

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Industrial



**Estudio exploratorio de reducción en la ocurrencia de
Cortocircuitos en el proceso de Electrorefinación de
CODELCO-Ventanas**

Por:

Eduardo Barros Sánchez

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil
Industrial

Prof. Guía María Lorena Álvarez Sánchez

Enero 2014

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que han contribuido a lo largo de este proceso, en la realización de este trabajo de título.

En primer lugar a mi señora, por haberme acompañado en este camino que no estuvo exento de dificultades, pero que finalmente llega a buen puerto.

En segundo lugar a mis Padres, por haberse sacrificado y luchado para que pudiera cumplir mis sueños.

Un agradecimiento especial a mis hermanas, por su incansable apoyo en todo este tiempo.

Un especial reconocimiento a mi profesora guía y amiga María Lorena Álvarez, por su apoyo, confianza y paciencia durante este proceso.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos y compañeros de Universidad, ya que sin ellos todos estos años de estudio no habrán sido lo mismo.

A todos, muchas gracias.

Índice

Agradecimientos	2
Índice.....	3
Glosario.....	5
Lista de Abreviaturas y Siglas	7
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tablas.....	9
Resumen.....	10
1. Introducción	11
2. Objetivos y alcances.....	17
2.1 Objetivo General	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
2.3 Alcances.....	17
3. Antecedentes Principales	19
3.1 Antecedentes generales CODELCO Ventanas.....	19
3.2 Ubicación	19
3.3 Historia División Ventanas	20
3.4 Traspaso a CODELCO.....	21
3.5 Proceso productivo CODELCO Ventanas.....	21
3.6 Refinería electrolítica.....	22
3.7 Componentes de la refinería electrolítica	24
3.8 Distribución de circuitos	25
3.9 Distribución de corriente en un circuito	25
3.10 Operación	27
4. Marco Teórico.....	29
4.2 Electrorefinación del cobre.....	31
4.2 Principales problemas en la electrorefinación de cobre	33
4.3 Eficiencia de corriente	35
4.4 Procedimiento actual para la detección y control de cortocircuitos en CODELCO Ventanas:.....	36
4.5 Comparación CODELCO Ventanas con algunas refinerías del mundo: ..	38
5. Oportunidad.....	41
6. Tecnología Disponible	46
6.1 Circuito de conexión eléctrica multicircuital.....	46
6.2 Electrodiálisis Reactiva	47
6.3 Comparación de ambos métodos	48
7. Desarrollo Experimental	54

8. Evaluación Económica	61
9. Conclusiones	68
Bibliografía	70
Anexos	72
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 24 horas de detectar un cortocircuito	75
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 48 horas de detectar un cortocircuito	77
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 72 horas de detectar un cortocircuito	80
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 24 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuital	84
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 48 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuital	87
Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 72 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuital	90

Glosario

- **Ánodo:** Placa de cobre o plomo que se instala en la celda electrolítica por la cual entra la corriente eléctrica (carga positiva). En la electrorefinación los ánodos son placas gruesas de cobre producto de la etapa de fundición, las cuales se someten a refinación mediante electrolisis.
- **Barro Anódico:** Compuesto formado por los componentes del ánodo que no se disuelven y se depositan en fondo de las celdas electrolíticas. Está formado principalmente por metales tales como oro, plata, selenio, platino y paladio.
- **Blister:** Cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refino y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electrorefinación.
- **Cátodo:** Placa metálica de acero inoxidable o cobre puro que se instala en la celda electrolítica, por las cuales sale la corriente eléctrica. El cátodo tiene carga negativa y, por lo tanto, atrae a los cationes de cobre que son iones de carga positiva.
- **Celda Electrolítica:** Corresponde al recipiente en donde se lleva a cabo la electrolisis tanto en el proceso de electroobtención, como en el de electrorefinación. En ella la solución portadora de la especie disuelta del metal, previamente purificada y concentrada se hace circular a través de esta celda especial.
- **Ciclo Catódico:** Corresponde al periodo de tiempo que dura cada uno de los procesos de electrorefinación. En CODELCO-Ventanas tiene una duración de 8 días.
- **Concentrado:** Pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en el proceso productivo, en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Su proporción depende de la mineralogía de la mina.
- **Cortocircuito:** Fenómeno que se da en la superficie del cátodo cuando el depósito en la placa crece hasta alcanzar el ánodo.

- **Placa Madre:** Es la lámina inicial de cobre mediante la cual se inicia el proceso de electrolisis en la celda electrolítica.
- **Refinería Electrolítica:** Edificio en el cual se realiza la electrorefinación de cobre con la finalidad de obtener cátodos comerciales con un 99,99% de pureza. Está compuesta por 6 circuitos. Cada circuito está formado por 8 grupos los que a su vez poseen 42 celdas electrolíticas.

Lista de Abreviaturas y Siglas

° C	: Grado Celsius
Cm	: Centímetro
CODELCO	: Corporación Nacional del Cobre de Chile
Cu	: Cobre
CuSO₄	: Sulfato de Cobre
Cu⁰	: Oxido de Cobre
Cu⁺²	: Cati3n de Cobre
ENAMI	: Empresa Nacional de Minería
e	: Electr3n
glp	: Gramos por litro
Gwh	: Giga Watt Hora
H₂SO₄	: 3cido sulf3rico
KA	: Kilo Ampere
Kwh	: Kilo Watt Hora
PRC	: <i>Pulsating Reverse Current</i>
TIR	: Tasa Interna de Retorno
TM	: Tonelada m3trica
USD	: <i>United State Dollars</i> (D3lares de Estados Unidos)
V	: Volt
VAN	: Valor Actual Neto

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Gráfico de Exportaciones de Cobre en Chile	11
Figura 1.2 – Gráfico de Destinos de Cobre (%).....	12
Figura 1.3 – Gráfico de Ventas según categoría de Cobre.	13
Figura 1.4 – Gráfico de Consumo de Energía Eléctrica.	14
Figura 1.5 – Gráfico de Consumo de Energía Eléctrica en Refinerías.	14
Figura 1.6 – Gráfico Precio de la Energía Eléctrica (USD/Kwh).....	16
Figura 3.1 - Mapa localización de la empresa.	20
Figura 3.2 – Proceso productivo CODELCO Ventanas.....	22
Figura 3.3 – Principales entradas y salidas a la Refinería Electrolítica.	23
Figura 3.4 – Distribución circuitos CODELCO Ventanas.....	25
Figura 3.5 – Esquema simplificado de distribución de corriente en un circuito. ...	26
Figura 3.6 – Fotografía de barras conductoras.	27
Figura 3.7 – Fotografía de unión barras conductoras.....	27
Figura 3.8 – Esquema de operación de renovación.	28
Figura 4.1 – Diagrama de flujo electrorefinación.	30
Figura 4.2 – Esquema electrorefinación convencional.	32
Figura 4.3 – Electrorefinación.....	33
Figura 4.4 – Fotografía de levantamiento cátodo por operador.....	37
Figura 4.5 – Fotografía de levantamiento cátodo puente grúa.	38
Figura 5.1 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 1.....	41
Figura 5.2 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	42
Figura 5.3 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 2.....	43
Figura 5.4 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	43
Figura 5.5 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 3.....	44
Figura 5.6 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	44
Figura 6.1 – Circuito Conexión eléctrica Multicircuital.	47
Figura 6.2 – Esquema Elda Electrodiálisis Reactiva..	48
Figura 6.3 – Gráfico de pérdidas en USD.....	49
Figura 6.4 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	49
Figura 6.5 – Gráfico de pérdidas en USD.....	50
Figura 6.6 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	50
Figura 6.7 – Gráfico de pérdidas en USD.....	51
Figura 6.8 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.....	52
Figura 7.1 – Fotografía de conexión celda en paralelo.....	55
Figura 7.2 – Fotografía de conexión celda en serie.....	56
Figura 7.3 – Fotografía de ánodo celda en paralelo.....	57
Figura 7.4 – Fotografía de ánodo celda en paralelo.....	58
Figura 7.5 – Fotografía de ánodo celda en serie.....	59
Figura 7.6 – Fotografía de ánodo celda en serie.....	59

Lista de Tablas

Tabla 4.1 – CODELCO Ventanas v/s otras refinerías.....	39
Tabla 7.1 – Distribución corriente circuito en paralelo	565
Tabla 7.2 – Distribución corriente circuito en serie	567
Tabla 8.1 – Calculo VAN y TIR sin sensibilización.....	632
Tabla 8.2 – Calculo VAN y TIR con ahorro 20% menor al estimado.....	643
Tabla 8.3 – Calculo VAN y TIR con ahorro 40% menor al estimado.....	654
Tabla 8.4 – Calculo VAN y TIR con ahorro 20% mayor al estimado.....	665
Tabla 8.5 – Calculo VAN y TIR con ahorro 40% mayor al estimado.....	676

Resumen

En el presente Trabajo de Titulación, se realizó el estudio de dos métodos que apuntan a la reducción de ocurrencia de cortocircuitos en una celda de electrorefinación, caso que se estudió y enmarco en las condiciones de operación de la refinería electrolítica de CODELCO-Ventanas. Los dos métodos analizados fueron: la conexión eléctrica multicircuital y la electrodiálisis reactiva.

El primer método es una solución eléctrica que consiste en una modificación a las barras interceldas y el segundo método es una solución del tipo electroquímico y estructural, ya que consiste en agregar entre cada ánodo y cátodo una membrana selectiva que privilegia el paso de cationes o aniones según sea el caso.

Para realizar el estudio de los métodos se realizó una estimación de los beneficios y ahorros que ambos métodos, por separado, traerían al proceso. Luego, se obtuvo como resultado que la alternativa viable y recomendable es la conexión eléctrica multicircuital ya que la electrodiálisis reactiva implica grandes costos económicos y operacionales, como son el costo por puente grúa superior a 2.160.000 USD y un costo por cosecha de 8.538.448,46 USD (ya que se debe detener la planta por un periodo de seis meses y en cada mes hay tres cosechas), lo que la hace, según el escenario económico actual, inviable.

Con la finalidad de comprobar que los resultados estimados con la conexión eléctrica multicircuital se consiguen en la realidad, se construyeron dos celdas electrolíticas a escala de laboratorio para realizar pruebas de distribución de corriente y comportamiento frente a la ocurrencia de cortocircuitos.

En base a los resultados obtenidos, en un escenario medio, se obtiene un VAN igual a 107.069,61 (miles de USD) y una TIR de 10,88%. Siendo el único caso no rentable cuando los ingresos estimados disminuyen en un 40%.

1. Introducción

En el año 2003 las exportaciones de cobre (cátodos comerciales, concentrado y blíster) fueron por un total de 4.687,5 TM, mientras que en el año 2012 alcanzaron un valor de 5.233,3 TM, presentando, de esta forma, un aumento en un 11,64%, esta tendencia se debe principalmente a la apertura de nuevos mercados así como también a los nuevos usos del cobre. Gráficamente se puede observar en la **Figura 1.1**.

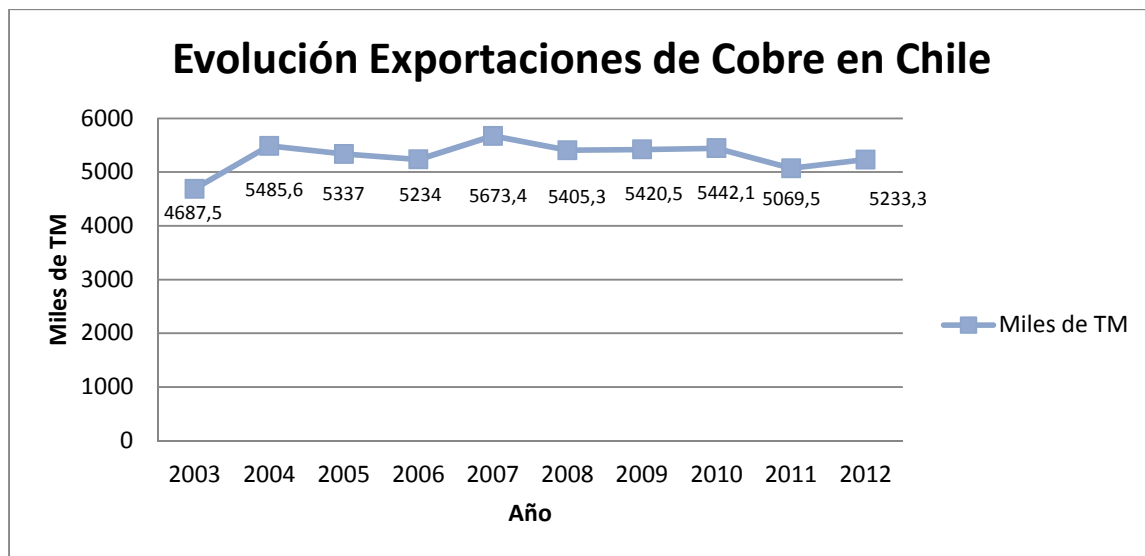


Figura 1.1 – Gráfico de Exportaciones de Cobre en Chile
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Chile es considerado el mayor productor y exportador de cobre a nivel mundial, por lo cual mantiene negocios con mercados de todo el mundo. Los principales destinos de las exportaciones chilenas se concentran en Asia 59.8%, Europa 17.9%, Sudamérica 11% y Norteamérica 10.2%. (Ver **Figura 1.2**).

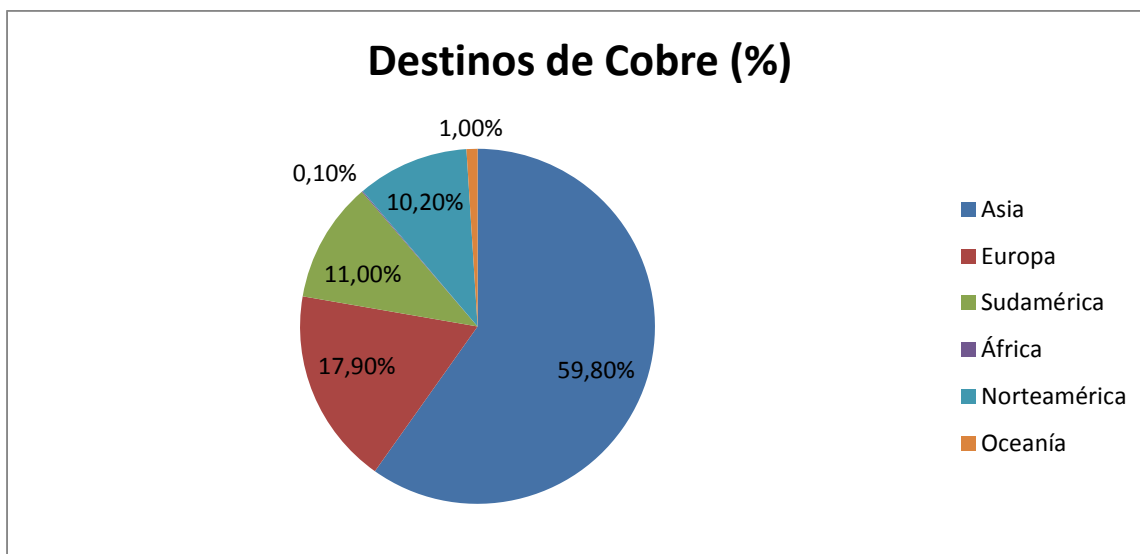


Figura 1.2 – Gráfico de Destinos de Cobre (%)
Fuente: (COCHILCO, 2013)

El cobre exportado se clasifica en tres categorías: cátodo comercial, concentrado y blíster, siendo el primero el que alcanza un más alto nivel de ventas (Ver **Figura 1.3**), debido a ser el que tiene una mayor pureza de los tres (99,99% de cobre). Para obtener dicha categoría de cobre es necesario someter la pieza de cobre al proceso de electrorefinación.

Debido a la importancia que representa ésta categoría de cobre dentro del total de exportaciones, es que se hace sumamente importante controlar el proceso de electrorefinación, el que consiste en la aplicación de un potencial eléctrico entre un ánodo de cobre y un cátodo de cobre que se encuentran sumergidos en una solución de sulfato de cobre ácida, lo que origina la disolución electroquímica del cobre del ánodo, la emigración de electrones e iones de cobre hacia el cátodo y el depósito de cobre sobre la superficie del cátodo.

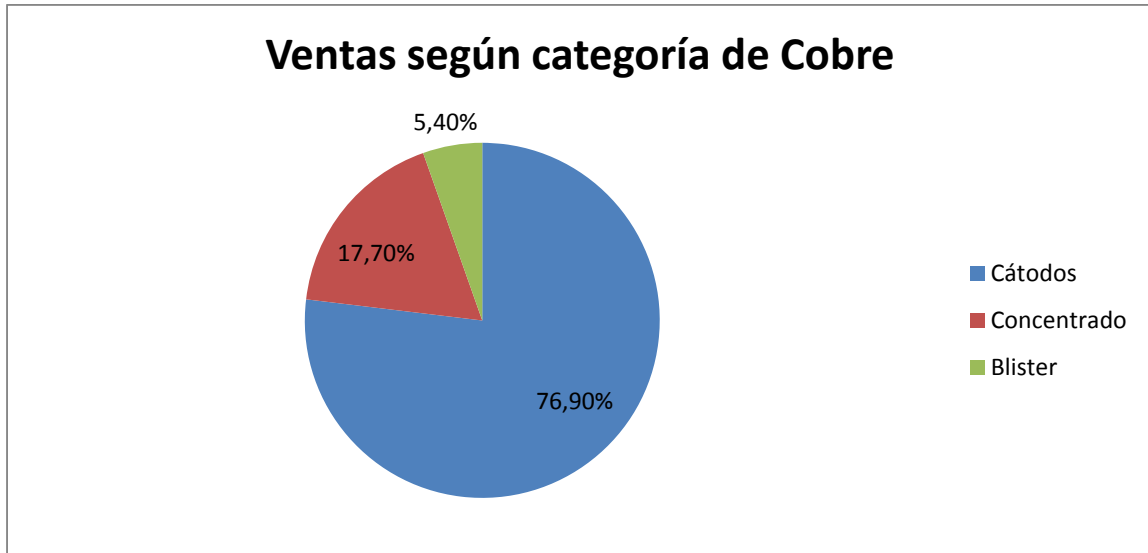


Figura 1.3 – Gráfico de Ventas según categoría de Cobre.
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Como fue mencionado en el párrafo anterior, el proceso de electrorefinación involucra la aplicación de un potencial eléctrico o consumo de energía eléctrica, el que, para el caso de la División de CODELCO Ventanas, representa aproximadamente un 50% del consumo total de energía eléctrica de la planta, llegando a 152.79 Gwh en el año 2012, el que año a año va aumentando. Este aumento anual en el consumo de la energía eléctrica en la minería del cobre en Chile se representa en la **Figura 1.4**.

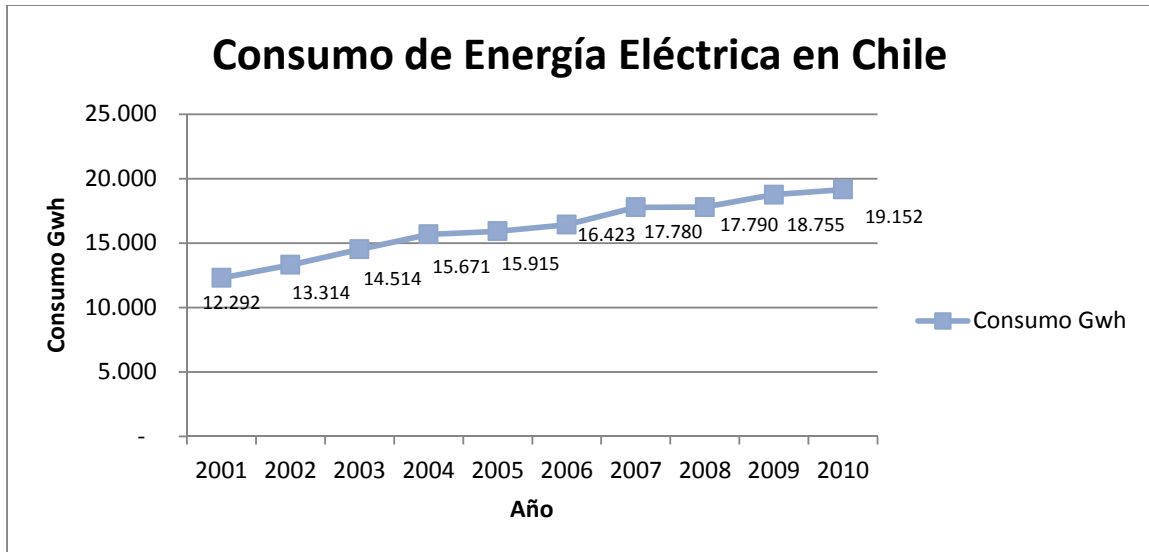


Figura 1.4 – Gráfico de Consumo de Energía Eléctrica.
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Por otro lado, el consumo eléctrico en el proceso de electrorefinación ha presentado la siguiente evolución, representada en la **Figura 1.5**.

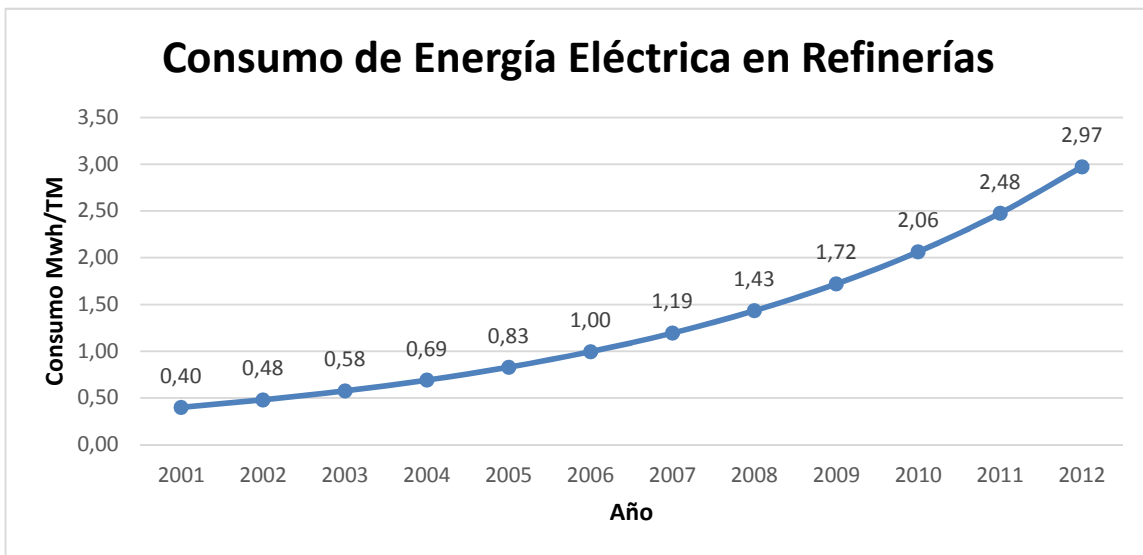


Figura 1.5 – Gráfico de Consumo de Energía Eléctrica en Refinerías.
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Además las exportaciones de cobre han presentado un aumento desde el año 2001 a la fecha de un 14,66% tal como se aprecia en la **Figura 1.6**, por lo que se espera que en el futuro el consumo de cobre siga en alza.

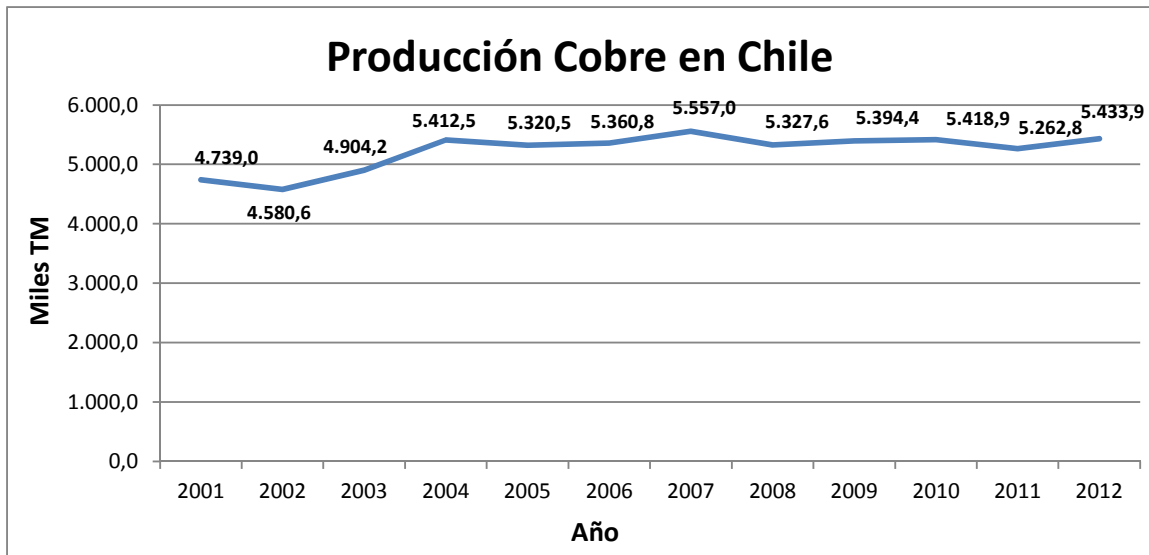


Figura 1.6 – Gráfico de Producción Cobre en Chile.
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Junto con esto se presenta la problemática del aumento constante año tras año del costo de la energía eléctrica, el que incide directamente en los costos de la empresa. Esta evolución del costo de la energía eléctrica se representa en la **Figura 1.6**.

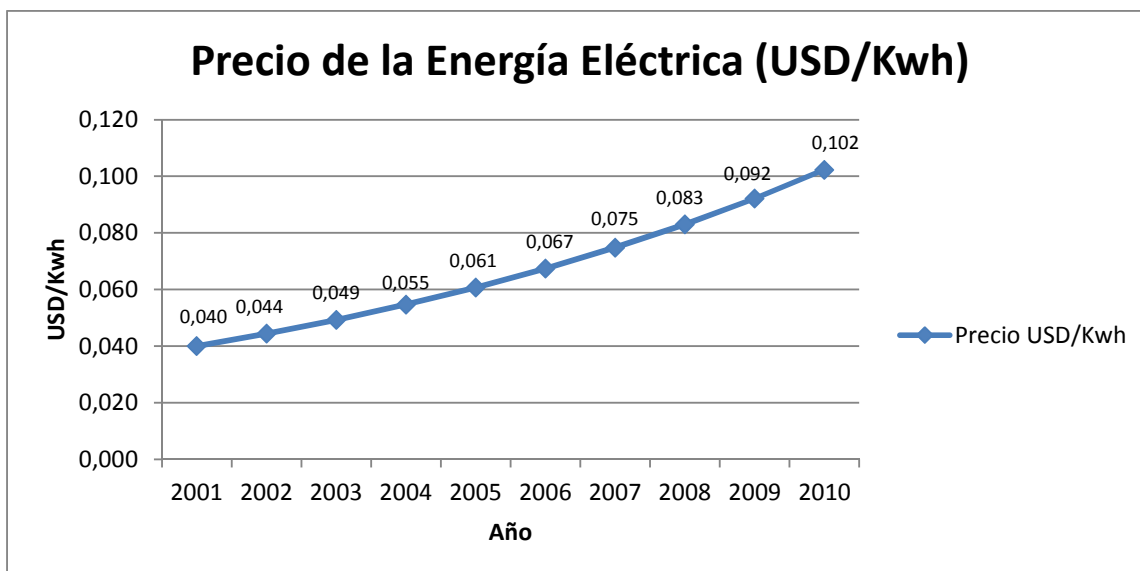


Figura 1.6 – Gráfico Precio de la Energía Eléctrica (USD/Kwh).
Fuente: (COCHILCO, 2013)

Al alto porcentaje (entre un 50%-65%) de consumo de energía eléctrica que representa el proceso de electrorefinación, del total del consumo de energía de la planta de CODELCO Ventanas, se le agrega una problemática: la ocurrencia de cortocircuitos, que se entiende como el fenómeno en el cual un ánodo y un cátodo se tocan en un punto provocando que la corriente eléctrica no circule homogéneamente, problema que ocurre diariamente en la refinería. De esta forma nace la inquietud de reducir dicho problema, de forma de evitar las pérdidas en este proceso.

El presente Trabajo de Titulación busca recoger y analizar los datos referentes al consumo de energía eléctrica de la planta y de los recurrentes cortocircuitos, con el fin de plantear soluciones viables que logren disminuir los cortocircuitos, mejorar la eficiencia energética de la planta y, por ende, disminuir el nivel de gastos de la empresa a causa de un ahorro.

2. Objetivos y alcances

2.1 Objetivo General

El objetivo de este proyecto fue proponer una alternativa que permitiera un aumento en la eficiencia energética mediante la reducción en la ocurrencia de cortocircuitos en la refinería electrolítica de CODELCO Ventanas.

2.2 Objetivos Específicos

Para la consecución del objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos, los cuales conforman los pasos para establecer y evaluar una alternativa viable a la problemática planteada.

- Establecer y cuantificar el impacto de la ocurrencia de cortocircuitos en el proceso de electrorefinación del cobre.
- Identificar y comparar las principales alternativas que permitan la reducción de la ocurrencia de cortocircuitos.
- Validación Experimental.
- Realizar la evaluación económica de la alternativa propuesta.

2.3 Alcances

Al momento de realizar un proyecto es necesario delimitar el mismo, de esta manera se entrega una descripción de los alcances de éste, incluyendo tanto los resultados que se entregarán, como un detalle de lo que está fuera del desarrollo de la tesis.

El proyecto en estudio abarca la División Ventanas de CODELCO Chile, específicamente la refinería electrolítica, pero afecta, de forma indirecta, en la totalidad del Proceso de Producción de Cobre, ya que al lograr alcanzar un ahorro importante, los resultados se reflejan en el resultado general de la misma y del logro de sus metas.

a) Exclusiones:

Hay distintos aspectos que no se desarrollarán dentro de la presente memoria, los cuales se detallan a continuación:

- Una de las alternativas planteadas, específicamente la electrodiálisis reactiva, resulto ser inviable por lo tanto no fue evaluada económicamente. Los motivos se exponen en el punto 6 del presente informe.
- La implementación de la alternativa propuesta en la refinería electrolítica, debido a que el implementar una alternativa de este tipo, en primer lugar requiere de la aprobación por parte del mandante, así como de una gran inversión. La solución junto con todos sus análisis son entregados a CODELCO Chile División Ventanas, quedando a su responsabilidad el llevar a cabo la alternativa propuesta o no.

3. Antecedentes Principales

3.1 Antecedentes generales CODELCO Ventanas

CODELCO División Ventanas, es la Quinta División, centro productivo que está dotada de funciones de producción, áreas administrativas y de servicios destinadas para fundir y refinar el cobre, oro y plata además de otros metales nobles.

A continuación se presentarán una serie de datos relevantes que darán una mirada general de la empresa.

3.2 Ubicación

CODELCO división Ventanas se encuentra ubicada en la localidad de Las Ventanas, en la comuna de Puchuncaví, a unos 164 kilómetros de Santiago y unos 50 de Viña del Mar, en el sector norte de la provincia de Valparaíso.

La dirección específica de esta división es Carretera F-30-E N° 58270, Ventanas, Puchuncaví, Chile.

La construcción de este plantel industrial se inició a fines de 1950 y fue inaugurado en 1964. Se eligió esta localidad debido a la disponibilidad de agua y cercanía con los puertos de Quintero y Valparaíso para el embarque de sus productos, además de la cercanía con los centros y proyectos mineros de esa época.

A continuación se presenta una ilustración que refleja la ubicación de CODELCO división Ventanas en el mapa.



Figura 3.1 - Mapa localización de la empresa.
Fuente: (CODELCO, 2013)

3.3 Historia División Ventanas

La fundición y refinería Las Ventanas fue inaugurada el 30 de septiembre de 1964, luego que el Estado chileno decidiera tener una nueva fundición y refinería para exportar el cobre con mayor valor agregado. Su construcción fue un proyecto país, que tenía como objetivo lograr mejores condiciones para exportar este patrimonio nacional, ya que en esa época la gran minería del cobre y sus fundiciones pertenecían a empresas extranjeras.

En 1960 Chile exportaba 512 mil toneladas de cobre, de las cuales 232 mil correspondían a cobre Blister con 98,5% de pureza, que debía ser refinado en el extranjero para lograr la ley más alta (99,99%) y extraerle el oro y la plata contenidos en el metal. Por lo tanto, al explotar cobre Blister, el país dejaba de percibir grandes cantidades de recursos económicos. Al procesar y refinar el metal en Chile, se logró un producto de mayor valor y se fomentó el desarrollo industrial y el empleo, mejorando los ingresos del sector minero de pequeña y mediana escala.

Los estudios para la ubicación de la nueva fundición consideraron opciones entre Rancagua y Coquimbo, escogiendo finalmente Ventanas por su cercanía a los puertos de Quintero y Valparaíso, por contar con un abastecimiento seguro de

agua desde el río Aconcagua, y la proximidad con centros y proyectos mineros de la época.

Paralelamente, en 1963, se construía una refinería electrolítica, la que fue inaugurada el 11 de noviembre de 1966. Ésta partió con tres circuitos de 336 celdas cada uno y una capacidad de 84.000 toneladas de cobre electrolítico, Luego incorporó un cuarto circuito en 1979 y un nuevo horno de refino, con lo cual la producción se elevó a 160.000 toneladas anuales. En 1982, se aplicó inversión de corriente (PRC) en un circuito, elevándose la producción a 175.000 toneladas. Otras mejoras y la extensión del PRC a toda la refinería, incrementaron la producción a 210.000 toneladas.

A fines de 1996 se incorporaron dos nuevos circuitos de 335 celdas de electrólisis, lo que elevó su capacidad nominal a 327.000 toneladas anuales. El proyecto ubicó a Refinería de Ventanas entre las diez mayores del mundo.

3.4 Traspaso a CODELCO

El traspaso de la Fundición y Refinería Ventanas de ENAMI a CODELCO fue para solucionar los pasivos acumulados por la primera, sin que el Estado perdiera su control. El acuerdo fue el resultado de un extenso estudio, escogiéndose el traspaso a CODELCO como la opción de menor costo social y económico para el Estado. La iniciativa fue acordada por las autoridades del Gobierno con ambas empresas y con la participación de sus organizaciones laborales, luego de lo cual la propuesta fue enviada al Parlamento, dado que se requería de una ley que permitiera a ENAMI desprenderse de esta instalación. El proyecto fue promulgado y se convirtió en la Ley 19.993 el 4 de enero del año 2005.

3.5 Proceso productivo CODELCO Ventanas

Las mezclas de concentrado de cobre (30% Cu) son conducidas a un secador rotatorio por correas transportadoras para reducir el contenido de humedad desde un 10% a un 0,2 %. A continuación el concentrado se carga al Convertidor Teniente, donde a temperatura de aproximadamente 1200 °C ocurre la fusión conversión, aquí se inyecta aire enriquecido para oxidar el fierro y el azufre y se obtiene el metal blanco con un porcentaje de cobre entre un 70-75%. En esta etapa se libera SO₂ que es conducido a la Planta de ácido sulfúrico. En

este reactor, además de fundir el concentrado, se inicia la conversión, la cual se completa en el Convertidor Pierce Smith, donde se obtiene un cobre tipo blister de 97% de pureza. El blister sigue a la etapa de los Hornos de Refino de donde se obtiene Cu 99,6% moldeado en forma de ánodos, los que constituyen la materia prima de la Refinería Electrolítica. De esta última etapa se obtienen los cátodos de cobre comerciales de 99,99% de Cu; además un barro anódico de donde es posible obtener metales nobles como oro y plata. El proceso global se puede apreciar en la **Figura 3.2**:

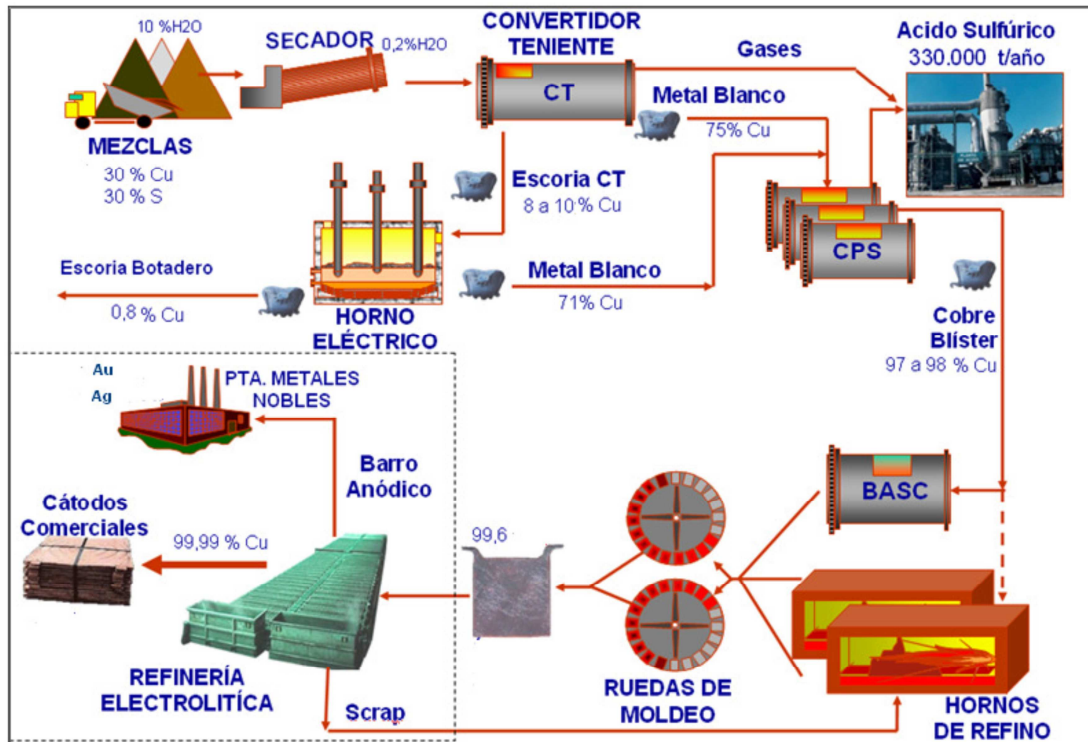


Figura 3.2 – Proceso productivo CODELCO Ventanas.
Fuente: (CODELCO, 2013)

3.6 Refinería electrolítica

La refinería electrolítica es la última etapa del proceso de producción, en donde se obtienen los cátodos de cobre comerciales.

La electrorefinación de cobre es un proceso mediante el cual primero por disolución y luego por depositación se purifica el cobre sobre un cátodo por vía electroquímica. La finalidad de este proceso es la obtención de cátodos comerciales, es decir, con un 99,99% de cobre. El proceso principal de la refinería

es la electrolisis, que se lleva a cabo en una celda electrolítica. En Ventanas se usa la electrorefinación a partir de una lámina inicial de cobre. En la **Figura 3.3** que se muestra a continuación, se ven las principales entradas y salidas de esta etapa.

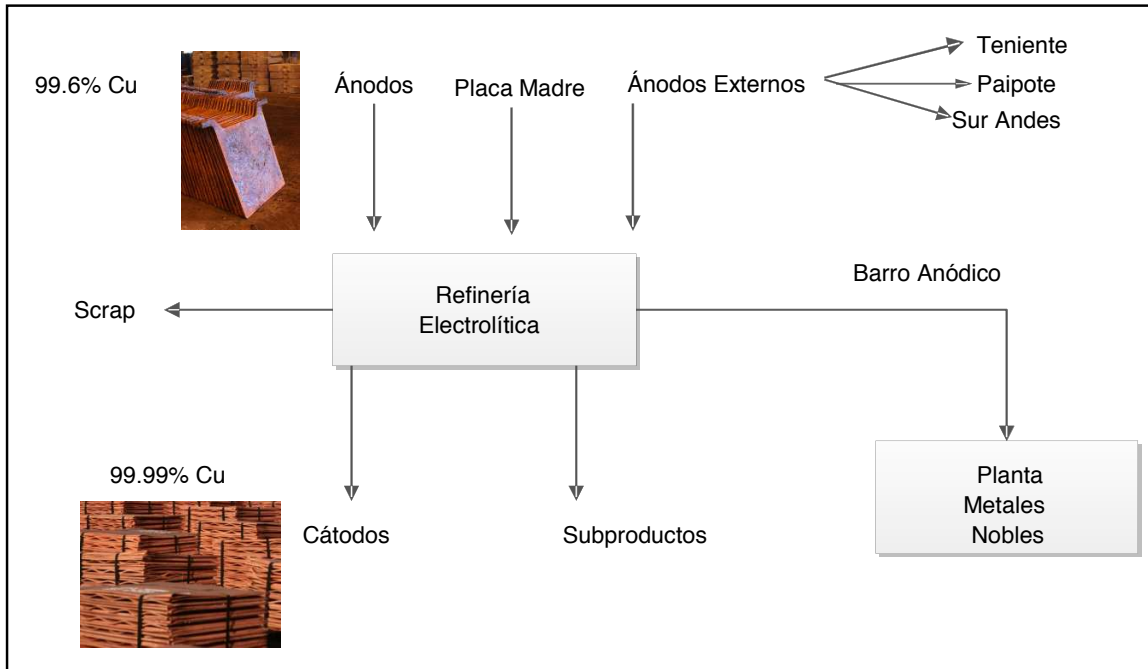


Figura 3.3 – Principales entradas y salidas a la Refinería Electrolítica.
Fuente: (Elaboración Propia)

Tal como se aprecia en la figura las principales entradas a la refinería son los ánodos propios (CODELCO Ventanas), las láminas iniciales o placas madres y los ánodos externos que pueden provenir de las Divisiones Teniente, Paipote y Sur Andes. Por otro lado, los principales productos que se pueden obtener en la refinería son los cátodos comerciales, los cuales presentan una pureza de un 99.99% de Cobre, el barro anódico, el cual es trasladado a la planta de metales nobles, y el Scrap y otros subproductos.

3.7 Componentes de la refinera electrolítica

Nave Electrolítica: Es el edificio principal de la refinera electrolítica y está compuesto por 6 circuitos eléctricos independientes, cada uno con su propio rectificador. Los circuitos están formados por 8 grupos los que a su vez poseen 42 celdas electrolíticas.

Celda Electrolítica: Es la unidad básica de la refinera electrolítica y está compuesta de 79 electrodos (39 cátodos y 40 ánodos, ubicados alternadamente) y una solución ácida denominada electrolito, que tiene como función principal ser el medio donde se mantiene el cobre en forma iónica en solución, además de medio conductor de la corriente eléctrica. El electrolito es una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfato de cobre ($CuSO_4$). Los 79 electrodos suspendidos en una celda están apoyados sobre una barra triangular llamada barra intercelda. Básicamente existen dos tipos de celdas, las "celdas comerciales", desde donde se obtienen los cátodos comerciales, y las celdas de "hojas madres", donde se obtienen láminas de cobre para los cátodos iniciales del proceso en una celda comercial.

Sistema circulación electrolito: La circulación del electrolito debe ser suficiente para mantener la temperatura deseada y prevenir la estratificación de la solución, lo que se manifiesta en una baja de la concentración de los iones de cobre cerca de la superficie del cátodo (catolito) y una elevada concentración cerca de la superficie del ánodo (anolito), por lo que se debe mantener homogénea la concentración de los iones cúpricos. El electrolito ingresa por un extremo de la celda y sale por el otro. Cada uno de los circuitos tiene su propio sistema de circulación. El electrolito es alimentado por gravedad a los grupos de un circuito desde estanques elevados, de manera de entregar un flujo constante; luego el electrolito sale de las celdas y se dirige a un estanque de almacenamiento. Desde el estanque de almacenamiento el electrolito se bombea a través de un intercambiador de calor, con el objetivo de reponer las pérdidas de calor que sufre el electrolito en las cañerías y celdas, de donde es conducido hasta el estanque elevado que cierra el sistema de circulación de electrolito.

Rectificadores: Son los encargados de entregar la corriente eléctrica necesaria para la operación. Existe uno para cada circuito (con valores nominales de 22 [kA] y 196 [V] de capacidad).

3.8 Distribución de circuitos

Tal como se indicó anteriormente, la refinería electrolítica está compuesta de 6 circuitos, cada uno alimentado con su propio rectificador. Cada circuito está conformado de 8 grupos, los que a su vez, están conformados por 42 celdas electrolíticas. En la figura siguiente se muestra la distribución de los grupos en la refinería. El rectificador 4, además de alimentar a sus 8 grupos, alimenta a 4 grupos más del circuito 1, ya que este último está destinado a la fabricación de hojas madres, y requiere de otras condiciones de operación.

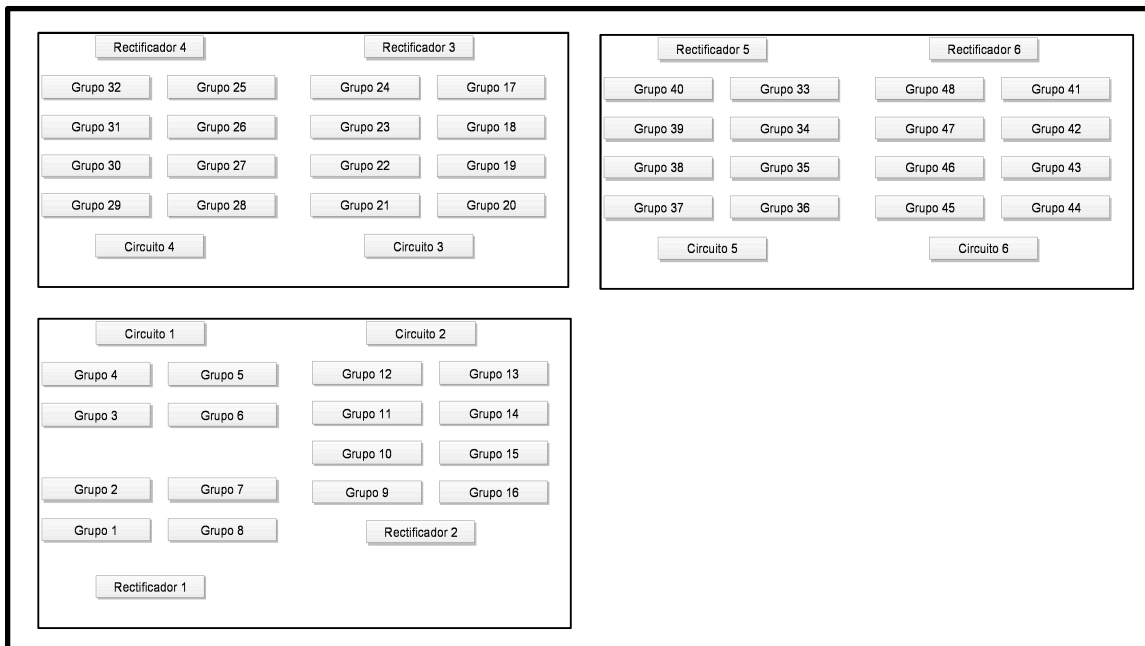


Figura 3.4 – Distribución circuitos CODELCO Ventanas.
Fuente: (Elaboración Propia)

3.9 Distribución de corriente en un circuito

En la figura siguiente, se presenta un esquema simplificado de un grupo compuesto por cuatro celdas, cada una de las cuales consta de 3 cátodos (rectángulo azul) y 4 ánodos (rectángulo negro). Las flechas rojas indican el sentido de circulación de corriente. En el esquema se puede apreciar que la corriente eléctrica ingresa al grupo por una barra conductora distribuyéndose en los ánodos de la celda, luego al electrolito y por último a los cátodos. Al final de la última celda de la primera mitad de un grupo, la corriente pasa por las barras conductoras para llegar a las celdas de la segunda mitad del grupo.

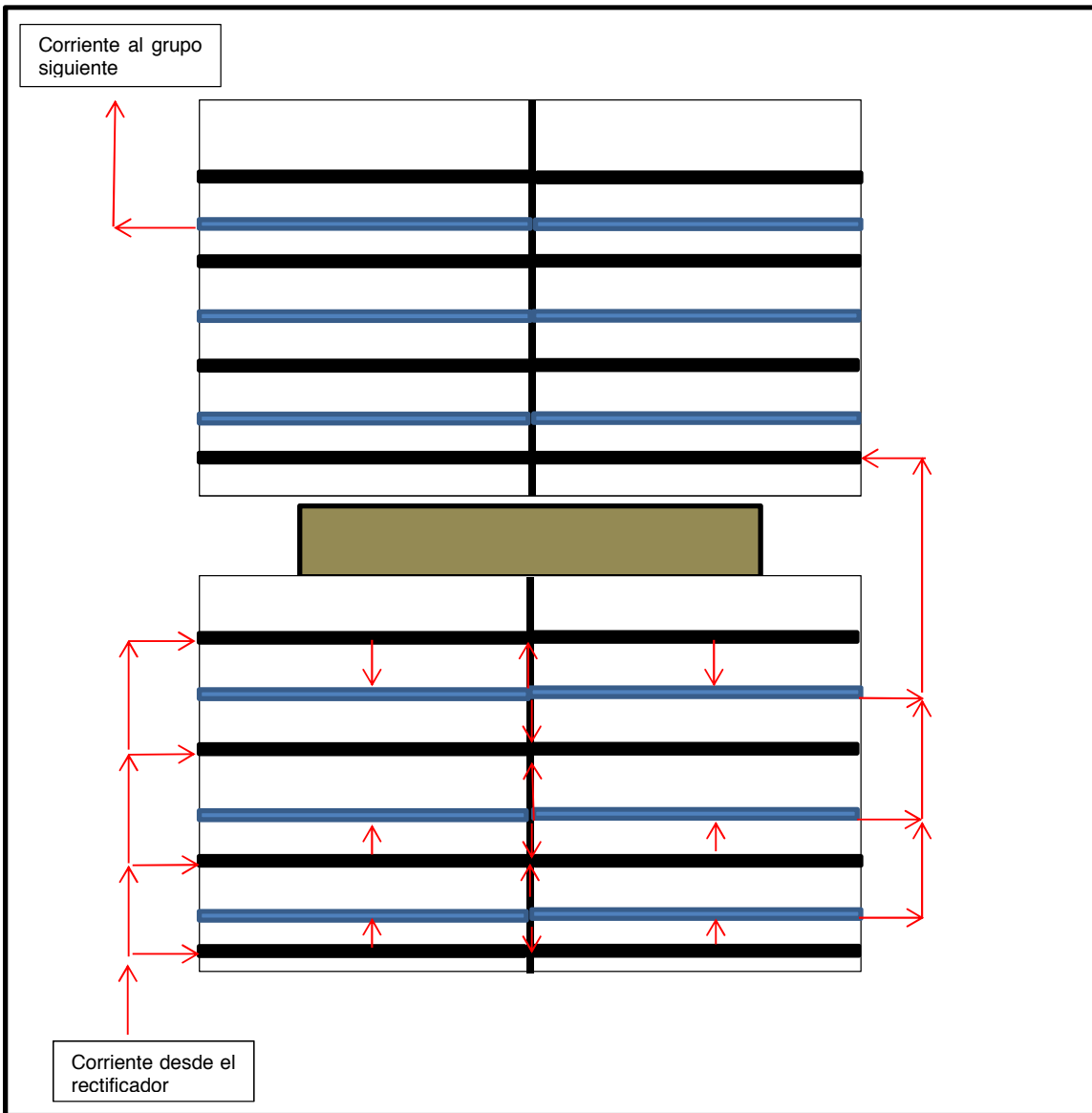


Figura 3.5 – Esquema simplificado de distribución de corriente en un circuito.
Fuente: (Elaboración Propia)

Más adelante se presentan algunas fotografías de los contactos y conductores presentes en una celda electroquímica.



Figura 3.6 – Fotografía de barras conductoras.
Fuente: (CODELCO, 2013)



Figura 3.7 – Fotografía de unión barras conductoras.
Fuente: (CODELCO, 2013)

3.10 Operación

La figura siguiente esquematiza a través de imágenes la operación de inicio de una renovación. En primer lugar se realiza la cosecha de las hojas madres (hojas iniciales), que son despegadas del cátodo permanente en donde son formadas, para luego ser llevadas a la máquina fabricadora de cátodos iniciales.

Antes del ingreso de los cátodos iniciales a las celdas se ubican los ánodos, los que tienen que quedar perfectamente alineados, a una distancia de 10 cm, entre cada uno.

Una vez que los dos tipos de electrodos están ubicados de forma alternada, en todo el grupo, se comienza a llenar las celdas con electrolito, el que se espera llegue a los 55 °C para conectar el grupo al rectificador e iniciar el ciclo.

El ciclo catódico comercial es de 8 días, y el de hojas madres de 22 horas. El ciclo anódico dura 16 días, por lo que un mismo ánodo se usa para dos ciclos catódicos.

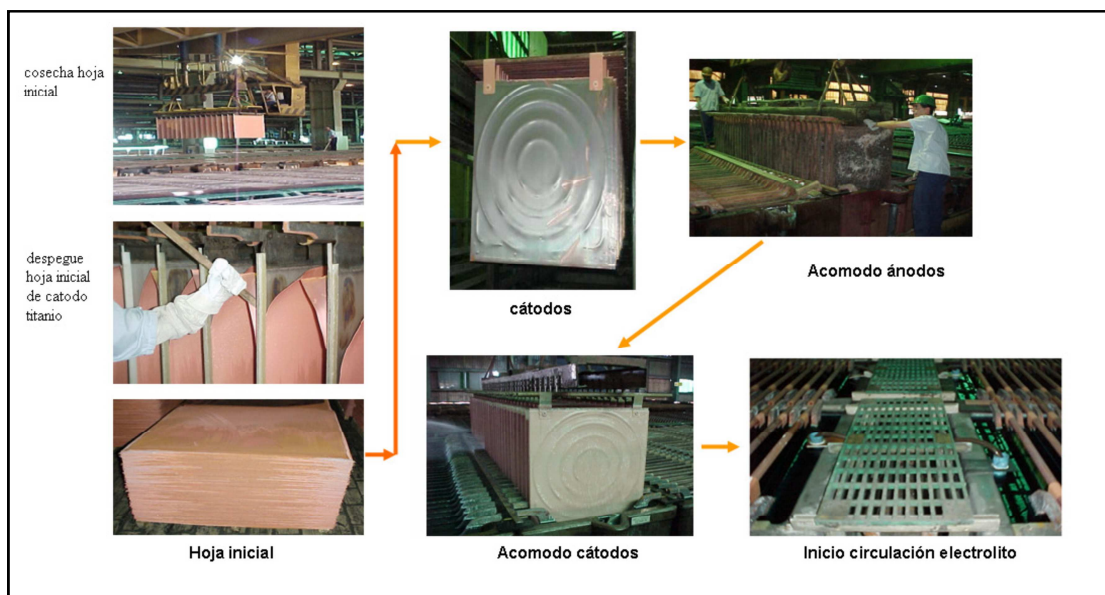


Figura 3.8 – Esquema de operación de renovación.
Fuente: (CODELCO, 2013)

Durante el ciclo del proceso, se controla la temperatura, la concentración de ácido sulfúrico e iones de cobre en el electrolito, flujo del electrolito a través de la celda y la presencia de cortocircuitos (cuando un ánodo con un cátodo adyacentes se tocan en un punto) ya que estos disminuyen la eficiencia de corriente.

4. Marco Teórico

4.1 Proceso de producción del cobre

La primera etapa de la producción del cobre es el chancado. En esta etapa una máquina (chancador giratorio) reduce el tamaño del material extraído en la mina a proporciones cada vez más pequeñas y compactas, de no más de 1,5 pulgadas. Dicho material se ordena apilándolo.

Como segunda etapa se encuentra la molienda, proceso mediante el cual mediante molinos se continúa reduciendo las partículas de mineral hasta obtener un tamaño máximo de 180 micrones (0,18 mm). Con esto se forma una pulpa con agua y reactivos que se lleva a flotación.

Luego de la molienda viene la etapa de flotación. En esta etapa se genera espuma, cuyas burbujas atrapan al cobre y otros minerales sulfurados contenidos en la pulpa.

Luego de varios ciclos, se recolecta y se seca esta espuma para obtener el concentrado de cobre que continúa su purificación.

Como cuarta etapa tenemos a la fundición, etapa en la cual para separar el cobre de otros minerales e impurezas, el concentrado de cobre se trata a grandes temperaturas en hornos especiales.

Luego de varios procesos se obtiene cobre RAF (refinado a fuego) el que es moldeado en placas de un peso aproximado de 225 Kg, llamadas ánodos.

Por último tenemos la etapa de electrorefinación, donde los ánodos provenientes de la fundición se llevan a celdas electrolíticas para su refinación. De este proceso se obtienen cátodos de alta pureza 99,99% de Cu.

La figura siguiente, muestra en forma de diagrama de flujo el proceso anteriormente descrito:

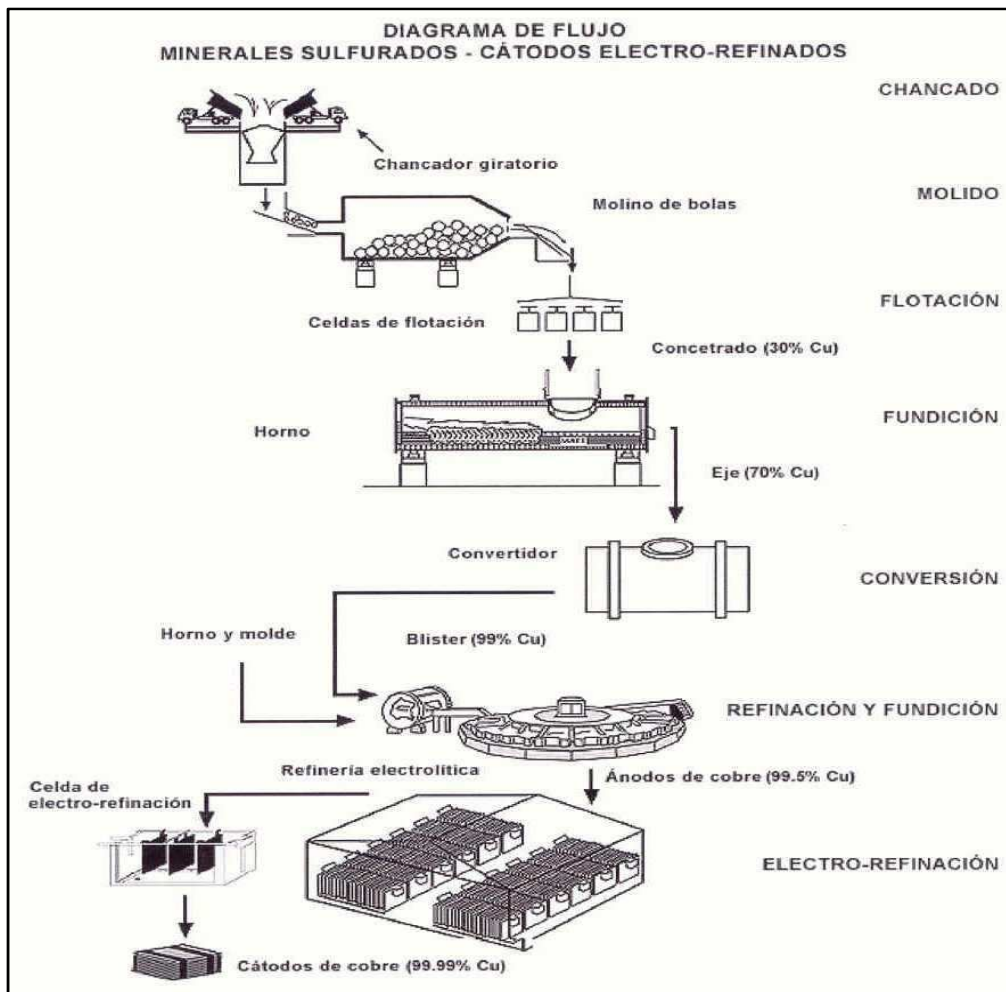


Figura 4.1 – Diagrama de flujo electrorefinación.
Fuente: (CODELCO, 2013)

4.2 Electrorefinación del cobre

La electrorefinación de cobre es la disolución electroquímica de los ánodos impuros de cobre, para permitir que el metal se deposite en forma selectiva y con máxima pureza sobre cátodos de cobre. La electrorefinación tiene dos objetivos:

- Eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre.
- Separar las impurezas valiosas del cobre. Éstas pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos.

En la siguiente se muestra un esquema de la electrorefinación convencional, que es la utilizada en CODELCO Ventanas:

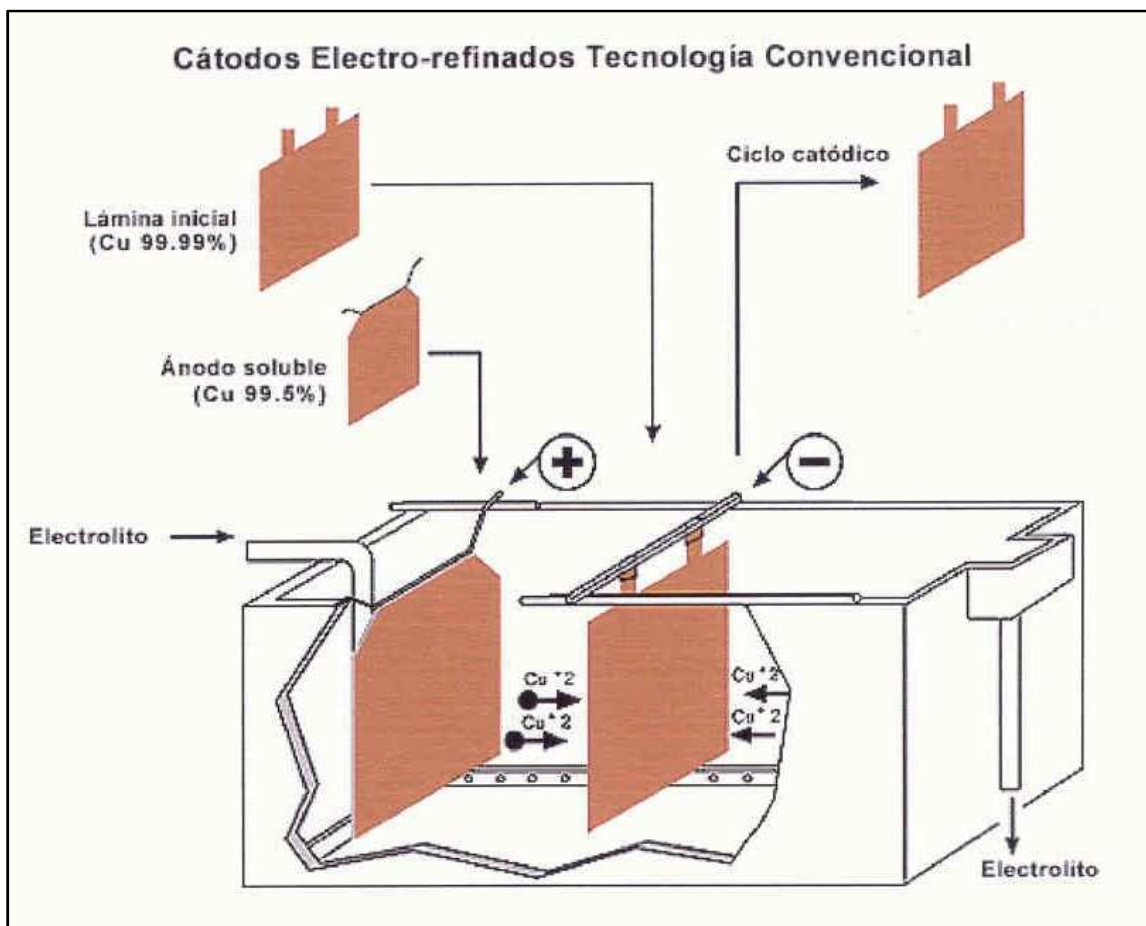


Figura 4.2 – Esquema electrorefinación convencional.
Fuente: (CODELCO, 2013)

La aplicación de un potencial eléctrico entre un ánodo de cobre (electrodo positivo) y un cátodo de cobre (electrodo negativo), sumergidos en una celda que contenga una solución de sulfato de cobre ácida, origina que tengan lugar las siguientes reacciones y procesos:

- El cobre del ánodo se disuelve electroquímicamente según:



- Los electrones producidos por la reacción antes mostrada, son conducidos hacia el cátodo a través del circuito y suministro de energía externo.
- Los cationes Cu^{+2} en la solución, emigran por difusión y convección hacia el electrodo negativo (cátodo).
- Los electrones y los iones Cu^{+2} se recombinan en la superficie del cátodo para producir el cobre metálico que se deposita sobre el cátodo según:



Mediante la siguiente figura se ilustra el proceso anteriormente descrito:

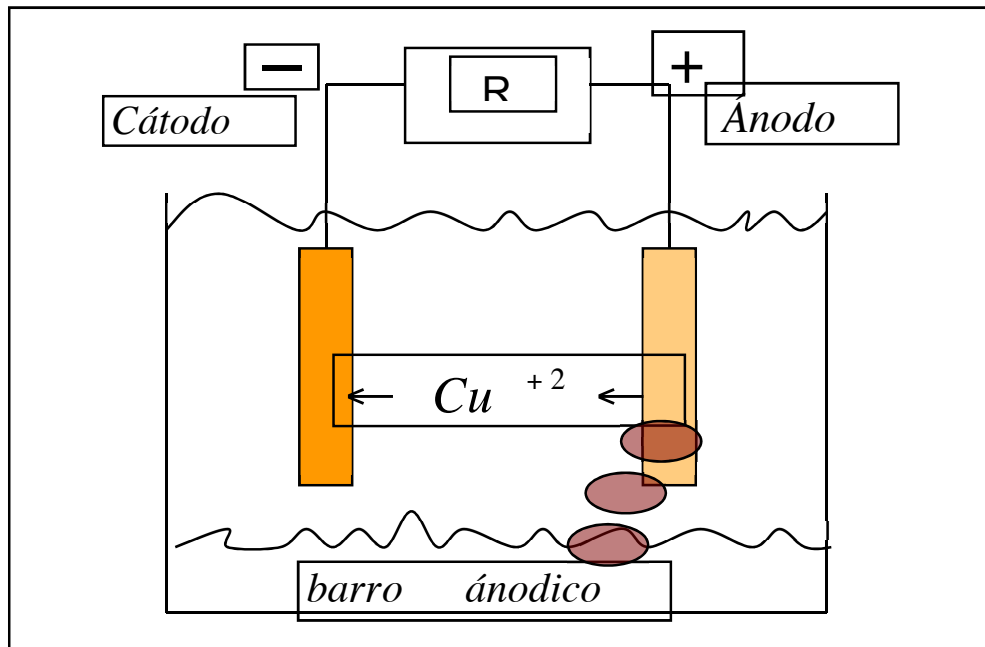


Figura 4.3 – Electrorefinación.
Fuente: (CODELCO, 2013)

4.2 Principales problemas en la electrorefinación de cobre

- Cortocircuitos: hay varios cientos de cortocircuitos diarios en una refinera de cobre, lo que conduce a pérdidas de energía en interrupciones en la producción.

- Aditivos: al alimentar el electrolito desde un extremo de la celda y extraerlo por el extremo opuesto, la concentración de aditivos (principalmente cola y tiourea) va decreciendo a lo largo de la celda, lo que causa una calidad heterogénea de los depósitos en distintos sectores de la celda.
- Antimonio y láminas iniciales: el Sb_2O_3 se deposita en la hoja madre de titanio e impide una buena deposición de la lámina inicial, lo que conduce a un rechazo de láminas.
- Posicionamiento de electrodos: la velocidad y calidad de la deposición dependen fuertemente de la distancia ánodo-cátodo. Si esta distancia varía de punto a punto del electrodo, debido a mal posicionamiento, la calidad del depósito será deficiente y conducirá a cortocircuitos.
- Limpieza de contactos: si los contactos barra-ánodo y barra-cátodo se ensucian (por ejemplo por sulfatación), se genera una resistencia eléctrica en los contactos que aumenta la tensión de celda y con ello, el costo energético de la operación.
- Concentración de ácido y deposición indeseada: la deposición y oclusión en el cátodo de elementos presentes en el electrolito dependen de la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito. En casi todos los casos, la composición óptima para minimizar la deposición indeseada está alrededor de 150 gpl de ácido. Sin embargo, para obtener una buena conductividad eléctrica y minimizar la tensión de celda, se trabaja normalmente con 180-200 gpl.
- Arsénico y barros en suspensión: la mayor parte de los barros anódicos se va al fondo de la celda, sin embargo una fracción permanece en suspensión en todo el volumen del electrolito. Estos barros en suspensión, erróneamente llamados “barros flotantes”, son compuestos no-estequiométricos y de composición variable. Al depositarse sobre los cátodos, causan la aparición de nódulos que conducen a rechazo de cátodos por su calidad física.

En este Trabajo de Titulación se va a buscar en particular una solución al caso de los cortocircuitos ya que son la principal causa de problemas de eficiencia en la refinería.

4.3 Eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente es la razón entre la cantidad de cobre depositado en los cátodos y la cantidad de cobre que teóricamente debiera haberse depositado al imponer una cierta corriente durante un tiempo determinado. Este índice varía en la práctica entre 80% y 97%. Como se indicó anteriormente los cortocircuitos son la principal causa de disminución de este índice en CODELCO Ventanas, estos se describen a continuación:

- El cortocircuito se produce al irse depositando exceso de cobre en una zona del cátodo hasta contactar físicamente el ánodo vecino. La formación progresiva de este depósito se debe a una sobrecorriente localizada. Este proceso es vicioso, ya que al producirse sobredeposición localizada disminuye la distancia entre el depósito y el ánodo y la corriente aumenta cada vez más. Al producirse el contacto entre electrodos se produce una sobrecorriente por sobre un 400% de su valor nominal. Este gran aumento de la corriente produce puntos de calor que dañan los electrodos. Los electrodos tienden a doblarse y pandearse e incluso el ánodo a derretirse. Esto aumenta la concentración del electrolito y de los depósitos de cobre en los cátodos de la celda, disminuyendo la calidad del cobre recuperado.

Otra variable afectada por los cortocircuitos como antes se mencionó es la eficiencia eléctrica. Esto es la cantidad de energía eléctrica consumida relativa al cobre obtenido. Como se mencionó, al sobredepositarse cobre en algunas zonas de los cátodos, se produce un aumento de la corriente por el par de electrodos comprometidos. Esta anomalía solo produce pérdidas por cuanto la energía consumida no resulta en producción de cobre. Además, la sobrecirculación de corriente asociada a este fenómeno resulta en una reducción al mínimo en la magnitud de corriente de todos los demás cátodos de la celda afectada. De esta forma la celda en cortocircuito solo contribuye al consumo eléctrico y no a la producción de cobre. Por lo tanto se concluye que el cortocircuito afecta a los electrodos, a la calidad de cobre, a la producción y a la eficiencia.

4.4 Procedimiento actual para la detección y control de cortocircuitos en CODELCO Ventanas:

Los cortocircuitos son un fenómeno que ocurre con bastante frecuencia en una refinera electrolítica, razón por la cual es sumamente importante contar con un buen procedimiento e instrumentos de detección de estos. Esto por que como se detallará más adelante, este problema genera grandes pérdidas de dinero a la empresa, no solo por pérdidas eléctricas, sino por la necesidad de volver a procesar los cátodos ya que no pueden ser utilizados y menos vendidos, generando un aumento en los costos operacionales.

En la actualidad la forma de detección de cortocircuitos en CODELCO Ventanas es mediante un operador, el cual se desplaza sobre las celdas con un instrumento (gausímetro) capaz de detectar las diferencias de voltaje presentes en el par ánodo-cátodo. Sin embargo este proceso es sumamente ineficiente ya que ya que al operador le puede tomar muchas horas el detectar un cortocircuito, si es que este se encuentra en uno de los circuitos alejados de la ubicación del operador. Además muchas veces el instrumento, por ser tecnología muy antigua no es capaz de detectar de forma correcta la ocurrencia de un cortocircuito, generando con esto que continúe el cortocircuito en la celda y así aumentando la pérdida de electricidad por este concepto.

En el caso de que el operador detecte un cortocircuito, este deberá analizar si es posible separar mediante un bastón (instrumento que posee el operador que le permite sin riesgo golpear el ánodo o cátodo) el ánodo del cátodo y así permitir que continúe de manera correcta el proceso y el paso de corriente eléctrica. En el caso de ser factible la solución por parte del operador, este deberá golpear la unión del ánodo y cátodo y así separarlos eliminando el cortocircuito y permitiendo el paso correcto de corriente.



Figura 4.4 – Fotografía de levantamiento cátodo por operador.
Fuente: (CODELCO, 2013)

En el caso de que el operador no pueda eliminar el cortocircuito (esto se da porque el ánodo y cátodo ya son muy pesados para ser manipulados por el operador) el este deberá informar y así solicitar la presencia de un puente grúa con la finalidad de que este levante el par ánodo-cátodo cortocircuitado para que el operador pueda golpearlos. Generalmente en este caso el cátodo se encuentra pandeado, por lo que se debe sacar del proceso.



Figura 4.5 – Fotografía de levantamiento cátodo puente grúa.
Fuente: (CODELCO, 2013)

Este caso es sumamente complicado ya que muchas veces los puentes grúas se encuentran ocupados, por lo cual el cortocircuito permanece varias horas, resultando en una pérdida importante de dinero y eficiencia del proceso.

Por todo lo anteriormente descrito, es que se hace muy necesario contar con una alternativa que permita controlar y reducir la ocurrencia de cortocircuitos, teniendo como consecuencia una reducción en las pérdidas de energía eléctrica, dinero y eficiencia de corriente.

4.5 Comparación CODELCO Ventanas con algunas refinerías del mundo:

Con la finalidad de saber cómo se encuentra la refinería de CODELCO Ventanas con respecto a otras refinerías del mundo, es que se hará una pequeña comparación con otras siete (Caraiba Metais, Union Miniere Pirdop, Norddeutsche Affinerie, Gresik, Sumitomo Toyo, Palabora Mining y Kennecott Utha Cu Magna).

Los parámetros a comparar serán la densidad de corriente de operación, la eficiencia de corriente, el voltaje de celda y los Kwh/Ton Cu catódico.

En primer lugar compararemos la densidad de corriente utilizada en cada una. Este parámetro es importante ya que al trabajar con densidades de corriente altas disminuye la calidad morfológica del cátodo pues el depósito es más granular o pulverulento, con la consiguiente formación de nódulos, causantes de los cortocircuitos y de los rechazos. CODELCO Ventanas opera a una densidad de corriente de 310 A/m^2 siendo la segunda con mayor densidad de operación luego de Norddeutsche Affinerie que tiene un valor de entre $330\text{-}340 \text{ A/m}^2$. La refinería con menor densidad de operación es Union Miniere Pirdop Bulgaria que opera con un valor de 257 A/m^2 .

En segundo lugar compararemos la eficiencia de corriente presentada por las refinerías, este parámetro es sumamente importante, ya que como se mencionó en el **Punto 4.3** la eficiencia de corriente es la razón entre la cantidad real de cobre depositado en los cátodos y la cantidad que teóricamente debiera haberse depositado, por lo tanto me indica cómo está funcionando la refinería en términos de aprovechamiento de la energía eléctrica durante el proceso de electrorefinación. CODELCO Ventanas tiene la segunda eficiencia de corriente más baja, con un valor de entre $93\%\text{-}96\%$, luego de Palabora Mining que posee una eficiencia de corriente entre un $91\%\text{-}95\%$. La refinería con mayor eficiencia de corriente corresponde a Sumitomo Toyo con un valor de 98% .

Como tercer punto de comparación consideraremos el voltaje de celda presente en cada una de las refinerías. En este punto CODELCO Ventanas posee el voltaje de celda menor, con un valor de $0,25 \text{ V}$ y le sigue Union Miniere Pirdop con un valor de entre $0,21\text{-}0,35 \text{ V}$.

Por último compararemos los Kwh/Ton Cu catódico consumidos, este parámetro es muy importante conocerlo ya que me va a indicar el consumo de energía eléctrica que estoy realizando para producir una tonelada de Cu catódico, además se hace sumamente prioritario tener este parámetro lo más bajo posible ya que afecta directamente a los costos operacionales. En este punto CODELCO Ventanas es la tercera que consume más Kilo Watts por tonelada de cobre catódico producido, luego de Palabora Mining y Union Miniere Pirdop.

En la **Tabla 4.1** se muestra un resumen de lo anteriormente detallado:

Tabla 4.1 – CODELCO Ventanas v/s otras refineras.

	Densidad de corriente A/m ²	Eficiencia de corriente %	Voltaje de la celda Volts	Kwh/ton Cu
Caraiba Metais Brasil	281	95	0.35	307
Union Miniere Pirdop Bulgaria	257	95	0.21-0.35	388
Norddeutsche Affinerie	330-340	95-97	0.33	300-320
Gresik Indonesia	295	97	0.3-0.4	285
Sumitomo Toyo Japan	267	98	0.31	302
Palabora Mining South Africa	277	91-95	0.29	390
Kennecott Utah Cu Magna Utah	282	95	0.28	320
Codelco Ventanas	310	93-96	0.25	340

Fuente: (CODELCO, 2013)

5. Oportunidad

Tal como se mencionó con anterioridad, en la refinera electrolítica ocurren diariamente cortocircuitos, los que, de no ser detectados oportunamente, pueden tener grandes consecuencias tanto en los costos por tonelada de cobre electrorefinado obtenido, así como también en la eficiencia de corriente. Es por esto que se detecta una oportunidad en la búsqueda de métodos que nos permitan reducir la ocurrencia de cortocircuitos y con esto también aumentar la eficiencia de corriente. A continuación se grafican tres escenarios, con la finalidad de dejar aún más claro las consecuencias que puede tener este fenómeno.

En el primer escenario se analizará el impacto que tienen 1, 2, 3 y 4 cortocircuitos que son detectados a las 24 horas de ocurridos.

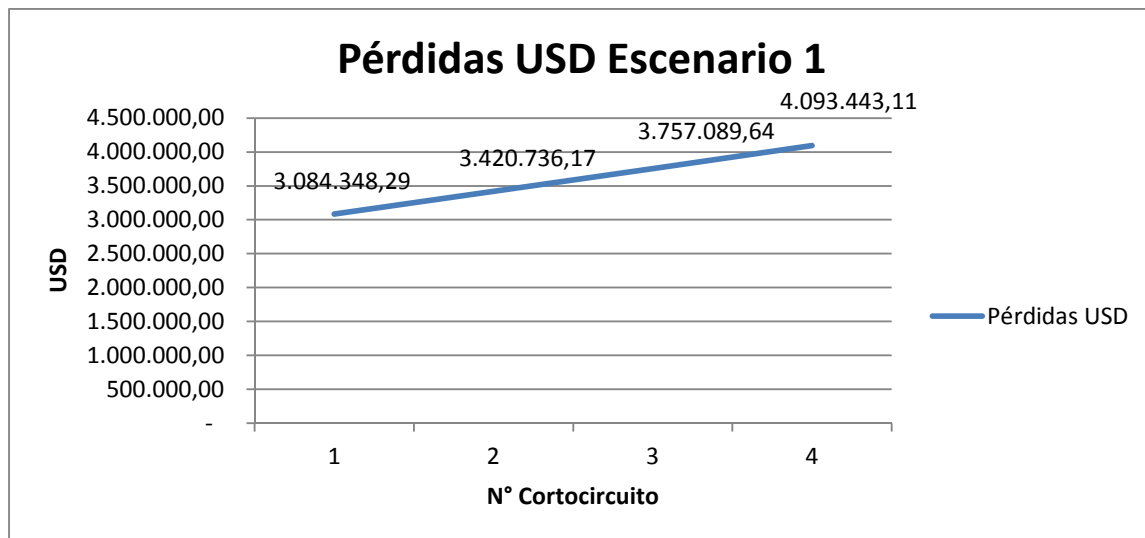


Figura 5.1 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 1.
Fuente: (Elaboración Propia)

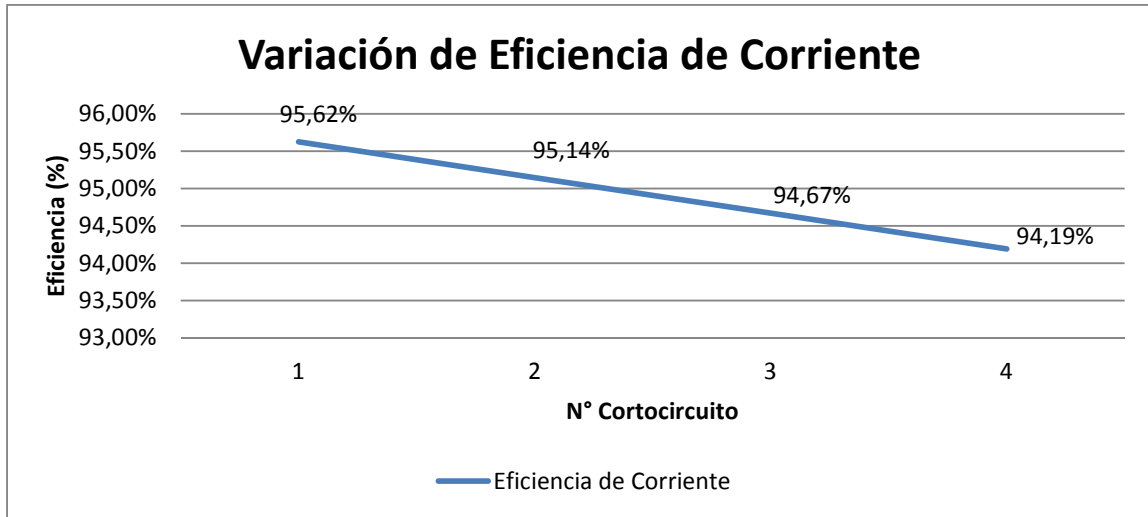


Figura 5.2 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

Como se muestra en los gráficos, cuando se produce 1 cortocircuito en las celdas y se detecta a las 24 horas de iniciado, la pérdida que se genera es de USD 3.084.348,29 y la eficiencia de corriente es igual a un 95.62%. Por otro lado, el caso más extremo en este primer escenario es que se produzcan 4 cortocircuitos y que sean detectados a las 24 horas de iniciados, lo que genera pérdidas por USD 4.093.443,11 y la eficiencia de corriente es igual a 94.19%.

Como segundo escenario, se analizará las consecuencias que tienen 1, 2, 3 y 4 cortocircuitos detectados a las 48 horas de ocurridos.

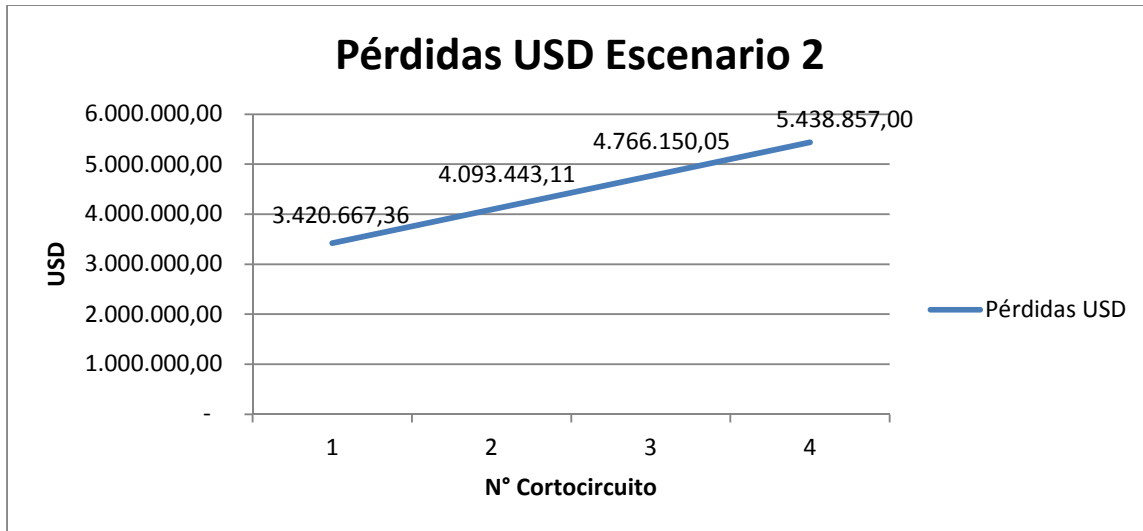


Figura 5.3 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 2.
Fuente: (Elaboración Propia)

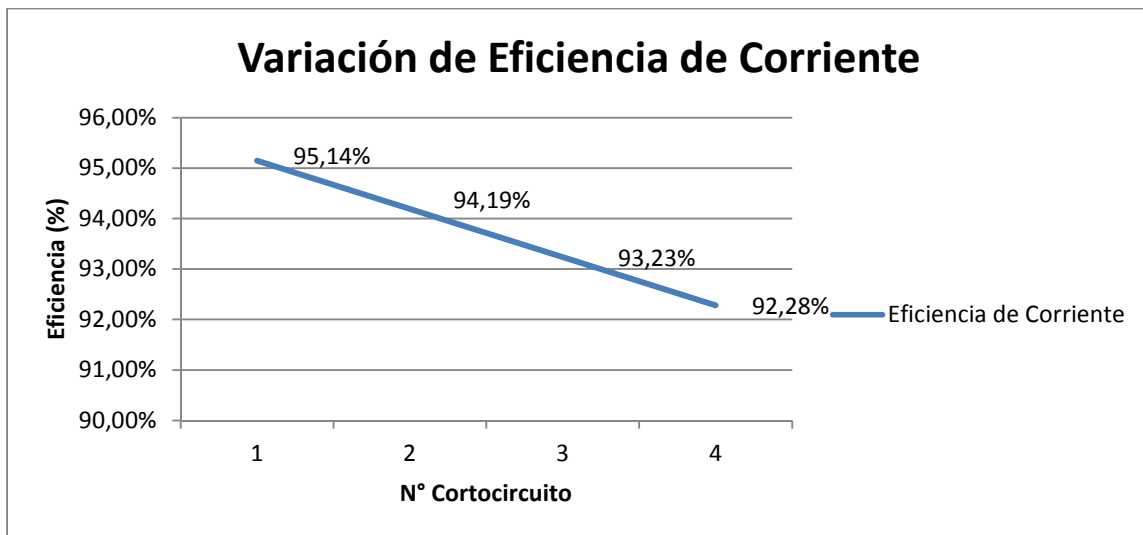


Figura 5.4 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar en este escenario, si es que ocurre 1 cortocircuito en las celdas y es detectado a las 48 horas, la pérdida que se genera es de USD 3.420.667,36 y la eficiencia de corriente es igual a 95.14%. En este escenario, el caso más extremo se da cuando ocurren 4 cortocircuitos y son detectados a las 48

horas. En este caso las pérdidas son de USD 5.438.857 y la eficiencia de corriente es igual a 92.28%.

Por último se analizará el escenario en que ocurran 1, 2, 3 y 4 cortocircuitos y que sean detectados a las 72 horas.

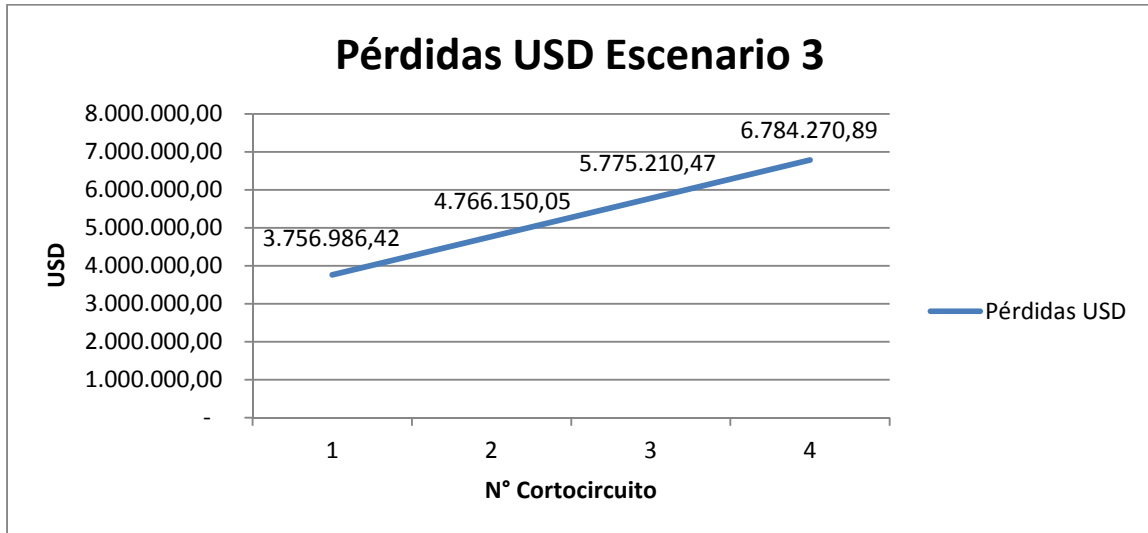


Figura 5.5 – Gráfico de pérdidas en USD Escenario 3.
Fuente: (Elaboración Propia)

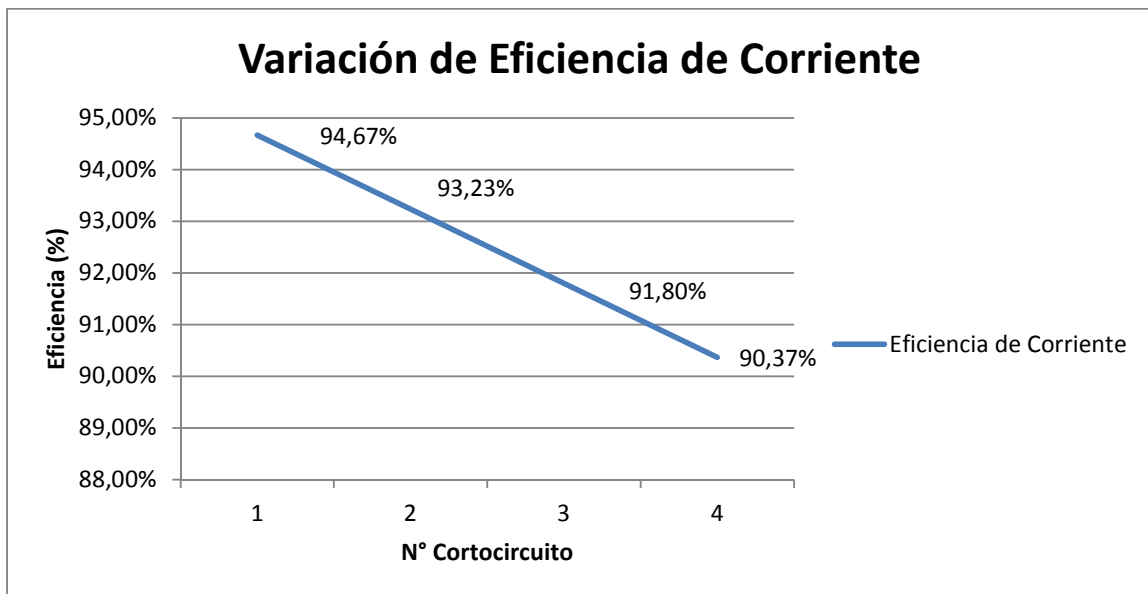


Figura 5.6 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

Este caso es obviamente el más complicado de todos, ya que como se aprecia en los gráficos, en el caso de ocurrir 4 cortocircuitos las pérdidas son de USD 6.784.270,89 y la eficiencia de corriente es igual a 90.37%.

Por todo lo visto anteriormente, es que se concluye que la reducción de la ocurrencia de cortocircuitos en la refinería es una gran oportunidad, ya que tiene grandes incidencias en los costos de operación y en el consumo de energía eléctrica.

6. Tecnología Disponible

En este Trabajo de Titulación se analizarán dos métodos que apuntan a la reducción de cortocircuitos y aumento de eficiencia de corriente, estos son: conexión eléctrica multicircuital y electrodiálisis reactiva. Ambos métodos han sido simulados en laboratorios, por lo que en esta memoria se compararán los efectos y beneficios que podría tener cada uno en la refinería de CODELCO Ventanas.

6.1 Circuito de conexión eléctrica multicircuital

Este tipo de conexión conduce la corriente a través de canales de conducción preferencial balanceando la distribución de corriente. Como resultado de este circuito se obtiene un cobre más uniforme tanto en peso como en forma. Además este tipo de conexión limita las sobrecorrientes previniendo los cortocircuitos, mejorando la eficiencia de corriente y la operación de la planta.

Para producir una mejor distribución de corrientes en las celdas electrolíticas se debe forzar a la corriente a circular en forma balanceada tanto por los caminos de menor como mayor resistencia. Para esto se debe modificar el circuito de distribución eléctrica eliminando la equipotencialidad entre los pares de electrodos (ánodo cátodo) de una celda. En efecto, al realizar la modificación se conectan en serie los distintos electrodos, compensando las variaciones de resistencia.

La modificación radical en el sistema de distribución eléctrica de las plantas de electrorefinación se realiza en las barras interceldas. En la actualidad, una barra recibe la corriente de todos los cátodos y la entrega a todos los ánodos. Mediante la modificación, se tendrá igual número de barras como de cátodos. Cada una recibirá la corriente desde un cátodo y la entregará a un ánodo. Con esta nueva configuración los electrodos de una celda no se encuentran conectados en paralelo, si no que todos los electrodos de la nave se conectan en serie, reduciendo de esta forma las variaciones de resistencia.

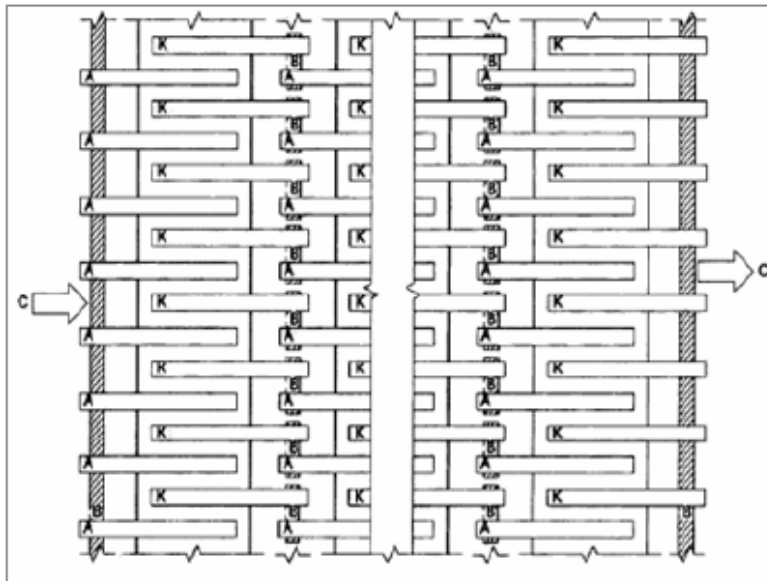


Figura 6.1 – Circuito Conexión eléctrica Multicircuito.
Fuente: (Elaboración Propia)

Los principales beneficios de este método son una disminución en un 40% la ocurrencia de cortocircuitos, una reducción del aumento de sobre corriente desde un 55% (conexión actual) a un 10%, aumento del nivel de producción entre un 5%-10% y un aumento de la eficiencia de corriente entre un 1.5%-2.5%. Por otro lado una ventaja muy importante es el que para aplicar este método no es necesario realizar modificaciones a la celda.

6.2 Electrodiálisis Reactiva

La electrodiálisis se basa en el transporte de masa, y este es el resultado de la existencia de un gradiente de potencial electroquímico a través de una membrana. El potencial eléctrico, componente del potencial electroquímico, actúa como fuerza motriz de las componentes iónicas, lo que se traduce en que las componentes cargadas positivamente (cationes) migran hacia el cátodo. Idealmente, las membranas son impermeables a las moléculas que carecen de carga eléctrica.

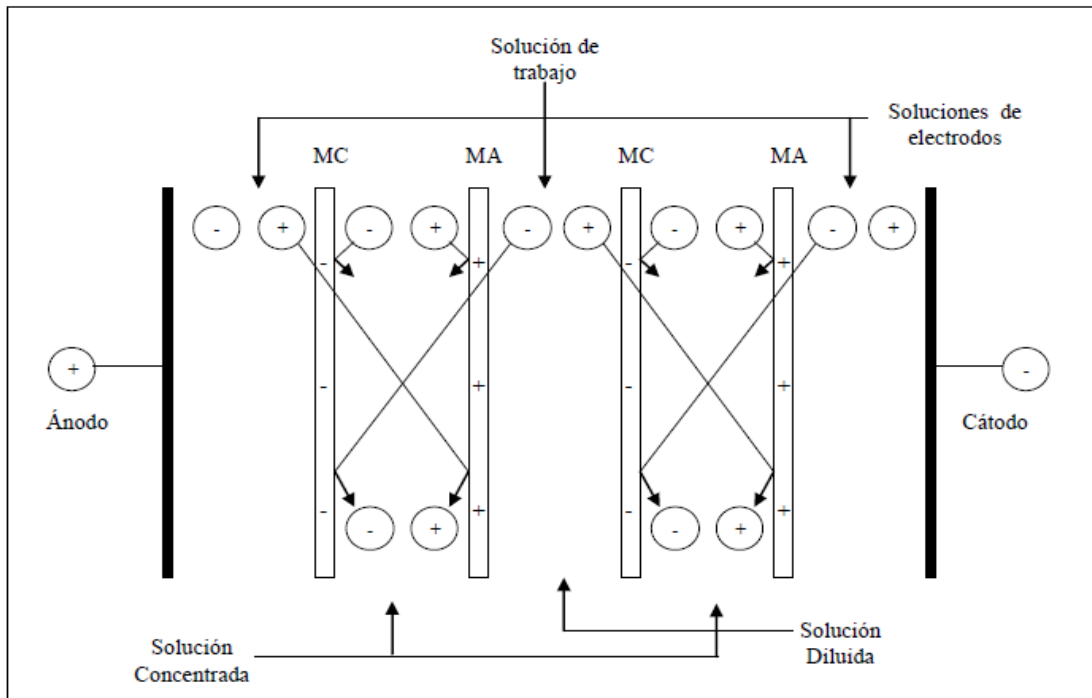


Figura 6.2 – Esquema Elda Electrodiálisis Reactiva..
Fuente: (Elaboración Propia)

Los principales beneficios de este método son el aumento de la eficiencia de corriente entre un 1%-1,5% y la reducción en el aumento de sobre corriente en el caso de ocurrir un cortocircuito desde un 55% a un 35%.

6.3 Comparación de ambos métodos

De acuerdo a la información obtenida, en la actualidad ocurren como mínimo 4 cortocircuitos por celda durante cada ciclo de electrorefinación, por lo que se va a tomar esta cantidad como base para compararla con los resultados de cada uno de los métodos encontrados.

En primer lugar se analizarán los resultados que se obtendrían ocupando el método de conexión multicircuital. Debido a que con este método se reduce en un 40% la ocurrencia de cortocircuitos, es que se analizará el caso de que ocurran dos cortocircuitos por celda en cada ciclo de electrorefinación.

El primer escenario será en el que ocurran 2 cortocircuitos y que sean detectados a las 24 horas, para este caso, las pérdidas y la eficiencia de corriente se comportan de la siguiente manera:

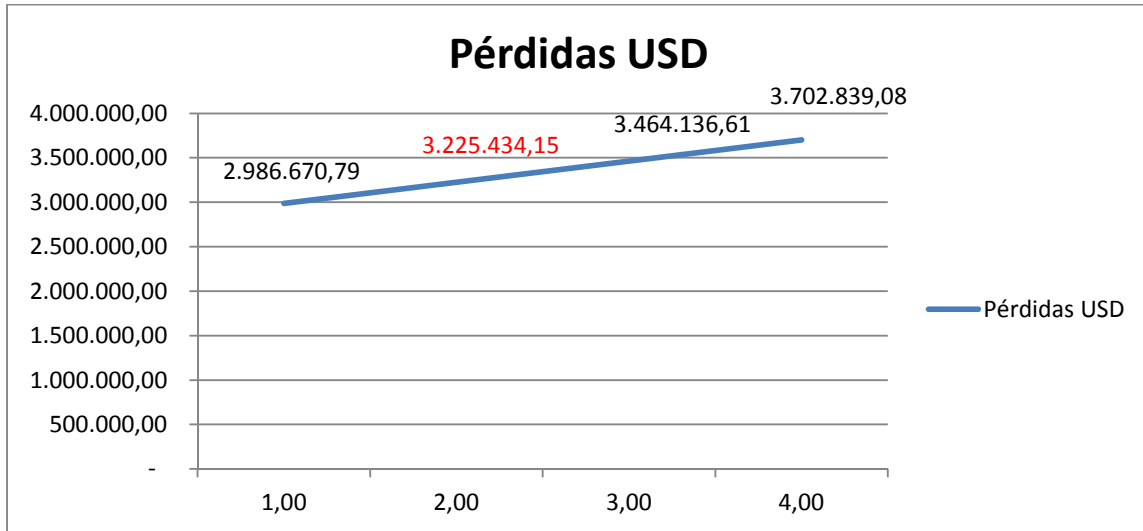


Figura 6.3 – Gráfico de pérdidas en USD.
Fuente: (Elaboración Propia)

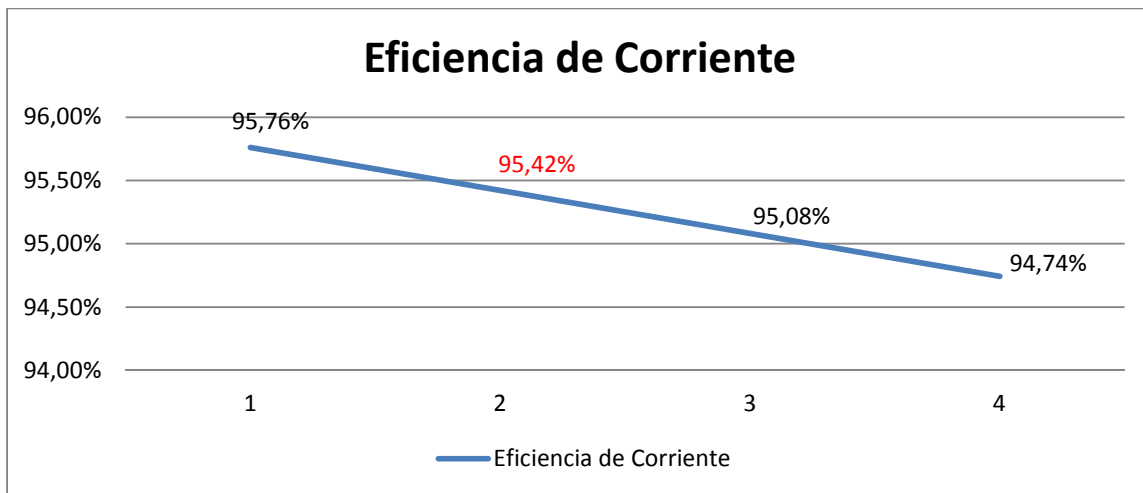


Figura 6.4 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

Tal como se aprecia en los gráficos cuando ocurren 2 cortocircuitos y se está utilizando el método de conexión eléctrica multicircuital, las pérdidas bajan desde 4.093.443,11 USD (caso actual en que ocurren 4 cortocircuitos en cada

celda por ciclo con conexión convencional) a 3.225.434,15 USD (valor marcado en rojo en el gráfico). Además la eficiencia de corriente aumenta desde un 94,19% a un 95,42%. Por lo tanto tenemos un ahorro mensual de 2.604.026,88 USD (sabiendo que hay 3 ciclos de electrorefinación al mes), junto con un aumento de la eficiencia de corriente en un 1,23%.

Para el caso en que ocurrieran dos cortocircuitos y sean detectados a las 48 horas los resultados son los siguientes:

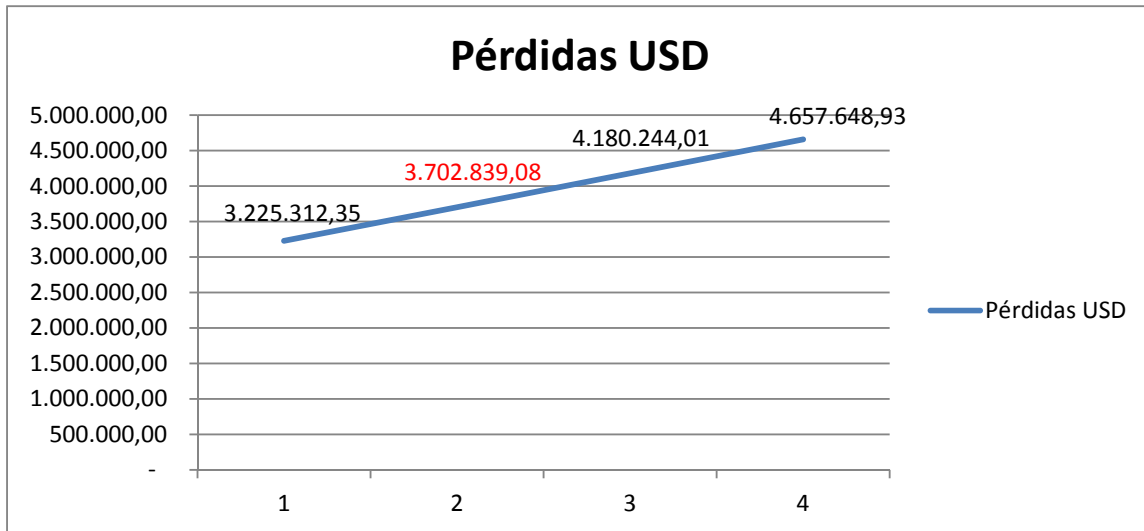


Figura 6.5 – Gráfico de pérdidas en USD.
Fuente: (Elaboración Propia)

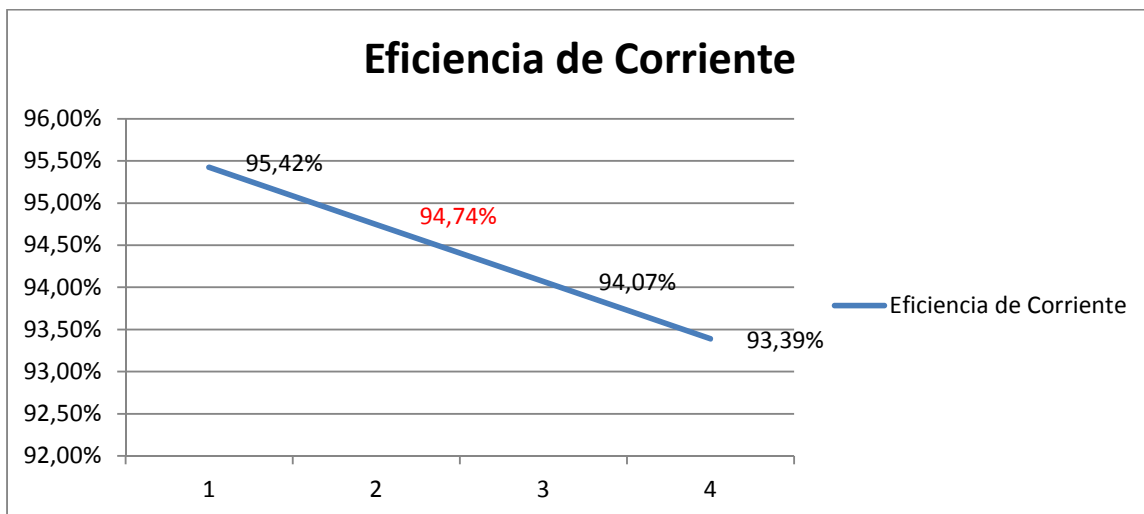


Figura 6.6 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

Como se aprecia en el gráfico de pérdidas, cuando ocurren dos cortocircuitos y son detectados luego de 48 horas, las pérdidas disminuyen desde 5.438.857 USD (caso de conexión convencional) a 3.702.839,08 USD y la eficiencia de corriente aumenta desde un 92,28% a un 94,74%. Esto quiere decir que al mes tenemos un ahorro de 5.208.053,76 USD. Junto con esto la eficiencia de corriente presenta un aumento de un 2,46%.

Por último tenemos el caso en que ocurran dos cortocircuitos y sean detectados a las 72 horas. Los resultados son los siguientes:

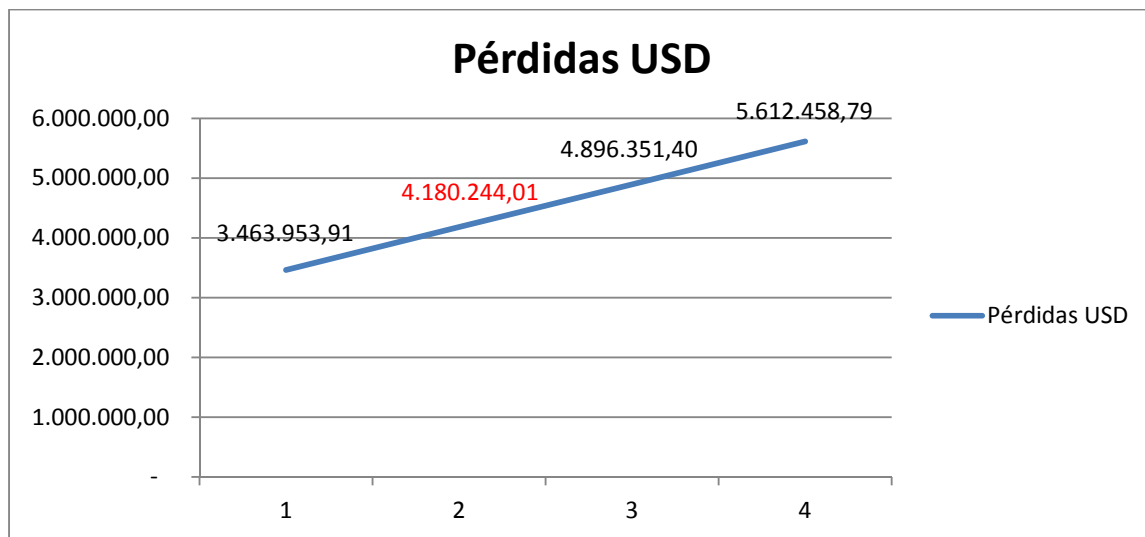


Figura 6.7 – Gráfico de pérdidas en USD.
Fuente: (Elaboración Propia)

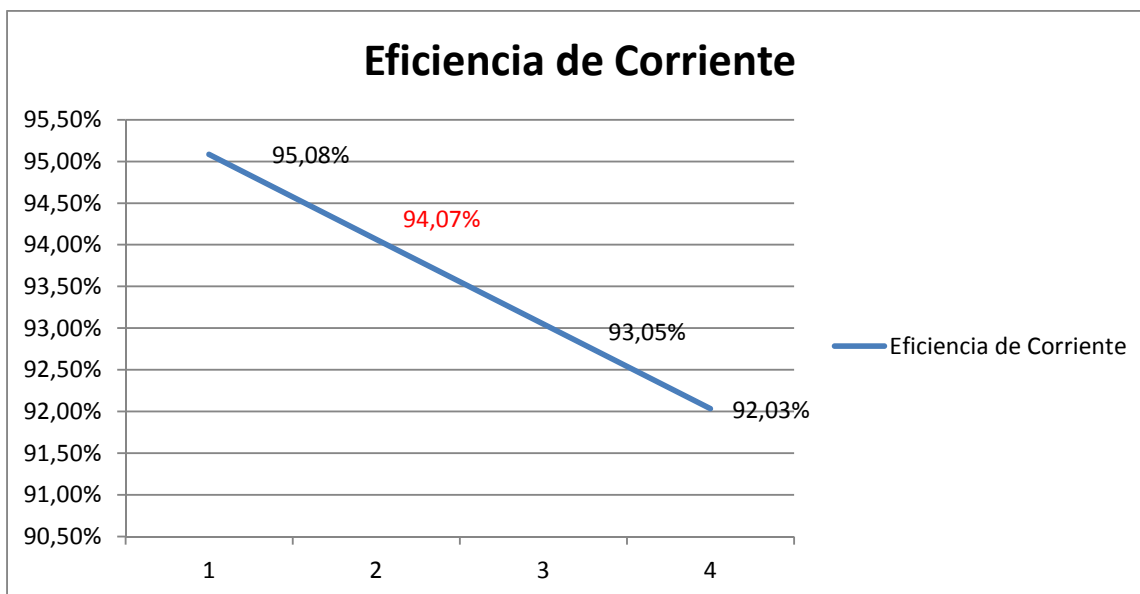


Figura 6.8 – Gráfico variación de eficiencia de corriente.
Fuente: (Elaboración Propia)

En este caso las pérdidas disminuyen desde 6.784.270,89 USD a 4.180.244,01 USD y la eficiencia de corriente aumenta desde un 90,37% a un 94,07%.

Sin embargo de acuerdo a la información obtenida, este escenario no se ha dado prácticamente nunca, por lo que solo se consideraran los dos casos anteriores.

Como ya se ha podido ver, este método representa grandes beneficios para la refinera electrolítica ya que permite grandes ahorros por concepto de cortocircuitos, así como también por un aumento importante de la eficiencia de corriente. Además para implementar esta solución no es necesario realizar modificaciones a la celda por lo que la intervención solo será la de incorporar la nueva barra a cada una de las celdas.

A fin de concluir esta comparación, se analizará la alternativa de la electrodiálisis reactiva.

Este método presenta grandes problemas, como es que en el caso de que no se quisiera realizar una modificación en las celdas, su capacidad disminuiría de 39 cátodos y 40 ánodos a 26 cátodos y 27 ánodos debido a que entre cada par ánodo-cátodo debe ir la membrana junto a un bastidor, por lo tanto se tendría una disminución en la capacidad de producción. Además otro problema del uso de

membranas es que su vida útil es solo de una cosecha, por lo que los costos de producción aumentarían, ya que cada membrana tiene un costo aproximado de 5.000 USD.

Por otro lado, si existiera la disposición a realizar cambios en las celdas con la finalidad de mantener la capacidad de producción se debería:

- Aumentar el tamaño de cada una de las celdas de la refinería o construir más celdas
- Modificar el circuito de calentamiento del electrolito
- Modificar es sistema de distribución eléctrica.
- Ampliar la nave electrolítica
- Cambiar las guías para el desplazamiento de los puentes grúas.

Sólo el costo de comprar un puente grúa e instalarlo tiene un valor aproximado de 2.160.000 USD, por lo que son modificaciones que implican una gran inversión.

Junto con esto, el tiempo estimado que demorarían las modificaciones es de alrededor 6 meses por lo que existe un costo operacional por la pérdida de producción de cátodos por el periodo en que duren los trabajos. Este costo en el caso de una cosecha tiene un valor de 8.538.448,46 USD, por lo que tener 6 meses detenida la refinería implica un costo demasiado elevado sabiendo que en el mes hay tres cosechas.

Otro factor relevante es la consideración de que la Fundición no puede detener su proceso por seis meses, luego, más que agrandar las celdas, la solución más lógica de implementar es construir nuevas celdas. Como esta alternativa implica la utilización de una menor cantidad de ánodos, éstos deberían apilarse en el patio de ánodos o venderse como cobre anódico. La última alternativa es la más viables, ya que el patio de ánodos no daría abastos para mantener los ánodos almacenados por 6 meses, considerando que este sitio es más que nada un lugar de almacenamiento es un espacio destinado a ubicar ánodos en tránsito.

7. Desarrollo Experimental

Con la finalidad de demostrar en forma empírica los resultados que se obtendrían con la conexión eléctrica multicircuital, es que se construyeron dos celdas electrolíticas a escala de laboratorio. Una con conexión convencional (electrodos en paralelo) y otra con la conexión propuesta (electrodos en serie) a fin de comparar los resultados obtenidos. Para esto se utilizaron dos recipientes de dimensiones 11cm x 9cm x 10cm, cuatro trozos de 14 cm cada uno de alambre de cobre, una fuente de poder DC Power Supply M10380S-406E, ocho placas de acero inoxidable de 7cm x 5cm y seis placas de cobre de 7cm x 5cm. Además se utilizó como electrolito una solución de 20 gpl de CuSO_4 y 170 gpl de H_2SO_4 .

En un circuito conectado en paralelo los dispositivos eléctricos, están dispuestos de manera que todo los polos, electrodos y terminales positivos (+) se unen en un único conductor, y todos los negativos (-) en otro, de forma que cada unidad se encuentra, en realidad, en una derivación paralela. Este tipo de conexión es la configuración Walker, que es la que actualmente se ocupa en CODELCO Ventanas. Esta configuración se basa en una distribución de barras interceldas de superficie menor en relación al área de la sección transversal ubicada entre las celdas adyacentes. Los cátodos de una celda y los ánodos de la celda contigua hacen un contacto eléctrico con la barra de distribución de corriente y se distribuyen por igual en toda su longitud.

La barra de distribución intercelda no requiere más que una fracción de la corriente total del proceso, debido a que la corriente que pasa por cada cátodo hacia la barra de distribución encontrará su camino de resistencia mínima a través de uno o más ánodos adyacentes a la siguiente celda.

Para construir la celda conectada en paralelo, en primer lugar se procedió a realizar un corte de 1 cm x 0,5 cm a cada lado de las placas de manera de obtener las orejas de los ánodos y cátodos. Luego cada ánodo se aisló en la oreja derecha, de manera de dejar aislado eléctricamente este lado. Continuando con la construcción, se conectó el lado izquierdo de cada ánodo a la barra de la izquierda, quedando conectado eléctricamente cada ánodo con esta barra. Una vez terminado esto, se procedió a aislar el lado izquierdo de cada cátodo y se conectó el lado derecho de cada cátodo con la barra de la derecha. Una vez finalizado esto se montaron las barras, los ánodos y los cátodos en el recipiente, para finalmente alimentar el electrolito. Una vez montada la celda, se conectó esta con la fuente mediante los cables conectores, el lado positivo se conectó a la barra de la izquierda y el lado negativo a la barra de la derecha, de esta manera la

corriente ingresa por los ánodos y se devuelve por los cátodos. La celda conectada en paralelo puede ser apreciada en la **Figura 7.1**.

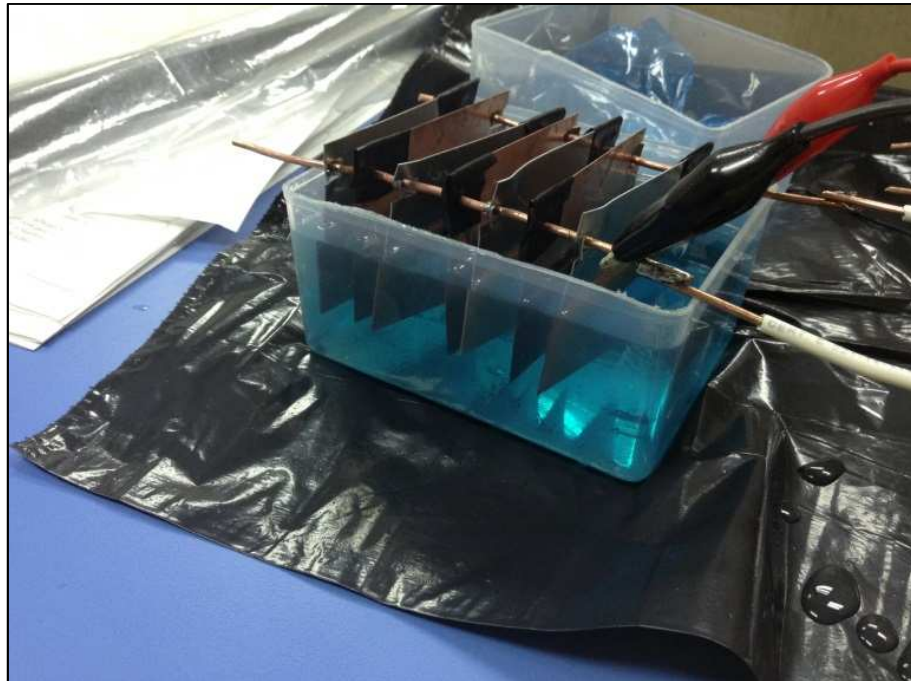


Figura 7.1 – Fotografía de conexión celda en paralelo.
Fuente: (Elaboración propia)

Un circuito en serie es aquel en que los dispositivos o elementos del circuito están dispuestos de tal manera que la totalidad de la corriente pasa a través de cada elemento sin división ni derivación. Cuando en un circuito hay dos o más resistencias en serie, la resistencia total se calcula sumando los valores de dichas resistencias.

Para construir la celda conectada en serie, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, con la diferencia que solo el tercer cátodo se dejó conectado a la barra de la derecha, los otros dos se dejaron totalmente aislados tal como se aprecia en la **Figura 7.2**. Esto se debe a que solo de esta forma el circuito se encuentra en serie y puede ser simulada la conexión eléctrica multicircuital.

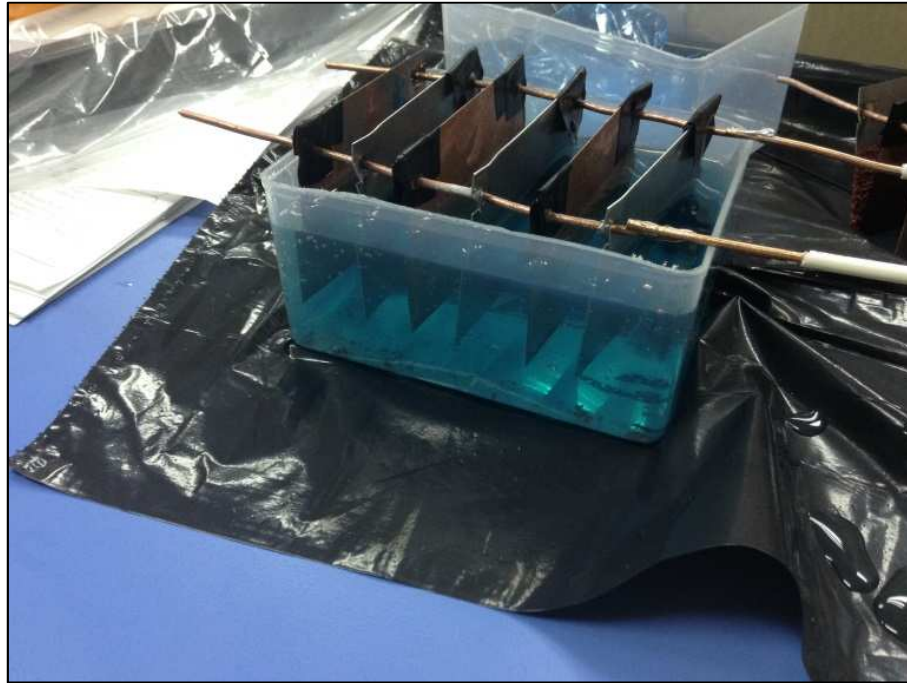


Figura 7.2 – Fotografía de conexión celda en serie.
Fuente: (Elaboración propia)

En primer lugar se trabajó con la celda con conexión convencional. Para simular el proceso se aplicó una corriente continua de 2,11 (A) y el electrolito se ocupó a una temperatura de 55°C que corresponde a la temperatura aproximada que se utiliza en CODELCO Ventanas. Al realizar una medición de corriente en los cátodos se obtuvo que la distribución de corriente no es uniforme como se muestra en la **Tabla 7.1**.

Tabla 7.1 – Distribución corriente circuito en paralelo

Cátodo	Corriente (A)
1	0,90
2	0,50
3	0,71

Fuente: (Elaboración Propia)

Además se provocaron cortocircuitos para ver cómo se comportaba la celda, obteniendo como resultado que al ocurrir un cortocircuito en un par ánodo-cátodo prácticamente no se depositaba cobre en los ánodos por lo que el proceso se veía interrumpido.

Junto con esto, el que la distribución de corriente no fuera homogénea tuvo como consecuencia que la depositación en los ánodos fuera irregular y distinta, tal como se aprecia en las **Figura 7.3 y 7.4**.



Figura 7.3 – Fotografía de ánodo celda en paralelo.
Fuente: (Elaboración propia)



Figura 7.4 – Fotografía de ánodo celda en paralelo.
Fuente: (Elaboración propia)

Una vez finalizadas las pruebas para la celda con conexión convencional, se realizaron las pruebas a la celda con conexión eléctrica multicircuital. Para esto también se le aplicó una corriente continua de 2,11 (A) y el electrolito se ocupó a 55°C. Para este caso, la distribución de corriente fue mucho más homogénea como se aprecia en la **Tabla 7.2**.

Tabla 7.2 – Distribución corriente circuito en serie

Cátodo	Corriente (A)
1	0,70
2	0,69
3	0,71

Fuente: (Elaboración propia)

Junto con esto, se provocaron cortocircuito y los resultados demostraron que a pesar de existir un par ánodo-cátodo cortocircuitado la corriente continua pasando por los demás pares y continua el proceso de deposición. Esto queda demostrado con las **Figuras 7.5 y 7.6**. En donde se puede ver la deposición homogénea y regular de cobre en los cátodos.

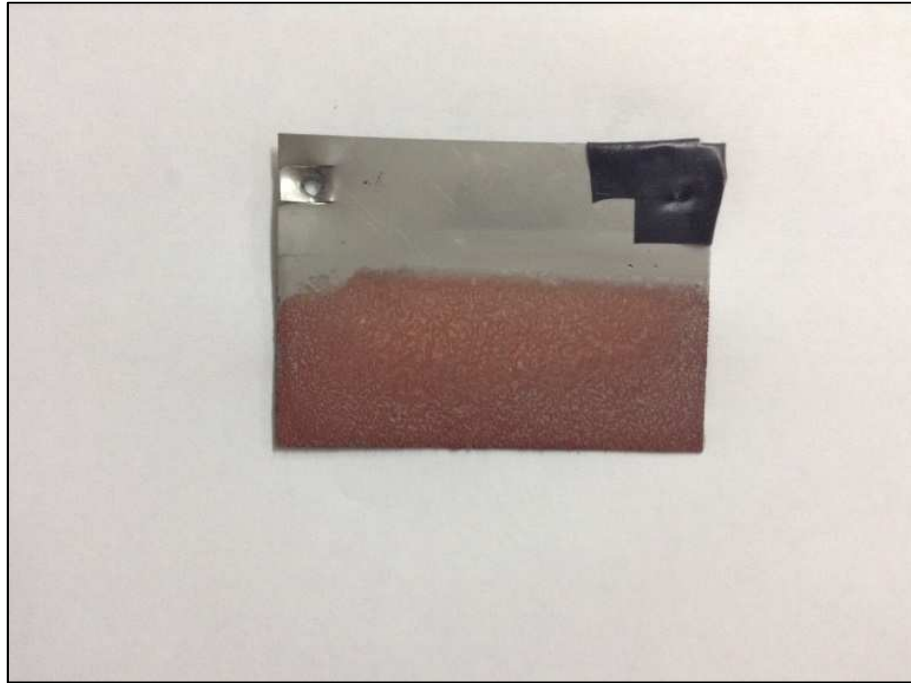


Figura 7.5 – Fotografía de ánodo celda en serie.
Fuente: (Elaboración propia)



Figura 7.6 – Fotografía de ánodo celda en serie.
Fuente: (Elaboración propia)

Con estas pruebas realizadas queda demostrada la efectividad de la conexión eléctrica multicircuital y sus beneficios, por sobre la conexión convencional que es la utilizada en la actualidad en CODELCO Ventanas.

8. Evaluación Económica

El caso que se evaluará económicamente es aquel en el que ocurrieran dos cortocircuitos por celda (ya que con la conexión convencional se dan cuatro, sin embargo con la nueva conexión bajarían a dos) y que sean detectados a las 24 horas como máximo, ya que es el que actualmente se presenta con mayor frecuencia en la refinería.

De acuerdo a la información obtenida, la inversión necesaria por celda sería de 100.000 USD para la implementación de este método, por lo que la inversión total sería igual a 25.760.000 USD.

Para este análisis, se realizará el supuesto de que la producción se mantiene constante durante el periodo de tiempo a evaluar. Además se supondrá que durante los diez primeros años de evaluación los costos de mantenimiento serán igual a un 15% de los ingresos y durante los últimos cinco años serán igual a un 20% de los mismos. Como supuesto final se considerará como tasa de interés un 8%, ya que es la utilizada en la actualidad por CODELCO para evaluar los proyectos de inversión y se asumirá que no hay modificaciones en la nave electrolítica.

Analizaremos 5 escenarios, en primer lugar un escenario con datos normales y luego realizaremos una sensibilización con los siguientes escenarios: uno en que los ingresos o ahorro disminuyan en un 20%, uno en que los ingresos disminuyan en un 40%, uno en que los ingresos aumenten en un 20% y por último un escenario en que los ingresos aumenten en un 40%.

Como se puede apreciar en la **Tabla 8.1**, en el caso uno (que es el análisis sin sensibilización), el proyecto es rentable, este resultado queda reflejado al obtener un VAN igual a 107.069,61 (miles de USD) y una TIR de 10,88%. Por lo tanto bajo este escenario el proyecto es recomendable.

En el caso dos (Ver **Tabla 8.2**), en el cual disminuimos el ahorro en un 20% el proyecto sigue siendo rentable, ya que obtenemos como resultado un VAN igual a 16.973,52 (miles de USD) y una TIR de 7%. En este escenario sigue siendo recomendable el proyecto.

En el tercer caso, el cual se observa en la **Tabla 8.3**, nos ponemos en un escenario aún más pesimista, reduciendo el ahorro en un 40% con respecto al

estimado. En este ejercicio el proyecto no sigue siendo rentable obteniendo como resultado un VAN de -74.232,10 (miles de USD) y una TIR de 2,62%.

Por último en los dos últimos casos aumentamos en un 20% y en un 40% los ahorros, respectivamente, obteniendo resultados aún mejores (Ver **Tabla 8.4** y **Tabla 8.5**)

Por lo tanto luego de todos los ejercicios anteriormente descritos, concluimos que el proyecto es rentable y recomendable de realizar.

Tabla 8.1 – Cálculo VAN y TIR sin sensibilización

Periodo de años	15	Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Tasa Interés	8%															
Inversión Inicial (miles USD)	25.760															
Miles USD		Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Ingresos	-	25.760	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116	116.116
Costos Operacionales																
Mantenimiento	-	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	1.161	2.322	2.322	2.322	2.322	2.322
Capital Trabajo	-	400.000														400.000
Margen Bruto		425.760	114.954	114.954	114.954	114.954	114.954	114.954	114.954	114.954	114.954	113.793	113.793	113.793	113.793	513.793
Depreciación	-	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717
Margen antes de impuesto		425.760	113.237	113.237	113.237	113.237	113.237	113.237	113.237	113.237	113.237	112.076	112.076	112.076	112.076	512.076
Impuesto 48%	-		54.354	54.354	54.354	54.354	54.354	54.354	54.354	54.354	54.354	53.796	53.796	53.796	53.796	245.796
Margen Neto		425.760	58.883	58.883	58.883	58.883	58.883	58.883	58.883	58.883	58.883	58.280	58.280	58.280	58.280	266.280
Depreciación	-		1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717	1.717
Flujo Caja		425.760	60.601	60.601	60.601	60.601	60.601	60.601	60.601	60.601	60.601	59.997	59.997	59.997	59.997	267.997

VAN	107.069,61
TIR	10,88%

Fuente: (Elaboración Propia)

Tabla 8.2 – Calculo VAN y TIR con ahorro 20% menor al estimado

Periodo de años	15	Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Tasa Interés	8%															
Inversión Inicial (miles USD)	25.200															
Miles USD		Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Ingresos	-	25.200	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893	92.893
Costos Operacionales	-	929	929	929	929	929	929	929	929	929	929	1.858	1.858	1.858	1.858	1.858
Mantenimiento	-															
Costo Capital	400.000															400.000
Margen Bruto	425.200	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.964	91.035	91.035	91.035	91.035	491.035
Depreciación	-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Margen antes de impuesto	425.200	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	90.284	89.355	89.355	89.355	89.355	489.355
Impuesto 48%	-	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	43.336	42.890	42.890	42.890	42.890	234.890
Margen Neto	425.200	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.947	46.464	46.464	46.464	46.464	254.464
Depreciación	-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Flujo Caja	425.200	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.627	48.144	48.144	48.144	48.144	256.144

VAN	16.973,52
TIR	7,00%

Fuente: (Elaboración Propia)

Tabla 8.3 – Cálculo VAN y TIR con ahorro 40% menor al estimado

Periodo de años	15	Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Tasa Interés	8%															
Inversión Inicial (miles USD)	25.200															
Miles USD		Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Ingresos	-	25.200	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669	69.669
Costos Operacionales																
Mantenimiento	-	697	697	697	697	697	697	697	697	697	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393
Capital de Trabajo	-	400.000														400.000
Margen Bruto	425.200	68.973	68.973	68.973	68.973	68.973	68.973	68.973	68.973	68.973	68.276	68.276	68.276	68.276	68.276	468.276
Depreciación	-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Margen antes de impuesto	425.200	67.293	67.293	67.293	67.293	67.293	67.293	67.293	67.293	67.293	66.596	66.596	66.596	66.596	66.596	466.596
Impuesto 48%	-	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	32.300	31.966	31.966	31.966	31.966	31.966	223.966
Margen Neto	425.200	34.992	34.992	34.992	34.992	34.992	34.992	34.992	34.992	34.992	34.630	34.630	34.630	34.630	34.630	242.630
Depreciación	-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Flujo Caja	425.200	36.672	36.672	36.672	36.672	36.672	36.672	36.672	36.672	36.672	36.310	36.310	36.310	36.310	36.310	244.310

VAN	-	74.232,10
TIR		2,62%

Fuente: (Elaboración Propia)

Tabla 8.4 – Cálculo VAN y TIR con ahorro 20% mayor al estimado

Periodo de años	15	Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Tasa Interés	8%															
Inversión Inicial (miles USD)	25.200															
Miles USD		Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Ingresos	25.200	-	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339	139.339
Costos Operacionales																
Mantenimiento	-		1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	1.393	2.787	2.787	2.787	2.787	2.787
Capital de Trabajo	-	400.000														400.000
Margen Bruto	425.200	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	137.945	136.552	136.552	136.552	136.552	536.552
Depreciación	-		1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Margen antes de impuesto	425.200	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	136.265	134.872	134.872	134.872	134.872	534.872
Impuesto 48%	-		65.407	65.407	65.407	65.407	65.407	65.407	65.407	65.407	65.407	64.739	64.739	64.739	64.739	256.739
Margen Neto	425.200	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.858	70.133	70.133	70.133	70.133	278.133
Depreciación	-		1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Flujo Caja	425.200	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	72.538	71.813	71.813	71.813	71.813	279.813

VAN	199.049,15
TIR	14,50%

Fuente: (Elaboración Propia)

Tabla 8.5 – Cálculo VAN y TIR con ahorro 40% mayor al estimado

Periodo de años	15	Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Tasa Interés	8%															
Inversión Inicial (miles USD)	25.200															
Miles USD		Flujo 0	Flujo 1	Flujo 2	Flujo 3	Flujo 4	Flujo 5	Flujo 6	Flujo 7	Flujo 8	Flujo 9	Flujo 10	Flujo 11	Flujo 12	Flujo 13	Flujo 14
Ingresos		162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562	162.562
Costos Operacionales																
Mantenimiento		-	1.626	1.626	1.626	1.626	1.626	1.626	1.626	1.626	1.626	3.251	3.251	3.251	3.251	3.251
Capital de Trabajo		-	400.000													400.000
Margen Bruto		237.438	160.936	160.936	160.936	160.936	160.936	160.936	160.936	160.936	160.936	159.311	159.311	159.311	159.311	559.311
Depreciación		-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Margen antes de impuesto		237.438	159.256	159.256	159.256	159.256	159.256	159.256	159.256	159.256	159.256	157.631	157.631	157.631	157.631	557.631
Impuesto 48%		-	76.443	76.443	76.443	76.443	76.443	76.443	76.443	76.443	76.443	75.663	75.663	75.663	75.663	267.663
Margen Neto		237.438	82.813	82.813	82.813	82.813	82.813	82.813	82.813	82.813	82.813	81.968	81.968	81.968	81.968	289.968
Depreciación		-	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680	1.680
Flujo Caja		237.438	84.493	84.493	84.493	84.493	84.493	84.493	84.493	84.493	84.493	83.648	83.648	83.648	83.648	291.648

VAN	463.940,56
TIR	35,06%

Fuente: (Elaboración Propia)

9. Conclusiones

Durante el análisis de cada una de las alternativas, se determinó que la electrodiálisis reactiva no es viable ya que es necesario realizar varias modificaciones a las celdas, lo que se traduciría en un costo superior a 2.160.000 USD sólo por el cambio de puente grúa. Las demás modificaciones constan de proyectos de ingeniería, modificación de circuitos y los ítems. A lo anterior, hay que sumar que durante el tiempo de una cosecha, la refinería estaría detenida lo que conlleva a dejar de producir el cobre equivalente a 8.538.448,46 USD, lo que es inviable para una refinería de las características de CODELCO-Ventanas. Por lo tanto la alternativa evaluada es la de conexión eléctrica multicircuital.

De acuerdo a las pruebas de laboratorio, quedaron demostrados los beneficios que tiene la conexión eléctrica multicircuital, como es la reducción en la dispersión de corrientes, la reducción en el impacto de los cortocircuitos en el proceso y una reducción en la depositación irregular de cobre en los ánodos.

Cuando se habla de dispersión de corrientes, se refiere a que en promedio para el caso de la conexión eléctrica multicircuital la variación de corriente en cada cátodo es de un 1,4% frente a un 28,57% para la conexión convencional. A su vez para el caso de los cortocircuitos, cuando ocurría uno en la conexión convencional el proceso de electrorefinación quedaba interrumpido, sin embargo en el caso de la conexión eléctrica multicircuital el proceso continuaba, por lo que las pérdidas de producción son mucho menores. Por otro lado, la deposición para el caso de la alternativa propuesta era mucho más homogénea y sin dendritas, que son una de las principales causas de los cortocircuitos, por lo que se puede concluir que el rechazo catódico será mucho menor con esta alternativa versus la conexión utilizada en la actualidad.

Además, desde el punto de vista económico el método de conexión eléctrica multicircuital es sumamente rentable, por lo cual se recomienda a la brevedad incorporar esta alternativa, ya que genera grandes beneficios como es por ejemplo un ahorro en un escenario medio de 107.069,61 (miles de USD) y un aumento en la eficiencia de corriente entre un 1.5%-2.5%.

El análisis de sensibilidad nos muestra que este método sigue siendo rentable en todos los escenarios excepto en el cual reduce la estimación de ahorro en un 40%, obteniendo como resultado un VAN de -74.232,10 (miles de USD) y una TIR de 2,62%. Con este cálculo queda aún más claro la viabilidad y rentabilidad del método, por lo cual se reafirma la recomendación de realizar el cambio de conexión

en cada una de las celdas electrolíticas existentes en la refinería electrolítica de CODELCO-Ventanas. En las Figuras 9.1 y 9.2 se puede apreciar el comportamiento del VAN y de la TIR en los diferentes escenarios.

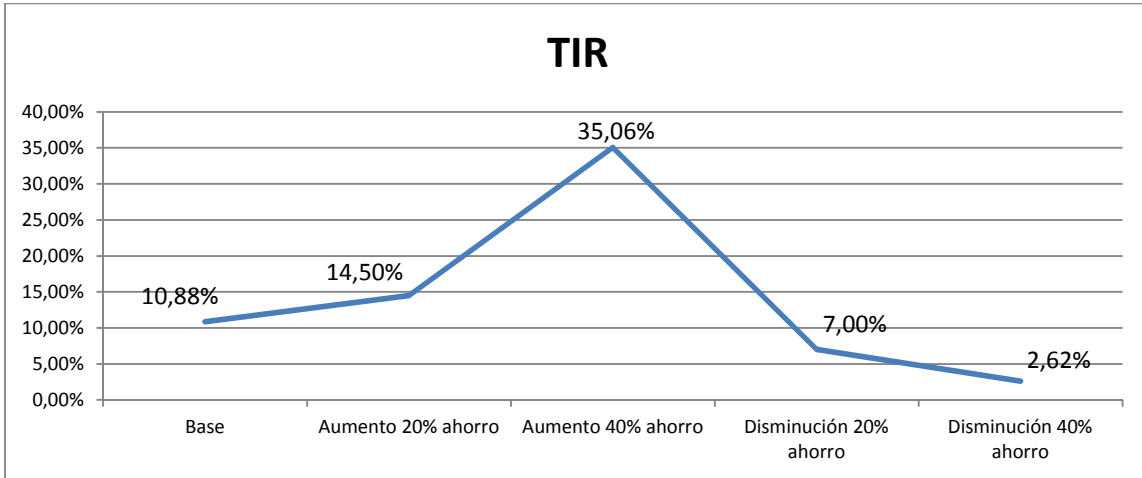


Figura 9.1 – Sensibilización escenarios TIR.
Fuente: (Elaboración propia)

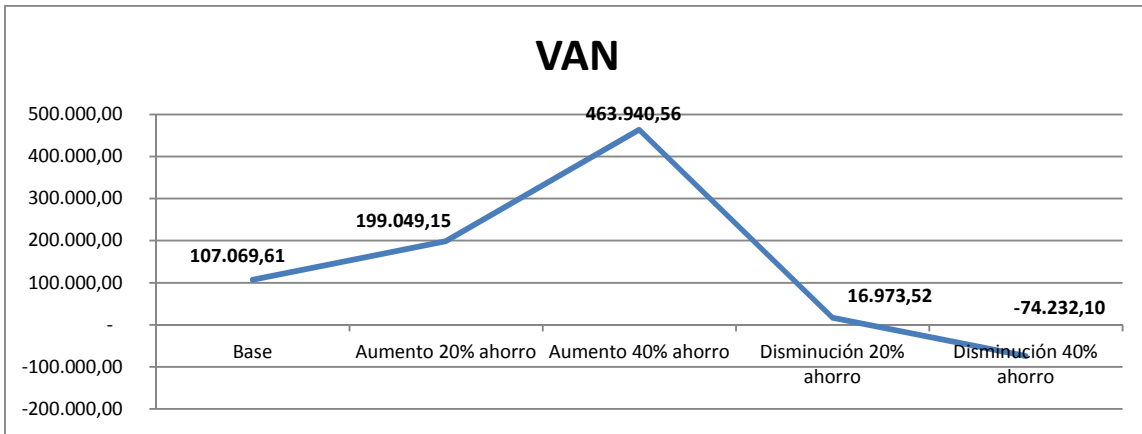


Figura 9.2 – Sensibilización escenarios VAN.
Fuente: (Elaboración propia)

Como se puede notar en las gráficas anteriores, el retorno de la inversión es válido, aún para una empresa del Estado como CODELCO que tributa un 48% de sus utilidades.

En el caso de analizar este tipo de cambio en el circuito eléctrico, par la minería privada, cuyo impuesto a las utilidades es menor, el TIR es superior al 300%. No se puede indicar una cifra exacta, ya que habría que analizar en específico, el Royalty que paga cada una de las Empresas en nuestro país.

Bibliografía

- [1]. <http://www.cochilco.cl/estudios/informes.asp> ; Internet; accessed 1° Noviembre 2013.
- [2]. <http://www.cochilco.cl/estadisticas/intro-bd.asp> ; Internet; accessed 1° Noviembre 2013.
- [3]. http://www.codelco.com/energia/prontus_codelco/2011-07-11/110731.html; Internet; accessed 1° Diciembre 2013.
- [4]. https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_exploracion_reconocimiento_mineralogia.asp ; Internet; accessed 1° Diciembre 2013.
- [5]. W.G Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas, Extractive Metallurgy Of Copper, 4ª Edición, Editorial Pergamon, USA, 2002, Capitulo 16.
- [6]. E.P Wiechmann, G.A. Vidal, A.G. Pagliero and J.A. Gonzalez, "Copper Electrowining Using Segmented Intercell Bars for Improved Current Distribution", Canadian Metallurgical Quarterly, 2002, vol 41(4), pp. 425-423.
- [7]. G. Vidal, E. Wienschman, and J. Pagliero, "Performance of intercell bars for electrolytic applications", in Proc. 5th Int. Symp. Honoring Professor Ian M. Ritchie, Hydrometallurgy, C. Young, A. Alfantazi, C. Anderson, A. James, D. dreisinger, and B. Harris, Eds, Vancouver, BC, Canada, Aug. 2003, vol. II, pp. 1381-1394.
- [8]. E. Wiechmann, G. Vidal, and Pagliero, "Current-source connection of electrolytic cell electrodes, an improvement for electrowinning and electrorefinery", IEEE Trans, Ind. Appl, vol 42, N°3, pp. 851-855, M ay/Jun. 2006.

Anexos

Anexo 1

Anexo 2

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 24 horas de detectar un cortocircuito

Calculo masa teórica:

Alimentación rectificador	24.400 Ampere
Corriente	548,78 Ampere
Tiempo	691.200 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500 C/Eq
Nº electrones transferidos	2,00

Por lo tanto la masa teórica por cátodo y por celda son las siguientes:

Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Eficiencia de Corriente	96,10%
--------------------------------	---------------

¿Qué pasa cuando ocurre un cortocircuito?

La corriente por el cátodo cortocircuitado aumenta en un 55%, tomando un valor igual a 850,5 (A). Por lo tanto la corriente en los otros 38 cátodos disminuye en 7,94 (A)

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	7,94 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (38 Cátodos)	540,80 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,78 Kg
Masa depositada siguientes 7 días	105,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.656,75 Kg

Eficiencia de Corriente	95,62%
--------------------------------	---------------

Precio promedio Cobre	7,176 USD/KG
-----------------------	--------------

Lo que dejo de producir/Celda	213,20 Kg
Lo que dejo de producir en total	429.814,42 Kg

Pérdida Total en USD 3.084.348,29

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	16,31 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (37 Cátodos)	532,43 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1	86.400 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800 Segundos

Masa depositada día 1	14,55 Kg
Masa depositada siguientes 7 dias	105,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.633,50 Kg

Eficiencia de Corriente 95,14%

Lo que dejo de producir/Celda	236,45 Kg
Lo que dejo de producir en total	476.691,22 Kg

Pérdida Total en USD 3.420.736,17

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	25,15 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (36 Cátodos)	523,59 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,31 Kg
Masa depositada siguientes 7 dias	105,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.610,25 Kg

Eficiencia de Corriente 94,67%

Lo que dejo de producir/Celda	259,70 Kg
Lo que dejo de producir en total	523.563,22 Kg

Pérdida Total en USD 3.757.089,64

¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	34,49 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (35 Cátodos)	514,25 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 segundos

Masa depositada día 1	14,06 Kg
Masa depositada siguientes 7 días	105 Kg

Masa total depositada/Celda 4.587 Kg

Eficiencia de Corriente 94,19%

Lo que dejo de producir/Celda	282,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	570.435,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.093.443,11

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 48 horas de detectar un cortocircuito

Cálculo Masa Teórica:

Alimentación rectificador	21.400,00 Ampere
Corriente	548,74 Ampere
Tiempo	691.200,00 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500,00 C/Eq
Nº electrones transferidos	2,00

Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Peso promedio Cátodo 120,00 Kg

Eficiencia de Corriente 96,10%

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 48 Hrs?

Disminución de corriente 7,94 Ampere
Aumento Corriente 55%
Corriente (38 Cátodos) 540,80 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 850,55 Ampere
Tiempo día 1-2 172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8 518.400,00 Segundos

Masa depositada día 1-2 29,57 Kg
Masa depositada día 3-8 90,00 Kg
Masa total depositada/Celda 4.633,50 Kg

Eficiencia de Corriente 95,14%

Precio promedio Cobre 7,176 USD/KG

Lo que dejo de producir/Celda 236,45 Kg
Lo que dejo de producir en total 476.681,63 Kg

Pérdida Total en USD 3.420.667,36

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente 16,31 Ampere
Aumento Corriente 55%
Corriente (37 Cátodos) 532,43 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 850,55 Ampere
Tiempo día 1-2 172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8 518.400,00 Segundos

Masa depositada día 1-2 29,11 Kg
Masa depositada día 3-8 90,00 Kg
Masa total depositada/Celda 4.587,00 Kg

Eficiencia de Corriente 94,19%

Lo que dejo de producir/Celda	282,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	570.435,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.093.443,11

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente	25,15 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (36 Cátodos)	523,59 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-2	172.800 Segundos
Tempo día 3 al 8	518.400 Segundos

Masa depositada día 1-2	28,63 Kg
Masa depositada día 3-8	90,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.540,50 Kg

Eficiencia de Corriente 93,23%

Lo que dejo de producir/Celda	329,45 Kg
Lo que dejo de producir en total	664.179,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.766.150,05

- ¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente	34,49 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (35 Cátodos)	514,25 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-2	172.800 Segundos
Tempo día 3 al 8	518.400 Segundos

Masa depositada día 1-2	28,11 Kg
Masa depositada día 3-8	90,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.494 Kg

Eficiencia de Corriente 92,28%

Lo que dejo de producir/Celda	375,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	757.923,22 Kg

Pérdida Total en USD 5.438.857,00

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 72 horas de detectar un cortocircuito

Cálculo Masa Teórica:

Alimentación rectificador	21.400 Ampere
Corriente	548,74 Ampere
Tiempo	691.200 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500 C/Eq
Nº electrones transferidos	2,00

Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Peso promedio Cátodo	120,00 Kg
----------------------	-----------

Eficiencia de Corriente 96,10%

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	7,94 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (38 Cátodos)	540,80 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000 Segundos

Masa depositada día 1-3	44,35 Kg
Masa depositada día 4-8	75,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.610,26 Kg

Eficiencia de Corriente 94,67%

Precio promedio Cobre	7,176 USD/KG
-----------------------	--------------

Lo que dejo de producir/Celda	259,70 Kg
Lo que dejo de producir en total	523.548,83 Kg

Pérdida Total en USD 3.756.986,42

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	16,31 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (37 Cátodos)	532,43 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000 Segundos

Masa depositada día 1-3	43,66 Kg
Masa depositada día 4-8	75,00 Kg

Masa total depositada/Celda	4.540,50 Kg
-----------------------------	-------------

Eficiencia de Corriente 93,23%

Lo que dejo de producir/Celda	329,45 Kg
Lo que dejo de producir en total	664.179,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.766.150,05

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	25,15 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (36 Cátodos)	523,59 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000 Segundos

Masa depositada día 1-3	42,94 Kg
Masa depositada día 4-8	75,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.470,75 Kg

Eficiencia de Corriente 91,80%

Lo que dejo de producir/Celda	399,20 Kg
Lo que dejo de producir en total	804.795,22 Kg

Pérdida Total en USD 5.775.210,47

¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	34,49 Ampere
Aumento Corriente	55%
Corriente (35 Cátodos)	514,25 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	850,55 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000,00 Segundos
Masa depositada día 1-3	42,17 Kg
Masa depositada dia 4-8	75,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.401 Kg
Eficiencia de Corriente	90,37%
Lo que dejo de producir/Celda	468,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	945.411,22 Kg
Pérdida Total en USD	6.784.270,89

Anexo 3

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 24 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuital

Cálculo Masa Teórica

Alimentación rectificador	21.400,00 Ampere
Corriente	548,74 Ampere
Tiempo	691.200,00 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500,00 C/Eq
Nº electrones transferidos	2,00

Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Peso promedio Cátodo	120,00 Kg
Eficiencia de Corriente	96,10%

¿Qué pasa cuando ocurre un cortocircuito?

La corriente por el cátodo cortocircuitado aumenta en un 10%, por lo tanto la corriente en el cátodo es igual a 603,61 (A). Por lo tanto la corriente en los otros 38 cátodos disminuye en 7,94 (A)

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	1,44 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (38 Cátodos)	547,30 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,96 Kg
Masa depositada siguientes 7 dias	105,00 Kg

Masa total depositada/Celda	4.663,50 Kg
-----------------------------	-------------

Eficiencia de Corriente	95,76%
--------------------------------	---------------

Precio promedio Cobre	7,176 USD/KG
-----------------------	--------------

Lo que dejo de producir/Celda	206,45 Kg
Lo que dejo de producir en total	416.202,73 Kg

Pérdida Total en USD 2.986.670,79

Este es el caso en que existiera 1 cortocircuito en cada celda durante todo el ciclo catódico

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	2,97 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (37 Cátodos)	545,77 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,92 Kg
Masa depositada siguientes 7 días	105,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.647,00 Kg

Eficiencia de Corriente 95,42%

Lo que dejo de producir/Celda	222,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	449.475,22 Kg

Pérdida Total en USD 3.225.434,15

Este es el caso en que existieran 2 cortocircuitos en cada celda durante todo el ciclo catódico

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	4,57 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (36 Cátodos)	544,17 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,88 Kg
Masa depositada siguientes 7 días	105,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.630,50 Kg

Eficiencia de Corriente	95,08%
Lo que dejo de producir/Celda	239,45 Kg
Lo que dejo de producir en total	482.739,22 Kg
Pérdida Total en USD	3.464.136,61

Este es el caso en que existieran 3 cortocircuitos en cada celda durante todo el ciclo catódico

- ¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 24 Hrs?

Disminución de corriente	6,27 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (35 Cátodos)	542,47 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1	86.400,00 Segundos
Tempo día 2 al 8	604.800,00 Segundos

Masa depositada día 1	14,83 Kg
Masa depositada siguientes 7 dias	105,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.614,00 Kg

Eficiencia de Corriente	94,74%
Lo que dejo de producir/Celda	255,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	516.003,22 Kg
Pérdida Total en USD	3.702.839,08

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 48 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuito

Cálculo Masa Teórica

Alimentación rectificador	21.400,00 Ampere
Corriente	548,74 Ampere
Tiempo	691.200,00 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500,00 C/Eq
N° electrones transferidos	2,00
Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Peso promedio Cátodo 120,00 Kg

Eficiencia de Corriente 96,10%

¿Qué pasa cuando ocurre un cortocircuito?

La corriente por el cátodo cortocircuitado aumenta en un 10%, por lo tanto la corriente en el cátodo es igual a 603,61 (A). Por lo tanto la corriente en los otros 38 cátodos disminuye en 7,94 (A)

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 48 Hrs?

Disminución de corriente	1,44 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (38 Cátodos)	547,30 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1-2	172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8	518.400,00 Segundos

Masa depositada día 1-2	29,92 Kg
Masa depositada día 3-8	90,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.647,01 Kg

Eficiencia de Corriente 95,42%

Precio promedio Cobre 7,176 USD/KG

Lo que dejo de producir/Celda 222,95 Kg

Lo que dejo de producir en total 449.458,24 Kg

Pérdida Total en USD 3.225.312,35

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente 2,97 Ampere
Aumento Corriente 10%
Corriente (37 Cátodos) 545,77 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 603,61 Ampere
Tiempo día 1-2 172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8 518.400,00 Segundos

Masa depositada día 1-2 29,84 Kg
Masa depositada día 3-8 90,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.614,00 Kg

Eficiencia de Corriente 94,74%

Lo que dejo de producir/Celda 255,95 Kg
Lo que dejo de producir en total 516.003,22 Kg

Pérdida Total en USD 3.702.839,08

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente 4,57 Ampere
Aumento Corriente 10%
Corriente (36 Cátodos) 544,17 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 603,61 Ampere
Tiempo día 1-2 172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8 518.400,00 Segundos

Masa depositada día 1-2 29,75 Kg
Masa depositada día 3-8 90,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.581,00 Kg

Eficiencia de Corriente 94,07%

Lo que dejo de producir/Celda 288,95 Kg
Lo que dejo de producir en total 582.531,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.180.244,01

- ¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 48 Hrs?

Disminución de corriente	6,27 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (35 Cátodos)	542,47 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1-2	172.800,00 Segundos
Tempo día 3 al 8	518.400,00 Segundos
Masa depositada día 1-2	29,66 Kg
Masa depositada día 3-8	90,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.548,00 Kg
Eficiencia de Corriente	93,39%
Lo que dejo de producir/Celda	321,95 Kg
Lo que dejo de producir en total	649.059,22 Kg
Pérdida Total en USD	4.657.648,93

Comportamiento de eficiencia de corriente y pérdidas a las 72 horas de detectar un cortocircuito con conexión eléctrica multicircuito

Cálculo Masa Teórica

Alimentación rectificador	21.400,00 Ampere
Corriente	548,74 Ampere
Tiempo	691.200,00 Segundos
Peso específico	63,54 Gr/Eq
Const. Faraday	96.500,00 C/Eq
Nº electrones transferidos	2,00
Masa Teórica/Cátodo	124,87 Kg
Masa Teórica/Celda	4869,95 Kg

Sabiendo que el peso promedio de un cátodo de Ventanas es de 120 kilos la eficiencia de corriente es:

Peso promedio Cátodo 120,00 Kg

Eficiencia de Corriente 96,10%

¿Qué pasa cuando ocurre un cortocircuito?

La corriente por el cátodo cortocircuitado aumenta en un 10%, por lo tanto la corriente en el cátodo es igual a 603,61 (A). Por lo tanto la corriente en los otros 38 cátodos disminuye en 7,94 (A)

- ¿Qué pasa cuando ocurre 1 cortocircuito y se detecta a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	1,44 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (38 Cátodos)	547,30 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200,00 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000,00 Segundos

Masa depositada día 1-3 44,88 Kg
Masa depositada día 4-8 75,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.630,51 Kg

Eficiencia de Corriente 95,08%

Precio promedio Cobre 7,176 USD/KG

Lo que dejo de producir/Celda 239,44 Kg
90

Lo que dejo de producir en total 482.713,76 Kg

Pérdida Total en USD 3.463.953,91

- ¿Qué pasa cuando ocurren 2 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente 2,97 Ampere
Aumento Corriente 10%
Corriente (37 Cátodos) 545,77 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 603,61 Ampere
Tiempo día 1-3 259.200,00 Segundos
Tempo día 4 al 8 432.000,00 Segundos

Masa depositada día 1-3 44,76 Kg
Masa depositada día 4-8 75,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.581,00 Kg

Eficiencia de Corriente 94,07%

Lo que dejo de producir/Celda 288,95 Kg
Lo que dejo de producir en total 582.531,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.180.244,01

- ¿Qué pasa cuando ocurren 3 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente 4,57 Ampere
Aumento Corriente 10%
Corriente (36 Cátodos) 544,17 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado 603,61 Ampere
Tiempo día 1-3 259.200,00 Segundos
Tempo día 4 al 8 432.000,00 Segundos

Masa depositada día 1-3 44,63 Kg
Masa depositada día 4-8 75,00 Kg

Masa total depositada/Celda 4.531,50 Kg

Eficiencia de Corriente 93,05%

Lo que dejo de producir/Celda 338,45 Kg
Lo que dejo de producir en total 682.323,22 Kg

Pérdida Total en USD 4.896.351,40

- ¿Qué pasa cuando ocurren 4 cortocircuitos y se detectan a las 72 Hrs?

Disminución de corriente	6,27 Ampere
Aumento Corriente	10%
Corriente (35 Cátodos)	542,47 Ampere
Corriente Cátodo Cortocircuitado	603,61 Ampere
Tiempo día 1-3	259.200,00 Segundos
Tempo día 4 al 8	432.000,00 Segundos
Masa depositada día 1-3	44,49 Kg
Masa depositada día 4-8	75,00 Kg
Masa total depositada/Celda	4.482,00
Eficiencia de Corriente	92,03%
Lo que dejo de producir/Celda	387,95
Lo que dejo de producir en total	782.115,22
Pérdida Total en USD	5.612.458,79