reducido hasta 100% bajo malla 2 [pulg].

1.6.2 Etapa Lixiviación

El producto final de la etapa de chancado es curado con ácido sulfúrico y agua sobre la correa transportadora, la que lo llevará a la formación de las pilas de lixiviación.

La correa transportadora, descarga el mineral en las canchas de lixiviación a través de un puente apilador, cuyo carro distribuidor va formando las dos pilas dinámicas, y sus dimensiones individuales de diseño alcanzan a 1350 [m] de largo por 383 [m] de ancho. La altura total puede fluctuar entre 8 y 10 [m].

La irrigación de las pilas se efectúa por goteo y/o aspersion con solución de refino, en un ciclo de 70 a 90 días, generando así una solución rica en cobre denominada PLS (Pregnant Leach Solution).

Dicha solución es recogida a través de cañerías de drenaje dispuestas en la base de la pila, las que por flujo gravitacional conducen la solución hacia las canaletas recolectoras que posteriormente la envían a tres piscinas desarenadoras y luego, por desbordamiento, a tres piscinas de almacenamiento.

Una vez completada la irrigación y drenadas las soluciones, se retiran los ripios de las canchas de lixiviación, con el fin de volver a formar sobre ellas nuevas pilas de mineral. Para esto, se cuenta con una rueda excavadora de capachos (rotopala), con una capacidad de 10500 [ton/h] que carga un puente-móvil, similar al del sistema apilador. A través de un conjunto de correas de 5 [Km] de largo, el ripio es transportado al botadero, donde se encuentra un esparcidor de ripios, que distribuye el material a razón de 200 [Kton/día] a lo largo de toda su extensión.

Las principales reacciones que ocurren en el lecho de este proceso se muestran en la **Tabla 1.3.**

• Principales Reacciones

Atacamita (28%)	$CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2$	$CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_{2(s)} + 6H^+ \leftrightarrow 4Cu^{2+} + 2Cl^- + 6H_2O$
Crisocola (25%)	$Cu_2SiO_3 \cdot 2H_2O$	$CuSiO_3 \cdot 2H_2O_{(s)} + 2H^+ \leftrightarrow Cu^{2+} + SiO_2 \cdot nH_2O + (3 - n)H_2O$ $n = 1,2,3$
Wad	$CuO \cdot MnO_2 \cdot 7H_2O$	$CuO \cdot MnO_2 \cdot 7H_2O_{(s)} + 6H^+ + 2Fe^{2+} \leftrightarrow Cu^{2+} + 2Fe^{3+} + 10H_2O$

Tabla 1.3: Reacciones en la etapa de Lixiviación con ácido de los minerales presentes en las pilas.

1.6.3 Etapa Extracción por Solvente

Las soluciones de la lixiviación, ricas en cobre y con alto contenido de impurezas, ingresan a la etapa de extracción por solventes, que se lleva a cabo en 4 trenes, tres de estos (Tren A, B, C) con dos etapas de extracción, una de re extracción y una de lavado, y el cuarto (Tren D) con dos etapas de extracción, dos de re extracción y una de lavado. Operando en base a la tecnología VSF, cada tren es alimentado con un flujo medio de 1650 [m³/h] de solución. (Tabla 1.4).

	Tren A	Tren B	Tren C	Tren D
Flujo PLS [m³/h]	1694	1691	1692	1657
Flujo Fase Orgánica [m³/h]	1739	1720	1753	1699
Flujo Spent [m³/h]	580	579	580	624
Flujo agua de lavado [m³/h]	35	34	36	36

Tabla 1.4: Flujos por cada tren en Planta SX.

La extracción por solventes aplicada a la Hidrometalurgia es una operación unitaria que consiste en la purificación y concentración de una amplia variedad de metales, poniendo en contacto una fase orgánica que contiene un extractante, con una fase acuosa que contiene el metal de interés.

El extractante reacciona químicamente con el metal para formar un complejo órgano-metal el cual es soluble en la fase orgánica. Las impurezas por lo general no

reaccionan con el extractante y se quedan en la fase acuosa. La fase orgánica que contiene el complejo órgano-metal es separada de la fase acuosa. El metal es recuperado y concentrado en otra fase acuosa por la reacción química inversa.

El proceso de extracción por solvente consiste fundamentalmente en dos operaciones secuenciales:

- **Extracción:** en donde el reactivo orgánico captura el cobre del acuoso.
- **Captura o re extracción:** El electrolito pobre que viene de Electrowinning captura el cobre, saliendo un acuoso limpio cargado o electrolito de avance.

Los objetivos principales de este proceso son separar cobre de otros contaminantes, concentrar este metal disuelto, disminuyendo así el volumen a procesar y simplificando su recuperación. De esta manera se reducen los costos para el proceso siguiente, y lo más importante se obtiene cobre metálico de acuerdo a las especificaciones comerciales.

En una primera etapa, denominada extracción, la solución de lixiviación (PLS), que contiene los iones metálicos de cobre recuperado del mineral cargado en las pilas, se pone en contacto con la fase orgánica, que posee un reactivo orgánico capaz de combinarse y captar selectivamente el cobre en solución. Es decir, la solución de lixiviación rica en cobre, (PLS), luego del contacto con la fase orgánica, baja su contenido de cobre (refino).

En una segunda etapa, la fase orgánica que ahora contiene el cobre, es contactada con una nueva solución acuosa, (electrolito pobre o Spent), de propiedades distintas a la primera proveniente de la etapa de Electrowinning con una concentración media de 39 [gpl] de cobre y alto contenido de ácido sulfúrico de modo de lograr transferir el cobre desde la fase orgánica a la fase acuosa (re extracción), resultando una solución rica en cobre y apta para electro depositación (electrolito avance). El orgánico se regenera, retornando a la etapa previa de extracción, operando en circuito cerrado permanente.

Esta planta opera con un diseño Outokumpu, y cuenta con un flujo de diseño de 1750 [m³/h], además de una unidad D.O.P (bomba) en cada etapa, dos unidades Spirok

(mezclador) en extracción y re extracción y una unidad Spirok en la etapa de lavado. Por cada tren hay decantadores, con un picket fence distribuidor de dispersión y dos picket fence adicionales. En estos decantadores se le adiciona Kieselghur para ayudar a la separación de fases.

Para el control de las impurezas del electrolito y de los arrastres de A/O (acuoso-orgánico) se utilizan coalescedores para el orgánico cargado y una etapa posterior de lavado con agua desmineralizada. Para la recuperación de orgánico del Crud (borra), se utiliza el proceso de ruptura mecánica.

Por otra parte, para la remoción del orgánico arrastrado por el electrolito rico, proveniente de SX, se emplean columnas de flotación Cominco y filtros de electrolitos Chuquicamata.

Todas las remociones van al sumidero, donde son posteriormente tratadas para su recuperación. El acuoso recuperado va a la poza de refinó I, y el orgánico es recirculado a la etapa de SX.

La planta incluye además los estanques de orgánico cargado, de alimentación a filtros, de recirculación del electrolito, intercambiadores de calor, bombas, cañerías y sus correspondientes válvulas.

1.6.4 Etapa Electrowinning

La Planta de Electrowinning cuenta con 984 celdas dispuestas en 6 bancos, siendo el primer banco el que contiene 149 celdas Scavenger o de sacrificio. Cada celda contiene 60 cátodos, sobre los cuales se recuperará el cobre, y 61 ánodos.

Trabaja con la tecnología Kidd Creek de cátodos permanentes, utilizando cuatro puentes grúas automáticos para el manejo de electrodos, que operan programados con las tres máquinas despegadoras de cátodos. Estas con una capacidad promedio superior a las 840 [ton/día] lavan, despegan, pesan, inspeccionan el producto, corrugan, muestrean y forman paquetes de 2 a 2,5 [ton] de cátodos de cobre, con una variabilidad del 5%. Una vez disponible los análisis químicos, estos cátodos de alta pureza se arman en paquetes de 60 piezas cada uno con tres zunchos, pesados en básculas certificadas.

Cada banco es alimentado eléctricamente por transforectificadores, con corrientes promedios de 33 a 35 [Kamp] por cada equipo. Resultando una densidad de corriente entre 270 a 290 [A/m²].

Básicamente, en el cátodo se depositará el cobre metálico que hay en solución (electrolito), y en el ánodo, se produce la oxidación del agua, produciéndose oxígeno gaseoso.

Razón por la cual vemos en los ánodos producirse burbujas (O₂ – oxígeno), burbujas que al salir fuera del electrolito, forman una neblina ácida producto del arrastre del electrolito. El proceso del depósito de cobre se realiza por efecto de un campo eléctrico, en donde, en el cátodo se produce la reducción del cobre y en el ánodo la oxidación del agua, aparte de reacciones parásitas, motivo por lo cual, es imposible llegar a una eficiencia de corriente de un 100 %, aplicado en las celdas por espacio de 5 a 6 días, lo que se llama ciclo catódico. La modalidad de cosecha es a través de tercios de celdas, esto es, levantar simultáneamente 20 placas de acero inoxidable por celda.

En las celdas se colocan esferas de polietileno y se les adiciona quillay, para controlar la emisión de neblina a la atmósfera, además la planta posee un sistema captador de aerosoles ácidos, que permite mantener un ambiente adecuado dentro de la nave, apto para los trabajadores así como para controlar la corrosión de las estructuras y equipos.

Las celdas tienen tecnología back to back, en donde la alimentación y el retorno del electrolito es por la misma pared frontal, la salida del electrolito es por rebose, siendo utilizadas por primera vez en la producción del cobre.

Estos cátodos de alta pureza, una vez disponible su análisis químico, son cargados en camiones y transportados al puerto de Antofagasta, donde son embarcados a distintos puntos del mundo, principalmente Francia y China.

1.7 RESEÑA HISTORICA DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC

Este yacimiento fue descubierto en 1952, como parte de un programa de exploraciones de posibles extensiones de la mineralización de óxidos bajo el área denominada Pampa Norte, ubicado al norte de Chuquicamata, llevado a cabo por la empresa Chile Exploration Company.

El centro de trabajos Radomiro Tomic se encuentra ubicado a 1670 [Km] de Santiago, en la comuna de Calama a 3000 m.s.n.m en la cordillera de los Andes. Debe su nombre al político democratacristiano Radomiro Tomic, quien fue un férreo defensor de la chilenización del cobre. Codelco bautizó a la mina de esta forma en 1992.

Este yacimiento es explotado mediante el método de extracción a cielo o rajo abierto para la obtención de minerales oxidados y sulfuros. Aunque fue descubierta en la década del 50, sus operaciones comenzaron en 1995, después que Codelco actualizó los estudios sobre la factibilidad de su explotación y contó con la tecnología necesaria para explotarla de manera rentable económicamente.

Luego de que se considerara una división más de Codelco durante algunos años, en el año 2002 se creó la división Codelco Norte producto de la fusión de las divisiones Radomiro Tomic y Chuquicamata.

Esta coalición en diciembre del año 2010, dejó de entregar en conjunto la producción total como división norte de Codelco; en el mes de enero del año 2011, Radomiro Tomic comienza a operar nuevamente como una división de la Corporación Nacional Del Cobre^[5].

2 CAPITULO 2: CELDAS EMEW®

2.1 ¿QUE ES UNA CELDA EMEW®?

Una celda EMEW® consiste en un arreglo concéntrico de dos electrodos cilíndricos, normalmente un ánodo central y un cátodo externo. Los extremos de los tubos se cierran con piezas plásticas, formando una cámara cerrada, a través de la cual se bombea electrolito a un alto caudal. Para la producción de metales en forma de cátodo, la celda tiene 6 [pulg] de diámetro por 120 [cm] de largo. Se usa un ánodo de Titanio de 2 [pulg] recubierto con una capa de óxido de Iridio, que tiene un desgaste conocido y predecible, y que debe ser renovado cuando ha alcanzado su vida útil. El cátodo es un cilindro de acero inoxidable de 6 [pulg], que tiene adosado en su interior una lámina removible de acero inoxidable de 0,8 [mm] de espesor, la que permite cosechar los cátodos con facilidad. Al terminar el ciclo de producción, aproximadamente entre 3 a 7 días, un Operador retira el cátodo mediante una herramienta de cosecha. Los cátodos cosechados pueden variar en peso entre 25 a 30 [Kg].

El ánodo de titanio, atraviesa el centro de la celda. La superficie interior de la tubería es el cátodo fabricado en acero inoxidable. (Figura 2.1)^[6].

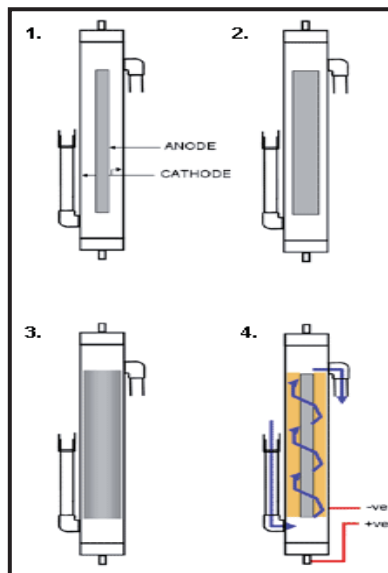


Figura 2.1: Celda EMEW®.

2.2 TIPOS DE CELDA EMEW®^[7]

En la actualidad existen dos tipos de celda EMEW®. Una produce placa metálica (cátodo), y la otra produce polvo metálico.

Tipo Celda	Cátodo	Material	Ánodo	Material	Cosecha Automática
Placa Cátodo	6"	Acero Inox.	2"	Titanio	NO
Polvo	8"	Acero Inox.	7"	Titanio	SI

Tabla 2.1: Tipos de celda EMEW

2.2.1 Celda EMEW® para producir placas

Para las celdas que producen placas se inserta una delgada lámina de inicio (habitualmente fabricada de acero inoxidable) dentro del cuerpo de la celda EMEW®.

El metal que se recupera se deposita sobre la lámina de inicio, la cual es removible y reutilizable, al hacer pasar una corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo.

Las celdas de placa se cosechan removiendo la tapa superior y extrayendo el cátodo. (Figura 2.2).

La lámina de inicio se reemplaza y el proceso comienza nuevamente.

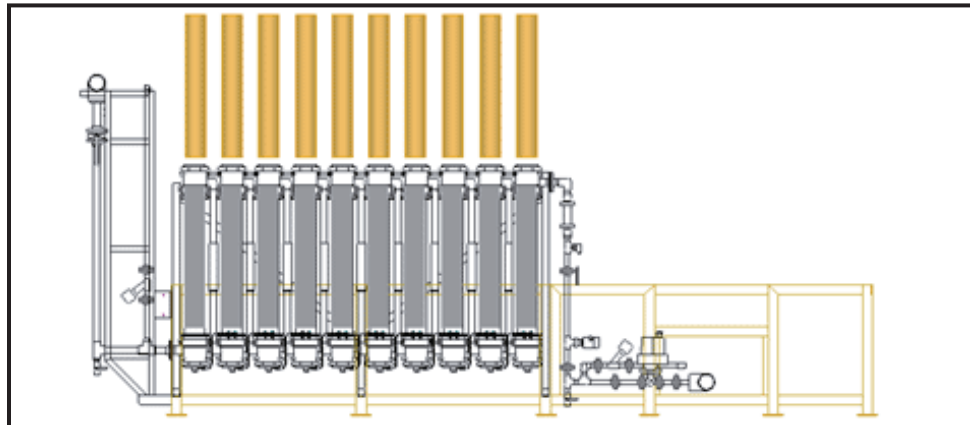


Figura 2.2: Cosecha Celda EMEW® en producción de placas.

2.2.2 Celda EMEW® para producir polvo

En la celda para producir polvo, la diferencia con la celda para producir placas es que el ánodo es de mayor diámetro y la distancia entre electrodos es más pequeña.

Las celdas de polvo se cosechan automáticamente utilizando un método de retrolavado. (**Figura 2.3**).

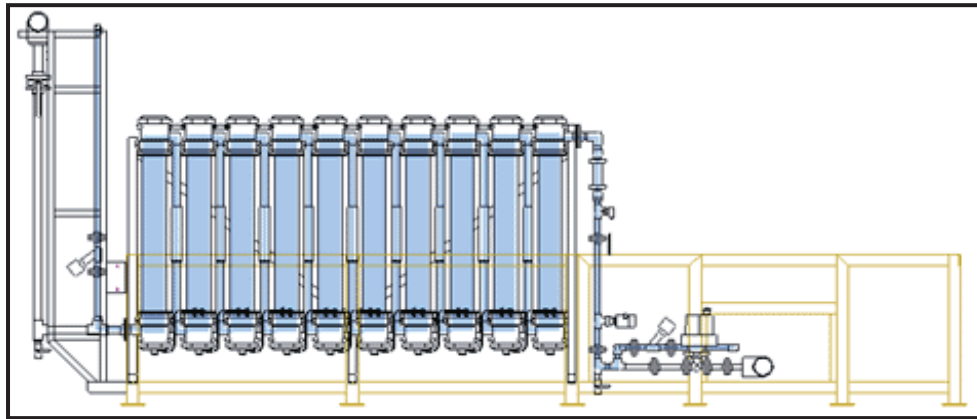


Figura 2.3: Cosecha Celda EMEW® en producción de polvo.

Esta cosecha con retrolavado se controla mediante un PLC y es completamente automática.

Más información en capítulo 7: Anexos, Anexo 1.

2.2.3 Tecnología EMEW®

Con base en la celda EMEW®, patentada a nivel mundial, la tecnología ha sido ampliamente demostrada para una variedad de metales, tanto en minería como en industria en general, y ha logrado un desempeño superior en un amplio rango de caudales y concentraciones. La tecnología de la celda EMEW® está cambiando el modo de pensar respecto de la factibilidad de recuperar metales de soluciones, con alternativas que van bastante más allá de las capacidades de la tecnología convencional, generando beneficios económicos, de proceso y ambientales, los que se originan de la mayor eficiencia, simplicidad y construcción modular y liviana de las plantas de celdas EMEW®.

2.2.4 Principales Aplicaciones

El interés y la aceptación de la tecnología EMEW® está creciendo rápidamente a nivel mundial. Los últimos años han visto avances significativos en la ingeniería asociada a la tecnología, pilotajes en diversas localidades e implementación comercial. Las aplicaciones en las cuales sus capacidades están bien establecidas incluyen:

Electrowinning a alta densidad de corriente 600 [A/m²] a partir de soluciones concentradas:

- Recuperación de Cobre a partir de drenaje ácido de mina.
- Tratamiento de Purgas de Refinería.
- EW directo de Plata a partir de soluciones cianuradas diluidas.
- Producción de Níquel de alta calidad desde desechos de Refinerías.
- Cobre.

La industria del cobre ha estado buscando modos de aumentar la densidad de corriente en Electrowinning, de modo de reducir la superficie de los electrodos necesarios en una planta para producir una cantidad determinada de cobre, con el objeto de reducir costo de capital.

La tecnología convencional está limitada esencialmente a una densidad de corriente de aproximadamente 340 [A/m²], lo que resulta en un rendimiento de aproximadamente 8,7 Kg de cobre por metro cuadrado de cátodo por día. Es difícil sobrepasar estos valores porque la mayor concentración de cobre requerida para satisfacer la demanda adicional de iones se encuentra limitada por la solubilidad del sulfato de cobre, y porque el gap de electrodo (distancia de contacto), no es fácilmente reducible sin ocasionar cortocircuitos. En contraste, la celda EMEW® permite densidades de corriente de casi el doble comparado con la tecnología convencional.

2.3 MARCO TEORICO

2.3.1 FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA TECNOLOGÍA EMEW®^[8]

Ley de Fick

La ley de Fick tiene lugar en aquellos sistemas termodinámicos multicomponentes donde existe un gradiente de concentración de alguno de los reactivos o productos de reacción. Esto se debe a que se genera un movimiento o flujo de componentes desde los lugares de alta concentración a los de baja concentración, este flujo corresponde al fenómeno de difusión. La difusión tiende a volver el sistema al estado de equilibrio, es decir, a aquel de concentración constante y uniforme. Fick plantea que el flujo difusivo que atraviesa una superficie, denominado J medido en $[\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}]$, es directamente proporcional al gradiente de concentración. Este gradiente de proporcionalidad se llama coeficiente de difusión, se denomina D y se mide en $[\text{cm}^2/\text{s}]$.

Existen estudios donde se ha determinado experimentalmente el valor del coeficiente de difusión de los iones de H^+ en minerales oxidados de cobre, entregando valores desde $1,2 \cdot 10^5$ a $2,2 \cdot 10^5$ $[\text{cm}^2/\text{min}]$, los que dependen de la concentración de ácido utilizada, los días de lixiviación y la distancia que logra penetrar la solución lixivante en la partícula^[9].

$$J \approx D \frac{\Delta c}{\delta} \quad 2.1$$

Dónde:

- J : Flujo difusivo ($\text{mol}/\text{cm}^2/\text{s}$)
- D : Coeficiente de difusión (cm^2/s)
- Δc : Variación de concentraciones (mol)
- δ : Espesor de la capa límite (cm)

Ley de Fick Electroquímica

$$i = zFD \frac{(C_b - C_s)}{\delta} \quad 2.2$$

Dónde:

- i : Densidad de corriente (A/m^2)
- z : N° de carga (Para cobre $z = 2$)
- F : Constante de Faraday ($96500 A*s/mol$)
- D : Coeficiente de difusión (m^2/s)
- C_b : Concentración del reactante en el seno de la solución ($Kmol/m^3$)
- C_s : Concentración del reactante en el sitio de reacción ($Kmol/m^3$)
- δ : Espesor de la capa de difusión; (δ) = 0.1 mm (acuosa, 25°C)

Densidad de corriente límite (i_L)

$C_s = 0 \Rightarrow$ Densidad de corriente alcanza un valor máximo

$$i_L = zFD \frac{C_b}{\delta} \quad 2.3$$

Si asumimos

$$k = \frac{D}{\delta} \quad 2.4$$

Entonces:

$$i_L = zFkC_b \quad 2.5$$

Dónde:

- i_L : Densidad de corriente límite (A/m^2)

Efecto de la agitación

Al agitar una solución, disminuye el espesor de la capa de difusión (δ), de manera que la densidad de corriente límite aumenta. Esto explica la posibilidad de trabajar con altas densidades de corriente en el proceso de Electrowinning utilizando celdas EMEW®.

Cuantificación de la dependencia de i_L en función de las propiedades del fluido.

Relación de Colburn-Chilton para reactor tubular:

$$Sh = 0.023Re^a Sc^{1/3} \quad 2.6$$

Dónde:

- a : 0.8 (régimen turbulento) y 0.5 (régimen laminar)
- Sh : N° de Sherwood
- Re : N° de Reynolds
- Sc : N° de Schmidt

Si desarrollamos la expresión, obtenemos:

$$\left[\frac{kd}{D}\right] = 0.023 \left[\frac{du\rho}{\mu}\right]^a \left[\frac{\mu}{\rho D}\right]^{1/3} \quad 2.7$$

Dónde:

- k : Coeficiente de transferencia de masa (m/s)
- d : Radio hidráulico (4*área/perímetro mojado) (m)
- u : Velocidad lineal del fluido (m/s)
- ρ : Densidad del fluido (kg/m³)
- μ : Viscosidad del fluido (kg/m·s)

Entonces, si de la ecuación anterior despejamos k y la sustituimos en la ecuación (2.2) de la ley de Fick electroquímica, obtenemos:

$$i_L = 0.023zFC_b \left[\frac{D}{d}\right] \left[\frac{du\rho}{\mu}\right]^a \left[\frac{\mu}{\rho D}\right]^{1/3} \quad 2.8$$

Para evaluar el cambio en i_L causado por una variación en las propiedades físicas o en la geometría del sistema se tiene la ecuación de diseño:

$$\frac{i_{L1}}{i_{L2}} = \frac{c_{b1}}{c_{b2}} \left[\frac{d_2}{d_1}\right]^{1-a} \left[\frac{u_1}{u_2}\right]^a \left[\frac{D_1}{D_2}\right]^{2/3} \left[\frac{\rho_1\mu_2}{\rho_2\mu_1}\right]^{a-1/3} \quad 2.9$$

El espesor de la capa de difusión (δ) está dado por una expresión empírica:

$$\delta = 3 \left(\frac{d}{u}\right)^{1/2} \left[\frac{\mu}{\rho}\right]^{1/6} D^{1/3} \quad 2.10$$

Dónde:

- D : Coeficiente de difusión (m²/s)
- d : Radio hidráulico [4*área/perímetro mojado] (m)

u	: Velocidad lineal del fluido (m/s)
ρ	: Densidad del fluido (kg/m^3)
μ	: Viscosidad del fluido ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

2.4 CONCEPTOS BASICOS DE ELECTRO OBTENCION^[10]

El proceso de Electro obtención constituye la etapa final del proceso productivo de la hidrometalurgia del cobre a partir de minerales oxidados y mixtos. El cobre se deposita por medio de electrólisis directa, a partir de soluciones concentradas de cobre (electrolito) provenientes de la etapa de Extracción por Solventes (SX), para la producción de cátodos de cobre con una pureza de un 99,99%.

En este tipo de procesos se utiliza actualmente cátodos de acero inoxidable 316L y ánodos insolubles laminados de una aleación Pb-Ca-Sn.

La celda electrolítica está compuesta por dos electrodos, ánodo (polo positivo) y cátodo (polo negativo), además del electrolito y la corriente circulante al interior de la celda.

En el polo positivo ocurre la siguiente reacción de oxidación:



Sobre el polo negativo ocurre la siguiente reacción de reducción:



El potencial termodinámico de la celda de electro obtención de cobre y que representa la siguiente expresión:



Dicho potencial está dado por la diferencia de potenciales de equilibrio de los electrodos, según:

$$\Delta E_{th} = E_{Cu}^0 - E_{O_2}^0 = 0,34[V] - 1,23[V] = -0,89[V] \quad 2.14$$

Para realizar la electrolisis es necesario aplicar entre los electrodos una diferencia de potencial mayor que la diferencia mínima de electrolisis, es decir un potencial mayor que 0,89 [V], esto debido a que se deben considerar otros factores como son los sobre potenciales y la caída óhmica en la celda.

El sobre potencial η , corresponde a la diferencia entre el potencial del electrodo cuando circula una corriente I y el potencial de equilibrio (cuando I=0), esto es:

$$\eta = E_I - E_{I=0} [V] \quad 2.15$$

La caída óhmica involucra la resistencia que opone al paso de la corriente, sea el electrolito, resistencia de contactos y barras usadas en el circuito entre otras.

Por lo tanto, desglosando los términos, la diferencia de potencial que se debe utilizar para lograr la reducción de cobre en el cátodo es la siguiente:

$$U = E_{Total} = \Delta E_{th} + \Delta \eta + IR \quad 2.16$$

Las reacciones más importantes producidas por las impurezas asociadas a pérdidas de eficiencia son:

En el cátodo la reducción de férrico a ferroso:



En el ánodo las oxidaciones de fierro y cloro llevan a modificar el potencial de éste trabajando a niveles levemente inferiores, producto de las intensidades bajas de ambas reacciones:



2.4.1 Ley de Faraday

“Un gramo electroquímico equivalente se produce en los electrodos por cada 96500 Coulombios de corriente que pasan por la celda electrolítica”

En la definición anterior se habló de gramo electroquímico equivalente, siendo éste el peso atómico en gramos dividido por la valencia.

Ley de Faraday:

$$M = \frac{PM \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad 2.20$$

Donde:

M	: Masa de material que reacciona [gr]
PM	: Peso Molecular de la especie que reacciona [gr/mol]
I	: Corriente circulante [A]
t	: Tiempo que la corriente circula [s]
n	: Electrones transferidos [Para Cobre n = 2]
F	: Constante de Faraday [96500 (A*s)/mol]

2.4.2 Eficiencia de Corriente

La eficiencia de corriente es la razón entre el cobre realmente recuperado y el cobre que teóricamente debiera depositarse para la cantidad de corriente y tiempo impuestos en el ciclo catódico que se obtuvo a través de la ley de Faraday.

$$E_f = \frac{M_{Real}}{M_{Teórica}} \times 100 \quad 2.21$$

Dónde:

E_f	: Eficiencia de corriente
M_{Real}	: Masa real
$M_{Teórica}$: Masa Farádica

Sin embargo existen pérdidas de corriente que impiden operar a un 100% de eficiencia, tales como:

- **Fugas de corriente**
- **Cortocircuitos**
- **Reacciones parasitas.**

Más información en capítulo Anexos, Anexo 2.

2.5 CELDA CONVENCIONAL V/S CELDA EMEW®

En la siguiente sección se muestra una comparación en términos operacionales y productivos de una planta convencional de electrowinning, como lo es la planta de la división RT, versus una planta anexa de producción de cobre vía tratamiento EMEW® con la cual se podrá visualizar una aproximación al trabajo realizado en este estudio.

2.5.1 Celda convencional

Para los siguientes cálculos se tomará en consideración el tamaño nominal y los datos operacionales de la planta de Electrowinning de la división RT, que cuenta con 984 celdas, una densidad de corriente media de 300 [A/m²], un flujo de electrolito de 15 [m³/h] y una eficiencia de corriente de 89%.

Ley de Ohms

$$V = I \cdot R \quad 2.22$$

Dónde:

- V : Voltaje (Voltios)
- I : Intensidad de corriente (Ampere)
- R : Resistencia (Ohms)

Datos reales de planta RT:

- I : 36000 [A]
- R : 5,8x10⁻⁵[omhs] (fuente: Presentación Proceso Electrowinning división Radomiro Tomic, año 2002).

$$V = 36000[A] \cdot 5,8 \cdot 10^{-5} = 2,0[V]$$

Densidad de corriente

Datos:

- I : 36000 [A]
- S_C : Superficie de depósito S=2[m²]
- N_C : Número de cátodos por celda N_C=60 cátodos

$$I_{CAT} = \frac{I}{N_C} \quad 2.23$$

$$I_{CAT} = \frac{36000[A]}{60} = 600[A]$$

$$i = \frac{I_{CAT}}{S_C} \quad 2.24$$

$$i = \frac{600[A]}{2[m^2]} = 300 \frac{[A]}{m^2}$$

Ley de Faraday: Se usará para calcular la masa farádica o masa teórica de cobre a depositar (Ec. 2.20).

$$M = \frac{PM \cdot i \cdot t}{n \cdot F}$$

Una variación de esta ecuación, es la siguiente:

$$M_F = EEQ \cdot N_C \cdot i \cdot S_C \cdot t \quad 2.25$$

Donde:

- M_F : Masa Farádica de Cobre [Ton/día]
- EEQ : Equivalente electroquímico [$1,1852 \cdot 10^{-6}$ (Ton/A*h)]
- N_C : Número de cátodos por celda $N_C=60$ cátodos
- i : Densidad de corriente [A/m^2]
- S_C : Superficie catódica [m^2]
- t : Tiempo que la corriente circula

Masa real

$$\eta = \frac{M_R}{M_F} \quad 2.26$$

Dónde:

- η : Eficiencia de corriente [$\eta = 0,89$]
- M_R : Masa real
- M_F : Masa Farádica ó Masa Teórica

Para este cálculo, se utiliza ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \cdot 984 \cdot 60 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 24$$

$$M_F = 1007,6 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Por lo tanto: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 1007,6 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,89 = 897 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Por cada celda:

$$M_R = \frac{897 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]}{984} = 0,911 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 911 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Consumo específico de energía

$$CEE = \frac{I \cdot N_C \cdot V_C \cdot t}{1000 \cdot M_R} \quad 2.27$$

Donde:

- CEE : Consumo específico de energía [Kwh/Kg]
- I : Corriente circulante [A]
- N_C : Número de cátodos por celda N_C=60 cátodos
- V_C : Voltaje por celda [V]
- t : Tiempo [h]
- M_R : Masa real depositada [Ton]

$$CEE = \frac{600 \cdot 60 \cdot 2,0 \cdot 24}{1000 \cdot 0,911} = 1896,8 \left[\frac{\text{w}}{\text{Kg} \cdot \text{h}} \right] = 1,9 \left[\frac{\text{Kwh}}{\text{Kg}} \right]$$

Balance de masa

$$\frac{dx}{dt} = q \cdot Cu_{in}^{2+} - q \cdot \left(\frac{x}{V}\right) - \frac{PM \cdot I \cdot t \cdot \eta}{n \cdot F} \quad 2.28$$

(Fuente: Charla Magistral Sr. Christian Hecker C. Gerente General Hecker S.A)

Donde:

- x : Masa de Cobre [Kg]
- V : Volumen de solución [m³]
- q : Flujo volumétrico de solución [m³/h]

Para Estado Estacionario: $\frac{dx}{dt} = 0$

Se obtiene:

$$0 = q \cdot Cu_{in}^{2+} - q \cdot Cu_{out}^{2+} - \frac{PM \cdot I \cdot \eta}{n \cdot F}$$

$$0 = q \cdot \Delta[Cu^{2+}] - \frac{PM \cdot I \cdot \eta}{n \cdot F}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{q} \cdot \frac{PM \cdot I \cdot \eta}{n \cdot F} \quad 2.29$$

Donde:

$\Delta[Cu^{2+}]$: Variación de masa de cobre respecto del flujo circulante [Kg/m³]

Por lo tanto:

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{15 \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s}\right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol}\right] \cdot 36000[A] \cdot 0,89}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol}\right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol}\right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 2,53 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Masa de descarte

$$m_{desc} = (0,5 - 2\%) \cdot M_R \quad 2.30$$

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 911 \left[\frac{Kg}{día} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{día}{h} \right]$$

$$m_{desc} = 0,57 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Eficiencia de tiempo

$$\eta_t = \frac{\text{días de trabajo}}{\text{días del año}} \quad 2.31$$

$$\eta_t = \frac{350}{365} = 0,959$$

Producción anual por celda

$$P_A = \left(q \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \Delta[Cu^{2+}] \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - m_{desc} \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot \eta_t \quad 2.32$$

$$P_A = \left(15 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 2,53 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - 0,57 \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot 0,959$$

$$P_A = 311755 \left[\frac{Kg}{año} \right] = 311,76 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Producción anual Nave EW convencional (Codelco RT) completa

$$P_A = 311,755 \left[\frac{Ton}{año} \right] \cdot 984 \text{ celdas} = 306767 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

2.5.2 Celda EMEW®

Supondremos una planta industrial EMEW® de 3200 celdas, un flujo de 20 [m³/h], una densidad de corriente media de 430 [A/m²] y una eficiencia de corriente de 90%.

Ley de Ohms: Utilizando ecuación 2.22

$$V = 215[A] \cdot 0.0116 = 2,5[V]$$

Densidad de corriente: Utilizando ecuación 2.24

$$i = \frac{215[A]}{0,5[m^2]} = 430 \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

Ley de Faraday: Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \cdot 3200 \cdot 1 \cdot 430 \cdot 0,5 \cdot 24$$

$$M_F = 19,57 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Masa real: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 19,57 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9 = 17,61 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Por cada celda:

$$M_R = \frac{17,61 \left[\frac{Ton}{día} \right]}{3200} = 0,0055 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 5,5 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Consumo específico de energía: Utilizando ecuación 2.27

$$CEE = \frac{215 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 24}{1000 \cdot 0,0055} = 2345,5 \left[\frac{w}{Kg \cdot h} \right] = 2,346 \left[\frac{Kwh}{Kg} \right]$$

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 215[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0115 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 5,5 \left[\frac{Kg}{día} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{día}{h} \right]$$

$$m_{desc} = 0,0034 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizando ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizando ecuación 2.32

$$P_A = \left(20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 0,0115 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - 0,0034 \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 1945,31 \left[\frac{Kg}{año} \right] = 1,94531 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Producción anual Planta EMEW® completa

$$P_A = 1,94531 \left[\frac{Ton}{año} \right] \cdot 3200 \text{ celdas} = 6225 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

De los cálculos realizados podemos concluir que la tecnología EMEW® no puede reemplazar bajo ningún aspecto al proceso EW convencional, por un lado está el más alto costo de producción por utilización de energía y por otro lado están los niveles de procesamiento de cada una de las plantas. Mientras una celda convencional produce 911 [Kg/día], una celda EMEW® produce 5,5 [Kg/día], es decir, un 0,6% por cada celda. Por lo tanto, se reitera que este es un proceso anexo al actual y no un proceso de reemplazo. Como planta anexa, la tecnología EMEW® aportaría (según los cálculos anteriores) 6225 [Ton/año], aumentando la producción nominal de RT de 306000 [Ton/año] a un valor cercano a las 313000 toneladas de cobre, es decir, un incremento de un 2% en su producción anual.

En términos económicos sería:

$$\text{Ingreso} = 6225[\text{Ton}] * 2200 \left[\frac{\text{lb}}{\text{Ton}} \right] * 3,0 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{lb}} \right] = 41085000 \text{ U\$D}$$

3 CAPITULO 3: PRUEBAS A ESCALA PILOTO PARA UTILIZACIÓN DE TECNOLOGIA EMEW® EN PLANTA RADOMIRO TOMIC

A continuación se describe el proceso de pruebas y trabajo a escala piloto realizado en la planta de electro winning de la división RT, en estas pruebas se buscó determinar la viabilidad de incorporar la operación de las celdas EMEW® como parte del proceso productivo.

3.1 COMPOSICIÓN GENERAL DEL ELECTROLITO, CODELCO RADOMIRO TOMIC

A continuación se resume la caracterización de las soluciones tratadas en las pruebas de pilotaje.

Batch 1	
Cu⁺² (gpl)	42,5
H⁺ (gpl)	191
Fe³⁺ (ppm)	901
Fe²⁺ (ppm)	35
Co (ppm)	198
Cl⁻ (ppm)	39,2
Mn (ppm)	-

Batch 2	
Cu⁺² (gpl)	36,6
H⁺ (gpl)	193
Fe³⁺ (ppm)	895
Fe²⁺ (ppm)	104
Co (ppm)	159
Cl⁻ (ppm)	46,7
Mn (ppm)	16

Batch 3	
Cu⁺² (gpl)	38,9
H⁺ (gpl)	200
Fe³⁺ (ppm)	988
Fe²⁺ (ppm)	20
Co (ppm)	164
Cl⁻ (ppm)	44,5
Mn (ppm)	11

Batch 4	
Cu⁺² (gpl)	16,6
H⁺ (gpl)	85
Fe³⁺ (ppm)	558
Fe²⁺ (ppm)	227
Co (ppm)	80
Cl⁻ (ppm)	23,7
Mn (ppm)	11

3.2 PRUEBAS PILOTO REALIZADAS EN CODELCO RT

Para realizar una evaluación técnica y económica de la aplicación de tecnología EMEW® en Codelco Radomiro Tomic, se efectuaron una serie de pruebas piloto con el objetivo de encontrar los parámetros operacionales óptimos que permitieran tratar la solución descarte con una alta eficiencia de corriente. Esto se logró a través del tratamiento de cuatro batch de soluciones bajo diferentes parámetros de operación. Desde este punto, se entenderá por batch a un volumen de solución de concentración inicial de cobre conocida que será objeto de estudio. El tratamiento de dichas soluciones consistió en recircular cada una de ellas por las celdas EMEW® en un régimen fluido dinámico turbulento, aplicando densidades de corriente entre 350 y 600 [A/m²] hasta agotar su concentración de cobre a 5 [gpl] y, produciendo cátodos de cobre en forma de cilindros de 6 [pulg] de diámetro y 1.2 [m] de altura. Con la información obtenida en las pruebas se ha podido estimar la eficiencia de corriente correspondiente a un rango de concentraciones, con la relación [Peso real/Peso teórico] de los cátodos obtenidos, con el objetivo de encontrar el mejor valor para los rangos de concentración de cobre en que se realizará la aplicación industrial.

La **Figura 3.1** muestra un esquema del agotamiento de la concentración de Cobre durante el desarrollo de una prueba EMEW®.

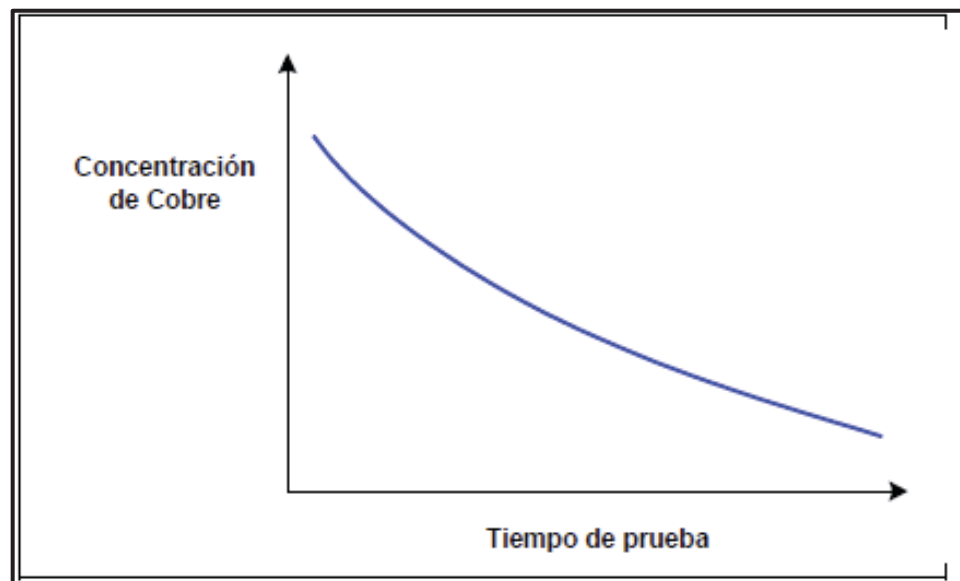


Figura 3.1: Evolución de concentración de cobre en transcurso de pruebas de pilotaje EMEW®.

3.2.1 Instalación de la planta piloto

La planta piloto descrita anteriormente fue instalada en galpón Mini-Planta ubicado en el patio Norte-Norte del área de Electrowinning de Codelco RT, frente al Banco 6 de la nave. Para el emplazamiento se utilizó un monta carga para 2.5 [Ton].

Los componentes que forman la Planta Piloto EMEW® fueron trasladados dentro de un container de 20 [pies] vía terrestre junto con un estanque para solución de 7.5 [m³] hasta las dependencias de RT donde fue instalada. Una vez en el lugar, los componentes fueron descargados del container para su ensamblado con la ayuda del monta carga.

Terminada esta labor, se procedió a conectar los elementos de la línea hidráulica propios de la planta piloto, junto con la unión al estanque de alimentación. Con la ayuda de personal de Codelco se realizaron las conexiones eléctricas destinadas a suministrar de energía al rectificador y bombas de la planta piloto. Estando la planta en condiciones de ser puesta en funcionamiento, se efectuó una prueba hidráulica con agua para descartar las posibles filtraciones del sistema, asegurando de esta manera la correcta operación.

Instalada la línea de alimentación de electrolito, posteriormente se vació el sistema y se llenó con un volumen determinado de electrolito pobre (primer Batch) y se dio comienzo a las pruebas de pilotaje EMEW®.

En resumen, para la instalación de todo el sistema se requieren alrededor de 22 [m²]. Esto, basado en un largo total aproximado de 6,4 [m] y un ancho total aproximado de 3,3 [m] (estanque incluido).

3.3 PRUEBAS DE PILOTAJE

En esta sección se presentan los resultados y resumen de las pruebas de pilotaje llevadas a cabo en Codelco Radomiro Tomic. El detalle de los resultados de las pruebas se encuentra en el capítulo 7: Anexos, Anexo 3.

3.3.1 Resultados obtenidos a partir de electrolito pobre de Electrowinning

A continuación se resumen las pruebas realizadas con electrolito pobre proveniente de la nave de Electrowinning. Las muestras de electrolito recolectadas durante el desarrollo de las pruebas fueron analizadas por el laboratorio químico de Codelco Radomiro Tomic, en donde se les efectuó análisis de concentración de cobre y ácido, así como también de impurezas cuando fue necesario.

En las **Tablas 3.1, 3.2, 3.3** se presenta el resumen de los parámetros operacionales de las pruebas de pilotaje EMEW® realizadas con Electrolito Pobre.

Prueba	Cosecha 1	Cosecha 2	Cosecha 3
Fecha	16/12/11	19/12/11	23/12/11
Densidad de Corriente, A/m ²	500	400	350
Flujo, m ³ /h	9	9	9
Cobre inicial, gpl	42.5	31.1	18.7
Cobre final, gpl	31.1	18.7	6.3
Voltaje ,V	2.9	2.5	2.4
Conc. Acidez inicial, gpl	191	210	234
Conc. Acidez final, gpl	210	234	258
Tiempo de duración, h	72.5	91.5	112.2
Peso del cátodo, Kg	20.5	19.5	21
Eficiencia de corriente, %	94.6	89.8	91.8
Consumo de Energía, Kwh/Kg Cu	2.58	2.33	2.18

Tabla 3.1: Resumen de Pruebas a Electrolito Pobre de Electrowinning en Primer Batch.

Prueba	Cosecha 4	Cosecha 5	Cosecha 6
Fecha	10/01/2012	13/01/2012	16/01/2012
Densidad de Corriente, A/m ²	600	500	400
Flujo, m ³ /h	9	9	9
Cobre Inicial, gpl	36,6	24,6	11,4
Cobre final, gpl	24,6	11,4	2,8
Voltaje ,V	2,8	2,6	2,5
Conc. Acidez inicial, gpl	193	217	239
Conc. Acidez final, gpl	217	239	248
Tiempo de duración, h	66,94	75,42	70,85
Peso del cátodo, Kg	21,50	21,00	14,50
Eficiencia de corriente, %	90,3	94,7	86,3
Consumo de Energía, Kwh/Kg Cu	2,58	2,33	2,41

Tabla 3.2: Resumen de Pruebas a Electrolito Pobre de Electrowinning en Segundo Batch.

Prueba	Cosecha 7	Cosecha 8	Cosecha 9
Fecha	20/01/2012	23/01/2012	27/01/2012
Densidad de Corriente, A/m ²	550	450	400
Flujo, m ³ /h	9,6	9,6	9,6
Cobre Inicial, gpl	39,0	29,3	17,2
Cobre final, gpl	29,3	17,2	4,9
Voltaje ,V	2,6	2,5	2,4
Conc. Acidez inicial, gpl	200	212	233
Conc. Acidez final, gpl	212	233	255
Tiempo de duración, h	69,17	92,86	103,72
Peso del cátodo, Kg	21,50	21,00	21,00
Eficiencia de corriente, %	90,9	90,7	85,4
Consumo de Energía, Kwh/Kg Cu	2,42	2,32	2,38

Tabla 3.3: Resumen de Pruebas a Electrolito Pobre de Electrowinning en Tercer Batch.

En las **Figuras 3.2, 3.3, 3.4** se muestra el agotamiento de la solución a lo largo de los diferentes batch de prueba.

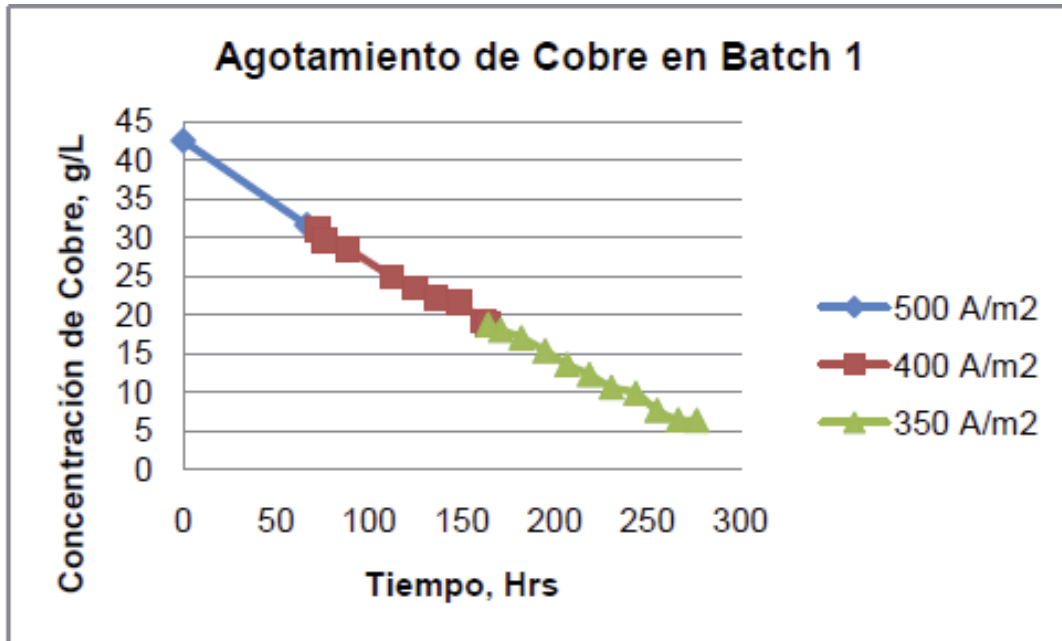


Figura 3.2: Agotamiento de Cobre en Pruebas de Batch 1.

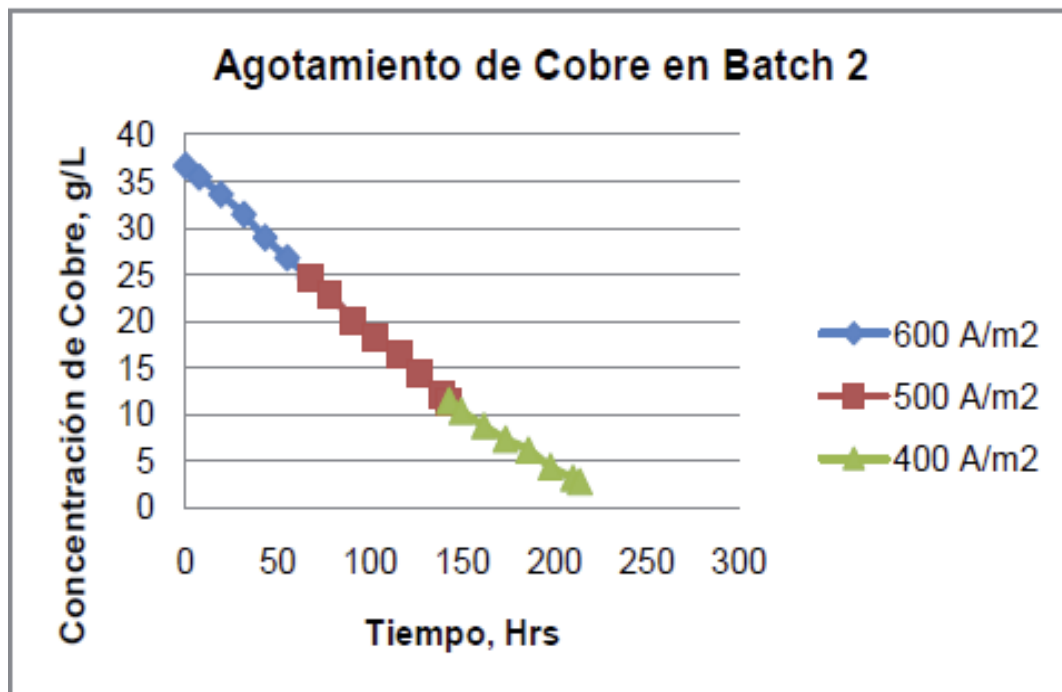


Figura 3.3: Agotamiento de Cobre en Pruebas de Batch 2.

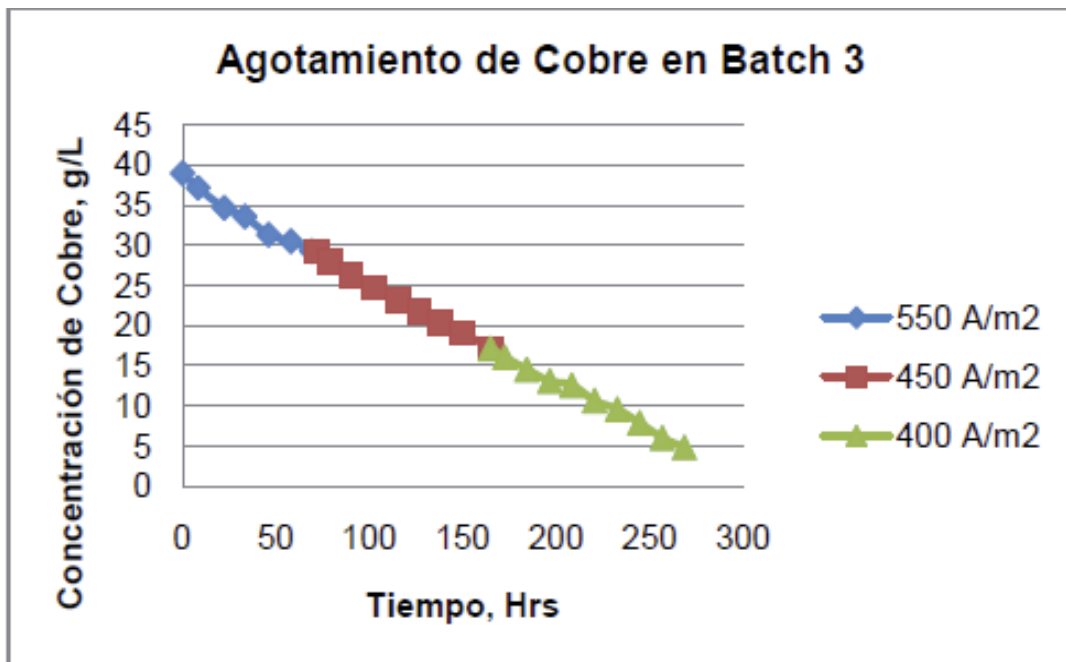


Figura 3.4: Agotamiento de Cobre en Pruebas de Batch 3.

Las eficiencias de corriente obtenidas en las diferentes pruebas, han sido graficadas y se muestran en la **Figura 3.5**.

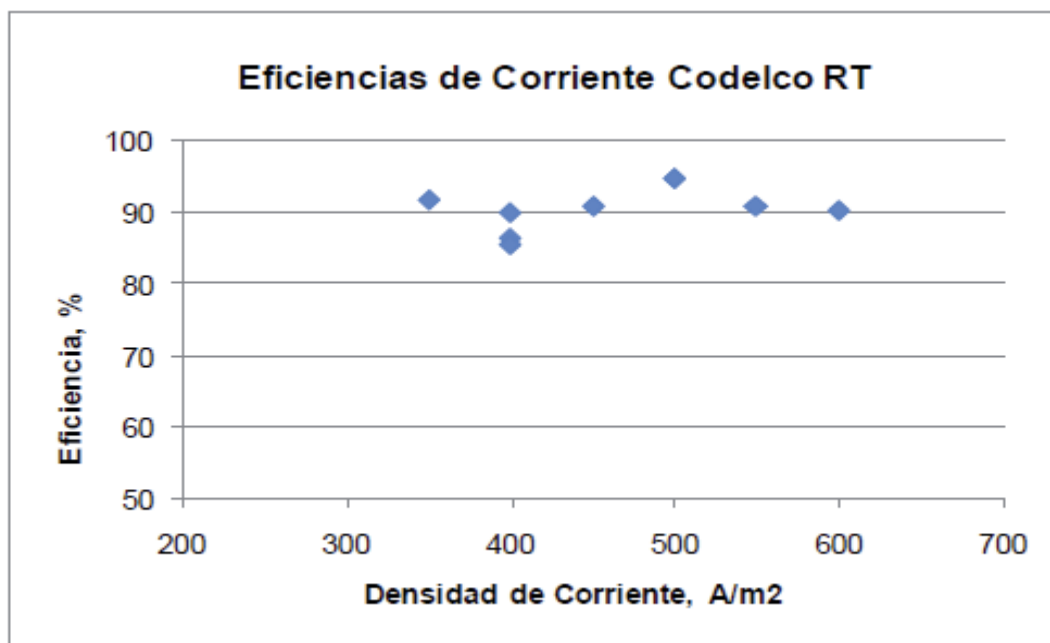


Figura 3.5: Eficiencias de corriente en pruebas piloto EMEW® en Codelco RT.

Los cátodos de cobre cosechados en las distintas pruebas realizadas fueron entregados a Codelco para que se efectuara el respectivo análisis químico que determinaría la calidad del producto final. Los cátodos entregados para análisis químico corresponden a aquellos obtenidos de la celda 1, a excepción de las pruebas 1 y 9, de las cuales se entregó el cátodo 2 debido a que con los cátodos de la celda 1 se hicieron ensayos de muestreo para evaluar el método con que se tomaría la respectiva muestra para el análisis químico. **Figura 3.6.**



Figura 3.6: Cátodos obtenidos y decoloración de solución tratada.

En la **Tabla 3.4**, se muestran los resultados de los análisis químicos realizados a los cátodos correspondientes a los primeros tres batch de electrolito pobre de Electrowinning.

Cátodo	Cu	Ag	As	Bi	C	Cd	Fe	Ni	Pb	S	Sb	Sn	Te	Zn
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
P01/C1	99,999	0,2	<0,2	<0,1	25	<0,1	0,5	<0,2	<0,1	2	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P01/C2	99,999	0,2	<0,2	<0,1	23	<0,1	3,7	<0,2	<0,1	2	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P02/C1	99,999	0,1	<0,2	<0,1	31	<0,1	2,1	<0,2	<0,1	3	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P03/C1	99,988	0,1	<0,2	<0,1	76	<0,1	2	<0,2	0,2	114	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P04/C1	99,999	0,1	<0,2	<0,1	27	<0,1	2	<0,2	<0,1	3	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P05/C1	99,972	0,1	<0,2	<0,1	52	<0,1	2,4	<0,2	<0,1	271	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P06/C1	99,994	0,1	<0,2	<0,1	35	<0,1	0,7	<0,2	<0,1	52	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P07/C1	99,998	0,1	<0,2	<0,1	28	<0,1	1	<0,2	<0,1	11	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P08/C1	99,999	0,1	<0,2	<0,1	21	<0,1	1,6	<0,2	<0,1	2	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P09/C2	99,996	0,1	<0,2	<0,1	24	<0,1	1,3	<0,2	<0,1	34	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4

Tabla 3.4: Resultados de análisis químico a cátodos EMEW® Pruebas 1 a 9.

En **Tabla 3.5** se presenta el peso de los cátodos obtenidos para los distintos batch con sus respectivas pruebas.

PRUEBA EMEW®			Peso, Kg		
Cosecha	Batch	Tipo solución	Cátodo 1	Cátodo 2	Cátodo 3
1	1	E. Pobre	20.5	20.0	20.5
2	1	E. Pobre	19.5	19.5	19.5
3	1	E. Pobre	21.5	21.5	21.0
4	2	E. Pobre	21.5	21.5	21.5
5	2	E. Pobre	21.5	21.0	21.0
6	2	E. Pobre	14.5	14.5	14.5
7	3	E. Pobre	20.0	7.0	21.0
8	3	E. Pobre	22.5	22.5	22.5
9	3	E. Pobre	21.0	21.0	21.0

Tabla 3.5: Peso de cátodos obtenidos a partir de Electrolito Pobre.

3.4 DISCUSIONES

- **Electrolito pobre de descarte**

Se comprueba que con la tecnología EMEW® es posible producir cátodos de excelente calidad (LME Grado A) con elevadas eficiencias de corriente a partir de soluciones de descarte de la nave de Electrowinning, y se cumple con éxito una parte de los objetivos de estas pruebas, que es confirmar las óptimas condiciones de operación para producir cátodos de Cobre.

- **Variables de operación**

Considerando las concentraciones de cobre iniciales y finales de cada uno de los batch tratados en estas pruebas, se ha podido demostrar que la tecnología EMEW® permite trabajar en rangos de concentración de cobre donde la tecnología convencional de Electrowinning no puede. En estas partidas de prueba, la concentración de cobre disminuyó hasta 2.78 [gpl], sin embargo, se recomienda operar sobre los 5 [gpl] para no perjudicar la eficiencia de corriente. La versatilidad operacional que posee la tecnología EMEW® permite ajustar la densidad de corriente en función de la concentración de cobre, generando

soluciones diluidas y alta acidez que pueden ser enviadas a refino, disminuyendo la carga circulante de cobre en el proceso y evitando, por ejemplo, pérdidas por anegamiento o pozas en la etapa de lixiviación en pilas.

- **Eficiencia de corriente**

Las eficiencias de corriente obtenidas en las diferentes pruebas realizadas, están entre 85.4 y 94.7%, consideradas altas para los rangos de concentración tratados (42.51 – 2.78 [gpl]) y las densidades de corriente empleadas (600 – 350 [A/m²]). A su vez, es importante considerar que la eficiencia de corriente media en la nave de Electrowinning de codelco RT es de 89% operando a una densidad de corriente media de 300 [A/m²] y concentraciones entre 54.31 y 38.47 [gpl] de cobre para el electrolito de avance y spent, respectivamente.

- **Consumo específico de energía**

Como se aprecia en las tablas 3.1, 3.2, 3.3, el consumo específico de energía (CEE) obtenido en las pruebas, fluctuó entre los 2.18 y 2.58 [Kwh/Kg de cobre depositado] para aplicaciones de densidad de corriente entre 300 y 600 [A/m²]. Para plantas convencionales este consumo es menor, variando entre los 1.8 y 2.2 [Kwh/Kg de cobre], sin embargo, muy rara vez pueden alcanzar densidades de corriente superiores a 300 – 350 [A/m²] sin tener problemas operacionales.

- **Calidad catódica**

Como se puede apreciar en la tabla 3.4, donde se presentan los análisis químicos realizados por RT a las muestras tomadas a los cátodos EMEW®, las pruebas realizadas tuvieron como resultado cátodos de cobre que cumplen con la designación de la Bolsa de Metales de Londres (BML o LME, su sigla en inglés) para la calidad catódica Grado A. Además, la exigencia de Codelco RT respecto a la tolerancia de impurezas es más alta que la clasificación de la BML, por lo que este cobre EMEW® podría ser clasificado en una categoría superior a Grado A. El alto índice de azufre en algunos de los cátodos tiene directa relación con la limpieza de los mismos, pues fueron lavados con agua fría una vez cosechados y quedaron expuestos a gran contaminación de partículas en suspensión por un

periodo superior a dos meses. Por su parte, el método de muestreo utilizado para la obtención de los cospeles consistió en el corte de los cátodos con cierra de copa no especificada para cobre, lo que pudo contribuir a la presencia de Fe como impureza. Dado lo anterior, para efectuar el análisis químico de los cospeles es siempre recomendado realizar una limpieza exhaustiva con algún tipo de solución ácida diluida y luego un baño de agua caliente.

- **Facilidad de cosecha**

Como se aprecia en la **Figura 3.8**, la cosecha de los cátodos de Cobre desde las celdas EMEW® es sumamente simple, pues requiere sólo de un operador para realizar la maniobra. Los riesgos son mínimos y controlados al no existir contacto con electrolito ni neblina ácida.

- **Incidencia cobre proceso global**

Si los descartes de Electrowinning son tratados por medio de la celda EMEW®, además de aumentar la producción recuperando cobre desde soluciones que recirculan permanentemente una carga de este, se puede mejorar las condiciones de operación de la planta de EW existente. Lo anterior se explica debido a que si existe un mayor descarte desde la nave de EW se libera el sistema de la acumulación de impurezas, pudiendo elevar la densidad de corriente y, por lo tanto, la producción de cobre (permitiendo además mantener eficiencias de corriente altas). Si consideramos un flujo de refino del orden de 1600 [m³/h] con una concentración de cobre de unos 0.6 [gpl], procesar 20 [m³/h] en una planta EMEW® producirá 754 [kg cobre/h] y, por consiguiente, una disminución de 0.47 [gpl de cobre] en el refino, dejando a este en aproximadamente 0.13 [gpl de cobre]. Este efecto en el refino producirá un beneficio sobre la eficiencia de recuperación en las pilas, además del valor agregado al recuperar el cobre quitándolo del sistema.

Para corroborar lo mencionado, existe un trabajo de investigación realizado en la escuela de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso el cual da cuenta de un aumento de recuperación en la etapa de lixiviación de un 8,9% utilizando una mezcla de descarte EW (tratado con celdas EMEW®) con refino, respecto de otra

solución de descarte EW (sin tratamiento EMEW®) con refino. En esta investigación se aprecia como la menor carga de Cu en la solución de riego logra un aumento considerable en la recuperación, y que se condice con lo propuesto en la ley de Fick.^[11]

3.4.1 Resultados de las pruebas de compuesto de descarte de canaletas

Siguiendo el mismo objetivo de las pruebas estipuladas en el contrato pero fuera de sus alcances, se recolectó solución de las canaletas ubicadas frente a los estanques TK-401 y TK-408, y se realizó una prueba exploratoria con los siguientes parámetros:

Prueba: 10

Densidad de Corriente, A/m ²	350
Caudal Celda, m ³ /h/celda	10,8
Voltaje promedio celda, V	2,66
Rango Concentración de Cobre, gpl	16,67- 4,97
Temperatura,	Ambiente
Eficiencia de corriente, %	89,6
Calidad de Cobre	LME Grado A

Por medio de esta prueba se logró obtener dos cátodos de excelente calidad física y química a pesar de operar en un rango de concentración por debajo de los límites del EW convencional.

En la **Tabla 3.6** se presenta el resumen de los parámetros operacionales de la prueba de pilotaje EMEW® realizada con esta solución.

Prueba	10
Fecha	29/02/2012
Densidad de Corriente, A/m ²	350
Flujo, m ³ /h	10,8
Cobre Inicial, gpl	16,7
Cobre final, gpl	5,0
Voltaje, V	2,66
Conc. Acidez inicial, gpl	84
Conc. Acidez final, gpl	106
Tiempo de duración, h	115,58
Peso del cátodo, Kg	21,50
Eficiencia de corriente, %	89,6
Consumo de Energía, KWh/Kg Cu	2,51

Tabla 3.6: Resumen de parámetros operacionales en prueba con Compósito de canaletas.

La **Figura 3.7** muestra la curva de agotamiento de Cobre en la solución a través del tiempo de operación de la prueba.

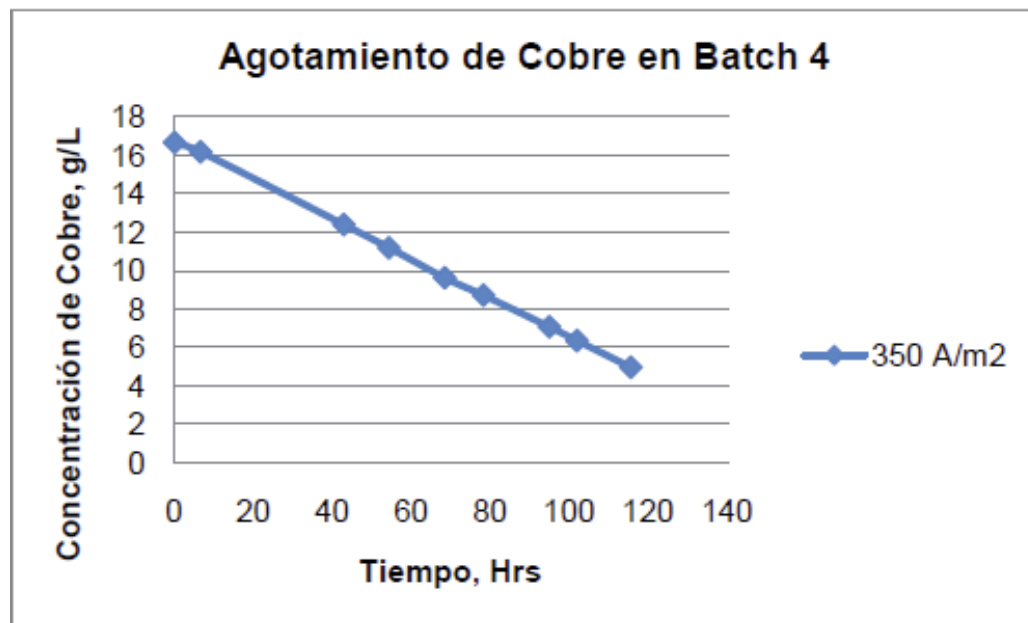


Figura 3.7: Agotamiento de Cobre en Pruebas de Batch 4.

De la prueba realizada con la solución de canaletas de la nave de EW, se obtuvieron los siguientes resultados, mostrados en las **Tablas 3.7 y 3.8**.

Cátodo	Cu	Ag	As	Bi	C	Cd	Fe	Ni	Pb	S	Sb	Sn	Te	Zn
	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
P10/C1	99,999	<0,1	<0,2	<0,1	122	<0,1	2,8	<0,2	<0,1	4	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4
P10/C2	99,999	<0,1	<0,2	<0,1	114	<0,1	2,3	<0,2	<0,1	4	<0,2	<0,5	<0,2	<0,4

Tabla 3.7: Análisis químico de cátodos EMEW® correspondiente al Compósito de Canaletas.

Pruebas EMEW®			Peso, Kg		
Cosecha	Batch	Tipo solución	Cátodo 1	Cátodo 2	Cátodo 3
10	4	Compósito Descarte	21.5	21,5	-

Tabla 3.8: Peso de cátodos obtenidos a partir de Compósito de Descarte de canaleta.

En este caso, el comportamiento de la prueba realizada a esta solución diluida fue muy similar a las pruebas antes mencionadas, obteniéndose una eficiencia de corriente de 89.6% y cátodos de 99.999% de pureza.

3.5 COSECHA DE CATODOS EN LAS PRUEBAS PILOTO

En la **Figura 3.8** se aprecian imágenes capturadas durante algunas de las cosechas de las pruebas piloto. En estas se puede ver la facilidad con que se realiza la cosecha de los cátodos desde las celdas EMEW® y la buena apariencia física que se obtiene a pesar de llevar la concentración de cobre muy por debajo de lo que la tecnología convencional de Electrowinning permite. Por otro lado, la **Figura 3.9** muestra el cambio en la coloración de las soluciones recolectadas durante las pruebas, lo que indica el agotamiento de cobre en solución a medida que transcurre el tiempo en las diferentes pruebas.



Figura 3.8: Cosecha de cátodos EMEW®.



Figura 3.9: Secuencia de decoloración de Electrolito en el tiempo.

En esta figura se puede ver, a la izquierda, la solución inicial del primer batch de pruebas con 42.51 [gpl] de cobre; mientras que a la derecha, la solución final que alcanzó 6.31 [gpl].

4 CAPITULO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA DE UTILIZAR TECNOLOGÍA EMEW® EN CODELCO RADOMIRO TOMIC

4.1 EVALUACIÓN TECNICA USANDO ELECTROLITO POBRE

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de pilotaje EMEW® efectuadas a electrolito pobre proveniente de Electrowinning, se han diseñado dos escenarios técnicos para el tratamiento de esta solución por medio de la tecnología EMEW®. El primero se refiere al tratamiento EMEW® en dos etapas, y el segundo basado en el tratamiento EMEW® en tres etapas.

La base de diseño para estos escenarios consistió en una solución de iguales características a la tratada en las pruebas piloto, presentada a continuación:

Electrolito Pobre:

Elemento	Concentración
Cu	42,51 gpl
H ⁺	190,65 gpl
Fe ³⁺	901 ppm
Temperatura	Ambiente
Fe ²⁺	35 ppm
Co	198 ppm
Cl ⁻	39,2 ppm

Tabla 4.1: Caracterización del electrolito utilizado en pruebas piloto.

La concentración de cobre en este electrolito pobre está por sobre el promedio del año 2009, que fue 38,46 [gpl], y por debajo del máximo que fue 44,45 [gpl]. Para este escenario se proponen dos configuraciones para el tratamiento de la solución. Estas pueden ser capaces de procesar un flujo de 20 [m³/h] y agotar la solución desde los 42,5 [gpl] (incluso 46) hasta 5 [gpl] utilizando densidades de corriente entre los 350 y 600 [A/m²].

a) **Tratamiento EMEW® en dos etapas:** Consiste en el procesamiento de la solución a través de una planta EMEW® dividida en dos etapas, con la finalidad de maximizar la eficiencia de corriente de la electro-depositación.

Esta alternativa considera una planta EMEW® de un total de 3150 celdas instaladas divididas en una sección de 2070 celdas operando entre 500 y 600 [A/m²], y otra sección de 1080 celdas operando a 350 [A/m²]. Esta planta permitirá producir aproximadamente 6480 toneladas de cobre, e inyectará alrededor de 9980 toneladas de ácido al sistema, en un año.

El electrolito usado es contenido en un estanque inicial, el cual mediante impulsión por bomba pasa a través de cada una de las celdas de cada etapa hasta llegar a una concentración aproximada de 5 [gpl], luego de esto el electrolito es repuesto en el estanque inicial repitiendo el proceso y el circuito

Esta configuración se muestra en la **Figura 4.1.**

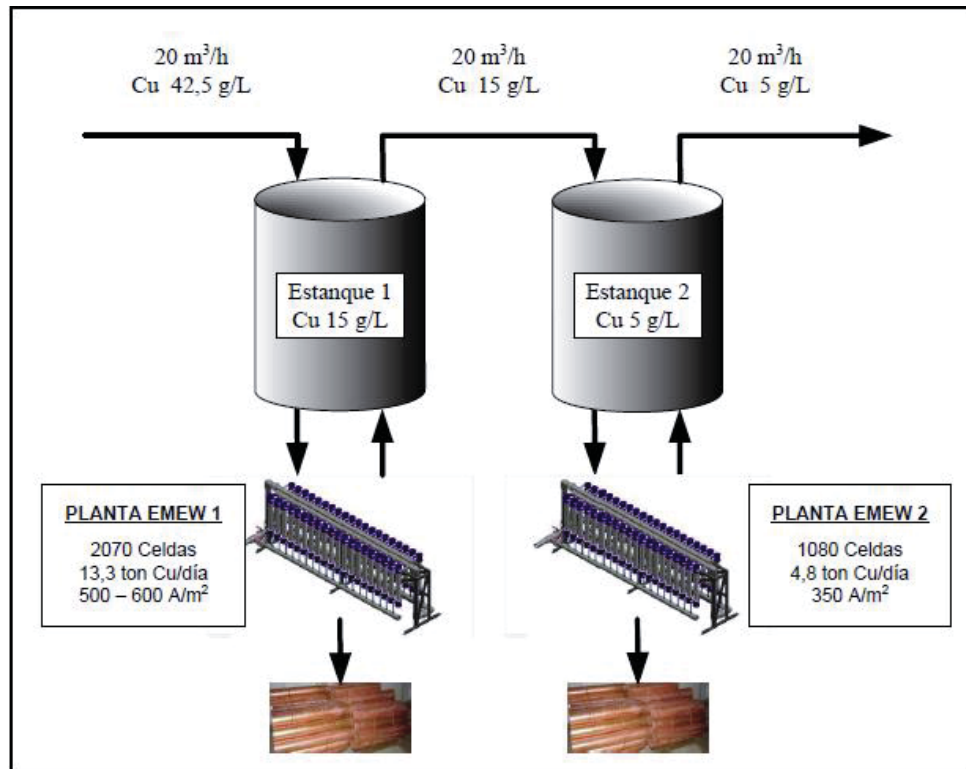


Figura 4.1: Diagrama esquemático de aplicación de Celdas EMEW® en Codelco RT para el tratamiento de EP en dos etapas.

b) **Tratamiento EMEW® en tres etapas:** Consiste en el procesamiento de la solución a través de tres etapas EMEW®. Al igual que en el caso anterior, con la finalidad de operar con la mayor eficiencia de corriente.

Esta configuración considera una planta EMEW® de un total de 3150 celdas instaladas divididas en una sección de 1320 celdas operando entre 500 y 600 [A/m²], una segunda sección de 750 celdas operando a 500 [A/m²], y una sección de 1080 celdas operando a 350 [A/m²]. Esta planta permitirá producir, al igual que la anterior, aproximadamente 6480 toneladas de Cobre, e inyectará alrededor de 9980 toneladas de ácido al sistema, en un año. El esquema de esta alternativa se muestra en la **Figura 4.2**.

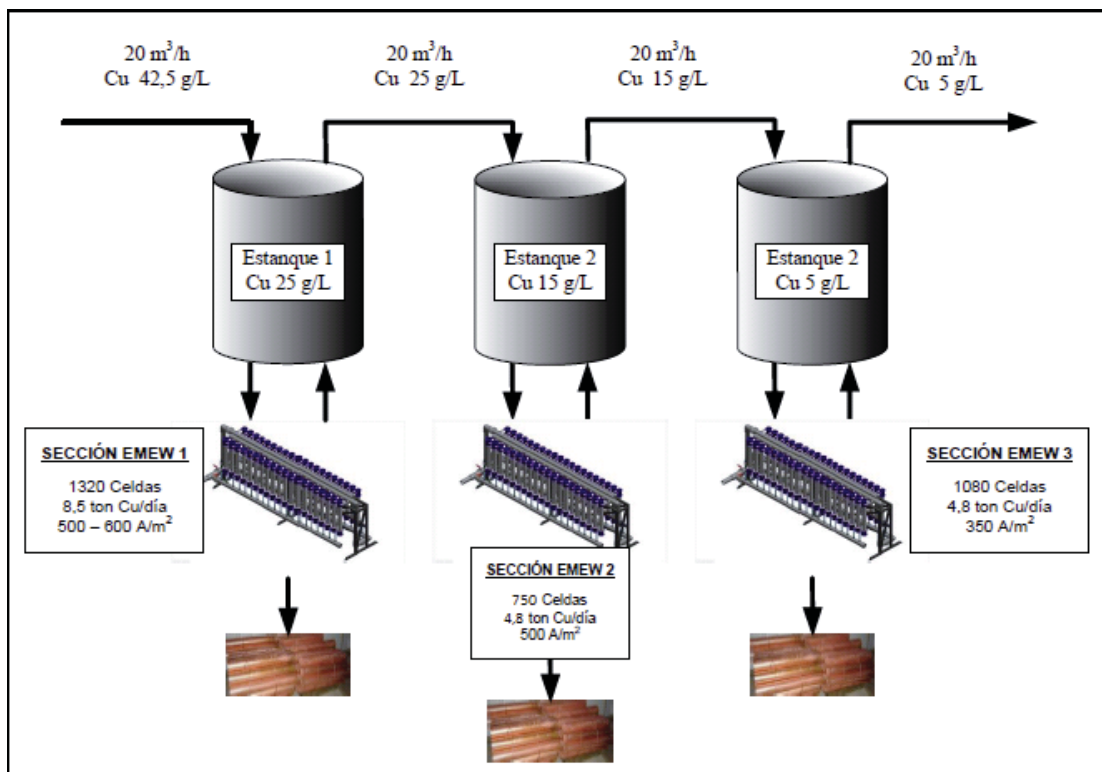


Figura 4.2. Diagrama esquemático de aplicación de Celdas EMEW en Codelco RT para el tratamiento de EP en tres etapas.

Las impurezas en ambos escenarios son despreciables, y no presentan una preocupación que pueda mermar la normal operación de las celdas.

4.2 CÁLCULOS DE DISEÑO DE PLANTA EMEW® PARA ELCETROLITO POBRE (DESCARTE)

Factores que se consideran para el diseño completo de una planta EMEW® se muestran en capítulo 7: Anexos, anexo 6.

4.2.1 Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en dos etapas

Volumen de una celda EMEW®

Utilizamos ecuación de cálculo para el volumen de un cilindro:

$$Vol = \pi \cdot \frac{d^2}{2} \cdot h \quad 4.1$$

Donde:

Vol	: Volumen de un cilindro [cm ³]
π	: Número pi
d	: diámetro del cilindro [cm] (6 pulg)
h	: Altura del cilindro [cm] (120 cm)

Se obtiene:

$$Vol = \pi \cdot \left[\frac{15,24}{2} \right]^2 [cm] \cdot 120[cm]$$

$$Vol = 21889,8[cm^3] \cong 22 [lt]$$

➤ Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]

Masa a tratar

$$M_{Cu} = q \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \Delta[Cu^{2+} (en la etapa)] \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right] \quad 4.2$$

Donde:

- M_{Cu} : Masa de cobre a producir [Ton/año]
 $\Delta[Cu^{2+}]$: Diferencia concentración de cobre en la etapa de tratamiento [Kg/m³]
 q : Flujo de solución circulante (m³/h)

De acuerdo a esto:

$$M_{Cu} = 20 \frac{m^3}{h} \cdot 27,5 \frac{Kg}{m^3} \cdot 8592 \frac{h}{año} = 4725,6 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = EQQ \cdot N_C \cdot i \cdot S_C \cdot t$$

$$4725,6 \left[\frac{Ton}{año} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot N_C \cdot 500 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5 [m^2] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right]$$

$$N_C = 1856,23 \text{ celdas}$$

Número real de celdas

$$N_C(\text{REAL}) = \frac{N_C}{\eta} \tag{4.3}$$

$$N_C = \frac{1856,23 \text{ celdas}}{0,9} = 2062,5 \text{ celdas}$$

Debido a que cada rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks

$$N_{RACKS} = \frac{N_C}{15} \tag{4.4}$$

$$N_{RACKS} = \frac{2062,5 \text{ celdas}}{15} = 137,5 \cong 138 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_C(\text{REAL}) = 138 \cdot 15 = 2070 \text{ celdas}$$

➤ **Sección 2, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Masa a tratar: Utilizando ecuación 4.2

$$M_{Cu} = 20 \frac{m^3}{h} \cdot 10 \frac{Kg}{m^3} \cdot 8592 \frac{h}{año} = 1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot N_C \cdot 350 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5 [m^2] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right]$$

$$N_C = 964,28 \text{ celdas}$$

Número real de celdas: Utilizando ecuación 4.3

$$N_C = \frac{964,28 \text{ celdas}}{0,9} = 1071,42 \text{ celdas}$$

Debido a que cada Rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks: Utilizando ecuación 4.4

$$N_{RACKS} = \frac{1071,42 \text{ celdas}}{15} = 71,43 \cong 72 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_C(\text{REAL}) = 72 \cdot 15 = 1080 \text{ celdas}$$

4.2.2 Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en dos etapas

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{q} \cdot \frac{PM \cdot I \cdot \eta}{n \cdot F}$$

➤ **Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]**

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 250[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0133 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot 1 \cdot 500 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5[m^2] \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right]$$

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 7,1 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 2070 = 14,72 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Producción diaria real por celda: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,0064 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 6,4 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 14,72 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9 = 13,3 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 6,4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{\text{día}}{\text{h}} \right]$$

$$m_{desc} = 0,004 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizando ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizando ecuación 2.32

$$P_A = \left(q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot \Delta[\text{Cu}^{2+}] \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] - m_{desc} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \cdot \eta_t$$

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 500 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot 0,0133 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] - 0,004 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 2249,02 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right] = 2,25 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

➤ **Sección 2, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 175[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0093 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot 1 \cdot 350 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5[m^2] \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right]$$

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 4,98 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 1080 = 5,376 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Por lo tanto:

Producción diaria real por celda: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 0,004978 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,00448 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 4,48 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 5,376 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9 = 4,8 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 4,48 \left[\frac{Kg}{día} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{día}{h} \right]$$

$$m_{desc} = 0,0028 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizamos ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizamos ecuación 2.32

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 350 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 0,0093 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - 0,0028 \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 1572,74 \left[\frac{Kg}{año} \right] = 1,573 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Producción anual de cobre en planta

Basado en los cálculos realizados, la producción anual de cobre del sistema completo se estima según lo siguiente:

$$P_A = (\text{Prod. diaria sección1} + \text{Prod. diaria sección2}) \cdot 358 \cdot 4.5$$

$$P_A = \left(13,3 \left[\frac{Ton}{día} \right] + 4,8 \left[\frac{Ton}{día} \right] \right) \cdot 358 \left[\frac{días}{año} \right]$$

$$P_A(\text{cobre}) = 6479,8 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Producción anual de ácido sulfúrico

En el proceso de producción de cobre, además se genera ácido sulfúrico como producto secundario, según la relación cobre/ácido = 1/1,54

Por lo tanto:

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 6479,8 \left[\frac{\text{Ton Cu}^{2+}}{\text{año}} \right] \cdot 1,54 \left[\frac{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}{\text{Ton Cu}^{2+}} \right] \quad 4.6$$

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 9978,89 \left[\frac{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}{\text{año}} \right]$$

4.2.3 Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en tres etapas

➤ Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]

Masa a tratar: Utilizando ecuación 4.2

$$M_{Cu} = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 17,5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 8592 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 3007,2 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$3007,2 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{A} \cdot \text{h}} \right] \cdot N_c \cdot 500 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right] \cdot 0,5 [\text{m}^2] \cdot 8592 \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right]$$

$$N_c = 1181,24 \text{ celdas}$$

Número real de celdas: Utilizando ecuación 4.3

$$N_c = \frac{1181,24 \text{ celdas}}{0,9} = 1312,48 \text{ celdas}$$

Debido a que cada Rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks: Utilizando ecuación 4.4

$$N_{RACKS} = \frac{1312,48 \text{ celdas}}{15} = 87,49 \cong 88 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_C(\text{REAL}) = 88 \cdot 15 = 1320 \text{ celdas}$$

Sección 2, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]

Masa a tratar: Utilizando ecuación 4.2

$$M_{Cu} = 20 \frac{m^3}{h} \cdot 10 \frac{Kg}{m^3} \cdot 8592 \frac{h}{año} = 1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot N_C \cdot 500 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5 [m^2] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right]$$

$$N_C = 674,992 \text{ celdas}$$

Número real de celdas: Utilizando ecuación 4.3

$$N_C = \frac{674,992 \text{ celdas}}{0,9} = 749,99 \text{ celdas}$$

Debido a que cada Rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks: Utilizando ecuación 4.4

$$N_{RACKS} = \frac{749,991 \text{ celdas}}{15} = 49,99 \cong 50 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_C(\text{REAL}) = 50 \cdot 15 = 750 \text{ celdas}$$

➤ **Sección 3, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Masa a tratar: Utilizando ecuación 4.2

$$M_{Cu} = 20 \frac{m^3}{h} \cdot 10 \frac{Kg}{m^3} \cdot 8592 \frac{h}{año} = 1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$1718,4 \left[\frac{Ton}{año} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot N_c \cdot 350 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5 [m^2] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right]$$

$$N_c = 964,274 \text{ celdas}$$

Número real de celdas: Utilizando ecuación 4.3

$$N_c = \frac{964,274 \text{ celdas}}{0,9} = 1071,42 \text{ celdas}$$

Debido a que cada Rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks: Utilizando ecuación 4.4

$$N_{RACKS} = \frac{1071,42 \text{ celdas}}{15} = 71,42 \cong 72 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_c(\text{REAL}) = 72 \cdot 15 = 1080 \text{ celdas}$$

4.2.4 Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en tres etapas

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

De acuerdo a esto:

➤ Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 250[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0133 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot 1 \cdot 500 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5[m^2] \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right]$$

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 7,1 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 1320 = 9,4 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Por lo tanto:

Producción diaria real por celda: Utilizamos ecuación 2.26

$$M_R = 0,0071 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,0064 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 6,4 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 9,4 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 0,9 = 8,5 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 6,4 \left[\frac{Kg}{día} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{día}{h} \right]$$

$$m_{desc} = 0,004 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizando ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizando ecuación 2.32

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 500 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 0,0133 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - 0,004 \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 2249,2 \left[\frac{Kg}{año} \right] = 2,25 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

➤ **Sección 2, trabajando a una densidad de corriente de 500 [A/m²]**

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 250[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0133 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{A} \cdot \text{h}} \right] \cdot 1 \cdot 500 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right] \cdot 0,5 [\text{m}^2] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]$$

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 7,1 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,0071 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 750 = 5,325 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria real por celda: Utilizamos ecuación 2.26

$$M_R = 0,0071 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,0064 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 6,4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 5,325 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9 = 4,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Masa de descarte: Utilizamos ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 6,4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{\text{día}}{\text{h}} \right]$$

$$m_{desc} = 0,004 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizamos ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizamos ecuación 2.32

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 500 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot 0,0133 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] - 0,004 \left[\frac{Kg}{h} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right] \cdot 365 \left[\frac{días}{año} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 2249,2 \left[\frac{Kg}{año} \right] = 2,25 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

➤ **Sección 3, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[Cu^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{m^3}{h} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{Kg}{Kmol} \right] \cdot 175[A] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{A \cdot s}{mol} \right] \cdot 1000 \left[\frac{mol}{Kmol} \right]}$$

$$\Delta[Cu^{2+}] = 0,0093 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizamos ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot 1 \cdot 350 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5[m^2] \cdot 24 \left[\frac{h}{día} \right]$$

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{Ton}{día} \right] = 4,98 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{Ton}{día} \right] \cdot 1080 = 5,376 \left[\frac{Ton}{día} \right]$$

Por lo tanto:

Producción diaria real por celda: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 0,004978 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,00448 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 4,48 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 5,376 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9 = 4,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 4,48 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{\text{día}}{\text{h}} \right]$$

$$m_{desc} = 0,0028 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizando ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizando ecuación 2.32

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 350 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot 0,0093 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] - 0,0028 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 1572,74 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right] = 1,573 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

Producción anual de cobre

Basado en los cálculos realizados, la producción anual de cobre del sistema completo se estima según lo siguiente:

Utilizando ecuación 4.5

$$P_A = \left(8,5 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] + 4,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] + 4,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \right) \cdot 358 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right]$$

$$P_A(\text{cobre}) = 6479,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

Con los cálculos anteriores podemos concluir que no existen mayores diferencias entre la configuración de dos etapas y la configuración en tres etapas en temas operacionales o productivos, por lo que en adelante y para todos los efectos nos enfocaremos en el tratamiento de electrolito en una planta de dos etapas. Asumiendo con esto que una planta con dos conexiones (2 etapas) ocuparía menos área, menos recursos de tuberías y pipping, y presentaría con esto menos puntos de falla y por ende un mantenimiento más acabado en caso de falla, que una planta con 3 conexiones (3 etapas).

Producción anual de ácido sulfúrico

En el proceso de producción de cobre, además se genera ácido sulfúrico como producto secundario, según la relación estequiométrica cobre/ácido = 1/1,54.

Utilizando ecuación 4.6

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 6479,8 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right] \cdot 1,54 \left[\frac{\text{Ton } H_2SO_4}{\text{Ton } Cu^{2+}} \right]$$

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 9978,89 \left[\frac{\text{Ton } H_2SO_4}{\text{año}} \right]$$

4.2.5 Beneficio de la generación de ácido sulfúrico en el sistema

La generación de una solución rica en ácido sulfúrico, para ambos casos, incide directamente en el costo de operación de una planta hidrometalúrgica, ya que permite ahorrar en la compra de ácido sulfúrico fresco que se necesita para acidular el efluente de la planta de SX, llamado refino y que se deposita en la piscina del mismo nombre.

Un cálculo rápido sería el siguiente, considerando el precio con que la división RT compra el ácido fresco.

$$Ahorro = 9978,89 \left[\frac{\text{Ton } H_2SO_4}{\text{año}} \right] \cdot 88 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{Ton } H_2SO_4} \right]$$

$$Ahorro = 878240 \left[\frac{\text{U\$D}}{\text{año}} \right]$$

De acuerdo a lo anterior la división Radomiro Tomic ahorraría aproximadamente U\$D 878240 por año en concepto de compra de ácido sulfúrico fresco.

4.3 EVALUACION TECNICA PARA COMPOSITO DESCARTE (CANALETAS DEL AREA PATIO ESTANQUES Y SUMIDEROS)

Para este escenario se propone una configuración continua en una etapa, que puede ser conectada de forma paralela con más de un estanque para entregar mayor flexibilidad a la cosecha y/o mantenciones. Se recomienda una etapa debido a que la concentración de entrada de la solución es menor que los escenarios previos y, por lo tanto, la cantidad de cobre a depositar también lo es. Esto se esquematiza en la **Figura 4.3**.

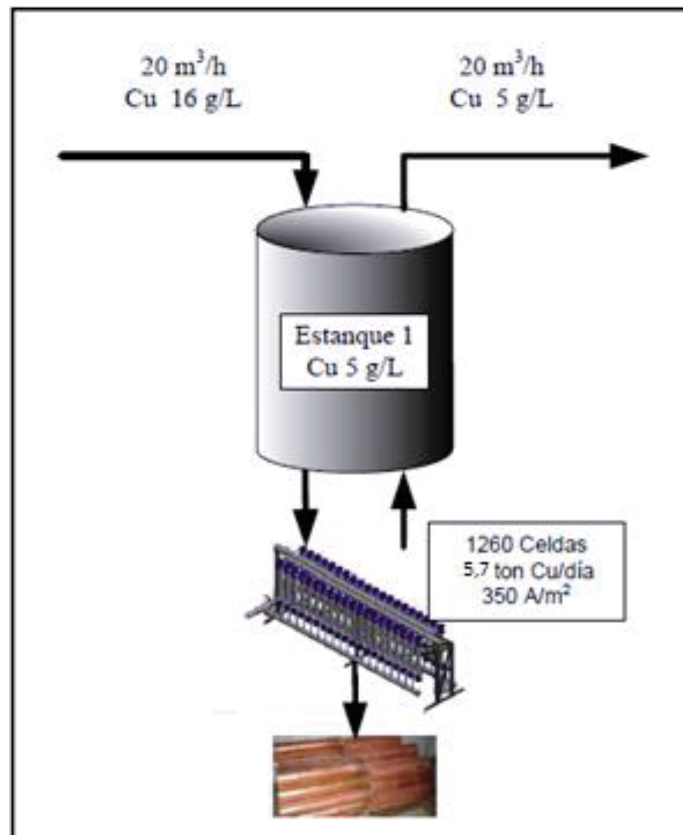


Figura 4.3: Diagrama esquemático de aplicación de Celdas EMEW en Codelco RT para el tratamiento de soluciones provenientes de Canaletas.

En esta configuración se cuenta con una planta EMEW® de 1260 celdas instaladas para procesar 20 [m³/h] y que opera a una densidad de corriente de 350 [A/m²]. Con esto se

logrará producir alrededor de 2040 toneladas de cobre fino al año en forma de cátodos EMEW® e inyectará al sistema aproximadamente 3140 toneladas de ácido sulfúrico.

4.4 CÁLCULOS DE DISEÑO DE PLANTA EMEW® PARA COMPOSITO DE DESCARTE DE CANALETAS

4.4.1 Cálculos de diseño para tratamiento EMEW® en compósito de descarte de canaletas

- **Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Masa a tratar: Utilizando ecuación 4.2

$$M_{Cu} = 20 \frac{m^3}{h} \cdot 11 \frac{Kg}{m^3} \cdot 8592 \frac{h}{año} = 1890,24 \left[\frac{Ton}{año} \right]$$

Cantidad de celdas: Utilizando ecuación 2.25

$$1890,24 \left[\frac{Ton}{año} \right] = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{Ton}{A \cdot h} \right] \cdot N_C \cdot 330 \left[\frac{A}{m^2} \right] \cdot 0,5 [m^2] \cdot 8592 \left[\frac{h}{año} \right]$$

$$N_C = 1124,99 \text{ celdas}$$

Número real de celdas: Utilizando ecuación 4.3

$$N_C = \frac{1124,99 \text{ celdas}}{0,9} = 1249,98 \text{ celdas}$$

Debido a que cada Rack de celdas equivale a un grupo de 15 unidades, se debe recalcular el valor total de celdas:

Número de racks: Utilizando ecuación 4.4

$$N_{RACKS} = \frac{1249,98 \text{ celdas}}{15} = 83,33 \cong 84 \text{ Racks}$$

Por lo tanto:

$$N_C(\text{REAL}) = 84 \cdot 15 = 1260 \text{ celdas}$$

4.4.2 Cálculos de producción para tratamiento EMEW® en compuesto de descarte

➤ **Sección 1, trabajando a una densidad de corriente de 350 [A/m²]**

Balance de masa: Utilizando ecuación 2.29

$$\Delta[\text{Cu}^{2+}] = \frac{1}{20 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{\text{h}}{\text{s}} \right]} \cdot \frac{63,5 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}} \right] \cdot 175 [\text{A}] \cdot 0,9}{2 \cdot 96500 \left[\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{mol}} \right] \cdot 1000 \left[\frac{\text{mol}}{\text{Kmol}} \right]}$$

$$\Delta[\text{Cu}^{2+}] = 0,0093 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Masa farádica: Utilizando ecuación 2.25

$$M_F = 1,1852 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Ton}}{\text{A} \cdot \text{h}} \right] \cdot 1 \cdot 350 \left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right] \cdot 0,5 [\text{m}^2] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]$$

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 4,978 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria por sección

$$M_F = 0,004978 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 1260 = 6,3 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria real por celda: Utilizando ecuación 2.26

$$M_R = 0,004978 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9$$

$$M_R = 0,00448 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] = 4,48 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Producción diaria real por sección

$$M_R = 6,3 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right] \cdot 0,9 = 5,7 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right]$$

Masa de descarte: Utilizando ecuación 2.30

$$m_{desc} = \frac{1,5}{100} \cdot 4,48 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{1}{24} \left[\frac{\text{día}}{\text{h}} \right]$$

$$m_{desc} = 0,0028 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

Eficiencia de tiempo: Utilizando ecuación 2.31

$$\eta_t = \frac{358}{365} = 0,98$$

Producción anual por celda: Utilizando ecuación 2.32

De acuerdo a lo anterior, para el cálculo de la producción anual por celda utilizando una densidad de corriente de 500 [A/m²], es el siguiente:

$$P_A = \left(20 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot 0,0093 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] - 0,0028 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right] \right) \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot 365 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}} \right] \cdot 0,98$$

$$P_A = 1572,74 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{año}} \right] = 1,573 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}} \right]$$

Producción anual de cobre

Basado en los cálculos realizados, la producción anual de cobre del sistema completo se estima según lo siguiente:

Utilizando ecuación 4.5

$$P_A = \left(5,7 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{día}}\right]\right) \cdot 358 \left[\frac{\text{días}}{\text{año}}\right]$$

$$P_A(\text{cobre}) = 2040,6 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{año}}\right]$$

Producción anual de ácido sulfúrico

En el proceso de producción de cobre, además se genera ácido sulfúrico como producto secundario, según la relación cobre/ácido = 1/1,54.

Utilizando ecuación 4.6

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 2040,6 \left[\frac{\text{TonCu}^{2+}}{\text{año}}\right] \cdot 1,54 \left[\frac{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}{\text{TonCu}^{2+}}\right]$$

$$P_A(\text{ac. sulfúrico}) = 3142,52 \left[\frac{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}{\text{año}}\right]$$

4.4.3 Beneficio en el sistema la generación de ácido sulfúrico

$$\text{Ahorro} = 3142,52 \left[\frac{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}{\text{año}}\right] \cdot 88 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{Ton H}_2\text{SO}_4}\right]$$

$$\text{Ahorro} = 276542 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{año}}\right]$$

De acuerdo a lo anterior la división Radomiro Tomic ahorraría aproximadamente US\$ 276542 por año en concepto de compra de ácido sulfúrico fresco.

5 CAPITULO 5: EVALUACION ECONOMICA PARA USO DE TECNOLOGÍA EMEW® EN CODELCO RADOMIRO TOMIC

5.1 EVALUACIÓN ECONOMICA PARA TRATAR DESCARTE ELECTROWINNING

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas piloto usando descarte de Electrowinning, a continuación se presenta el escenario de evaluación para la concentración de cobre presente en el electrolito a la entrada de la planta EMEW®. Se considera una aproximación global utilizando como base la plata EMEW® en dos etapas, debido a la casi nula diferencia entre ambas configuraciones de planta.

5.1.1 Condiciones generales de operación

El escenario evaluado corresponde a la siguiente concentración de cobre a la entrada de la planta de Electrowinning EMEW®.

- **42,5 gpl de Cobre**

Para esta evaluación se considera el caudal de trabajo de la planta EMEW®.

- **20 m³/h**

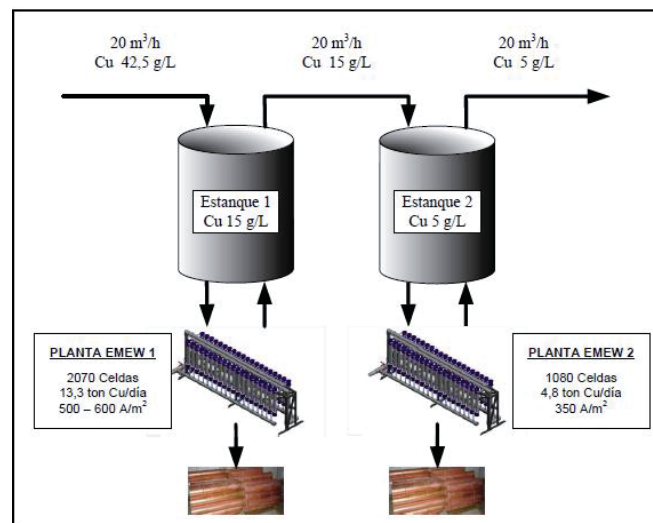
La composición química del electrolito proveniente de descarte de electrowinning con la cual se efectuó la evaluación económica es: **Tabla 5.1.**

Elemento	Concentración
Cu	42,51 gr/l
H ⁺	190,65 gr/l
Fe ³⁺	901 ppm
Fe ²⁺	35 ppm
Co	198 ppm
Cl ⁻	39,2 ppm

Tabla 5.1: Composición química del electrolito tratado en las pruebas con celdas EMEW®.

Configuración en dos etapas

El siguiente diagrama indica un esquema básico del flowsheet propuesto. En este el electrolito proveniente de la nave EW, es depositado en un estanque. Desde aquí es bombeado a través de cada una de las celdas, de cada una de las etapas hasta que el electrolito circulante queda agotado aproximadamente a 5 [gpl]. Luego de esto se repone el electrolito en el estanque inicial y el proceso se repite.



Bajo el esquema recomendado, cada una de las secciones EMEW® puede ser operada en condiciones diferentes, optimizando de modo de ajustarse a la concentración de Cobre progresivamente menor. Utilizando los criterios derivados de las pruebas piloto con descarte de Electrowinning, la planta se divide en 2 etapas, según sigue:

ETAPA 1

Concentración Cu Estanque 1	: 15 gr/l
Densidad de corriente	: 500-600 A/m ²
Eficiencia de corriente	: 90%
Potencial de producción	: 13,3 ton/día Cu
Producción de cobre	: 6,4 Kg/día/celda
Número de celdas instaladas	: 2070

ETAPA 2

Concentración Cu Estanque 2	: 5 gr/l
-----------------------------	----------

Densidad de corriente	: 350 A/m ²
Eficiencia de corriente	: 90%
Potencial de producción	: 4,8 ton/día Cu
Producción de cobre	: 4,4 Kg/día/celda
Número de celdas instaladas	: 1080

5.1.2 Costo y producción de una celda Convencional v/s una celda EMEW®

Al igual como se realizó capítulos antes con una comparación en temas productivos y de consumo energético, se presenta a continuación una comparación aproximada en cuanto a ingresos y egresos de una celda convencional versus una celda EMEW®, **Tablas 5.2 y 5.3**. De acuerdo con las tablas presentadas, se vuelve a concluir entonces que una planta EMEW® es un sistema anexo a la planta de electrowinning convencional existente.

Celda Convencional ^[12]

CELDA CONVENCIONAL			
Costos	Uso (Kg/día)	Precio (U\$/Kg)	Costo anual (U\$/año)
Celda y componentes			17,000
Reactivo Sulfato ferroso	100	0,19	6,935
Reactivo Sulfato de Cobalto	600	9,28	2,032,320
Acondicionador Quillay	160	10,58	617,872
Reactivo Guartec	Uso (lb/Ton Cu)	Precio (U\$/lb)	
	0,2	2,64	159,506
Total Aditivos (Reactivos + Acondicionador) (U\$)			2,816,630
Total Costos			2,833,630
Total Costos por Celda (984 unidades)			2,880
Producción	lb Cu	Precio (U\$/lb Cu)	Ingreso por producción
Cobre producido por celda	701470	3,0	2,104,410
Total Ingresos (Producción - Costos) (U\$)			2,101,530

Tabla 5.2: Costos v/s Producción de una celda EW convencional.

Celda EMEW®

CELDA EMEW®			
Costos			
Celda y componentes	U\$		3,600
Total Costos por Celda			3,600
Producción	Lb Cu	Precio (U\$/lb Cu)	Ingreso por producción
Cobre producido por celda	4950	3,0	17,672
Total Ingresos (Producción - Costos) (U\$)			14,072

Tabla 5.3: Costos v/s Producción de una celda EMEW®.

5.1.3 Costo de Inversión y Operación para una concentración de entrada a la Planta EMEW® de 42.5 gpl de Cu.

- **Costo Equipos principales.**
 - Rectificadores de corriente de 600 [A]: U\$D 5000
 - Bombas centrifugas 30 [m³/h]: U\$D 8000

A continuación en la **Tabla 5.4** se presenta los niveles de inversión. En anexo 8.5 al final de este informe se muestran los cálculos de la evaluación económica en detalle.

Planta EMEW®	
Costo celda EMEW® (fuente: Blumos S.A)	3.600
Costo Equipos principales CIF, U\$D	6.947.500
Costo total de inversión, U\$D	41.685.000

Tabla 5.4: Monto de inversión planta EMEW®.

- **Costo de Operación**

La **Tabla 5.5** presenta las suposiciones efectuadas para evaluar estos costos. Estas suposiciones se consideran para todos los escenarios propuestos.

Suposiciones		
Horas de producción	h	24
Días de producción	días	360
Costo horas hombre	U\$D/h	8
Precio promedio (2011) acido sulfúrico	U\$D/ton	88

Tabla 5.5: Suposiciones realizadas para evaluación de costos.

A partir de esto se obtiene para el proyecto el siguiente valor de costo total del producto. El detalle de este cálculo se encuentra en anexo 7.9.

Costo total del producto: U\$D 6,908,693

- **Ingresos**

Para efectuar esta evaluación se consideró el valor del Cobre en 2.0 U\$D/lb. En la **Tabla 5.6** se presentan los ingresos por dos conceptos. El primero considera la venta adicional de cobre producido por las celdas EMEW® desde la solución proveniente del descarte de Electrowinning y el segundo considera el ahorro de la compra de ácido debido a

que en esta operación se genera 1,54 gramos de ácido por gramo de cobre producido, y el consumo de ácido el año 2011 fue de 593957 [Ton].

Configuración planta EMEW®	Dos etapas
Cobre adicional producido por celdas EMEW, U\$D/año	\$ 28.512.000
Menor consumo de ácido por producción en las celdas, U\$D/año	\$ 878.240
Cobre adicional por aumento en recuperación en pilas	\$ 0
Cobre adicional por mayor intensidad de corriente en la nave de EW	\$ 0
Ingreso adicional por premio en mejor calidad de Cobre	\$ 0
Ingreso Total, U\$D/año	\$ 29.390.240

Tabla 5.6: Ingresos por venta de cobre y por ahorro en compra de ácido sulfúrico.

En la tabla 5.6 se muestran conceptos que se les asigna el valor de \$0, sin embargo, el tratamiento del descarte de EW debería tener como resultado los siguientes puntos:

- Cobre adicional por aumento en recuperación en pilas. Esto se debe a que la solución de refinación no tendrá el cobre que se está adicionando actualmente en el electrolito de descarte que se envía a la piscina de refinación. Esto tendría como incidencia una mayor eficiencia de recuperación en las pilas.
- Cobre adicional por mayor intensidad de corriente. Al descartar electrolito se libera el sistema de la acumulación de impurezas, por lo tanto, se podría aumentar la producción aumentando la densidad de corriente en la nave actual, siempre que este aumento no afecte la calidad del producto. Se debe además considerar que un aumento en la corriente de la nave actual de EW incrementará el costo energético
- Ingreso adicional por premio en mejor calidad de Cobre. Al liberar el sistema de contaminantes se asegura una mejor calidad del producto.

A continuación, en la **Tabla 5.7** se muestra un flujo de caja preliminar y general para la planta EMEW®.

		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
ingreso por ventas	+		26.047.472	29.390.240	29.390.240	29.390.240	29.390.240	29.390.240
costo total producto	-		6.122.936	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693
ingreso operacional	=		19.924.536	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547
intereses	-		-	-	-	-		
depreciación	-							
venta activo	+							-
PEA	-			-	-	-	-	-
utilidades antes de impuestos	=		19.924.536	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547
impuestos	-		3.387.171	3.821.863	3.821.863	3.821.863	3.821.863	3.821.863
depreciación	+		2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625
amortización	-				-	-		
PEA	+			-	-	-	-	-
valor de libro	+							14.589.750
capital de trabajo	+							6.947.500
inversión capital propio	-	41.685.000						
prestamo	+							
FCN	=	- 41.685.000	18.968.990	21.091.309	21.091.309	21.091.309	21.091.309	42.628.559
	VAN		5.384.841					
	TIR		46,26%					

Tabla 5.7: Flujos de caja preliminares con precio del Cobre en 2.0 USD/lb.

En la **Tabla 5.8** se muestra un análisis de sensibilidad según el precio del cobre. El objetivo de este análisis es mostrar que mientras más celeridad tenga el proyecto más atractivo se presenta este. Gráficos se muestran en anexo 7.10.

Planta EMEW®		
Precio Cobre, USD/lb	VAN	TIR
1,7	-2.022.535	37,62%
1,8	446.590	40,52%
2,0	5.384.841	46,26%
2.5	17.730.468	60,28%
3	30.076.094	73,97%
3.5	42.421.721	87,43%

Tabla 5.8: Análisis de Sensibilidad según precio del Cobre.

En la **Tabla 5.9** se muestra un análisis de sensibilidad según el precio de la energía (recordando que por cada kilogramo de cobre producido se ocupa una energía de 2,58

Kwh). El objetivo de este análisis es mostrar que la energía que se utiliza es un factor muy influyente en este tipo de proyectos. Gráficos se muestran en anexo 7.10.

Planta EMEW®		
Precio Energía, USD/Kwh	VAN	TIR
0,13	5.963.963	46,93%
0,14	5.674402	46,59%
0,15	5.384.841	46,26%
0,18	4.516.158	45,26%
0,2	3.937.036	44,59%
0,25	2.489.230	42,91

Tabla 5.9: Análisis de Sensibilidad según precio de la energía Kwh.

6 CAPITULO 6: CONCLUSIONES

- Las pruebas de pilotaje con Celdas EMEW® realizadas en Codelco Radomiro Tomic aplicadas a descartes de electrowinning fueron exitosas, ya que se comprobó la operación a altas densidades de corriente (300 a 600 A/m²) y con buenas eficiencias de corriente, en promedio 90%.
- Con los resultados obtenidos se elaboró una evaluación técnica que entrega detalles de tamaño, diseño y configuración de una planta industrial. De acuerdo a esto se consideran una totalidad de 3150 celdas EMEW®, las cuales producirían aproximadamente 6480 toneladas de cobre fino e inyectarían al sistema 9980 toneladas de ácido sulfúrico anualmente.
- La producción de ácido desde la planta EMEW® podría generar un ahorro de aproximadamente US\$880,000 anualmente para la división Radomiro Tomic.
- De igual manera, de la prueba realizada con solución de canaletas se obtuvieron exitosos resultados y se realizó un diseño para una planta con 1260 celdas EMEW®, la cual podría producir aproximadamente 2000 toneladas de cobre fino e inyectar 3142 toneladas de ácido sulfúrico al sistema.
- De la misma forma, a partir de la evaluación técnica, se obtuvo todos los parámetros necesarios para la realización de una propuesta económica. Como una aproximación, se presenta esta evaluación, donde resulta una buena rentabilidad del proyecto, recuperando la inversión realizada en un plazo de 2 años, con un TIR de 46,26% y un VAN de USD 5.384.841.
- Con las pruebas realizadas se demostró que la calidad del producto final depositado cumple los requerimientos de pureza y cae dentro de la categoría LME Grado A, con un 99,99% de pureza.
- Se logró estimar que la utilización de esta tecnología podría tener una incidencia importante sobre la recuperación global del sistema, pues disminuiría la concentración de cobre en el refino. Se recomienda realizar pruebas para validar este punto.

6.1 RECOMENDACIONES

- Estudiar en detalle la incidencia en las etapas SX-EW, el tratamiento del descarte con celdas EMEW®. Analizar la variación de la carga de contaminantes en estas etapas.
- Realizar una prueba a escala piloto de la incidencia que tiene en el proceso de lixiviación un regadío con una solución con menor carga de cobre, con la finalidad de obtener una representación más aproximada a la realidad.
- Realizar evaluación económica detallada del proyecto.
- Optimizar el proceso de análisis químico para una futura implementación industrial.
- Realizar proyecto de investigación, y un estudio acabado para una posible recuperación de cobalto de las soluciones obtenidas en proceso de electro obtención utilizando celdas EMEW®.

7 CAPITULO 7: ANEXOS

7.1 ANEXO 1: CELDAS EMEW®

7.1.1 Funcionamiento de la celda EMEW®^[13]

La electro obtención convencional involucra la colocación de un ánodo y un cátodo en un baño de electrolito que recircula lentamente. Los iones metálicos eventualmente llegan hasta el cátodo para ser depositados (**Figura 7.1**).

Con la celda EMEW®, el electrolito es recirculado a alto caudal por el ánodo y el cátodo, resultando en mayor eficiencia eléctrica y mayor recuperación.

- El electrolito es bombeado a través de la celda desde abajo hacia arriba.
- Se aplica energía a la celda entre el ánodo y el cátodo.
- El metal comienza entonces a depositarse como placa o como polvo en el cátodo.

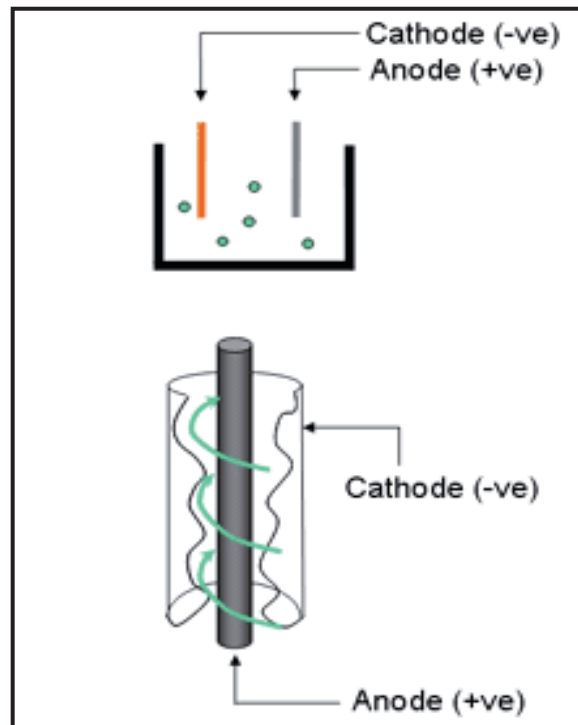


Figura 7.1: Celda Convencional v/s Celda EMEW®.

7.1.2 Apariencia Cátodos post-cosecha



Figura 7.2: Cátodo obtenido en cosecha de celda EMEW®.

7.1.3 Características de las celdas EMEW®

Una planta EMEW® se puede configurar en serie o en paralelo, según sea el requerimiento. (**Figura 7.3**).

Algunas características claves de la tecnología son:

- Simplicidad de operación. La celda no tiene piezas móviles.
- Ausencia de insumos. No se requieren aditivos químicos u otros insumos.
- Ausencia de control de temperatura. No se requiere calentar el electrolito.
- Obtención de un producto de alta calidad a partir de soluciones diluidas o contaminadas.
- Sistema cerrado. No hay emisión de neblina ácida al ambiente.
- Simplificación de proceso. Amplio rango de concentración de metales.
- Construcción modular. La celda individual es relativamente pequeña y portátil.
- Procesamiento a concentraciones bajas. Tratamiento directo de RILES.
- Procesamiento de soluciones más concentradas a mayor densidad de corriente,

- Integración opcional con proceso SX resultando en simplificación de operación.
- Permite trabajar en medio ácido (electrowinning de cobre) o alcalino (electrowinning directo de plata desde soluciones cianuradas).
- Permite usar materiales alternativos por no haber corrosión.
- Capaz de recuperar una variedad de metales. Cu, Ni, Sn, Co, Sb, Au, Ag, Pb;
- Muy alta tolerancia a contaminantes en solución. por ejemplo cloruros.

Los fundamentos operacionales de la tecnología EMEW® obedecen a una mayor capacidad de transporte de masa, a un circuito cerrado, y a que la celda sea de configuración simple, según se resume en el siguiente cuadro:

Característica	Principales Beneficios
Alta Capacidad de Transporte de Masa	Reducción de limitaciones a la concentración de metales para EW.
	Reducción de limitaciones a la composición de soluciones sobre las que se puede hacer EW.
	Permite operar a mayor densidad de corriente sobre soluciones de concentraciones habituales de EW.
Simplicidad	Construcción modular y económica permite aplicación en proyectos pequeños y grandes a costos competitivos
	Baja mantenimiento por no tener partes móviles
	Transportable a otro proyecto
Celda cerrada	No hay emanación o acumulación de gases o neblina ácida
	Baja Cinética de Corrosión de Materiales de Construcción por ausencia de interfase aire-líquido

Tabla 7.1: Resumen principales características de las celdas EMEW®.

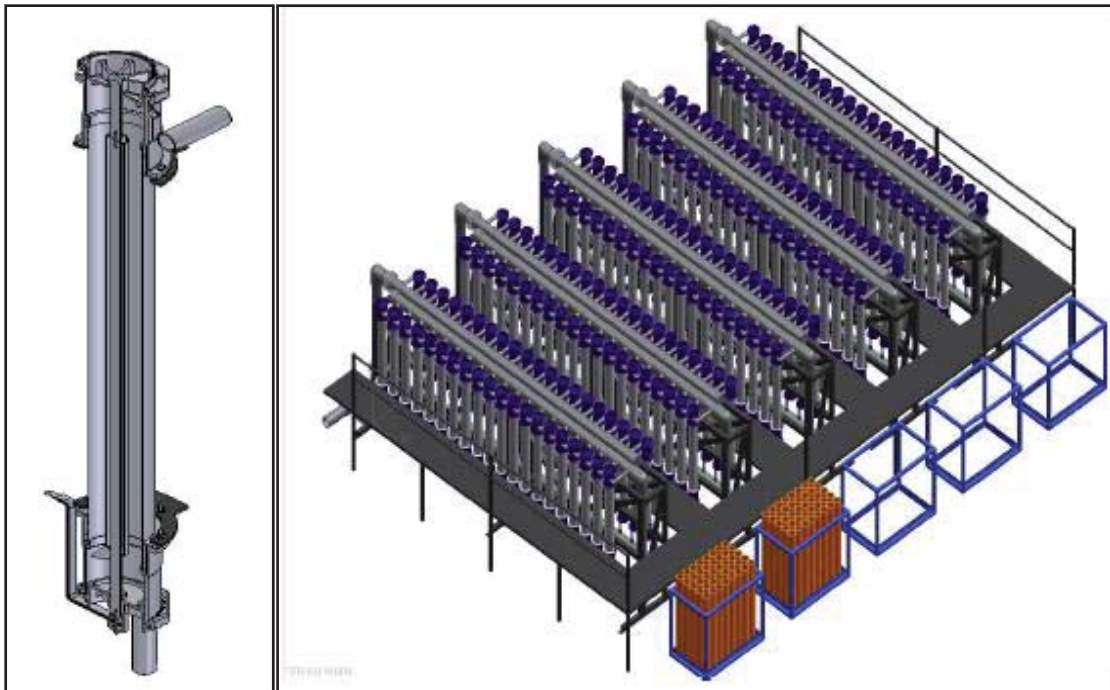


Figura 7.3: Módulo de celdas en planta EMEW®.

7.1.4 Estado Actual de las celdas EMEW®

Existen variados datos acumulados respecto al desempeño de la tecnología EMEW® para la recuperación de cobre a partir de soluciones concentradas y diluidas. Por ejemplo, el artículo presentado en Hydroprocess 2006^[14].

- Se cuenta con una herramienta que permite recuperar el cobre contenido en purgas de nave de electrowinning. Esto evita recircular la purga a la planta SX o a lixiviación, evitando problemas asociados a esta práctica.
- Se demuestra que la tecnología EMEW® permite producir cátodos de buena calidad con elevadas eficiencias de corriente a partir de soluciones provenientes del descarte de electrowinning, y disminuir la concentración de Cobre en las soluciones hasta niveles difícilmente alcanzables por la tecnología convencional.
- Se postula que al utilizar este método, se pueden mejorar las condiciones de operación de la planta de electrowinning existente. Lo anterior, se explica

debido a que si existe un mayor descarte desde la nave de electrowinning se libera el sistema de acumulación de impurezas pudiendo elevar la densidad de corriente, y por lo tanto, aumentar la producción de cobre.

- Al permitirse una mayor purga, la calidad del electrolito de la nave será mejor, resultando en un mayor porcentaje de la producción de alta calidad catódica con mayores ingresos por premios a la calidad catódica.
- La capacidad de SX aumenta levemente debido a que no se está recirculando cobre hacia el sistema.
- Un beneficio secundario, es que la disminución de la concentración de cobre en el refino aumenta la eficiencia de recuperación global de Cobre en las pilas por efecto de una mayor gradiente de concentración.
- El método permite una ampliación de la planta global en una cantidad equivalente a la purga con una inversión comparativamente baja, ya que no es necesario expandir la capacidad SX, sino solo la parte EMEW®.
- Para este tipo de electrolitos, el consumo de energía eléctrica varía entre 2.0 y 2.5 [Kwh/Kg Cu depositado] y la eficiencia eléctrica está en torno a 94%.
- Se ha verificado que la tecnología no emite neblina ácida y que es posible efectuar el ciclo de electrowinning en un sistema cerrado sin acumulación de gases.

7.1.5 Descripción de la Planta Piloto EMEW®

La Planta Piloto de EMEW® utilizada para las pruebas piloto en Codelco Radomiro Tomic posee las siguientes características:

- 3 celdas de 6 [pulg] de diámetro
- Cátodos de acero inoxidable de área catódica de 0.5 [m²]
- Ánodos de Titanio de 2 [pulg] de diámetro
- Sistema de conexión eléctrica múltiple en serie
- Sistema hidráulico en serie
- Sistema de despegue de cátodo de la lámina inicial, que consiste en un teclé y una herramienta neumática de cosecha

Accesorios:

1. Rectificador de corriente eléctrica de 380 [V], con regulador de intensidad de corriente hasta 600 [A].
2. Bomba centrífuga de alimentación a celdas EMEW®.
3. Caudalímetro de alimentación de solución a la planta.
4. Sensor de flujo.

La **Figura 7.4** muestra un esquema de la configuración de la Planta Piloto EMEW®.

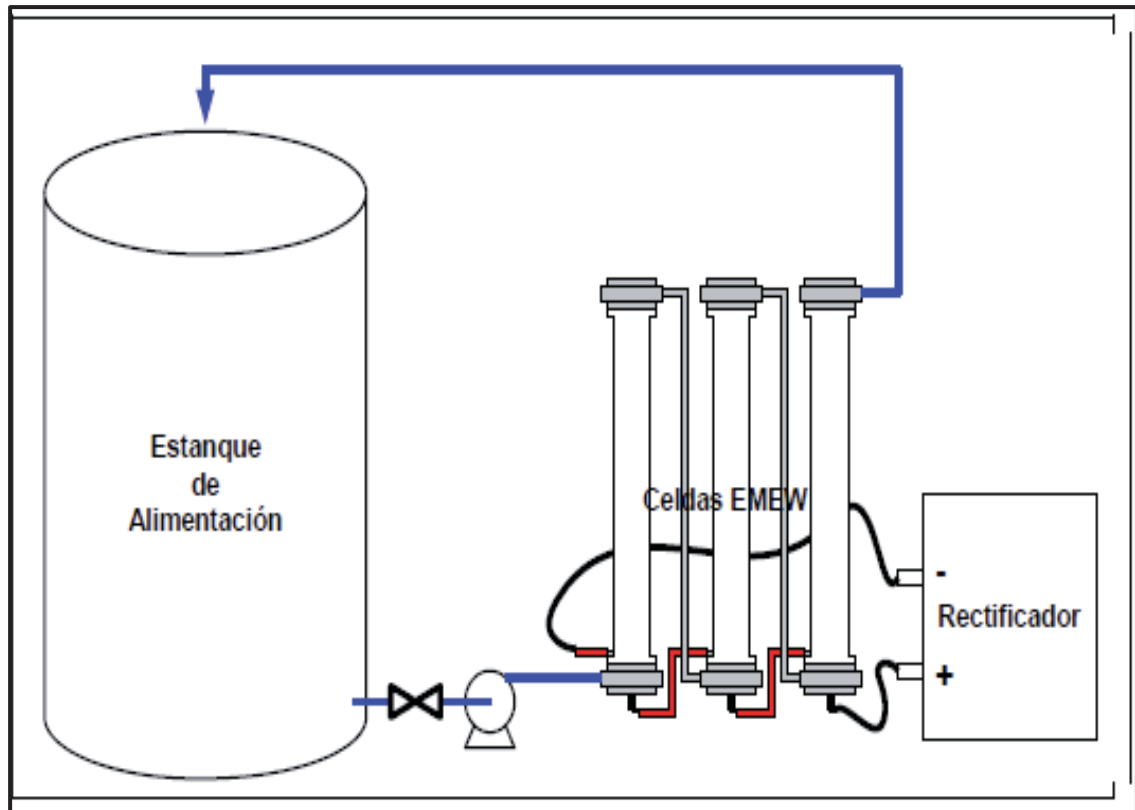


Figura 7.4: Esquema del Sistema de pruebas de pilotaje EMEW® (con recirculación).

La **Figura 7.5** muestra una imagen de la Planta Piloto emplazada en Codelco RT.



Figura 7.5: Planta Piloto EMEW® instalada en Codelco Radomiro Tomic.

7.2 ANEXO 2: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DEPOSITACION DEL METAL

La masa depositada de metales de acuerdo a las leyes de Faraday depende principalmente de la corriente aplicada y la eficiencia del proceso. Sin embargo la calidad del depósito depende de otros factores tales como la temperatura, concentración, densidad de corriente y otros.

Los depósitos electrolíticos de metales son siempre cristalinos, pero pueden variar de un depósito adherente, grueso, de granos grandes, hasta un depósito pulvurulento, de grano fino y poco adherido. La forma del depósito depende de muchos factores. Durante la depositación electrolítica se deben tener en cuenta la existencia de dos procesos simultáneos:

- **Nucleación**
- **Crecimiento de Cristales**

Cuando la tasa de nucleación es mucho más rápida que la velocidad de crecimiento de los cristales, el producto será un polvo fino. Por otro lado, cuando la velocidad de crecimiento de los cristales es mucho mayor que la velocidad de nucleación, el producto será un grano grueso.

Cuando la concentración de iones del metal en la interfase de depositación, tiende a cero, es decir cuando el proceso tiende a ser controlado por la difusión, la tasa de nucleación llega a ser más grande que la velocidad de crecimiento de los cristales y de esta manera se favorece la formación de un depósito de tipo pulvurulento.

7.2.1 Nucleación y Crecimiento

Las etapas iniciales de la electro cristalización de cobre sobre un sustrato extraño o diferente involucran un mecanismo de nucleación. Cuando se aplica un potencial constante se observa que el número de núcleos aumenta linealmente en el tiempo, alcanzando un número de saturación final después de transcurrido un lapso. La formación de la primera capa involucra los procesos de formación y crecimiento de núcleos y su estructura

dependerá de la relativa cinética de estos dos procesos competitivos. Por una parte esta capa se puede formar por recubrimiento directo con núcleos recién formados, en caso que la cinética de nucleación sea muy rápida. Por otra parte puede ser el producto del crecimiento y coalescencia de una población relativamente baja de núcleos formados en una etapa inicial. La ruta específica de crecimiento está determinada por las condiciones de electrodeposición (concentración de soluto, sobre potencial, grado de agitación, tipo de aditivos, entre otros) y el tipo de interacción entre el sustrato y el depósito.

La formación de una película continua de depósito no necesariamente se alcanza, si por ejemplo el sustrato es muy poco hospitalario para el metal depositado, la población de núcleos será muy pequeña, quedando muy alejados unos de otros. De este modo al crecer no podrán coalescer en una sola fase de crecimiento. Además si los núcleos crecen demasiado de manera individual, eventualmente su desarrollo en la dirección del seno de la solución se ve favorecido con respecto al crecimiento lateral, dando origen a dendritas. Una de las razones de este tipo de crecimiento es que la densidad de corriente es mayor en la dirección del campo eléctrico. Además en el caso de estar electro depositado bajo fuertes condiciones de polarización por concentración (control por transferencia de masa), el crecimiento de la punta del núcleo se ve favorecido debido a la predominancia de la difusión hemisférica por sobre la lineal.

En general aun cuando se logre una capa continua inicial, al engrosar el depósito ciertas facetas cristalinas crecen más rápidas que otras, la superficie se torna irregular y eventualmente se desarrolla de igual modo un cierto crecimiento dendrítico. La codeposición de partículas suspendidas también puede catalizar este proceso. Para contrarrestar el crecimiento de dendritas se puede usar un aditivo que tenga la propiedad de adsorberse preferencialmente en aquellos sitios donde existe mayor grado de polarización.

7.2.2 Variables de operación^[15]

Ciertamente existen muchas variables que inciden directamente en el buen funcionamiento del proceso de electro obtención de cobre, sin embargo existen ciertas variables que son más relevantes para la producción y la calidad química y física de los cátodos.

A continuación se describen tres de las variables más importantes en el proceso de electro obtención de cobre para una corriente de producción definida.

Flujo de electrolito por celda

Con el fin de obtener un buen depósito de cobre se ha determinado empíricamente que la densidad de corriente aplicada debe ser entre un 30 a un 40% de la densidad de corriente límite, que se relaciona directamente con el flujo de solución ingresado a la celda.

En la mayoría de las plantas de electro obtención se opera a un flujo de 12-18 [m³/h] por celda, ya que si el flujo de electrolito a estas es muy bajo se podría producir un empobrecimiento del cobre en solución alrededor de las placas, lo que conlleva a operar en condiciones de densidad de corriente fuera del límite deseado, generándose una mala calidad física del depósito. No obstante, si el flujo de electrolito es muy alto, se pueden generar turbulencias al interior de la celda con lo cual se produce un aumento en la contaminación por plomo que es arrastrado desde el fondo de la celda, esto debido a la borra anódica que decanta por la inevitable corrosión que se forma al aplicar la corriente en el proceso.

En general en una nave de electro obtención se debe procurar mantener un flujo de electrolito lo más uniforme posible en cada una de las celdas y así mantener éstas mismas en equivalentes condiciones operacionales.

Temperatura del electrolito

Al igual que el caso del flujo de electrolito, la temperatura también tiene efectos negativos si es mayor o menor al rango de operación, éste se encuentra entre 40-50 [°C].

Si la temperatura es mayor al rango mencionado, se acelera la velocidad de la reacción ya que ésta varía exponencialmente con la temperatura (según la ecuación de Arrhenius), aumentando la conductividad del electrolito, permitiendo un buen depósito de cobre, además aumenta la solubilidad del cobre, por lo mismo se producen aumentos en la velocidad de difusión, pero existen problemas con la degradación de los aditivos orgánicos (cumplen la función de afinar el grano del depósito o aumentar la vida útil de los ánodos) y la mayor evaporación del electrolito como a la vez generación de neblina ácida.

Por el contrario, si la temperatura es menor al rango mencionado, es posible que se genere una mala calidad en el depósito además de una baja en la eficiencia de corriente que es generada por la disminución de la solubilidad del cobre en solución existiendo una menor movilidad iónica, sulfatación de electrodos, barras conductoras y capping boards.

Concentración de cobre en el electrolito

Ésta variable es de suma importancia, pues de ella depende la cantidad de corriente que se le puede aplicar al proceso y por ende de la producción de cobre que es posible obtener. No obstante el aumento de corriente depende además de otras variables y no solo de la concentración de cobre.

Por lo general el cobre entrante a la celda a través del llamado electrolito rico o avance es de 40-42 [gpl], mientras que el electrolito pobre o spent (electrolito de salida en la celda) es de 38-40 [gpl], tratando siempre de mantener un corte máximo avance-spent de 2,5 [gpl].

Según estudios a corriente, temperatura y flujo constante, la morfología del grano depende principalmente de dos variables: la concentración de ión cúprico en la superficie del electrodo disponible a reaccionar y la concentración del ión cúprico en el seno de la solución.

La corriente límite (corriente máxima a la cual se produce la máxima transferencia de cobre, a esta corriente se obtiene un depósito esponjoso, nodular, dendrítico, de grano fino casi polvo de cobre), es directamente proporcional a la concentración de cobre (según se observa en ecuación 7.1) es por esto que cualquier modificación de la concentración de cobre variará el valor de ésta.

7.2.3 Distribución de corriente

En un contexto ideal, la corriente suministrada a la planta de EW se debiera distribuir por igual entre los electrodos de cada una de las celdas. Pero la densidad de corriente indicada en cada una de las plantas corresponde a la densidad de corriente promedio para cada cátodo, por efecto de distancias interelectródica no uniformes, contactos obstruidos, gradiente de temperatura muy altos, entre otros, cada cátodo presenta

una distribución de corriente distinta del promedio informado. Es así como se presentan cortocircuitos, pesos diferentes y crecimientos preferenciales para los distintos cátodos obtenidos en una misma celda.

Se pueden distinguir dos tipos de distribución de corriente:

a.- **Entre cátodos:** cada cátodo dentro de una celda debería operar a una misma densidad de corriente, pero en la práctica se observa una distribución de ésta que depende entre otras de la separación de los electrodos. Por ejemplo, un depósito catódico rugoso se asocia con densidades de corriente altas, que resultan de una desigual distribución de corriente. Una alternativa para mitigar la mala distribución es mejorar la verticalidad y curvatura de los electrodos.

b.- **Dentro del cátodo:** la densidad de corriente en la superficie del electrodo no es uniforme. Esto se debe a que existe una transición en el tipo de régimen del flujo de electrolito frente a los cátodos; en la mitad superior de la celda el flujo se presenta turbulento y en la mitad inferior es laminar. Como consecuencia, el espesor de la capa límite y el sobre potencial catódico varían con la altura. Por lo cual, la transferencia de masa es mayor y con menos probabilidad de producir un depósito nodular en la parte alta del cátodo que en la parte baja.

7.2.4 Calidad de los catodos producidos^[16]

La electro depositación, como etapa final del proceso hidrometalúrgico, tiene entre sus objetivos la producción de cátodos de cobre con un 99,99 % de pureza, con el fin de maximizar los resultados económicos de venta del producto.

Las impurezas que presentan mayor problema en la electro depositación son el plomo (Pb), azufre (S). Estas impurezas están influenciadas principalmente por las prácticas operacionales que existen en cada planta.

Tanto el azufre como el plomo son elementos que deben estar presentes en la celda para el funcionamiento del proceso. El plomo por ser el principal constituyente del ánodo y el azufre por ser uno de los elementos del ácido sulfúrico y de los iones sulfatados que se encuentran disueltos en el electrolito

Cada clasificación catódica está regulada con un máximo permisible por la London Metal Exchange (LME), entidad encargada de regir las normas internacionales de la calidad catódica de cobre ya sea por clasificación física y química (calidad química, ejemplo cátodo grado "A", azufre máximo permisible 15 [ppm] y plomo máximo permisible 5 [ppm]), asimismo con el propósito de cumplir con todos los requerimientos internacionales de calidad, Radomiro Tomic aplica estándares mucho más rigurosos respecto de los que reglamentariamente se exigen. (**Tablas 7.2 y 7.3**).

La calidad química de los cátodos, está ligada a la calidad física o apariencia presentada por el depósito; se establece en la práctica operacional que un depósito liso, denso y coherente presenta una mejor calidad química que otro rugoso, poroso e incoherente.

En la División Radomiro Tomic se le aplica un estándar de clasificación a los cátodos electro obtenidos, tomando en cuenta su calidad física y química. Los parámetros de clasificación usados en la división son:

- Grado RT o Grado A
- Grado Rechazo
- Grado Estándar
- Off Grade

En la planta de Radomiro Tomic el principal problema de la calidad catódica, se debe al aspecto físico de los cátodos, ya que presentan una alta nodulación y rugosidad en gran parte de su producción.

7.2.5 Calidad Física

Está relacionado a la morfología del depósito y a la calidad superficial de los cátodos. Entendiéndose como defectos superficiales a:

- Falta de depósito lateral
- Terminación de la interfase dispereja
- Estrías
- Falta de depósito

- Nodulación

La nodulación es uno de los defectos más comunes que se presenta en los cátodos electro obtenidos, realizando la clasificación física en base a este defecto, un cátodo calidad RT (o grado “A”) es aquel que presenta una nodulación menor a un 10% (**Tabla 7.2**), en anexo 9.4 se pueden observar además los estándares físicos de acuerdo al tamaño de los defectos asociados al cátodo.

Calidad	Porcentaje Nódulos en Cara del Cátodo
RT	<10%
Rechazo	Entre 10% y 20%
Estándar	>20%

Tabla 7.2: Estándares de Calidad Física de Cátodos Comerciales

7.2.6 Calidad Química

Se refiere a la cantidad de impurezas presentes en el depósito. Se determina mediante análisis químicos a las muestras tomadas directamente de los cátodos. La calidad química deseada de los cátodos producidos debiera ser la calidad RT (o grado “A”) como se observa en **Tabla 7.3**.

Calidad	Azufre (ppm)	Plomo (ppm)	Fierro (ppm)
RT	0 – 9.0	0 – 3.0	0 – 5.0
Rechazo	9.1 – 15	3.1 – 5.0	5.1 – 7
Estándar	>15	>5.0	>7

Tabla 7.3: Estándares de Calidad Química de Cátodos Comerciales

7.2.7 Aireación de Electrolito

Según experiencias anteriores en otras faenas mineras (Escondida, Spence, Codelco Gabriela Mistral) el ingreso de aire al interior de la celda mediante un burbujeo suave, genera mejoras en la calidad de los cátodos obtenidos en el proceso de electro obtención. Como se observa de acuerdo a la siguiente relación para la corriente límite de difusión,

modificará interiormente la densidad de corriente de trabajo en función de la corriente límite, lo que se puede expresar como:

$$i_L = \frac{n \cdot F \cdot D \cdot [Cu^{2+}]_0}{\delta} \quad 7.1$$

Donde:

- n : Número de electrones o cargas transferidas [n = 2]
- F : Constante de Faraday [96500 (A*s)/mol]
- D : Coeficiente de difusión del ión cúprico en el medio
- δ : Espesor de la capa límite de difusión
- $[Cu^{+2}]_0$: Concentración de cobre en el seno de la solución

Al existir un burbujeo permanente que agite el electrolito se espera una disminución en el espesor de la capa límite de difusión, δ , por lo mismo el efecto inmediato es un aumento en el valor de la corriente límite de acuerdo a la ecuación 7.1, lo que permitiría aumentar el rango de trabajo óptimo.

7.3 ANEXO 3: CARTILLAS DE DATOS DE PRUEBAS PILOTO

7.3.1 Tabla 7.4: Cartilla de datos prueba 1.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico				
N° de Batch :		1								Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final		
N° de Prueba :		1								Cu (gpl)	42,51	6,31		
Fecha Inicio Pruebas:		18/12/2011								H+ (gpl)	190,65	257,9		
Tipo de Solución :		Electrolito								Fe (ppm)	901	930		
Flujo por Celda :		150 lt/min								Fe2+ (ppm)	35	870		
										Co (ppm)	198			
										Cl (ppm)	39,2	35,1		
										Mn (ppm)		17		
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial														
Voltaje (V)														
Intensidad (A)														
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas				Muestra (P-XX/M-YY)	Concentración		Tiempo h	
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)	Voltaje 3 (V)		Cu (gpl)	H+ (gpl)		
18/12/2011	150	18:30	2989,95	250	8	250	2,95	3,10	3,10	P-01 / M-01	42,51	190,65	0,0	
19/12/2011	140	12:30	3025,44	250	7,5	254	2,73	2,87	2,87	P-01 / M-02	31,58		68,6	
19/12/2011	150	18:30	3030,37	250	7,5	250	2,73	2,85	2,89	P-01 / M-03	31,10	210,17	72,5	
							Prom	251,3	2,80	2,94				
									2,90					
Observaciones														
			Densidad de Corriente			500,0 A/m2			Peso promedio			20,33333333		
			Peso teórico de cátodos =			21,50 Kg								
			Peso de Cátodos P-01/C-1=			20,5 Kg			Eficiencia Corriente =			95,4%		
			P-01/C-2=			20 Kg			Eficiencia Corriente =			93,0%		
			P-01/C-3=			20,5 Kg			Eficiencia Corriente =			95,4%		
			Tiempo de duración de la Prueba :			72,5 hrs. Con Ef. de Corriente media			94,6%			94,6		

7.3.2 Tabla 7.5: Cartilla de datos prueba 2.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT											Análisis Químico																										
N° de Batch : 1		N° de Prueba : 2		Fecha Inicio Pruebas: 19/12/2011		Tipo de Solución : Electrolito		Flujo por Celda : 150 lt/min		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Muestra Inicial</th> <th>Muestra Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu (gpl)</td> <td>42,51</td> <td>6,31</td> </tr> <tr> <td>H+ (gpl)</td> <td>190,65</td> <td>257,9</td> </tr> <tr> <td>Fe (ppm)</td> <td>901</td> <td>930</td> </tr> <tr> <td>Fe2+ (ppm)</td> <td>35</td> <td>670</td> </tr> <tr> <td>Co (ppm)</td> <td>198</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cl (ppm)</td> <td>39,2</td> <td>35,1</td> </tr> <tr> <td>Mn (ppm)</td> <td></td> <td>17</td> </tr> </tbody> </table>				Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final	Cu (gpl)	42,51	6,31	H+ (gpl)	190,65	257,9	Fe (ppm)	901	930	Fe2+ (ppm)	35	670	Co (ppm)	198		Cl (ppm)	39,2	35,1	Mn (ppm)		17
Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final																																			
Cu (gpl)	42,51	6,31																																			
H+ (gpl)	190,65	257,9																																			
Fe (ppm)	901	930																																			
Fe2+ (ppm)	35	670																																			
Co (ppm)	198																																				
Cl (ppm)	39,2	35,1																																			
Mn (ppm)		17																																			
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Voltaje (V)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>Intensidad (A)</td> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>											Voltaje (V)											Intensidad (A)															
Voltaje (V)																																					
Intensidad (A)																																					
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas				Muestra (P-XX/M-YY)	Concentración		Tiempo h																								
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)	Voltaje 3 (V)		Cu (gpl)	H+ (gpl)																									
19/12/2011	150	19,30	3030,37	200	6	202	2,27	2,37	2,33	P-02 / M-01	31,10	210,17	0,0																								
19/12/2011	150	23,00	3033,18	200	6	204,3	2,39	2,49	2,39	P-02 / M-02	29,55		3,4																								
20/12/2011	150	11,30	3043,62	200	6,5	202	2,48	2,58	2,53	P-02 / M-03	28,46		15,9																								
20/12/2011										P-02 / M-04																											
21/12/2011	85	11,05	3063,36	200	6,5	202,5	2,49	2,6	2,55	P-02 / M-05	24,92		39,6																								
21/12/2011	150	23,06	3073,45	200	6,5	202,8	2,45	2,56	2,5	P-02 / M-06	23,50		51,7																								
22/12/2011	150	11,07	3083,35	200	6,2	202,5	2,46	2,58	2,52	P-02 / M-07	22,09		63,6																								
22/12/2011	150	23,08	3093,39	198	6,3	200,2	2,45	2,56	2,5	P-02 / M-08	21,48		75,6																								
23/12/2011	150	11,45	3104,29	200	6,2	200,5	2,46	2,57	2,51	P-02 / M-09	19,19		88,70																								
23/12/2011	150	15,00	3106,65	200	6,2	202	2,46	2,57	2,51	P-02 / M-10	18,71	233,95	91,54																								
						Prom	202	2,43	2,54	2,48																											
								2,49																													
Observaciones											Densidad de Corriente	400,0 A/m2		Peso promedio	19,5																						
											Peso teórico de cátodos =	21,71 Kg																									
											Peso de Cátodos P-02/C-1	19,5 Kg	Eficiencia Corriente =	89,8%	0,898																						
											P-02/C-2	19,5 Kg	Eficiencia Corriente =	89,8%	0,898																						
											P-02/C-3	19,5 Kg	Eficiencia Corriente =	89,8%	0,898																						
											Tiempo de duración de la Prueba	91,5 hrs. Con Ef. de Corriente media	89,8%	89,8																							
											Se observa mayor tamaño de granulos en estos cátodos respecto a los de la prueba anterior.																										

7.3.3 Tabla 7.6: Cartilla de datos prueba 3.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT											Análisis Químico		
N° de Batch :		1									Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final
N° de Prueba :		3									Cu (gpl)	42,51	6,31
Fecha Inicio Pruebas:		23/12/2011									H+ (gpl)	190,65	257,9
Tipo de Solución :		Electrolito									Fe (ppm)	901	930
Flujo por Celda :		150 lt/min									Fe2+ (ppm)	35	670
											Co (ppm)	198	
											Cl (ppm)	39,2	35,1
											Mn (ppm)		17
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial													
Voltaje (V)													
Intensidad (A)													
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas				Muestra (P-XX/M-YY)	Concentración		Tiempo h
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)	Voltaje 3 (V)		Cu (gpl)	H+ (gpl)	
23/12/2011	150	17,10	3106,65	162	5,5	175,7	2,14	2,25	2,21	P-03 / M-01	18,71	233,95	0,0
23/12/2011	150	23,15	3112,31	170	6,0	171,3	2,19	2,30	2,20	P-03 / M-02	17,99		6,8
24/12/2011	150	11,00	3121,53	170	6,0	178,3	2,34	2,44	2,39	P-03 / M-03	17		17,9
24/12/2011	150	23,00	3132,15	175	6,0	177,3	2,35	2,45	2,39	P-03 / M-04	15,31		30,6
25/12/2011	140	11,00	3142,05	160	6,0	170,2	2,31	2,47	2,42	P-03 / M-05	13,55		42,5
25/12/2011	130	23,00	3152,05	172	6,0	173,4	2,38	2,44	2,40	P-03 / M-06	12,24		54,5
26/12/2011	125	11,20	3161,94	162	6,0	175,8	2,39	2,49	2,44	P-03 / M-07	10,6		66,3
26/12/2011	150	23,00	3172,82	175	6,0	138,7	2,30	2,41	2,36	P-03 / M-08	9,83		79,4
27/12/2011	150	11,50	3182,35	165	6,0	175,8	2,35	2,46	2,41	P-03 / M-09	7,62		90,84
27/12/2011	150	23,10	3191,92	180	6,0	140,7	2,61	2,50	2,36	P-03 / M-10	6,37		102,32
28/12/2011	155	9,20	3200,18	160	5,5	175,5	1,90	2,48	2,43	P-03 / M-11	6,31	257,9	112,24
					175,0	Prom	174,8	2,30	2,43	2,36			
Observaciones		Densidad de Corriente = 350,0 A/m ² Peso promedio = 21,3 Peso teórico de cátodos = 23,29 Kg Peso de Cátodos P-03/C-1= 21,5 Kg Eficiencia Corriente = 92,3% 0,923 P-03/C-2= 21,5 Kg Eficiencia Corriente = 92,3% 0,923 P-03/C-3= 21 Kg Eficiencia Corriente = 90,1% 0,901 Tiempo de duración de la Prueba 112,2 hrs. Con Ef. de Corriente media 91,6% 91,6 Se observa mayor oxidación de los cátodos de esta prueba con respecto a los de las dos pruebas anteriores.											

7.3.4 Tabla 7.7: Cartilla de datos prueba 4.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT											Análisis Químico																									
N° de Batch : 2		N° de Prueba : 4		Fecha Inicio Pruebas: 10/01/2012		Tipo de Solución : Electrolito		Flujo por Celda : 9		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Elemento</th> <th>Muestra Inicial</th> <th>Muestra Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cu (gpl)</td> <td>36,63</td> <td>2,78</td> </tr> <tr> <td>H+ (gpl)</td> <td>192,66</td> <td>248,2</td> </tr> <tr> <td>Fe (ppm)</td> <td>895</td> <td>1020</td> </tr> <tr> <td>Fe2+ (ppm)</td> <td>104</td> <td>993</td> </tr> <tr> <td>Co (ppm)</td> <td>159</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>Cl (ppm)</td> <td>46,7</td> <td>44</td> </tr> <tr> <td>Mn (ppm)</td> <td>16</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>			Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final	Cu (gpl)	36,63	2,78	H+ (gpl)	192,66	248,2	Fe (ppm)	895	1020	Fe2+ (ppm)	104	993	Co (ppm)	159	190	Cl (ppm)	46,7	44	Mn (ppm)	16	18
Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final																																		
Cu (gpl)	36,63	2,78																																		
H+ (gpl)	192,66	248,2																																		
Fe (ppm)	895	1020																																		
Fe2+ (ppm)	104	993																																		
Co (ppm)	159	190																																		
Cl (ppm)	46,7	44																																		
Mn (ppm)	16	18																																		
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial																																				
Voltaje (V)																																				
Intensidad (A)																																				
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas			Muestra (R-X/M-Y)	Concentración		Tiempo h																								
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)		Voltaje 3 (V)	Cu (gpl)		H+ (gpl)																							
10/01/2012	150	15,00	3200,23	300	7,5	305	2,68	2,76	2,69	P-04 / M-01	36,63	192,66	0,0																							
10/01/2012	150	23,00	3206,30	300	7,3	303	2,20	2,73	2,67	P-04 / M-02	35,43		7,3																							
11/01/2012	150	11,00	3216,13	300	8,0	310	2,85	2,91	2,87	P-04 / M-03	33,60		19,1																							
11/01/2012	150	23,00	3226,32	300	7,5	308	2,78	2,76	2,76	P-04 / M-04	31,44		31,3																							
12/01/2012	150	11,00	3235,97	300	7,9	308	2,83	2,85	2,85	P-04 / M-05	28,92		42,9																							
12/01/2012	150	23,00	3246	300	7,8	310	2,79	2,83	2,87	P-04 / M-06	26,76		54,9																							
13/01/2012	150	11,00	3256,01	300	7,8	305	2,79	2,81	2,8	P-04 / M-07	24,63	216,57	66,9																							
						Prom	307	2,70	2,81	2,79																										
								2,77																												
Observaciones											Densidad de Corriente = 614 A/m ²		Peso promedio = 21,5																							
Peso teórico de cátodos = 23,82 Kg																																				
Peso de Cátodos P-04/C-1= 21,5 Kg											Eficiencia Corriente = 90,3%		0,903																							
P-04/C-2= 21,5 Kg											Eficiencia Corriente = 90,3%		0,903																							
P-04/C-3= 21,5 Kg											Eficiencia Corriente = 90,3%		0,903																							
Tiempo de duración de la Prueba = 66,94 hrs. Con Ef. de Corriente media = 90,3%													0,903																							

7.3.5 Tabla 7.8: Cartilla de datos prueba 5.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico					
N° de Batch :		2								Elemento		Muestra Inicial	Muestra Final		
N° de Prueba :		5								Cu (gpl)		36,63	2,78		
Fecha Inicio Pruebas:		13/01/2012								H+ (gpl)		192,66	248,2		
Tipo de Solución :		Electrolito								Fe (ppm)		895	1020		
Flujo por Celda :		9 m3/h								Fe2+ (ppm)		104	993		
										Co (ppm)		159	190		
										Cl (ppm)		46,7	44		
										Mn (ppm)		16	18		
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial															
Voltaje (V)															
Intensidad (A)															
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas				Muestra (R-X/M-Y)	Concentración		Tiempo (h)		
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)	Voltaje 3 (V)		Cu (gpl)	H+ (gpl)			
13/01/2012	160	12,00	3256,28	250	6,3	257	2,42	2,41	2,4	P-05 / M-01	24,63	216,57	0,0		
13/01/2012	160	23,00	3265,12	254	6,8	261	2,50	2,44	2,41	P-05 / M-02	22,83		10,6		
14/01/2012	150	11,15	3275,83	250	7,0	260	2,62	2,73	2,69	P-05 / M-03	20,12		23,5		
14/01/2012	150	23,00	3285,47	249	7,0	261	2,61	2,73	2,71	P-05 / M-04	18,20		35,0		
15/01/2012	140	11,00	3296,24	250	7,0	260	2,64	2,75	2,72	P-05 / M-05	16,44		48,0		
15/01/2012	130	22,51	3305,41	245	7,0	262	2,62	2,74	2,71	P-05 / M-06	14,39		59,0		
16/01/2012	130	11,05	3315,82	245	7,0	262	2,64	2,76	2,72	P-05 / M-07	12,02		71,4		
16/01/2012	150	15,15	3319,13	245	7,0	260	2,59	2,69	2,66	P-05 / M-08	11,41	239,32	75,4		
				250	Prom	260	2,58	2,66	2,63						
								2,62							
Observaciones															
			Densidad de Corriente				521 A/m2				Peso promedio			21,2	
			Peso teórico de cátodos =				22,36 Kg								
			Peso de Cátodos P-05/C-1=				21,5 Kg				Eficiencia Corriente =		96,1%		0,961
			P-05/C-2=				21 Kg				Eficiencia Corriente =		93,9%		0,939
			P-05/C-3=				21 Kg				Eficiencia Corriente =		93,9%		0,939
			Tiempo de duración de la Prueba				75,42 hrs. Con Ef. de Corriente media				94,7%		94,7		
Lavado de cátodos después de cosecha con agua fría.															

7.3.6 Tabla 7.9: Cartilla de datos prueba 6.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>N° de Batch</td><td>:</td><td>2</td></tr> <tr><td>N° de Prueba</td><td>:</td><td>6</td></tr> <tr><td>Fecha Inicio Pruebas:</td><td></td><td>16/01/2012</td></tr> <tr><td>Tipo de Solución</td><td>:</td><td>Electrolito</td></tr> <tr><td>Flujo por Celda</td><td>:</td><td>10,8 m3/h</td></tr> </table>										N° de Batch	:	2	N° de Prueba	:	6	Fecha Inicio Pruebas:		16/01/2012	Tipo de Solución	:	Electrolito	Flujo por Celda	:	10,8 m3/h	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Elemento</td><td>Muestra Inicial</td><td>Muestra Final</td></tr> <tr><td>Cu (gpl)</td><td>36,63</td><td>2,78</td></tr> <tr><td>H+ (gpl)</td><td>192,66</td><td>248,2</td></tr> <tr><td>Fe (ppm)</td><td>895</td><td>1020</td></tr> <tr><td>Fe2+ (ppm)</td><td>104</td><td>993</td></tr> <tr><td>Co (ppm)</td><td>159</td><td>190</td></tr> <tr><td>Cl (ppm)</td><td>46,7</td><td>44</td></tr> <tr><td>Mn (ppm)</td><td>16</td><td>18</td></tr> </table>		Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final	Cu (gpl)	36,63	2,78	H+ (gpl)	192,66	248,2	Fe (ppm)	895	1020	Fe2+ (ppm)	104	993	Co (ppm)	159	190	Cl (ppm)	46,7	44	Mn (ppm)	16	18								
N° de Batch	:	2																																																								
N° de Prueba	:	6																																																								
Fecha Inicio Pruebas:		16/01/2012																																																								
Tipo de Solución	:	Electrolito																																																								
Flujo por Celda	:	10,8 m3/h																																																								
Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final																																																								
Cu (gpl)	36,63	2,78																																																								
H+ (gpl)	192,66	248,2																																																								
Fe (ppm)	895	1020																																																								
Fe2+ (ppm)	104	993																																																								
Co (ppm)	159	190																																																								
Cl (ppm)	46,7	44																																																								
Mn (ppm)	16	18																																																								
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Voltaje (V)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Intensidad (A)</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>										Voltaje (V)										Intensidad (A)																																						
Voltaje (V)																																																										
Intensidad (A)																																																										
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas			Muestra (R-X/M-Y)	Concentración		Tiempo h																																														
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)		Voltaje 3 (V)	Cu (gpl)		H+ (gpl)																																													
16/01/2012	160	16,20	3319,13	200	6,0	212,6	2,25	2,34	2,32	P-06 / M-01	11,41	239,32	0,0																																													
16/01/2012	150	22,54	3324,63	200	6,0	215,7	2,38	2,46	2,45	P-06 / M-02	10,32	235,39	6,6																																													
17/01/2012	180	11,00	3334,75	200	6,0	211,5	2,42	2,51	2,48	P-06 / M-03	8,74	243,73	18,7																																													
17/01/2012	180	22,50	3344,6	200	6,0	215,1	2,42	2,51	2,48	P-06 / M-04	7,31	237,84	30,6																																													
18/01/2012	180	11,15	3354,99	200	6,0	211,5	2,45	2,54	2,51	P-06 / M-05	6,17	243,7	43,0																																													
18/01/2012	180	23,10	3364,87	200	6,5	213,4	2,45	2,53	2,5	P-06 / M-06	4,35	248,2	54,9																																													
19/01/2012	180	11,15	3374,99	200	6,5	212,7	2,48	2,57	2,54	P-06 / M-07	3,15		67,0																																													
19/01/2012	180	15,05	3378,17	200	6,5	212,5	2,49	2,57	2,54	P-06 / M-08	2,78		70,8																																													
						Prom	213	2,42	2,50	2,48																																																
									2,47																																																	
Observaciones										Densidad de Corriente = 400 A/m2		Peso promedio = 14,5																																														
										Peso teórico de cátodos = 16,81 Kg																																																
										Peso de Cátodos P-06/C-1= 14,5 Kg		Eficiencia Corriente = 86,3%																																														
										P-06/C-2= 14,5 Kg		Eficiencia Corriente = 86,3%																																														
										P-06/C-3= 14,5 Kg		Eficiencia Corriente = 86,3%																																														
										Tiempo de duración de la Prueba = 70,85 hrs. Con Ef. de Corriente media		86,3%																																														
										Lavado de cátodos después de cosecha con agua fría.																																																

7.3.8 Tabla 7.11: Cartilla de datos prueba 8.

Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico			
N° de Batch :		3		Elemento		Muestra Inicial		Muestra Final					
N° de Prueba :		8		Cu (gpl)		38,96		4,86					
Fecha Inicio Pruebas:		23/01/2012		H+ (gpl)		199,67		255,08					
Tipo de Solución :		Electrolito		Fe (ppm)		988		1033					
Flujo por Celda :		9,6 m3/h		Fe2+ (ppm)		20		781					
				Co (ppm)		164		167					
				Cl (ppm)		44,5		45					
				Mn (ppm)		11		12					
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial													
Voltaje (V)													
Intensidad (A)													
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas			Muestra (R-X/M-Y)	Concentración		Tiempo h	
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)		Voltaje 3 (V)	Cu (gpl)		H+ (gpl)
23/01/2012	160	14,45	3438,09	220	6,0	225	2,31	2,31	2,34	P-08 / M-01	29,25	212,34	0,0
23/01/2012	160	23,40	3443,54	220	6,3	224	2,44	2,51	2,55	P-08 / M-02	28,05	214,80	6,5
24/01/2012	160	11,25	3453,37	220	6,5	225	2,48	2,5	2,52	P-08 / M-03	26,20	43,65	18,3
24/01/2012	180	23,30	3463,42	220	6,7	226	2,49	2,56	2,59	P-08 / M-04	24,76	43,94	30,4
25/01/2012	170	12,30	3474,3	220	6,8	225	2,50	2,53	2,53	P-08 / M-05	23,15	223,69	43,5
25/01/2012	160	23,33	3483,59	210	6,7	224	2,54	2,5	2,51	P-08 / M-06	21,72	228,04	54,6
26/01/2012	160	11,00	3493,05	220	6,7	226	2,50	2,53	2,52	P-08 / M-07	20,32	225,97	66,0
26/01/2012	160	23,02	3503,01	220	6,7	226	2,52	2,5	2,52	P-08 / M-08	19,10	227,41	77,9
27/01/2012	170	13,50	3515,47	220	6,7	226	2,50	2,5	2,51	P-08 / M-09	17,15	232,65	92,9
					Prom	225	2,48	2,49	2,51				
								2,49					
Observaciones													
Densidad de Corriente			450 A/m2			Peso promedio			22,5				
Peso teórico de cátodos =			24,80 Kg										
Peso de Cátodos P-08/C-1=			22,5 Kg			Eficiencia Corriente =			90,7%			0,907	
P-08/C-2=			22,5 Kg			Eficiencia Corriente =			90,7%			0,907	
P-08/C-3=			22,5 Kg			Eficiencia Corriente =			90,7%			0,907	
Tiempo de duración de la Prueba			92,86 hrs. Con Ef. de Corriente media			90,7%			90,7				
Lavado de cátodos después de cosecha con agua fría.													

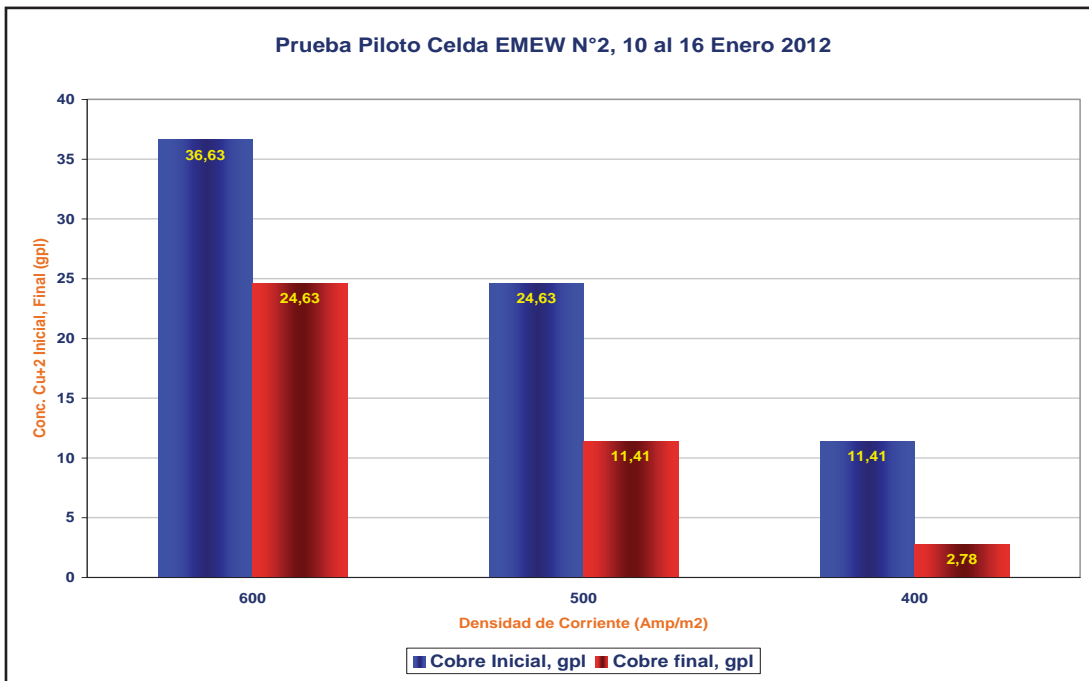
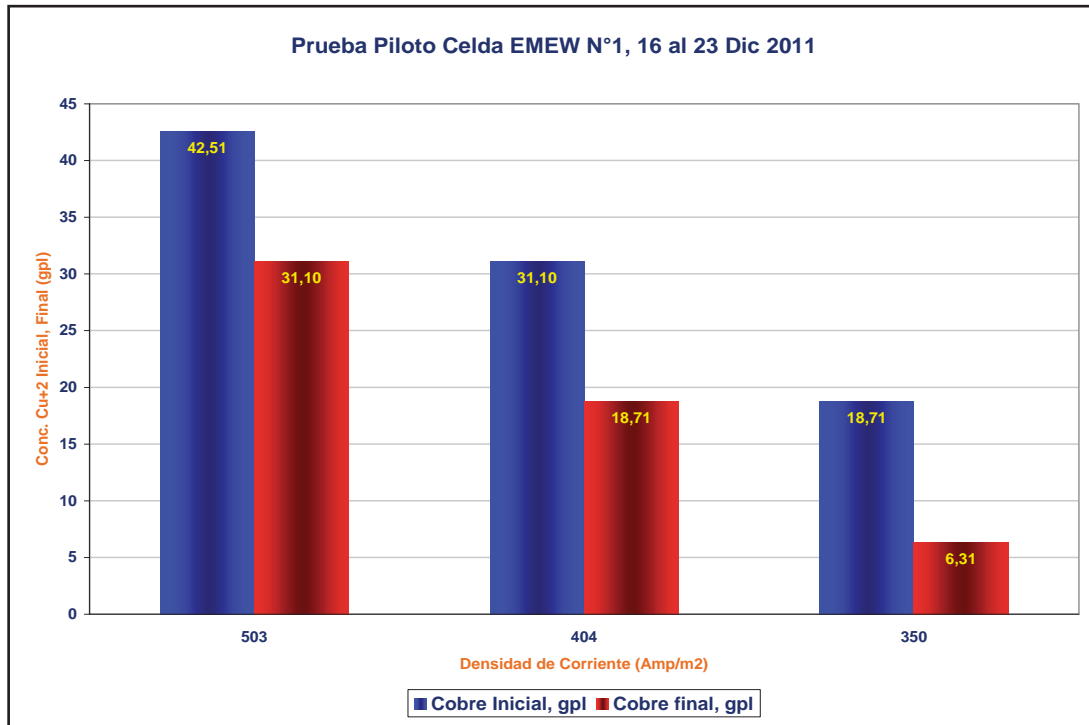
7.3.9 Tabla 7.12: Cartilla de datos prueba 9.

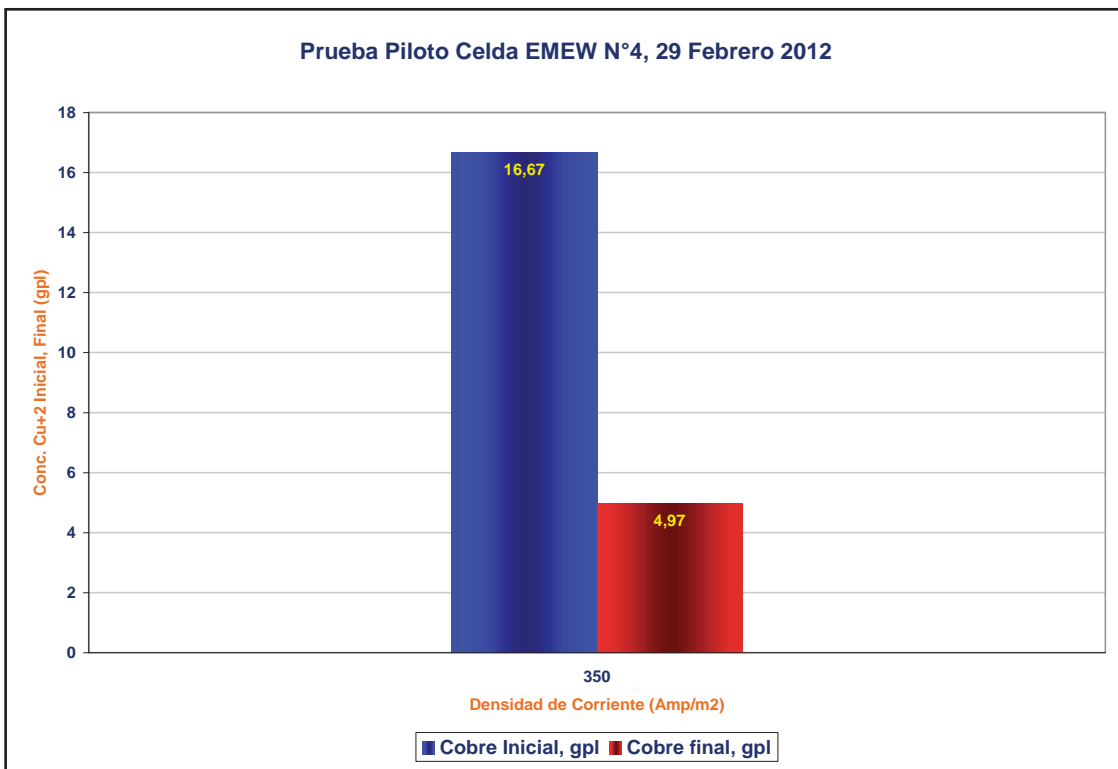
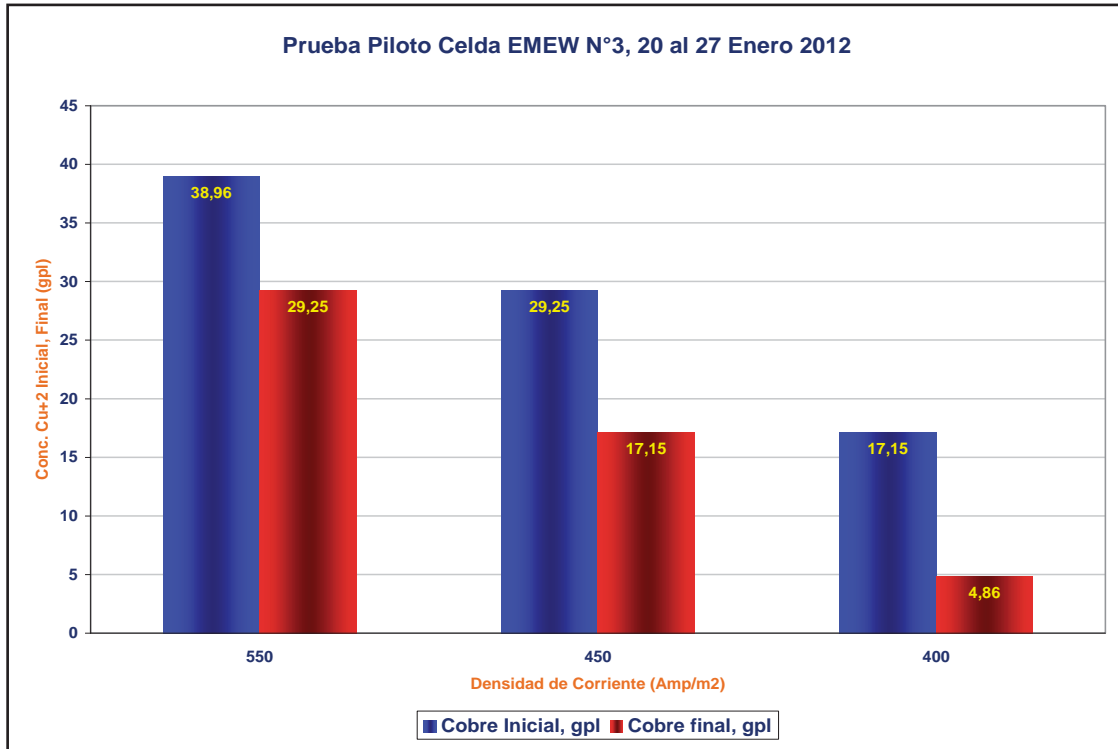
Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico			
N° de Batch :		3		Elemento		Muestra Inicial		Muestra Final					
N° de Prueba :		9		Cu (gpl)		38,96		4,86					
Fecha Inicio Pruebas:		27/01/2012		H+ (gpl)		199,67		255,08					
Tipo de Solución :		Electrolito		Fe (ppm)		988		1033					
Flujo por Celda :		9,6 m3/h		Fe2+ (ppm)		20		781					
				Co (ppm)		164		167					
				Cl (ppm)		44,5		45					
				Mn (ppm)		11		12					
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial													
Voltaje (V)													
Intensidad (A)													
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas			Muestra (R-X/M-Y)	Concentración		Tiempo h	
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)		Voltaje 3 (V)	Cu (gpl)		H+ (gpl)
27/01/2012	160	15,30	3515,53	200	6,0	212	2,29	2,29	2,29	P-09 / M-01	17,15	232,65	0,0
27/01/2012	160	23,09	3521,91	200	6,0	209	2,24	2,31	2,27	P-09 / M-02	16,07		7,7
28/01/2012	160	11,00	3531,7	200	6,0	200	2,40	2,48	2,46	P-09 / M-03	14,53		19,4
28/01/2012	160	23,11	3541,96	200	6,0	204	2,28	2,4	2,42	P-09 / M-04	13,09		31,7
29/01/2012	120	11,00	3551,76	200	6,0	204	2,26	2,4	2,41	P-09 / M-05	12,59		43,5
29/01/2012	120	23,03	3561,87	200	6,5	207,6	2,26	2,42	2,4	P-09 / M-06	10,67		55,6
30/01/2012	120	11,15	3572,08	200	6,4	209,5	2,45	2,51	2,49	P-09 / M-07	9,58		67,9
30/01/2012	160	23,05	3582,04	200	6,5	207,6	2,45	2,51	2,49	P-09 / M-08	7,89		79,8
31/01/2012	160	11,20	3592,17	200	6,5	209	2,46	2,53	2,51	P-09 / M-09	6,04		92,0
31/01/2012	160	23,05	3601,96	200	6,5	209	2,46	2,55	2,49	P-09 / M-10	4,86	255,08	103,7
						Prom	207	2,36	2,44	2,42			
									2,41				
Observaciones													
Densidad de Corriente				414 A/m ²				Peso promedio				21	
Peso teórico de cátodos				= 24,60 Kg									
Peso de Cátodos				P-09/C-1= 21 Kg				Eficiencia Corriente = 85,4%				0,854	
				P-09/C-2= 21 Kg				Eficiencia Corriente = 85,4%				0,854	
				P-09/C-3= 21 Kg				Eficiencia Corriente = 85,4%				0,854	
Tiempo de duración de la Prueba				103,72 hrs. Con Ef. de Corriente media				85,4%				85,4	
Lavado de cátodos después de cosecha con agua fría.													

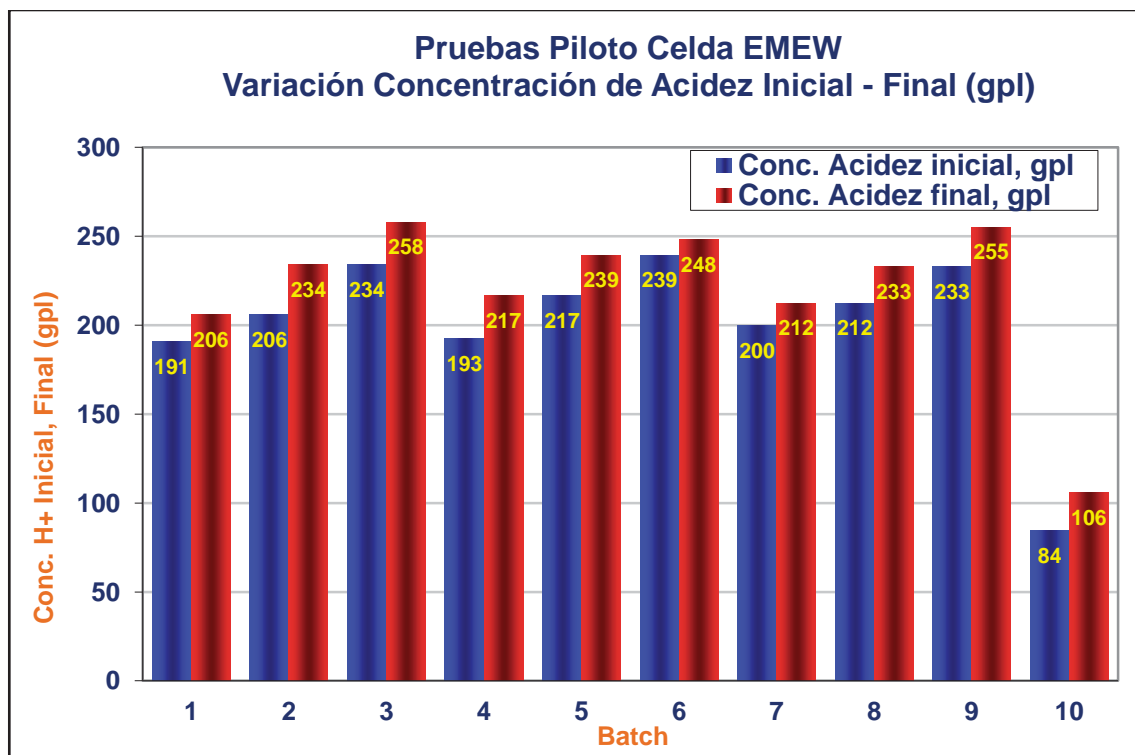
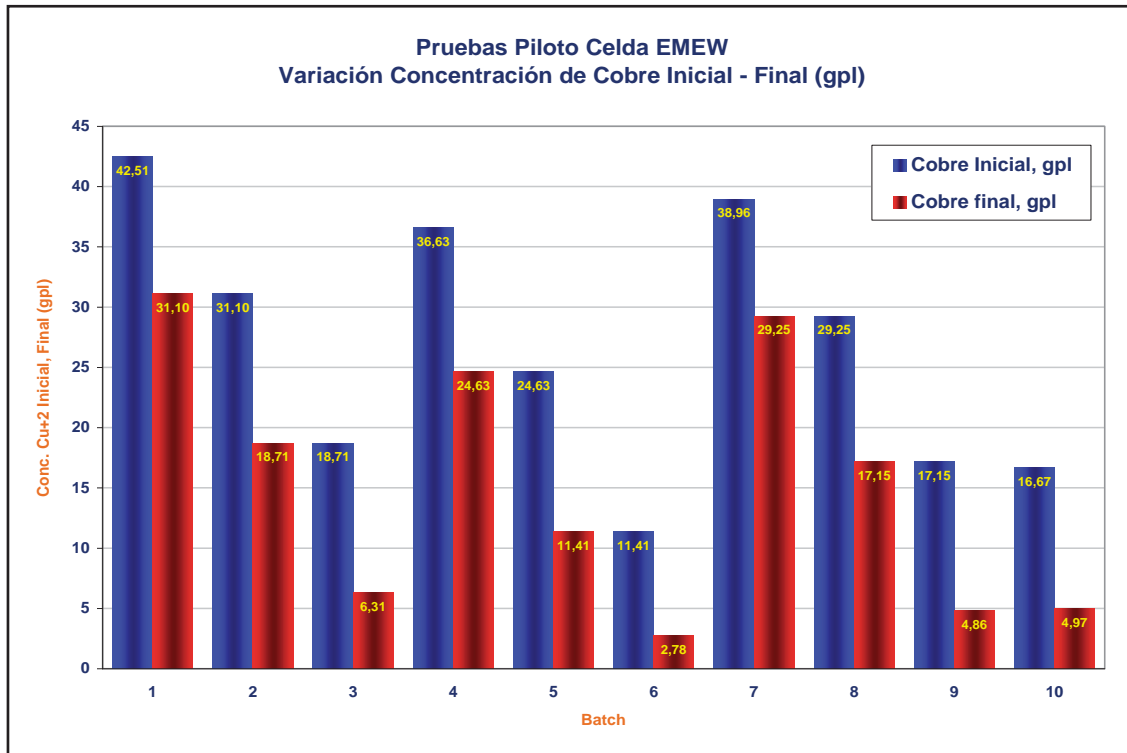
7.3.10 Tabla 7.13: Cartilla de datos prueba 10 (Compósito Canaletas).

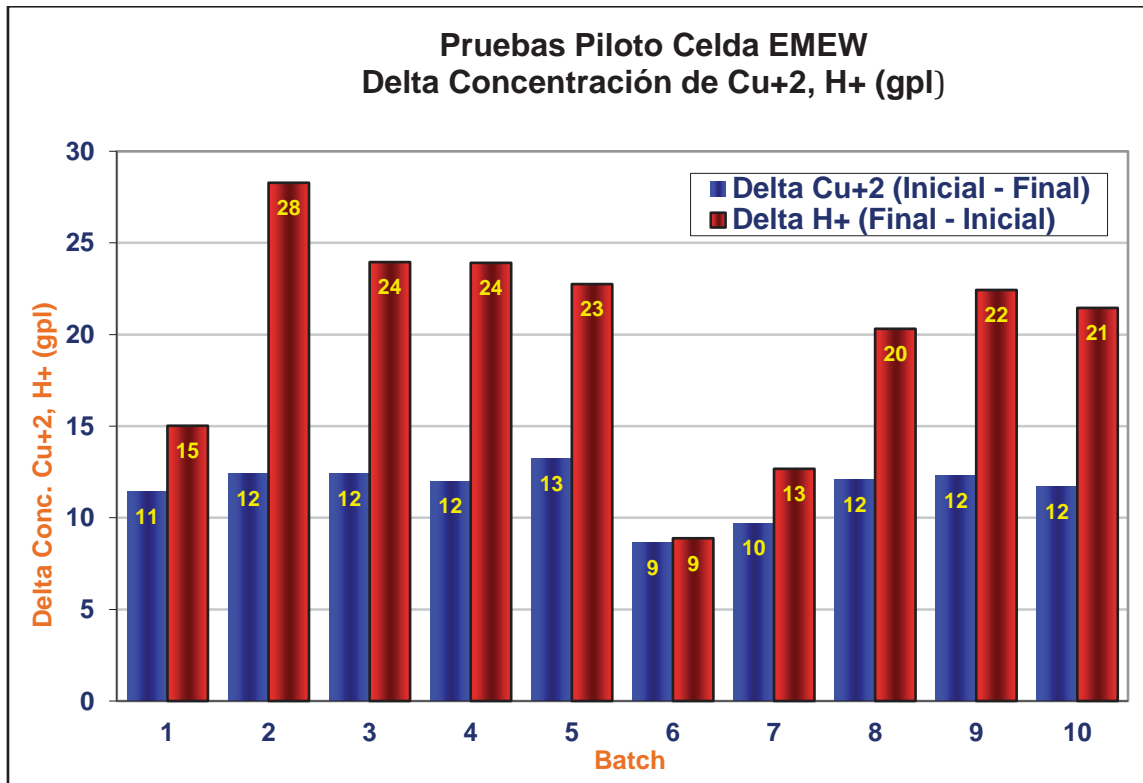
Planilla de Datos Pruebas Piloto EMEW CODELCO RT										Análisis Químico		
N° de Batch : 4		N° de Prueba : 10		Fecha Inicio Pruebas: 29/02/2012		Tipo de Solución : Composito Descarte		Flujo por Celda : 180 lt/min		Elemento	Muestra Inicial	Muestra Final
										Cu (gpl)	16,67	4,97
										H+ (gpl)	84,48	105,93
										Fe (ppm)	558	581
										Fe2+ (ppm)	227	402
										Co (ppm)	80	77
										Cl (ppm)	23,7	25
										Mn (ppm)	11	9
										Sólidos Susp	38	5
Barrido de Voltaje-Intensidad para solución Inicial												
Voltaje (V)	3,6	3,27	2,93	2,57	2,24							
Intensidad (A)	309	256	206	155	107							
Fecha (dd/mm/aaaa)	Flujo (lt/min)	Hora (hh:mm)	Rectificador			Celdas			Muestra (P-XX/M-YY)	Concentración		
			Horómetro (hr)	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Intensidad (A)	Voltaje 1 (V)	Voltaje 2 (V)		Voltaje 3 (V)	Cu (gpl)	H+ (gpl)
29/02/2012	180	16,50	3602,19	175	4,5	181	2,78	2,79	-	P-10 / M-01	16,67	84,48
29/02/2012	180	23,28	3607,69	175	4,5	183	2,76	2,74	-	P-10 / M-02	16,19	87,43
01/03/2012	180	11,40	3617,89	175	4,5	181	2,76	2,77	-	P-10 / M-03		
01/03/2012	180	23,00	3627,36	175	4,5	181	2,75	2,76	-	P-10 / M-04		
02/03/2012	180	11,40	3637,91	175	4,3	182	2,65	2,66	-	P-10 / M-05	12,4	94,66
02/03/2012	180	23,02	3647,42	175	4,3	181	2,65	2,75	-	P-10 / M-06	11,2	96,61
03/03/2012	180	13,10	3659,2	175	4,1	182	2,54	2,65	-	P-10 / M-07	9,63	99,05
03/03/2012	180	22,59	3667,38	175	4,0	184	2,55	2,63	-	P-10 / M-08	8,72	99,54
04/03/2012	180	15,37	3681,27	175	4,0	183	2,53	2,61	-	P-10 / M-09	7,08	97,59
04/03/2012	180	23,00	3687,11	175	4,1	184	2,53	2,63	-	P-10 / M-10	6,36	98,08
05/03/2012	180	12,18	3698,51	175	4,1	182	2,54	2,58	-	P-10 / M-11	4,97	105,93
							2,64	2,69				
	180,0			175,0	4,3	181,8		2,66				
						364						
Observaciones												
Lavado de cátodos después de cosecha con agua fría.												
Peso teórico de cátodos = 23,99 Kg												
Peso de Cátodos R-3/C-1= 21,5 Kg Eficiencia Corriente = 89,6% 0,896												
R-3/C-2= 21,5 Kg Eficiencia Corriente = 89,6% 0,896												
R-3/C-3= Kg Eficiencia Corriente = 0,0% 0,000												
Tiempo de duración de la Prueba = 115,6 hrs. Con Ef. de Corriente media 89,6% 89,6												

7.4 ANEXO 4: GRAFICOS RESUMEN DE PRUEBAS PILOTO REALIZADAS

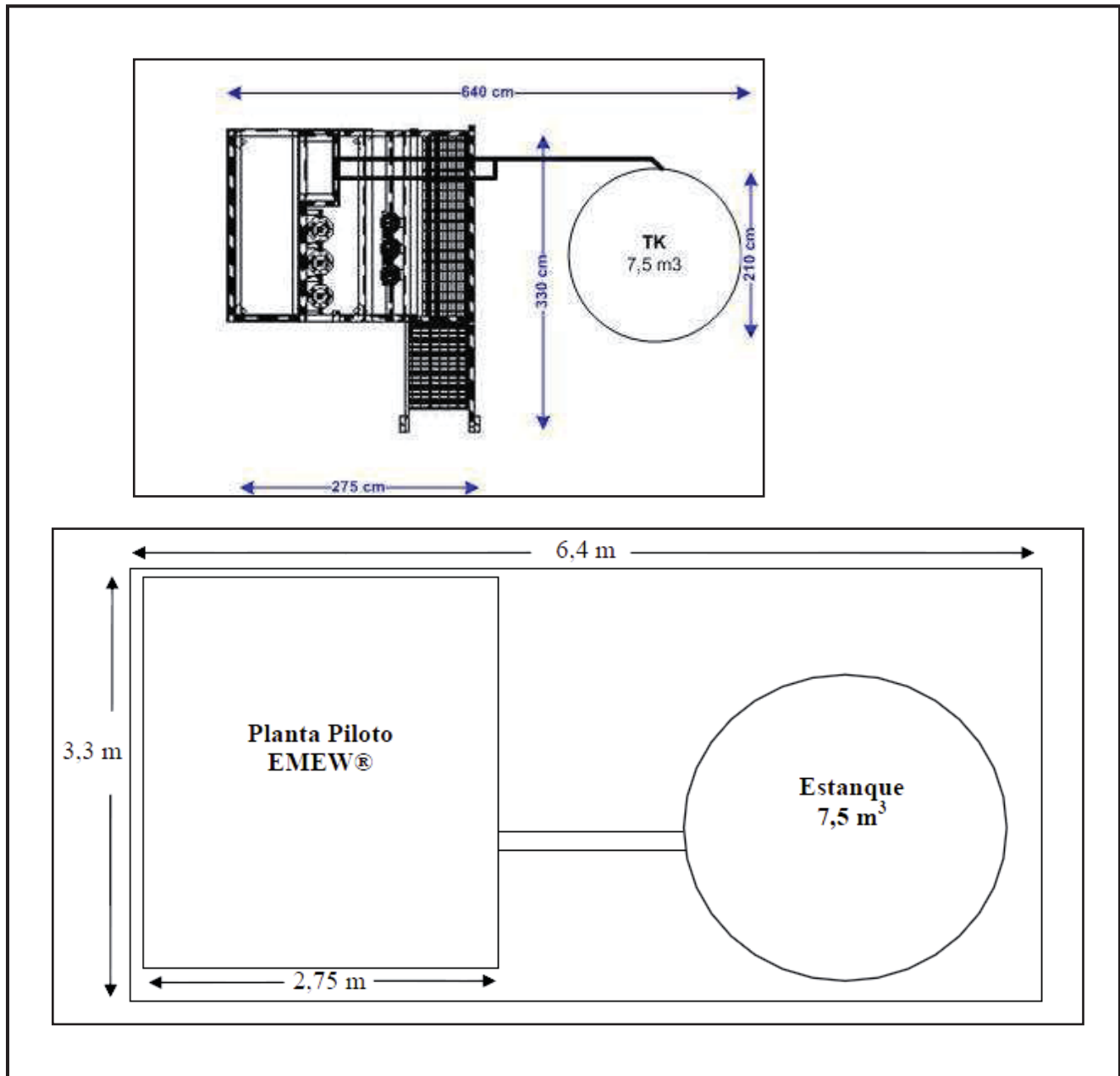








7.5 ANEXO 5: DIMENSIONES DE PLANTA PILOTO



7.6 ANEXO 6: FACTORES PARA DISEÑO DE UNA PLANTA EMEW®

7.6.1 Consideraciones de Diseño

Para los criterios de diseño de una planta a escala industrial, los factores principales a considerar son:

- Concentración de cobre en electrolito de alimentación a la planta EMEW®: La concentración de cobre en solución, junto con el caudal y el corte al que se quiere llegar, son consideradas para determinar el tamaño de planta para una producción de cátodos EMEW® fija esperada.

- La densidad de corriente que puede ser aplicada manteniendo una alta eficiencia de corriente: La densidad de corriente de operación para una instalación comercial dependerá de decisiones tomadas por División Radomiro Tomic, las que considerarán, entre otros factores: El número de celdas necesario para una producción determinada (y por lo tanto el costo de inversión) depende de la corriente aplicada a estas, siempre que la eficiencia de corriente permanezca dentro de un rango objetivo a diferentes niveles de densidad de corriente. La densidad de corriente empleada para la recuperación de cobre es proporcional al grado de pureza en la solución a tratar y, que se traduce en los costos de inversión, siendo menor la inversión a grados de impureza menores en la solución a tratar. Sin perjuicio a la modalidad de uso de la planta EMEW®, Blumos S.A. se comprometió a operar la planta bajo una eficiencia de corriente mínima de 85%. Las etapas individuales de funcionamiento acorde a cada densidad de corriente aplicada logran eficiencias puntuales por sobre el 90%. Sin embargo y contemplando posibles cambios en la composición química de la solución o fugas eléctricas parásitas en el sistema, se plantea 85% como un valor razonable y dentro de un esquema de trabajo serio y responsable, para operaciones de similares características a las aquí planteadas.

Factores que afectan la eficiencia de corriente^[17]

- **Presencia de Fe en el electrólito**

Reducción $\text{Fe}^{+3} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{+2}$ reduce la eficiencia de corriente catódica al utilizar parte de la corriente destinada a depositar cobre.

En Chile: 1 gpl de Fe en electrólito de EO (0.2 gpl de ferroso y 0.8 gpl de férrico), produce una eficiencia de corriente catódica de 95%. Concentraciones mayores de Fe producen bajas dramáticas en la eficiencia.

- **Presencia de Mn en el electrólito**

El Mn existe principalmente como Mn^{+2} en solución de EO de Cu. Este elemento puede ser arrastrado desde la etapa de extracción por solvente, y solo afectaría a la etapa de electrowinning si es que la cantidad de cooper wad aumenta, ya que son estos compuestos de cobres negros los que poseen Mn en su estructura química. Puntualmente en Codelco RT no existe dicho problema, razón por la cual no se solicita análisis por manganeso al laboratorio.

Su oxidación en el ánodo puede ser a permanganato (MnO_4^-) o a bióxido de manganeso (MnO_2). El permanganato origina un aumento del poder oxidante del electrólito (alto E_h). La consecuencia es que el cloruro se oxida a cloro gaseoso en solución, generando corrosión en la planta. El bióxido de Mn se deposita en el ánodo, generando "casarilla" de plomo, es decir, contribuyendo a la corrosión de ánodos. Por tanto se debe mantener baja la concentración de Mn en solución (10 - 30 ppm).

- **Arrastre de orgánico**

Desde la operación de SX suele haber arrastre de orgánico al electrólito de EO. Este orgánico produce problemas de calidad catódica.

- **Corrosión de cátodos permanentes**

Los cátodos permanentes son de acero inoxidable 316L y son atacados por el ión cloruro. El efecto es picadura (pitting) de los cátodos que luego causa adherencia del cátodo de cobre al cátodo permanente (especialmente cerca de la línea de agua), haciendo difícil el

despegue y, en ocasiones, produciendo la fractura de la hoja de acero. Se debe mantener la concentración de cloruro bajo 20 ppm en el electrolito.

- **Corrosión de ánodos de plomo**

La liberación de Pb desde el ánodo hacia el electrolito se produce cuando el ánodo comienza a perder la capa de óxidos de Pb (PbO_2 , principalmente) que lo protege, y éste fenómeno sucede cuando acontecen cortes de energía eléctrica en la planta de EO, así como también cuando la concentración de MnO_2 es la suficiente para desplazar al PbO_2 de la superficie del ánodo.

- El caudal apropiado para la densidad de corriente aplicada: De acuerdo a la densidad de corriente con la que se trabaje, se ajustará el flujo por celda. Estas pruebas de electro obtención fueron realizadas a un caudal medio de 9.4 [$\text{m}^3/\text{h}/\text{celda}$] para la producción de cátodos de cobre. El caudal de operación en las celdas EMEW® para producir cobre tiene los siguientes efectos generales:

- Un caudal alto ($>17-18 \text{ m}^3/\text{h}$) promueve, en general, una mayor eficiencia a una densidad de corriente y concentración de cobre dadas.
- Un caudal alto puede resultar en un cátodo más firme y menos rugoso.

Hay condiciones bajo las cuales un caudal alto puede llevar a un mal depósito del cátodo incluso se puede generar backstripping (disolución del cobre depositado) de este, particularmente a concentraciones de cobre más bajas y en presencia de oxidantes (como ión férrico) en solución. Por lo tanto, en términos generales, el caudal por celda para la producción de cobre se mantendrá tan alto como sea práctico, dependiendo de la calidad (cantidad de impurezas y concentración de Cu) de la solución de electrolito a procesar.

Eficiencia de corriente estimada para las condiciones anteriores: Como se mencionó en la Sección 3.3.1, la figura 3.5 muestra la relación entre eficiencia y densidad de corriente para las pruebas realizadas en Radomiro Tomic con electrolito pobre. Los resultados obtenidos en las pruebas indican que la eficiencia de corriente promedio para este tipo de

solución es del orden del 90%. Los cálculos de eficiencia de corriente se basan en peso promedio de cátodos al final de la prueba (y son, por lo tanto, directas).

Concentración de ácido en el electrolito alimentado: La concentración de ácido en el electrolito (160 a 200 gpl) es importante para el proceso de electrowinning, ya que el ácido presente en la solución mejora la conductividad iónica del electrolito y con ello también el desempeño del sistema.

Obtención de un producto de alta calidad comercial: El peso típico promedio de los cátodos a cosechar en la celda EMEW® es de 25 a 30 [Kg]. En las pruebas piloto realizadas con electrolito pobre de electrowinning se planificaron las cosechas pensando en la cantidad de solución con que se contaba y la concentración de cobre contenida debía abarcar más de un rango de concentración, es por esto que los pesos de los cátodos obtenidos durante las pruebas piloto se encontraron entre 19 y 22 [Kg].

7.6.2 Configuración de armado de una planta EMEW®

- Disposición de las Celdas

Las celdas están dispuestas normalmente en filas de 15 unidades, conectadas hidráulicamente en paralelo y eléctricamente en serie entre ellas. Este banco alimenta al siguiente banco de 15 celdas, formándose un marco como se muestra en las **Figuras 7.6 y 7.7**.

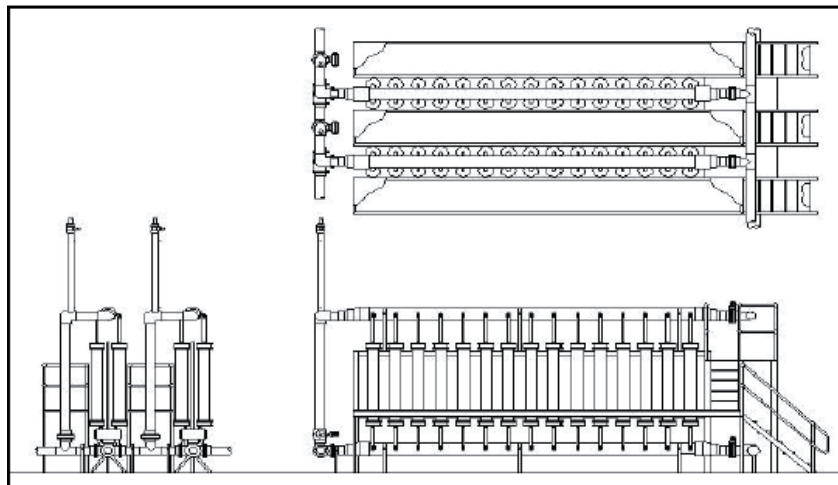


Figura 7.6: Marco Celdas EMEW®.

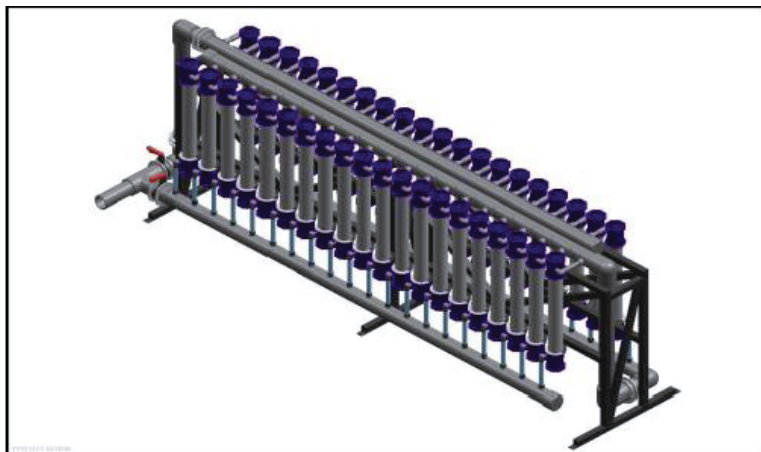


Figura 7.7: Marco Celdas EMEW®.

Con los marcos de 30 celdas, se construyen módulos (3 marcos). Típicamente se usa un rectificador y una bomba para controlar la operación de cada módulo. El rectificador está controlado por un switch de caudal que asegura que haya flujo presente antes de poder aplicar corriente. La bomba de proceso alimenta el primer banco, y luego el electrolito fluye a través de cada banco hasta retornar al estanque de proceso. Existen válvulas a lo largo de cada manifold para cada marco, de modo que cualquier marco de 30 celdas puede ser by-paseado (saltado) mientras el resto del módulo permanece operacional. Esto permite cosechar un marco a la vez, o efectuar trabajos de mantenimiento o inspección en un módulo.

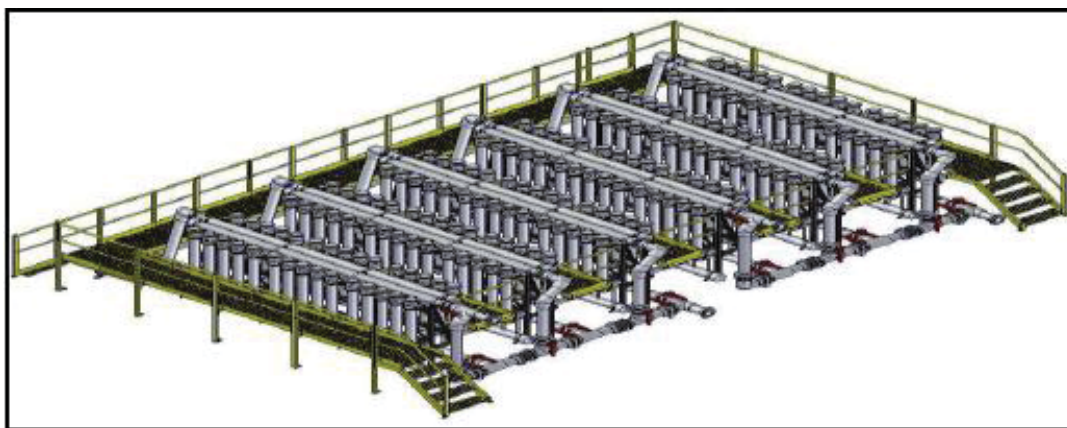


Figura 7.8: Planta de 180 Celdas EMEW®.

Los módulos pueden ser dispuestos en varias configuraciones, dependiendo de factores tales como espacio disponible, dimensiones del espacio, construcción de galpón, posición de tecla de cosecha, aprovisionamiento de la solución, etc. En las **Figuras 7.8 y 7.9** se muestran plantas de 2 y 3 módulos de celdas EMEW®.

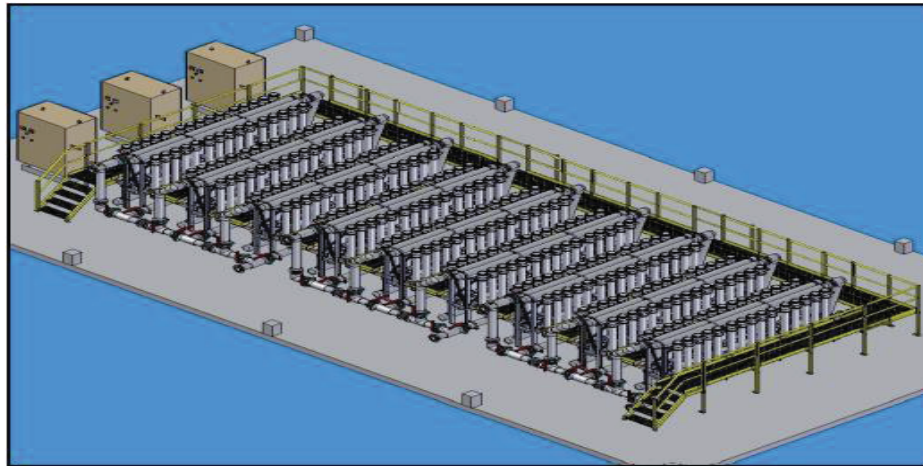


Figura 7.9: Planta de 270 celdas EMEW®.

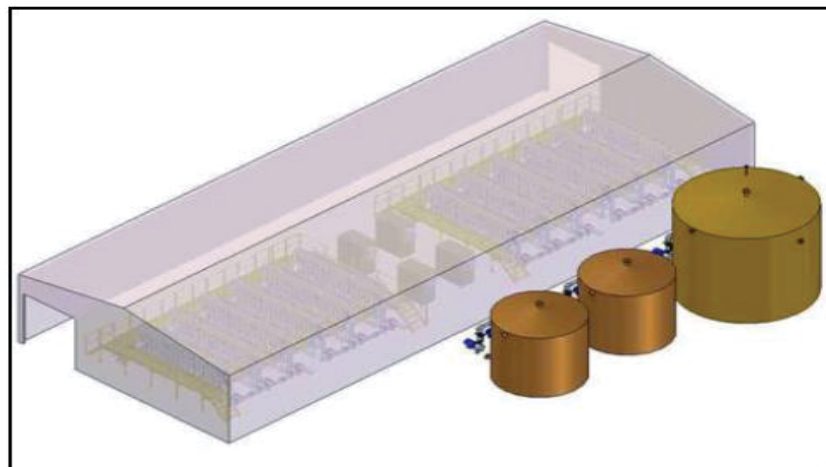


Figura 7.10 Módulos de tecnología EMEW® dispuesto en Galpón.

- Características del Radier

La planta es muy liviana en construcción, por lo que los requerimientos de obras civiles son bastante simples. Se sugiere que la planta se monte sobre soportes longitudinales de concreto de un mínimo de 50 [mm] de altura incorporados a un radier de concreto

liviano, lo que permite minimizar cualquier corrosión por derrames, etc. La carga completa por soporte se estima en 500 [Kg]. El radier necesario es de 125 [mm] de espesor. Se sugiere además proteger el radier con una carpeta de PVC o HDPE para evitar la corrosión del concreto.

- Cosecha

Se puede cosechar un módulo completo o un banco a la vez. En este último caso, las bombas incorporan velocidad variable para ajustar el caudal a un banco menos, y el rectificador se ajusta automáticamente también a una menor demanda de corriente. Para cada banco o para todo el módulo, luego de detener el flujo que lo alimenta, se drena libremente el electrolito retornando al estanque de proceso. Luego se cosechan las celdas, eliminando así el contacto de los operadores con electrolito.

Para cada marco, los cátodos cosechados se juntan en bins (rack contenedor para cátodos) ubicados al final de cada marco, con 40 cátodos por bin. El bin es retirado de la planta por una grúa horquilla para luego proceder a una zona de lavado y posterior enzunchado. **Figura 7.11.**

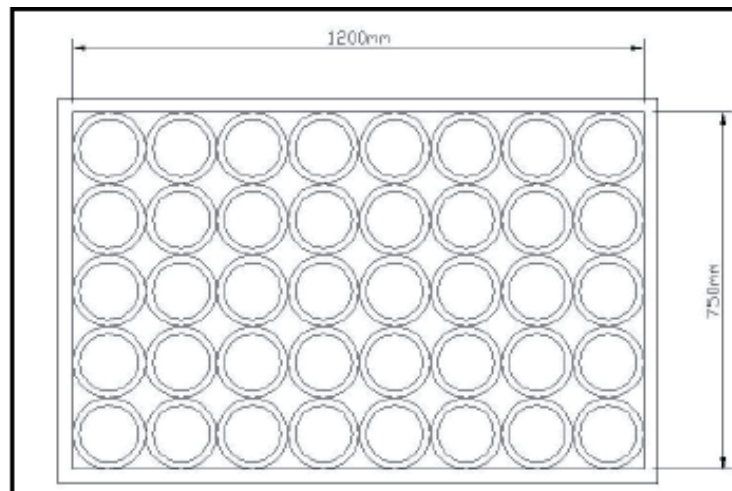


Figura 7.11: Apilamiento de Cátodos EMEW® en Bins.

- Lavado y Empaque

Una vez realizada la cosecha de los cátodos es recomendable lavarlos por medio de un proceso estandarizado por el cliente para remover trazas de ácido de la superficie de los

cátodos, evitando así, la precipitación de productos sólidos como sales que podrían afectar el análisis químico del cátodo. Los cátodos pueden ser enzunchados en grupos de 19 cátodos, lo que resulta en una estructura muy compacta y que no se desarma con el movimiento, por ejemplo, el movimiento originado en el transporte terrestre.

- Impacto Ambiental y Seguridad Industrial

Las plantas están configuradas con grupos de celdas que operan hidráulicamente en paralelo, donde cada grupo tiene una válvula de venteo de gases para liberar el Hidrógeno y el Oxígeno producidos durante la electro-obtención. Estas válvulas están conectadas a un manifold (tubería) común que a su vez es venteadado a la atmósfera en el tanque de recirculación. Durante la cosecha, los operadores no se ven expuestos a electrolito de cobre ni a ácido sulfúrico, por lo que la planta presenta grandes ventajas de higiene y seguridad industrial.

7.7 ANEXO 7: CALIDAD FISICA

Se refiere a los requerimientos físico-morfológicos con los que con los que debe cumplir un cátodo de cobre, desde el punto de vista macroestructural como pueden ser nódulos formados por depositación selectiva en una zona puntual como también microestructurales.

<i>DEFECTO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>PRINCIPALES VARIABLES O CAUSA RELACIONADA</i>
<i>Plomo</i>	Origen en el desprendimiento de laminillas de Plomo provenientes del ánodo. Se presenta regularmente incrustado en la zona baja del cátodo y normalmente no supera el 1% del cuerpo.	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenión Celdas - Cortocircuitos - Flujo - Desenergización celda - Temperatura electrolito - Calidad ánodo
<i>Nódulos Superficiales</i>	Origen por la incorporación de un material sólido de pequeño tamaño y que es rodeado por un depósito cristalino adoptando la forma de una esfera. Su ocurrencia es generalmente zonificada y tiene asociado una contaminación química por plomo y azufre.	<ul style="list-style-type: none"> - Distancia interelectrónica - Sólidos en suspensión - Temperatura Electrolito - Aditivos - Calidad electrodos - Flujo
<i>Nódulos Internos</i>	Origen en el proceso de nucleación y crecimiento anómalo del depósito. Su presencia no compromete químicamente al cátodo. A diferencia del anterior, su forma es de media esfera sobrepuesta en el depósito.	<ul style="list-style-type: none"> - Falta homogeneidad en carga superficial - Aditivos
<i>Cortocircuito</i>	Falta de depósito en zona de contacto entre ánodo-cátodo o sobre depósito localizado en los bordes del cuerpo catódico, dependiendo de la zona del	<ul style="list-style-type: none"> - Distancia interelectrónica - Geometría electrodos - Aislador anódico - Peso depósito catódico

	cortocircuito.	
Orgánico	Presencia de materia orgánica proveniente del circuito de extracción por solvente.	- Arrastre de orgánico de la SX.
Estrías	Hendiduras ubicadas en el cuerpo catódico, en dirección a las líneas de corriente del flujo de electrolito y por la evolución de oxígeno desde el ánodo.	- Distribución de Flujo - Distancia interelectrónica
Marca Aislador	Hendidura en la zona baja del cátodo, ocasionada por la presencia de elementos aislantes o aislador anódico.	Variables operacionales: • Mal asentamiento del aislador
Sulfato	Presencia de residuos de sulfato de cobre en alguna parte del cuerpo, caracterizada por su coloración blanca, azul claro.	- Variables operacionales: • Lavado electrodos • Goteo de electrolito del puente grúa. • Lavado de contactos. - Housekeeping en general.
Elementos Extraños en Depósito	Presencia de elementos extraños en el depósito catódico como aisladores anódicos, laminillas de cobre, entre otras.	- Variables operacionales
Falta de Depósito Catódico	Ausencia de depósito en el cátodo no teniendo el peso requerido para cosecha.	- Concentración Cu - Flujo - Densidad de Corriente

7.8 ANEXO 8: ESTANDARES FISICOS DE CALIDAD

DIMENSIONES	NOMINAL	GRADO A	RECHAZO	STANDARD
Alto	100 cm	± 3 (min. 97 cm)	± 3 (min. 97 cm)	± 6 (min. 94 cm)
Ancho	100 cm	± 1 (min. 99 cm)	± 1 (min. 99 cm)	± 5 (min. 95 cm)
Peso	40 Kg	± 5 (min. 35 cm)	± 5 (min. 35 cm)	± 10(min. 30 cm)

Estándares Físicos de Cátodos.

NOMBRE	ABREV.	TIPO	GRADO A	GRADO R	GRADO STD
NÓDULO	Nod.	Internos	Nod≤1500cm ² h≤4mm.	1500cm ² <Nod≤4000cm ² h≤6mm.	4000cm ² <Nod≤7000cm ² 6mm<h≤20mm
		Superficial	Nod≤1000cm ² h≤6mm.	1000cm ² <Nod≤3000cm ² h≤8mm.	3000cm ² <Nod≤6000cm ² h≤20mm
CORTO CIRCUITO	Cc.	Planchón	Exento	Exento	Pb≤300cm ² No susceptible de eliminar
		Crecimiento Anómalo	Exento	Exento	Pb≤300cm ² No susceptible de eliminar
PARCHE	P.	Superficial	Exento	Exento	Pb≤300cm ² No susceptible de eliminar
		Incrustado	Exento	Exento	≤Pb≤300cm ² No susceptible de eliminar
SULFATO	S.		Exento	S≤300cm ² Escobillado	300cm ² <S≤3000cm ² No recuperado

NOMBRE	ABREV.	TIPO	GRADO A	GRADO R	GRADO STD
FALTA DEPÓSITO	FD	Bajo Peso	FD≤ 0,03 cm Sin pérdida rigidez	FD≤ 0,02 cm Con pérdida rigidez parcial	SD>0,01cm Con pérdida rigidez total
		Rotura	SD≤200cm ²	200cm ² <SD≤500cm ²	500cm ² <SD≤5000cm ²
QUEMADO	QD.		Exento	100cm ² <QD≤500cm ² Superficial escobillado	500cm ² <SD≤3000cm ² Profundo
SOBRE DEPÓSITO	SBD	Rebarbas	RB≥2cm	2cm<SBD≤5cm	5cm<SBD≤10cm
		Cordón	Espesor≤1cm No poroso	1cm<Esp≤2cm Poroso	Espesor>2cm Poroso
MARCA DE AISLADOR	MA		MA ≤100cm ² , marcas limpias menor a 0,03 cm de profundidad	MA ≤100cm ² , marcas limpias menor a 0,06 cm de profundidad	MA ≤100cm ² , marcas limpias mayor a 0,06 cm de profundidad

7.9 ANEXO 9: CALCULOS EVALUACIÓN ECONÓMICA^[18]

Calculo de los ingresos por año:

- **Valor de los ingresos por año:**

Año	U\$/Ton Cu	Ton/año Cu	U\$/año	U\$/Ton H ₂ SO ₄	Ton/Año H ₂ SO ₄	U\$/Año
2011	4.400	5.743	25.269.200	88	8.844	778.272
2012	4.400	6.480	28.512.000	88	9.980	878.240
2013	4.400	6.480	28.512.000	88	9.980	878.240
2014	4.400	6.480	28.512.000	88	9.980	878.240
2015	4.400	6.480	28.512.000	88	9.980	878.240
2016	4.400	6.480	28.512.000	88	9.980	878.240

- **Costo de los equipos principales**

Bombas centrifugas

$$C_p = U\$8000$$

Rectificador de corriente

$$C_p = U\$5000$$

- **Costo Total de los equipos principales**

Costo Equipos Principales

$$5,103,000 + 8000 * 35 + 5000 * 35 = U\$5,558,000$$

Calculo de Costo CIF

$$CIF = 5,558,000 + 0.2CIF$$

$$CIF = U\$6,947,500$$

- **Capital de Inversión**

Por el metodo de Lang se obtiene los siguientes valores para una planta de fluidos:

Capital Total de inversión

$$CTI = 6 \cdot 6,947,500$$

$$CTI = U\$41,685,000$$

Capital Fijo

$$C.F = 5 \cdot 6,947,500$$

$$C.F = US\$34,737,500$$

Capital de Trabajo

$$CT = CTI - CF$$

$$CT = 41,685,000 - 34,737,500$$

$$CT = US\$6,947,500$$

Costo total del Producto

$$Mano\ de\ obra = 10 \cdot 360 \cdot 24 \cdot 8$$

$$Mano\ de\ obra = US\$691,200$$

Servicios de Agua y Electricidad

15 % de CTP

Administración

3,5% de CTP

Depreciación

Utilizando el metodo de el porcentaje del costo de los equipos principales para la determinacion del monto depreciable de una planta anexa .

$$Cantidad\ depreciable = 6,947,500 \cdot 3,5 = US\$24,316,250$$

Para una depreciacion lineal en 10 años:

$$dt = \frac{24,316,250}{10} = US\$2,431,625$$

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
Valor libro	24.316.250	21.884.625	19.453.000	17.021.375	14.589.750	12.158.125	9.726.500
Depreciación		2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625
CTP		6.121.936	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693

Costo total del producto

ENERGÍA	
Energía Electrowinning, Kwh	1.450
Otra Energía, Kwh	235
Energía Total, Kwh	1.685
Consumo energético, Kwh/Kg Cu	2,58
Costo Energía U\$D/Kwh	0,15
Costo Anual de energía, U\$D/año	2.507.760

$$CTP = 0,15 \cdot CTP + 0,035 \cdot CTP + 2,431,625 + 691,200 + 2,507,760$$

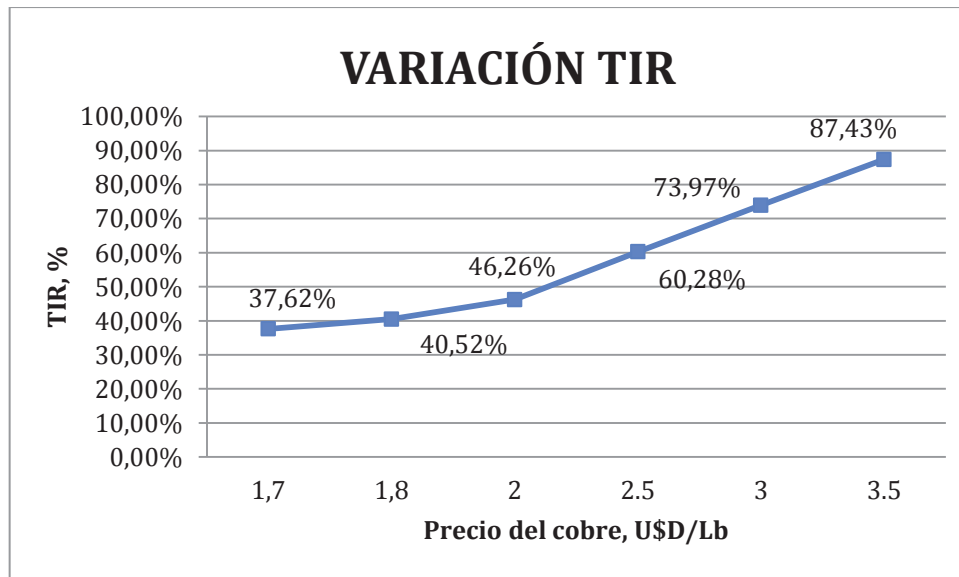
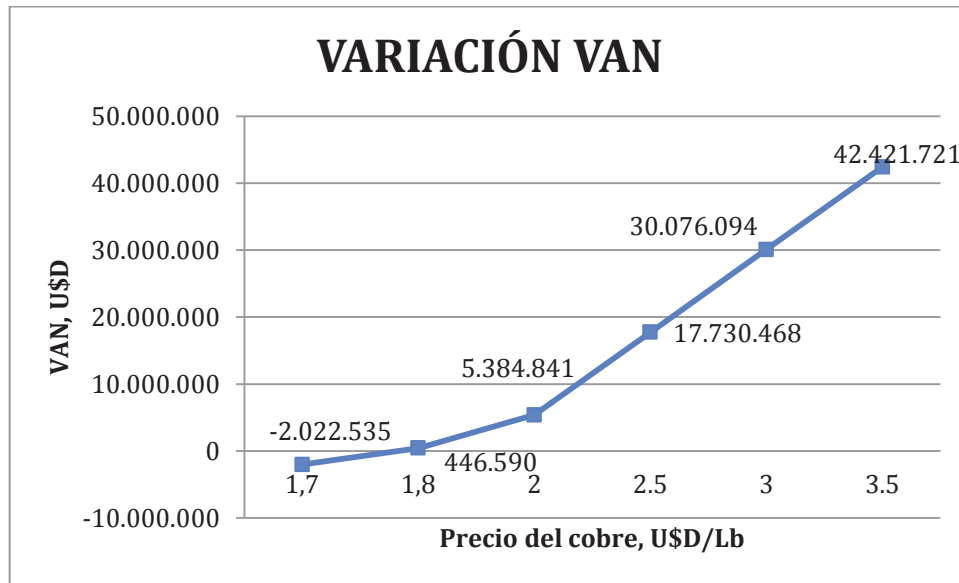
$$CTP = US\$6,908,693$$

Con los datos obtenidos se procede a efectuar el flujo de caja el proyecto.

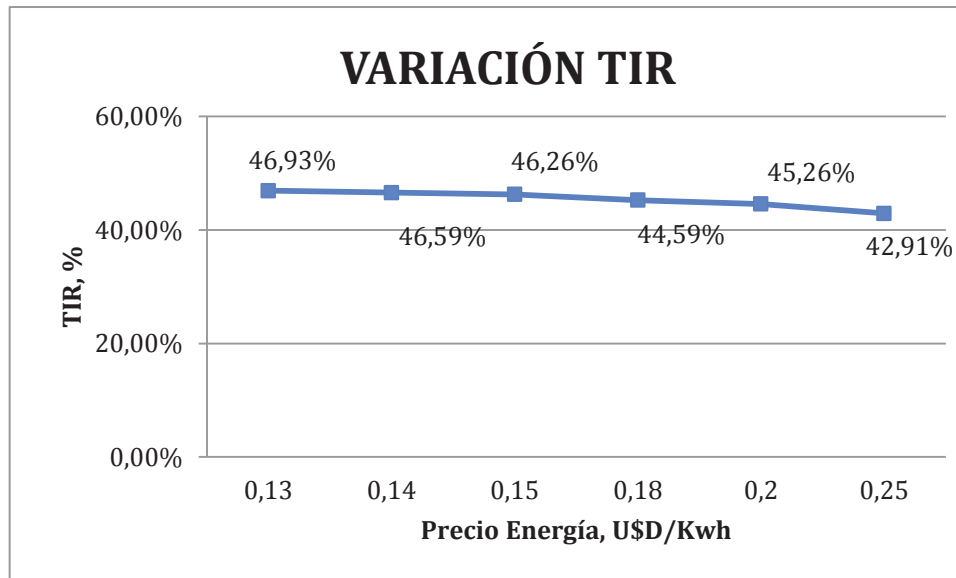
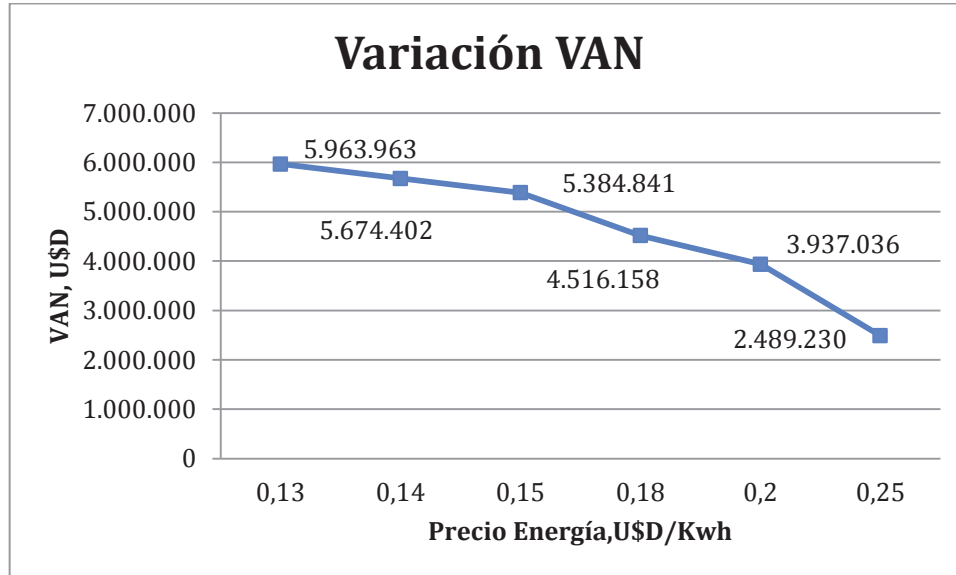
		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
ingreso por ventas	+		26.047.472	29.390.240	29.390.240	29.390.240	29.390.240	29.390.240
costo total producto	-		6.122.936	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693	6.908.693
ingreso operacional	=		19.924.536	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547
intereses	-		-	-	-	-		
depreciación	-							
venta activo	+							-
PEA	-			-	-	-	-	-
utilidades antes de impuestos	=		19.924.536	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547	22.481.547
impuestos	-		3.387.171	3.821.863	3.821.863	3.821.863	3.821.863	3.821.863
depreciación	+		2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625	2.431.625
amortización	-				-	-		
PEA	+			-	-	-	-	-
valor de libro	+							14.589.750
capital de trabajo	+							6.947.500
inversión capital propio	-	41.685.000						
prestamo	+							
FCN	=	- 41.685.000	18.968.990	21.091.309	21.091.309	21.091.309	21.091.309	42.628.559
	VAN	5.384.841						
	TIR	46,26%						

7.10 ANEXO 10: GRAFICOS ANALISIS DE SENSIBILIDAD

7.10.1 Precio del Cobre



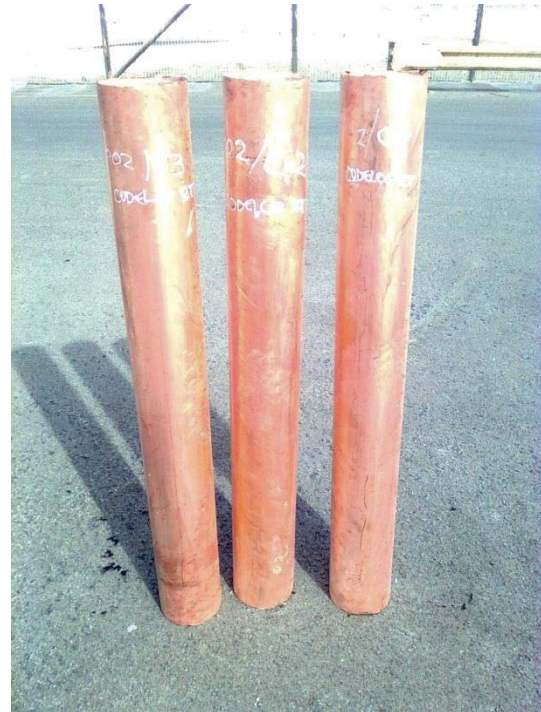
7.10.2 Precio de la Energía



7.11 ANEXO 11: FOTOS PRUEBAS PILOTO PLANTA EMEW







8 CAPITULO 8: BIBLIOGRAFIA

[1] Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Informe plan minero, Plan de Negocios y Desarrollo 2011, Codelco Norte, Calama (Chile), diciembre 2010.

[2] Hoja de cálculo, Descarte electrolito 2009-2010, Codelco Chile División Radomiro Tomic, Calama (Chile), año 2011.

[3][4] Gerencia de Extracción y Lixiviación Norte, Manual de Calidad, año 2009.

[5] Superintendencia LX-SX-EW, Apuntes proceso Radomiro Tomic, año 2011.

[6][7] Verónica Escobar, Tony Treasure, Richard Dixon, “Electro obtención de cobre a alta densidad de corriente”, Codelco Chile División Radomiro Tomic, Calama (Chile), año 2002.

[8] Dr. Luis Cifuentes Ceves, Presentación procesos hidrometalúrgicos, Universidad de Chile, Santiago (Chile), año 2007.

[9] Sebastián Badilla C., Memoria de Tesis, Optimización hidrometalúrgica a través de sistemas de celdas EMEW®, P. Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso (Chile), año 2013.

[10] Dr. Horacio Aros M, Apuntes cursos Procesos Electroquímicos EIQ-644 y Laboratorio Electroquímica EIQ-668, Escuela Ingeniería Química PUCV, Valparaíso (Chile), año 2009.

[11] Sebastián Badilla C., Memoria de Tesis, Optimización hidrometalúrgica a través de sistemas de celdas EMEW®, P. Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso (Chile), año 2013.

[12] Superintendencia LX-SX-EW, Presupuesto Materiales LX-SX-EW, Codelco División Radomiro Tomic, Calama (Chile), año 2011.

[13] Electrometals Technologies Limited, Apuntes EMEW®, año 2009.

[14] Electrometals Technologies Ltd, BlumosS.A., “Propuesta de pruebas piloto con celdas EMEW®”, Codelco División Radomiro Tomic, Santiago (Chile), 25 de Noviembre de 2010.

[15] “Manual de Operaciones”, Codelco Chile División Radomiro Tomic, Calama (Chile), enero 2002.

[16] “Manual de Especificaciones Químicas, Físicas y Manejo de Producto”, Codelco Chile División Radomiro Tomic, Calama (Chile), octubre 2006.

[17] Dr. Cristian Vargas R., Curso de capacitación operación de plantas de electro obtención, Departamento Ingeniería Química, USACH, Santiago (Chile), año 2006.

[18] Luis Vega A., Apuntes curso Ingeniería Económica EIQ-657, Escuela Ingeniería Química PUCV, Valparaíso (Chile), año 2009.