

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AMBIENTAL  
VALPARAISO – CHILE



“Evaluación técnico-económica de sistema  
automático de detección de corto circuitos en  
refinería de cobre Chuquicamata – Codelco”

**LUIS ALBERTO PEREZ ALVARADO**

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO CIVIL  
QUÍMICO.

PROFESOR GUÍA  
PROFESOR CO REFERENTE

: DANIEL RAMIREZ.  
: DR. JUAN PATRICIO IBAÑEZ

MARZO - 2022

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi gratitud hacia mi profesor guía Daniel Ramirez y mi profesor co-referente quienes me han guiado durante este proceso investigativo y me ha dado una visión complementaria que sin duda me acompañara en el resto de mi vida profesional, les agradezco su espíritu docente, el cual tuve el agrado de vivirlo durante mi pregrado en la Universidad. Expreso mi gratitud también hacia las personas de la industria que creyeron en mi para trabajar en los casos expuestos en esta memoria.

Este trabajo se lo dedico a mi familia y esposa. En este sentido agradezco a mi madre Suria por su interminable esfuerzo diario durante todo este proceso y en toda mi vida. A mi padre Luis, por su ayuda interminable siempre en mi vida. A mi hermano Bryant por los momentos de alegría y apoyo cuando de repente se veía oscuro el paisaje. En general les agradezco sus enseñanzas, sus valores inculcados, y su estilo de vida. Me acompañaran por siempre y me han formado en el ser humano que soy hoy en día.

Dedico un párrafo especial a mi esposa Karla quien me ha acompañado durante gran parte de mi vida, siempre apoyándome y cuidándome, gracias por aguantar las noches de desvelo o los fines de semana trabajados en este proyecto personal. Que Dios nos de su bendición y a ti en especial, te de toda la dicha por el resto de nuestros días.

Finalmente, dedico este trabajo a mi abuela Filomena, la cual lamentablemente no pudo llegar a ver este momento, pero sé que, desde el cielo, me ha acompañado en el tramo final de este trabajo. Gracias por todo lo que apoyaste siempre y espero que me acompañes en el tramo final y en lo que venga hacia el futuro.

## RESUMEN

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa autónoma, propiedad del Estado de Chile y la mayor productora de cobre del mundo. Concentra, además, el mayor nivel de reservas y recursos mundiales de cobre y es el motor del desarrollo del país.

La división Chuquicamata, perteneciente a Codelco, se ubica en la comuna de Calama, a 650 kilómetros al norte de Santiago de Chile y a 2870 metros sobre el nivel del mar. Este yacimiento posee el rajo más grande del mundo, cuya producción corresponde a cátodos electrorefinados y electroobtenidos con una pureza de 99,99 % de cobre. Este trabajo se enfoca en el proceso de electrorrefinación electrolítica.

La refinación electrolítica o electro refinación es el último proceso metalúrgico al que es sometido el cobre sulfurado en nuestro país antes de ser embarcado al extranjero en formato de cátodos de cobre.

Dentro de este contexto la Planta de Refinación Electrolítica de la división Chuquicamata es la sección funcional final del proceso de producción de cátodos de cobre, donde por medio de procesos (electrorefinación) y operaciones (manejo de electrodos, manejo de materiales) se obtienen los cátodos de cobre de 99,999% de pureza.

Una de las grandes preocupaciones en las refinerías de cobre es la calidad de cobre obtenido. Los cátodos deben poseer una alta pureza (99,99% de Cu) y el proceso debe ocurrir con eficiencias de corriente entre 94% y 98%, lo cual es una labor compleja en los tiempos actuales ya que el crecimiento de los cátodos está influenciado por parámetros de proceso para los cuales la refinería se encuentra diseñada, pero también por parámetros operacionales, tales como planes de mantenimiento, reducciones de personal o personal no adecuado para las tareas diarias que se deben realizar para el mantenimiento del proceso.

Dentro de los grandes problemas que se encuentran en la operación de la refinería están los corto circuitos, estos se forman cuando existe un contacto directo entre cátodo y ánodo por diferentes razones que se explican en el presente trabajo.

La manera de eliminar estos cortos circuitos es mediante inspección con cámaras térmicas manuales, operadas por un operador en conjunto con una cuadrilla que elimina, mediante métodos físicos, el corto detectado.

En la búsqueda de mejora continua la refinería de Chuquicamata implemento un piloto de tecnología térmica denominada MAT, propiedad de la empresa INNOVAXXION. El piloto logro detectar que una vez eliminado los corto circuitos, un 52% de estos volvía a formarse, ademas detecto que un 18% de las horas utilizados por la cuadrilla se encontraban innecesariamente ocupadas en inspección.

En cuanto a los costos y beneficios de la implementación de esta tecnología para toda la nave de electrorrefinacion se tiene que desde el punto de vista financiero, en un horizonte de 7 años, la única manera del que el sistema de detección temprana de corto circuitos sea rentable es aumentando las toneladas producidas. Actualmente la refinería posee una ocupación operativa de un 86,5%. Desde el punto de vista económico y de acuerdo con el análisis de sensibilidad correspondiente, el principal efecto sobre los costos del sistema y su viabilidad financiera, recaen en un aumento de producción. Lo anterior se traduce en un aumento de cobre catódico grado A producido. A un horizonte de 7 años, esto se traduce en casi 630 toneladas más de cobre catódico grado A producidos.

Desde el punto de vista de horas hombre y eficiencia de corriente, el sistema no es viable desde el punto de vista financiero.

Finalmente, se ve una tremenda oportunidad de cambiar una practica arraigada en la operación, como son las cuadrillas de inspección, un cambio de paradigma y una implementación de tecnologías que apuntan hacia la llamada industria 4.0.

## Contenido

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b>                                             | 2  |
| <b>RESUMEN</b>                                                     | 3  |
| 1.1 Cobre                                                          | 10 |
| 1.2 Recursos                                                       | 13 |
| 1.3 Producción                                                     | 15 |
| 1.4 Mercado                                                        | 20 |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                                | 23 |
| <b>3. ANTECEDENTES GENERALES</b>                                   | 24 |
| 3.1 Antecedentes de la empresa                                     | 24 |
| 3.1.1 División Chuquicamata                                        | 24 |
| 3.2 Proceso de electro refinación                                  | 24 |
| 3.3 Descripción general de la División Chuquicamata                | 25 |
| <b>4. MARCO TEÓRICO</b>                                            | 31 |
| 4.1 Electrocrystalización                                          | 31 |
| 4.2 Fundamentos de la Electrocrystalización                        | 31 |
| 4.3 Nucleación                                                     | 33 |
| 4.4 Crecimiento                                                    | 36 |
| 4.5 Ley de Faraday                                                 | 38 |
| 4.5.1 Corto Circuitos                                              | 38 |
| 4.6 Eficiencia de corriente                                        | 41 |
| 4.7 Sobrepotencial de cristalización                               | 43 |
| 4.8 Factores influyentes en la estructura del metal depositado     | 43 |
| 4.8.1 Densidad de corriente                                        | 43 |
| 4.8.2 Inhibición                                                   | 44 |
| <b>5. Condiciones Operativas que favorecen los Corto Circuitos</b> | 45 |
| 5.1 Ánodos con orejas Chuecas                                      | 45 |
| 5.1.1 Orejas de ánodos con zonas de contacto irregulares           | 46 |
| 5.1.2 Protuberancia en ambas caras del ánodo                       | 48 |
| 5.1.3 Ánodos Sobredimensionados                                    | 49 |
| 5.2 Inspección Catódica                                            | 51 |
| 5.3 Calidad Catódica                                               | 53 |

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6. TECNOLOGÍA PARA DETECCIÓN DE CORTO CIRCUITOS .....</b>                    | <b>55</b> |
| 6.1 Tecnología MAT .....                                                        | 55        |
| 6.2 Sistema térmico de detección temprana de corto circuitos.....               | 59        |
| 6.2.1 Sensores de visión Térmica (iMAT Vision) .....                            | 60        |
| 6.2.2 Plataforma de base de datos (iMAT Plataform) .....                        | 61        |
| 6.2.3 Interfaz de usuario (iMAT User Interface) .....                           | 61        |
| 6.2.4 Identificador de electrodo (iMAT Capboard).....                           | 62        |
| 6.3 Resultados de sistema térmico de detección temprana de Corto Circuito ..... | 63        |
| <b>7. Análisis económico .....</b>                                              | <b>66</b> |
| 7.1 Escenario actual.....                                                       | 66        |
| 7.2 Escenario con tecnología Térmica .....                                      | 70        |
| 7.3 Escenario con tecnología Térmica .....                                      | 72        |
| <b>8. Conclusiones .....</b>                                                    | <b>82</b> |
| Bibliografía .....                                                              | 83        |
| <b>9. Anexo A.....</b>                                                          | <b>85</b> |

## Índice de Tablas

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 - Propiedades del Cobre (Codata).....                                                       | 11 |
| Tabla 2 - Usos del cobre - Highlights (Group, 2018).....                                            | 12 |
| Tabla 3 - Top 20 de refinerías a nivel mundial (Capacidad en miles de toneladas) (ICSG, 2018) ..... | 19 |
| Tabla 4 - Parámetros de diseño Refinería Chuquicamata.....                                          | 26 |
| Tabla 5 - HH mal distribuidas .....                                                                 | 65 |
| Tabla 6 - Dotación de personal refinería CHQ de acuerdo turno.....                                  | 69 |
| Tabla 7 - Costo unitario operadores.....                                                            | 69 |
| Tabla 8 - Sensores iMAT escalamiento al total de la refinería .....                                 | 70 |
| Tabla 9 - inversión inicial.....                                                                    | 70 |
| Tabla 10 - Costos Mantenimiento anual de la solución. ....                                          | 70 |
| Tabla 11 - Ahorro por operadores.....                                                               | 73 |
| Tabla 12 - Ahorro por eficiencia eléctrica .....                                                    | 74 |
| Tabla 13 - Beneficios en recuperación de cobre .....                                                | 75 |
| Tabla 14 - Beneficios Totales USD .....                                                             | 75 |
| Tabla 15 - VAN Solución Térmica escenario ideal. ....                                               | 77 |
| Tabla 16 - VAN Solución Térmica sin recuperación de cobre. ....                                     | 78 |
| Tabla 17 - VAN Sistema Térmico escenario sin recuperación de eficiencia energética.....             | 79 |
| Tabla 18 - VAN Sistema Térmico escenario sin reducción de HH .....                                  | 80 |

## Índice de Figuras

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Proceso de electro refinación .....                                      | 25 |
| Figura 2 - Nave electrolítica Chuquicamata .....                                    | 26 |
| Figura 3 - Esquema general refinería Chuquicamata (CODELCO, 2015) .....             | 30 |
| Figura 4 - Secuencia de electrocristalización .....                                 | 32 |
| Figura 5 - Tipos de inhomogeneidades .....                                          | 33 |
| Figura 6 - Energía libre de formación de un clúster como función del tamaño N ..... | 34 |
| Figura 7 - Zonas con su respectivo número de coordinación. ....                     | 35 |
| Figura 8 - Relación entre sobre potencial y crecimiento .....                       | 37 |
| Figura 9 - Formas estructurales básicas de cobre depositado .....                   | 37 |
| Figura 10 - Generación de Corto Circuito.....                                       | 40 |
| Figura 11 - Ánodos con orejas chuecas. ....                                         | 45 |
| Figura 12 - Ánodos con orejas chuecas en celda. ....                                | 46 |
| Figura 13 - Orejas frezadas y no frezadas. ....                                     | 47 |
| Figura 14 - Oreja frezada y no frezada en celda.....                                | 47 |
| Figura 15 - Nodulación en zona inferior del cátodo.....                             | 48 |
| Figura 16 - Protuberancias en ambas caras del ánodo. ....                           | 49 |
| Figura 17 - Espesor ánodos Chuquicamata .....                                       | 50 |
| Figura 18 - Espesor ánodos Teniente .....                                           | 50 |
| Figura 19 - Espesor ánodo Alto Norte .....                                          | 51 |
| Figura 20 - Cámara térmica .....                                                    | 52 |
| Figura 21 - Cuadrilla de inspección .....                                           | 53 |
| Figura 22 - Cátodo rechazado por nodulación .....                                   | 54 |
| Figura 23 - Cátodos empaquetados para comercialización. ....                        | 54 |
| Figura 24 - Tecnología MAT.....                                                     | 56 |
| Figura 25 - Resultado final esperado de la tecnología MAT.....                      | 56 |
| Figura 26 – Prototipo 1 Clip MAT .....                                              | 58 |
| Figura 27 - Prototipo 2 Clip MAT.....                                               | 58 |
| Figura 28 - Clip MAT afectado por la temperatura. ....                              | 59 |
| Figura 29 - Telas MAT luego del primer ciclo catódico. ....                         | 59 |
| Figura 30 - Descripción del sistema iMAT .....                                      | 60 |
| Figura 31 - iMAT Vision .....                                                       | 61 |
| Figura 32 - Mockup referencial .....                                                | 62 |
| Figura 33 - iMAT Capboard.....                                                      | 63 |
| Figura 34 - iMAT Vision prototipo para piloto .....                                 | 63 |
| Figura 35 - Plataforma iMAT para piloto.....                                        | 64 |
| Figura 36 - Detección de corto circuitos a 8 metros de altura .....                 | 64 |
| Figura 37 - Detección de corto circuitos con iMAT .....                             | 65 |
| Figura 38 - Distribución de costos Refinería CHQ .....                              | 67 |
| Figura 39 - Distribución de gastos en electrorrefinación .....                      | 68 |
| Figura 40 - Distribucion de gastos en Mantenimiento Refinería .....                 | 68 |
| Figura 41 - Distribución de costos por elemento .....                               | 69 |
| Figura 42 - Distribución de costos (Elaboración propia) .....                       | 71 |
| Figura 43 - Distribución de costos de Mantenimiento por año. ....                   | 71 |

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Figura 44 - Análisis de sensibilidad del VAN..... | 81 |
| Figura 45 - Esquema Refinería DCH.....            | 85 |

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Cobre

Uno de los principales Commodities que se tranzan actualmente en el mercado mundial es el cobre. ¿Qué es el cobre? El cobre es un elemento metálico maleable y dúctil que es un excelente conductor de calor y electricidad además de ser resistente a la corrosión y antimicrobiano. El cobre se produce naturalmente en la corteza terrestre en una variedad de formas. Se puede encontrar en depósitos de sulfuro (como calcopirita, bornita, calcocita, covellita), en depósitos de carbonato (como azurita y malaquita), en depósitos de silicato (como chrysocolla y dioplasa) y como Cobre puro "nativo".

El cobre también se produce de forma natural en los seres humanos, animales y plantas. Las formas de vida han evolucionado en un ambiente que contiene cobre. Como un Nutriente y elemento esencial, el cobre es vital para mantener la salud. Las funciones de soporte vital dependen del cobre.

Cobre y aleaciones basadas en cobre se utilizan en una variedad de aplicaciones que son necesarios para un nivel de vida razonable. La producción y el uso es esencial para el desarrollo de la sociedad.

El cobre es uno de los metales más reciclados. Es nuestra capacidad para reciclar los metales una y otra vez lo que los convierte en un material de elección. El cobre reciclado (también conocido como cobre secundario) no se puede distinguir del cobre primario (cobre originado de minerales), una vez reprocesado. Reciclar el cobre extiende la eficiencia del uso del metal, genera ahorros de energía y contribuye a garantizar que tengamos una fuente de metal sostenible para las generaciones futuras.

La demanda de cobre continuará siendo satisfecha mediante el descubrimiento de nuevos depósitos, mejoras tecnológicas, diseño eficiente y aprovechando la naturaleza renovable del cobre mediante la reutilización y el reciclaje. Además, la competencia entre los materiales y los principios de oferta y demanda contribuyen a garantizar que los materiales se utilicen de manera eficiente y efectiva.

El cobre es un importante contribuyente a las economías nacionales de los países maduros, recientemente desarrollados y en desarrollo. La minería, el procesamiento, el reciclaje y la transformación del metal en una multitud de productos crean empleos y generan riqueza. Estas actividades contribuyen a construir y mantener la infraestructura de un país y crean oportunidades comerciales y de inversión.

El cobre seguirá contribuyendo al desarrollo de la sociedad en el futuro.

Sus propiedades físicas y químicas generales se detallan en la tabla 1.

*Tabla 1 - Propiedades del Cobre (Codata)*

| Información general                   |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Nombre, símbolo, número               | Cobre, Cu, 29                        |
| Serie química                         | Metales de transición                |
| Grupo, período, bloque                | 11, 4, d                             |
| Masa atómica                          | 63,536 u                             |
| Configuración electrónica             | [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> |
| Dureza Mohs                           | 3                                    |
| Electrones por nivel                  | 2, 8, 18, 1                          |
| Propiedades atómicas                  |                                      |
| Radio medio                           | 135 pm                               |
| Electronegatividad                    | 1,9 (escala de Pauling)              |
| Radio atómico (calc)                  | 145 pm (radio de Bohr)               |
| Radio covalente                       | 138 pm                               |
| Radio de van der Waals                | 140 pm                               |
| Estado(s) de oxidación                | +1, +2, +3, +4                       |
| Óxido                                 | Levemente básico                     |
| 1. <sup>a</sup> Energía de ionización | 745,5 kJ/mol                         |
| 2. <sup>a</sup> Energía de ionización | 1957,9 kJ/mol                        |
| 3. <sup>a</sup> Energía de ionización | 3555 kJ/mol                          |
| 4. <sup>a</sup> Energía de ionización | 5536 kJ/mol                          |
| Propiedades físicas                   |                                      |
| Estado ordinario                      | Sólido (diamagnético)                |
| Densidad                              | 8960 kg/m <sup>3</sup>               |
| Punto de fusión                       | 1357,77 K (1084,62 °C)               |
| Punto de ebullición                   | 2835 K (2562 °C)                     |
| Entalpía de vaporización              | 300 kJ/mol                           |
| Entalpía de fusión                    | 13,1 kJ/mol                          |
| Varios                                |                                      |
| Estructura cristalina                 | Cúbica centrada en las caras         |
| N° CAS                                | 7440-50-8                            |
| N° EINECS                             | 231-159-6                            |
| Calor específico                      | 385 J/(K·kg)                         |
| Conductividad eléctrica               | 58,108 × 10 S/m                      |
| Conductividad térmica                 | 400 W/(K·m)                          |
| Velocidad del sonido                  | 3570 m/s a 293,15 K(20 °C)           |

La demanda mundial de cobre crece año tras año; el uso mundial refinado se ha más que triplicado en los últimos 50 años gracias a la expansión de sectores tales como productos eléctricos y electrónicos, construcción de edificios, maquinaria y equipo industrial, equipo de transporte y

productos de consumo y productos generales. Algunos de los aspectos más destacados de la producción y el uso de cobre de 2015 se enumeran en la tabla 2.

*Tabla 2 - Usos del cobre - Highlights (Group, 2018)*

### Highlights de Usos del Cobre

Uso de cobre refinado en 2017 alcanzó los 23,8 millones de toneladas. China fue también el mayor consumidor de cobre refinado en 2017 con uso aparente de alrededor de 11,8 millones de toneladas.



Según la Asociación Internacional del Cobre (ICA), equipos electrónicos fue el mayor uso final de cobre sector en 2017, seguido por la construcción de edificios e infraestructura



Las nuevas aplicaciones de cobre que se están desarrollando incluyen superficies táctiles antimicrobianas de cobre, tuberías de latón sin plomo, cables de cobre de alta tecnología, intercambiadores de calor y también nuevos productos de consumo.



## 1.2 Recursos

Por lo general, la disponibilidad futura de minerales se basa en el concepto de reservas y recursos. Las reservas son depósitos que se han descubierto, evaluado y evaluado como económicamente rentables para la mina. Los recursos son mucho más grandes e incluyen reservas, depósitos descubiertos que son potencialmente rentables y depósitos no descubiertos que se pronostican en base a estudios geológicos preliminares.

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), las reservas de cobre ascienden actualmente a alrededor de 790 millones de toneladas (Mt) y los recursos de cobre identificados y no descubiertos se estiman en alrededor de 2,100 Mt y 3,500 Mt, respectivamente (figura 1). Este último no tiene en cuenta las vastas cantidades de cobre que se encuentran en los nódulos de aguas profundas y en los sulfuros masivos submarinos y terrestres. Las oportunidades de exploración actuales y futuras conducirán a aumentos tanto en reservas como en recursos conocidos.

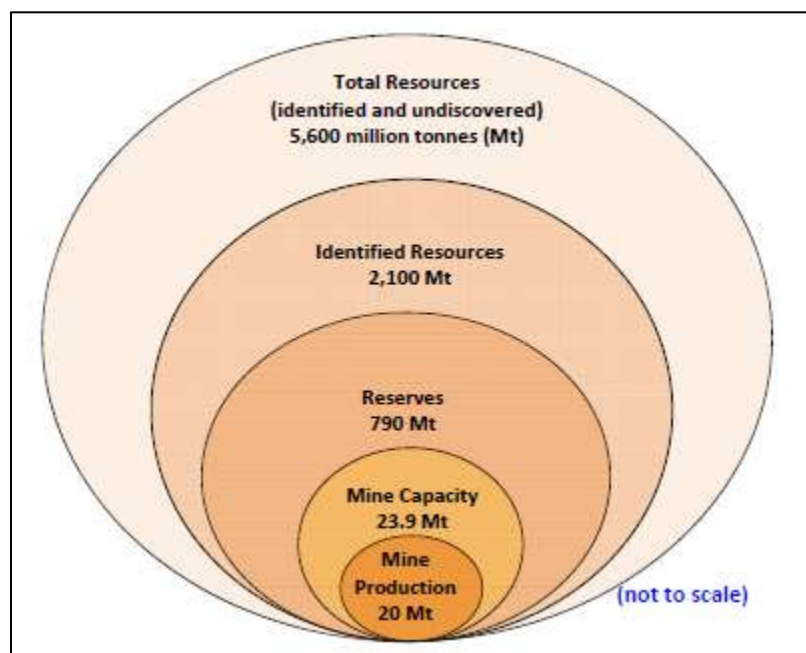


Figura 1 - Reservas y producción mundial de Cobre 2017 (USGS, 2017)

En 2013, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) completó una evaluación internacional cooperativa basada en la geología de los recursos de cobre del mundo. El USGS evaluó el cobre no descubierto en dos tipos de depósitos que representan aproximadamente el 80% del suministro mundial de cobre. Los depósitos de cobre pórfido representan aproximadamente el 60% del cobre mundial. En los depósitos de cobre pórfido, los minerales de cobre se diseminan en intrusiones

ígneas. Los depósitos de cobre de enlace de hierro alojados en sedimentos, en los que el cobre se concentra en capas en rocas sedimentarias, representan aproximadamente el 20% del cobre identificado en el mundo. Los promedios totales no descubiertos para pórfidos y depósitos alojados en sedimentos son 3,100 y 400 Mt respectivamente, lo que resulta en un total global de 3,500 Mt de cobre. Con los recursos de cobre identificados actualmente estimados en 2,100 Mt, los recursos totales de cobre (no descubiertos + identificados) se estiman en 5,600 Mt. En la figura 2 se dan a conocer los recursos de cobre disponibles actualmente en el mundo, y en la figura 3 se presentan los recursos de cobre no descubiertos aun en cada continente.

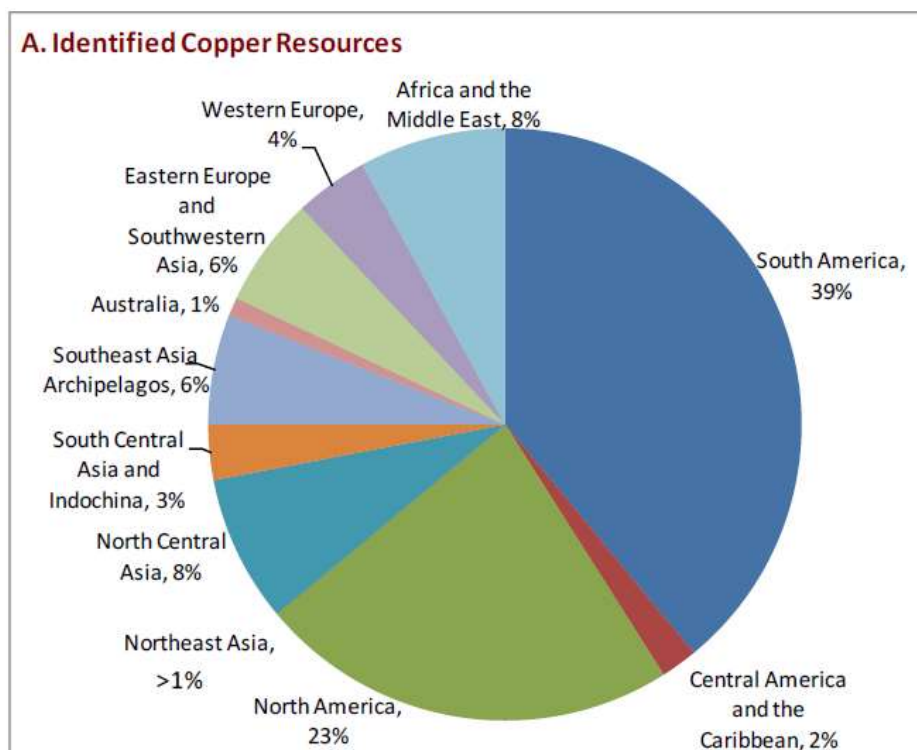


Figura 2 - Recursos de cobre en el mundo (Hammarstrom, 2014)

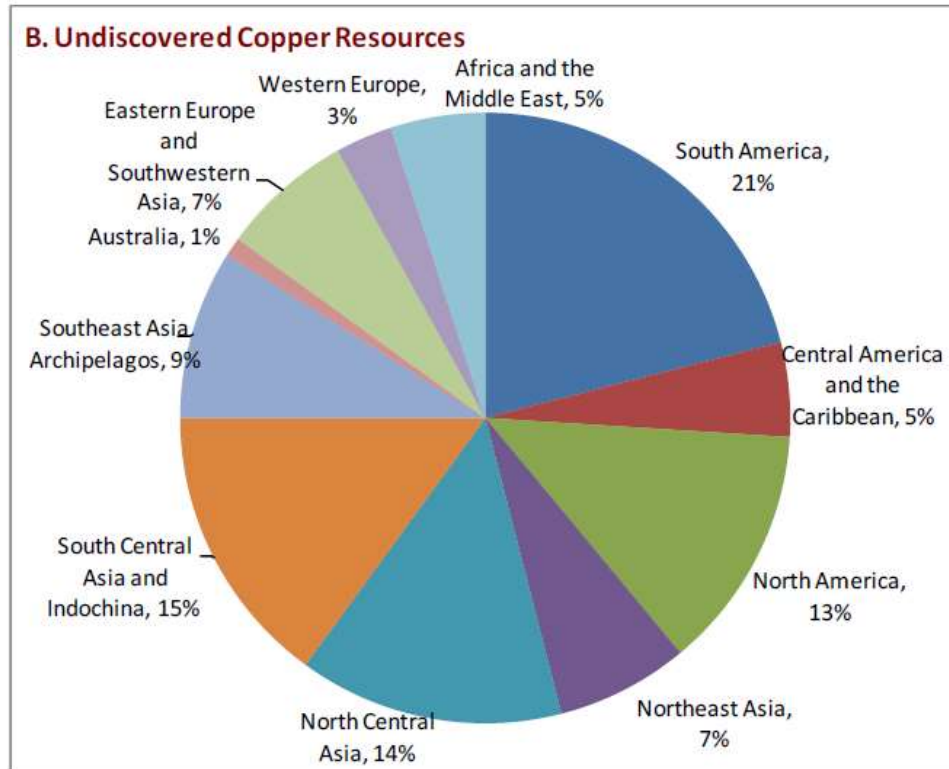


Figura 3 - Recursos de Cobre no descubiertos a nivel mundial (Hammarstrom, 2014)

### 1.3 Producción

Los geólogos buscan signos y / o anomalías que indiquen la presencia de un depósito mineral. Bajo las condiciones geológicas, económicas, ambientales y legales adecuadas, la minería puede proceder. La producción primaria de cobre comienza con la extracción de minerales de cobre. Hay tres formas básicas de extracción de cobre: minería de superficie, subterránea y lixiviación. La minería a cielo abierto es el método de minería predominante en el mundo. Una vez que el mineral ha sido extraído, se tritura y se muele, seguido de una concentración por flotación. Los concentrados de cobre obtenidos típicamente contienen alrededor del 30% de cobre, pero los grados pueden variar de 20% a 40%. En el siguiente proceso de fundición, a veces precedido por un tostado paso, el cobre se transforma en un "mata" que contiene 50-70% de cobre. La mata fundida se procesa en un convertidor que da como resultado el llamado cobre blíster de 98.5-99.5% contenido de cobre. En el siguiente paso, el cobre blíster se refina a fuego en la ruta del proceso tradicional o, cada vez más, se vuelve a fundir en ánodos para electro-refinación. La salida del electro-refinado son cátodos de cobre refinado, que se ensayan sobre 99.99% de cobre. Alternativamente, en la ruta hidrometalúrgica, el cobre se extrae de principalmente minerales de óxido de bajo grado y también algunos minerales de sulfuro, a través de lixiviación (extracción con solvente) y electrodeposición

(proceso SX-EW). La salida es la misma que a través de la ruta de electro-refinación. Se estima que, en 2017, la producción de cobre refinado de SX-EW representó el 16% de la producción total de cobre refinado. Producción de cobre refinado derivado de la producción minera (ya sea de El tratamiento metalúrgico de concentrados o SX-EW) se conoce como "Producción primaria de cobre", como puede obtenerse de una materia prima primaria. fuente. Sin embargo, existe otra fuente importante de materia prima que es chatarra de cobre. La chatarra se deriva de cualquiera de los metales desechados en semis Fabricación o procesos de fabricación de productos terminados ("chatarra nueva") o Productos obsoletos al final de la vida útil ("chatarra vieja"). La producción de cobre refinado atribuible a la alimentación de chatarra reciclada se clasifica como "cobre de producción secundaria". Los productores secundarios utilizan procesos similares a los Empleado para la producción primaria. Se estima en 2017 que la producción secundaria de cobre refinado alcanzó el 17% del total de producción de cobre refinado. En la figura se presenta la producción mundial de cobre en los últimos años

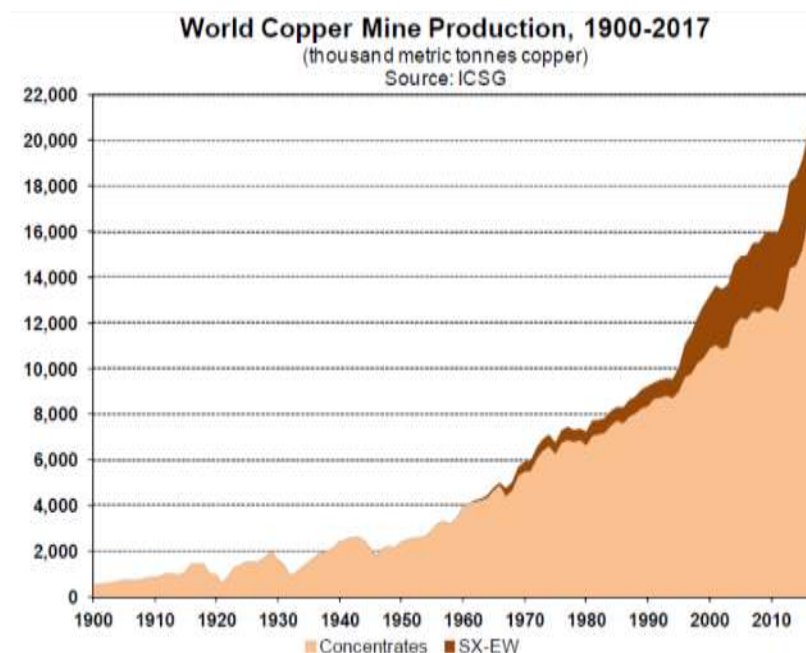


Figura 4 - Producción Mundial de Cobre 1900-2017 (Group, 2018)

Desde 1900, cuando la producción mundial era inferior a 500 mil toneladas de cobre, la producción mundial de minas de cobre creció un 3,2% anual a 20 millones de toneladas en 2017. La producción de SX-EW, prácticamente inexistente antes de la década de 1960, se situó en 3,7 millones de toneladas en 2017.

En cuanto a producción, Chile representó más de un cuarto de la producción minera mundial de cobre en 2017, con una producción minera de 5,5 millones de toneladas de cobre. Perú, que ha experimentado un fuerte aumento en la producción desde 2015, representó el 12% de la producción minera mundial (Figura 5).

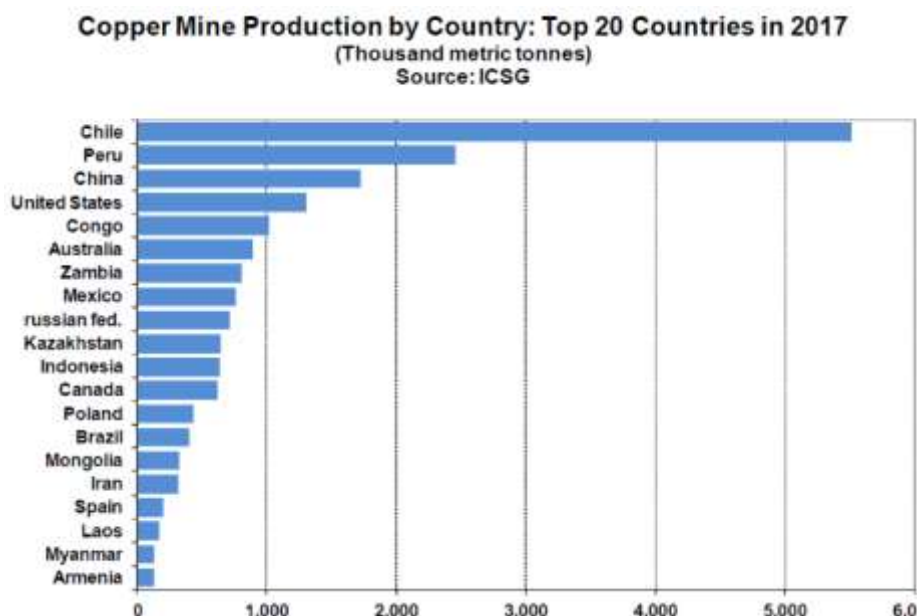


Figura 5 - Producción de Cobre por países en 2017 (Group, 2018)

Para este caso en particular, el interés está enfocado en el cobre refinado mediante electro refinación. En este sentido en la figura 6 se presenta la Producción mundial de cobre refinado desde 1960 a 2017 y como este producto ha ido en aumento.

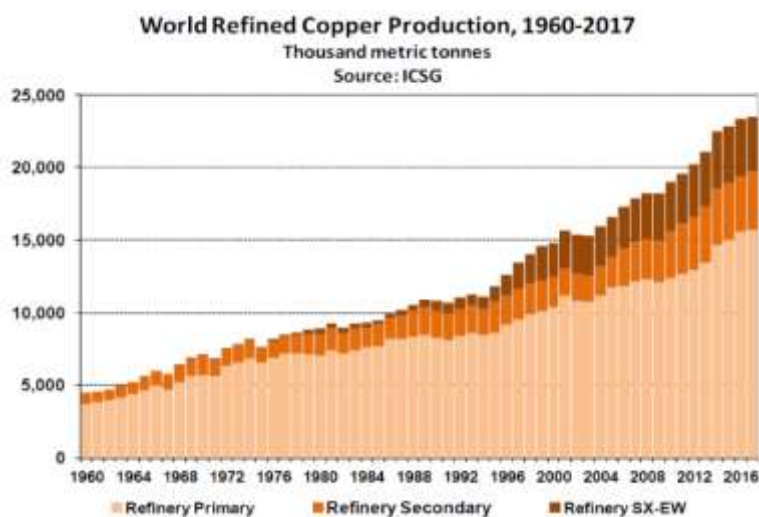


Figura 6 - Producción mundial de Cobre refinado (Group, 2018)

Dentro de la categoría de cobre refinado se pueden distinguir 3 diferentes procedencias, refinado electrolítico, electrowining o a fuego. El detalle de la capacidad y su proyección para los próximos años de cada una de las procedencias anteriormente mencionadas se presenta en la figura 7.

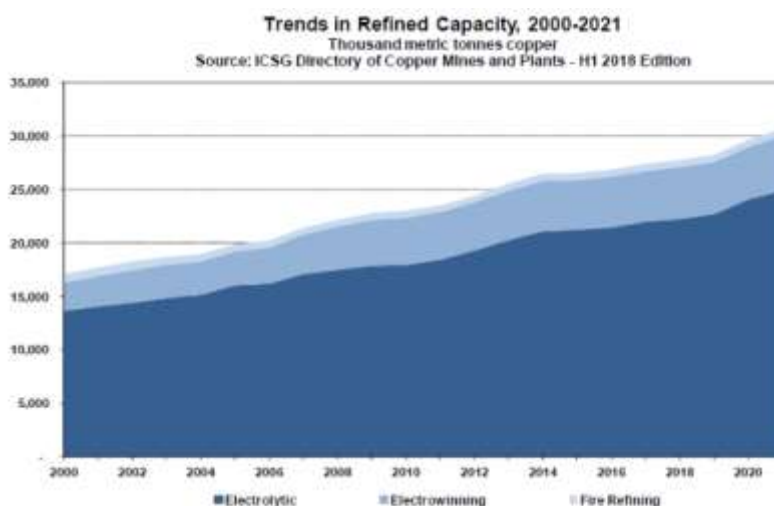


Figura 7 - Proyección de capacidad de Refinerías en el mundo (Group, 2018)

Dentro de esta categoría, Chile destaca como el segundo país con mayor producción de cobre refinado en el mundo. En la figura 8 se dan a conocer los 20 primeros países en cuanto a producción de cobre refinado a nivel mundial para el año 2017.

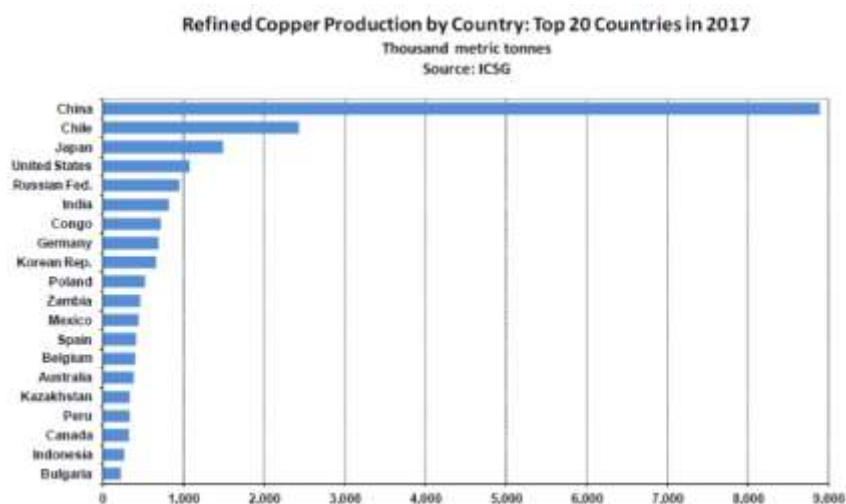


Figura 8 - Top mundial de países productores de cobre refinado (Group, 2018)

Dentro de las principales refinerías a nivel mundial, destaca Chuquicamata, con una producción de 450.000 toneladas anuales de cobre refinado. En la tabla se dan a conocer las principales refinerías a nivel mundial.

*Tabla 3 - Top 20 de refinerías a nivel mundial (Capacidad en miles de toneladas) (ICSG, 2018)*

| Rank | Refinery                     | Country         | Owner(s)                                         | Process      | Capacity |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------|--------------|----------|
| 1    | Guixi                        | China           | Jiangxi Copper Corporation                       | Electrolytic | 1000     |
| 2    | Jinchuan                     | China           | Jinchuan Non Ferrous Co.                         | Electrolytic | 650      |
| 3    | Daye/ Hubei (refinery)       | China           | Daye Non-Ferrous Metals Co.                      | Electrolytic | 600      |
| 4    | Yunnan Copper                | China           | Yunnan Copper Industry Group (64.8%)             | Electrolytic | 500      |
| 4    | Birla                        | India           | Birla Group (Hidalko)                            | Electrolytic | 500      |
| 6    | Pyshma Refinery              | Russia          | UMMC (Urals Mining & Metallurgical Co.)          | Electrolytic | 460      |
| 7    | Toyo/Nihama (Besshi)         | Japan           | Sumitomo Metal Mining Co. Ltd.                   | Electrolytic | 450      |
| 7    | Amanillo                     | United States   | Grupo Mexico                                     | Electrolytic | 450      |
| 7    | Chuquicamata Refinery        | Chile           | Codelco                                          | Electrolytic | 450      |
| 10   | Onsan Refinery I             | Korean Republic | LS-Nikko Co. (LS, Nippon Mining)                 | Electrolytic | 440      |
| 11   | Hamburg (refinery)           | Germany         | Aurubis                                          | Electrolytic | 416      |
| 12   | El Paso (refinery)           | United States   | Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc.              | Electrolytic | 415      |
| 13   | Las Ventanas                 | Chile           | Codelco                                          | Electrolytic | 410      |
| 14   | Jinguan (refinery)           | China           | Tongling Non-Ferrous Metals Group                | Electrolytic | 400      |
| 14   | Jinlong (Tongdu) (refinery)  | China           | Tongling Non-Ferrous Metal Corp. 52 %, Sharpline | Electrolytic | 400      |
| 14   | Xiangguang Copper (refinery) | China           | Yanggu Xiangguang Copper Co                      | Electrolytic | 400      |
| 14   | Shandong Fangyuan            | China           | Dongying, Shandong                               | Electrolytic | 400      |
| 14   | Jinchuan (Fangchenggang      | China           | Jinchuan Non-Ferrous Metal Co.                   | Electrolytic | 400      |
| 14   | Sterite Refinery             | India           | Vedanta                                          | Electrolytic | 400      |
| 20   | CCR Refinery (Montreal)      | Canada          | Glencore plc                                     | Electrolytic | 370      |

## 1.4 Mercado

La minería del cobre es una de las principales actividades productivas del país desde inicios de la República. En Chile se realiza minería del tipo metálica y no metálica; en la metálica destacan el cobre, el oro, la plata, el zinc y el plomo. Existen yacimientos polimetálicos, que permiten producir cobre y otros minerales como subproducto. El subproducto más importante en Chile es el molibdeno, pero también se encuentran yacimientos de cobre con producción de oro, plata y otros.

Entre 2000 a 2017 tanto la producción mundial de cobre como la producción nacional van en aumento, o al menos esa es la tendencia general. En cuanto a la producción nacional, desde el 2015 a 2017 la producción nacional de cobre mina ha caído en unas 500.000 toneladas, lo anterior básicamente por problemas sindicales y además de envejecimiento de los yacimientos.



Figura 9 - Producción Mundial/Nacional de Cobre Mina (Cochilco, 2018)

El valor del cobre exportado promedió US\$1.400 millones entre 1960 y 1990 (ver Figura 3), y en el periodo de mayor expansión 1990-2003 se elevó a US\$5.500 millones. Pero durante el periodo 2004-2014, el llamado “súper ciclo”, el valor exportado en promedio cada año alcanzó los US\$34.000 millones. En 2015 se exportó cobre por valor de US\$30.000 millones, un 30% menos del

máximo de US\$44.000 millones (2011). Entre 1960 y 1990 el precio se duplicó, mientras que entre 1990 y 2011 se cuadruplicó (todos en dólares corrientes).

Durante los últimos 17 años en el país, la exportación de cobre a granel (Concentrado) va en aumento, mientras que el cobre refinado (Cátodos) va en declive, esto básicamente por el tema de los costos operacionales del proceso y además las nuevas políticas ambientales que existen en el país.

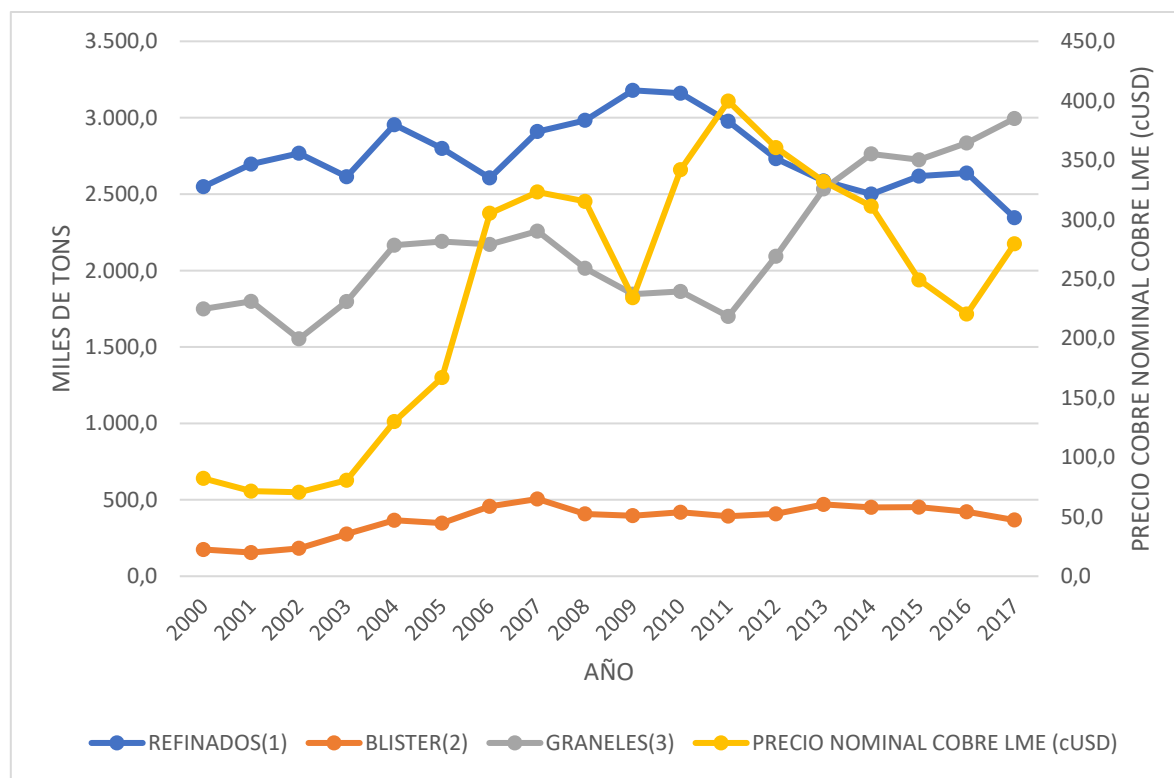


Figura 10 - Exportaciones de Cobre (Cochilco, 2018)

Siendo el cobre un Commodities su precio se tranza en la bolsa, en este caso la Bolsa de Metales de Londres (BML). Por tanto, el precio del cobre sufre una gran variación día a día, lo cual impacta directamente en el costo de la producción del proceso en sí.

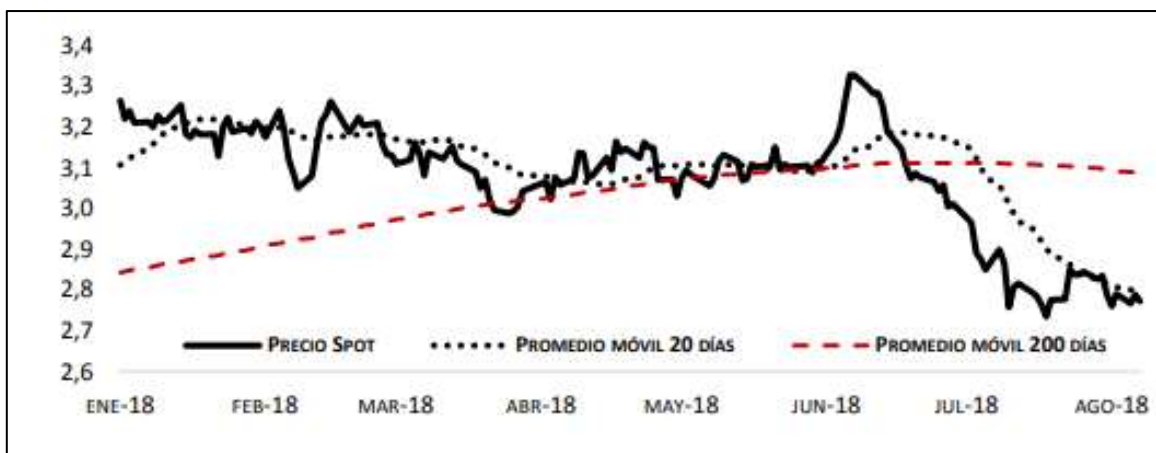


Figura 11 - Precio spot Cobre LME 2018 (Cochilco, 2018)

A la fecha el principal problema que afecta a la gran minera son los costos operacionales, por tanto, es imperioso aplicar tecnologías, innovar o cambiar ciertas prácticas operacionales para que el margen de ganancias sea mayor.

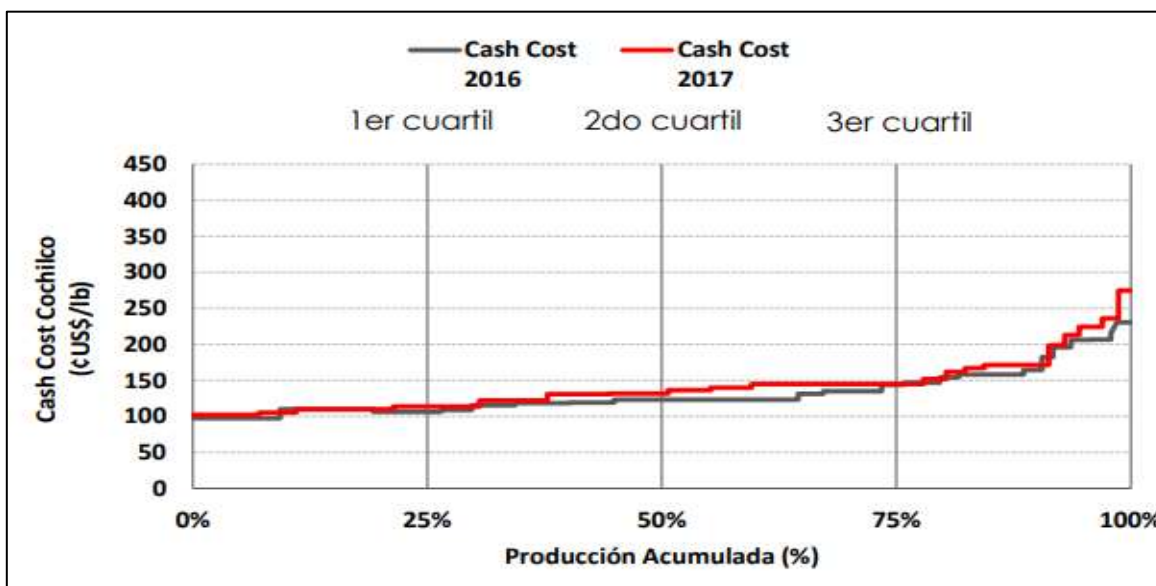


Figura 12 - Cash cost 2016/2017 (Cochilco, 2018)

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal es ~~realizar una la~~ evaluación técnico-económica de un sistema ~~automático de térmico + software para~~ detección ~~automática~~ de ~~corto circuitos CC~~ en la refinería ~~electrolítica de~~ Chuquicamata.

Los objetivos secundarios de este estudio son los siguientes:

- Establecer una análisis comparativo de tecnología termográfica y las existentes para la detección de corto circuitos, definiendo las ventajas tecnológicas de la primera.
- Analizar el efecto en la detección de corto circuitos al integrar la tecnología termográfica con un software de reconocimiento de patrones térmicos.
- Proponer una alternativa mejorada para la inspección y detección de corto circuitos basado en un sistema automatizado.
- Realizar evaluación técnico-económica del sistema térmico frente a otras alternativas incluyendo ~~como el~~ aumento de dotación.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1 Antecedentes de la empresa

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es una empresa autónoma, propiedad del Estado de Chile y la mayor productora de cobre del mundo. Concentra, además, el mayor nivel de reservas y recursos mundiales de cobre y es el motor del desarrollo del país. Su negocio principal es explorar, explotar y comercializar los recursos mineros del cobre y sus subproductos, y lo realiza a través de siete divisiones: Andina, Chuquicamata, El Teniente, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Radomiro Tomic y Salvador, a las que se suma la Fundición y Refinería Ventanas. Su estrategia corporativa es coordinada y encabezada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile, por el directorio formado por nueve integrantes y la presidencia ejecutiva.

##### 3.1.1 División Chuquicamata.

La división Chuquicamata, perteneciente a Codelco, se ubica en la comuna de Calama, a 650 kilómetros al norte de Santiago de Chile y a 2870 metros sobre el nivel del mar.

Este yacimiento posee el rajo más grande del mundo, cuya producción corresponde a cátodos electrorefinados y electroobtenidos con una pureza de 99,99 % de cobre. También produce fino de molibdeno. Además, se obtienen otros subproductos, como barros anódicos y ácido sulfúrico.

#### 3.2 Proceso de electro refinación

La refinación electrolítica o electro refinación es el último proceso metalúrgico al que es sometido el cobre sulfurado en nuestro país antes de ser embarcado al extranjero en formato de cátodos de cobre. En Chile se produce más de un millón de toneladas anuales de cátodos refinados electrolíticamente. El cobre crudo (blister o cobre negro) es refinado a fuego y colado a la forma de ánodos en ruedas de moldeo rotatorias que contienen entre 20 y 30 moldes. Los ánodos son de forma rectangular con dos orejas en la parte superior para colgarlos en el estanque, miden 1 m de largo por 0.80 m de ancho y un espesor de 5 cm y pesan alrededor de 420 kg cada uno para el caso de la refinería de Chuquicamata; el peso varía de acuerdo con la refinería. Los ánodos contienen aproximadamente 99,5% Cu y 0,5% total de impurezas. Los ánodos de cobre prácticamente impuros deben ser sometidos a un último proceso para eliminar las impurezas remanentes. Para esto, se sumergen en un baño de solución ácida, mezcla de ácido sulfúrico y sulfato de cobre, a alta temperatura (60- 65°C) donde se facilita la migración de iones de cobre hacia el cátodo. El resultado

es cobre 99,99% de pureza. Así, el objetivo fundamental de la refinación electrolítica es la obtención de un cátodo de cobre de elevada pureza, prácticamente libre de impurezas y que es adecuado para ser transformado en función de futuras aplicaciones.

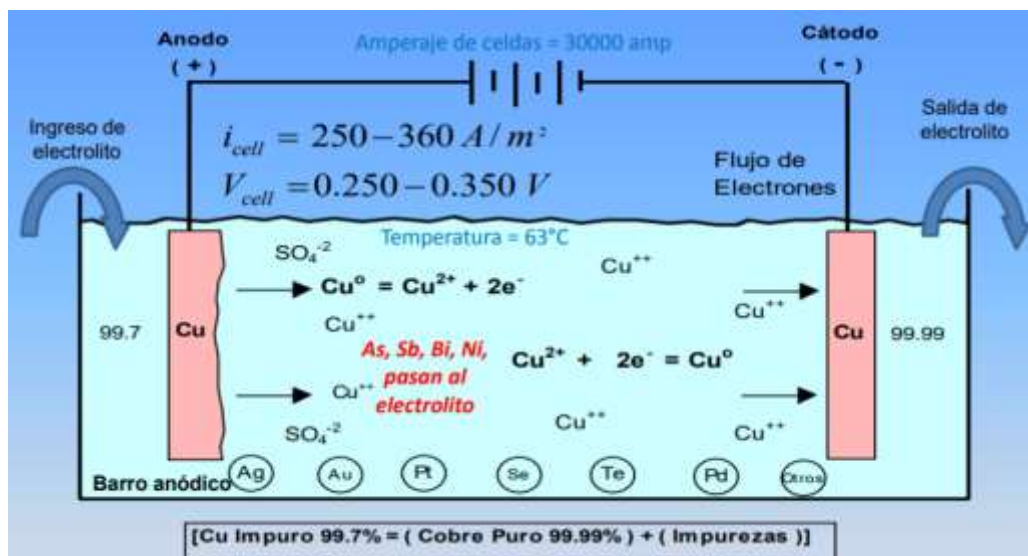
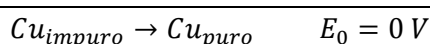
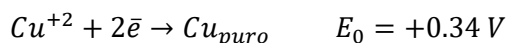
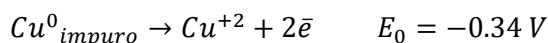


Figura 1 - Proceso de electro refinación

Las principales reacciones químicas presentes en el proceso son las siguientes.



Es necesario considerar que además del voltaje de reacción, se tiene un sobre potencial catódico (~50mV) y un sobre potencial anódico (~100mV), además de las pérdidas óhmicas en el electrolito y en las resistencias de contacto entre los electrodos y las barras intercelda. Finalmente, el potencial aplicado a una celda de electro-refinación es de 300mV aproximadamente.

### 3.3 Descripción general de la División Chuquicamata

La Planta de Refinación Electrolítica es la sección funcional final del proceso de producción de cátodos de cobre, donde por medio de procesos (electrorefinación) y operaciones (manejo de electrodos, manejo de materiales) se obtienen los cátodos de cobre de 99,999% de pureza. Al disolverse el ánodo aparecen con ellos impurezas las cuales siguen dos vías; las solubles, como el arsénico, bismuto y el antimonio, las que se transfieren al electrolito comercial; y las insolubles que forman el barro anódico, el que se deposita en el fondo de las celdas. Las impurezas contenidas en

el barro anódico son el oro, platino, plata, selenio y telurio entre otras, además, de una cantidad importante de cobre.

*Tabla 4 - Parámetros de diseño Refinería Chuquicamata*

|                                  |           |     |
|----------------------------------|-----------|-----|
| Ánodos recibidos totales         | 1.024.000 | tpa |
| Ánodos alimentados refinería     | 1.012.740 | tpa |
| Cátodos producidos               | 855.000   | tpa |
| Barro anódico descobrizado       | 1.126     | tpa |
| Cobre descarte a Planta de SX/EW | 6.850     | tpa |
| Restos de ánodos a fundición     | 147.860   | tpa |

La nave de electro refinación de Chuquicamata (Figura 14) es una de las más grandes del mundo con una capacidad de producción instalada de 855.000 Ton métricas de cátodos. Esta Refinería se divide en tres circuitos eléctricos (1, 2 y 3) y cinco circuitos hidráulicos operativos (11, 12, 13, 14 y 19). Para el caso de los circuitos 12,13 y 14, se tienen 10 secciones, subdivididas en 2 hemi secciones de 20 celdas cada una. El circuito 11 posee 6 secciones subdivididas de igual manera. Por último, el circuito 19 posee 3 secciones de este tipo y 3 secciones, subdivididas en 2 hemi secciones de 18 celdas cada una. La cantidad total de celdas disponibles para operar actualmente son 1668, requiriendo 93408 ánodos para poder cargarlas por completo.



*Figura 2 - Nave electrolítica Chuquicamata*

En el Anexo A se puede observar un esquema de su disposición de circuitos y secciones. Para referirse a los distintos sectores de la nave, primero se indica el número de circuito hidráulico, luego el número de sección y por último a que hemi sección corresponde, indicando si corresponde al lado

A o B, en los cuales siempre uno de ellos tendrá sus ánodos expuestos a su primer ciclo catódico y el otro lado, a su segundo ciclo catódico.

La Refinería Chuquicamata opera con la tecnología de cátodos permanentes, los cuales son láminas de acero inoxidable del tipo 316 L, llamados blanks, en las que se forma el depósito de cobre.

La planta está diseñada para una capacidad de producción de 855.000 toneladas métricas de cobre electrefinado por año, operando con una densidad de corriente nominal de 320 [A/m<sup>2</sup>] y una eficiencia de corriente de 95% con una utilización de celdas del 95%. La planta debe operar 362 días al año.

Los ciclos de operación se definen como anódicos y catódicos, siendo éste último la mitad del primero y abarcan en torno a 18 y 9 días, respectivamente. Las celdas operan con 56 ánodos y 55 cátodos, con un espaciamiento entre electrodos de 51 mm medidos de centro a centro. Estas celdas son de concreto reforzado con una capacidad de electrolito de 9,67 [m<sup>3</sup>] al encontrarse sin electrodos y de 6,86 [m<sup>3</sup>] cuando está cargada con ánodos y cátodos. (CODELCO, 2015)

El electrolito se encuentra a una temperatura aproximada de 64 [°C], cuyo flujo de alimentación a cada celda está en torno a 20 [l/min]. Éste contiene aproximadamente 45 [g/l] de cobre y 180 [g/l] de ácido sulfúrico, además de aditivos como cola, tiourea y avitone en dosis de aplicación de 35-40, 50-66 y 20-44 [g/ton de cobre depositado], respectivamente. Además, se agrega cloruro como ácido clorhídrico en dosis de 40 a 80 [mg/l]. Estos aditivos tienen como objetivo regular la calidad física del depósito de cobre a nivel industrial. (CODELCO, 2015)

La tiourea es uno de los aditivos más conocidos utilizados en la electro refinación o electro obtención de cobre. Este compuesto ha sido empleado como agente refinador del tamaño de grano, principalmente, debido a un proceso de adsorción en los sitios activos de nucleación que se encuentran en toda el área del cátodo durante la deposición (lukomska & Slominski, 2001). La calidad y rugosidad de un depósito de metal depende de la distribución de las líneas de corriente y de la presencia de inhibidores que incrementan el poder nivelador del electrolito, reforzando la generación de superficies lisas y tamaño de grano pequeño. La adición de tiourea es un componente efectivo en el control de procesos de enchapado por ayudar al brillo del depósito y el poder nivelador del electrolito, esto quiere decir, que las fuerzas químicas, lo que ayuda a una mejor disociación de los iones presentes en la disolución (Reents & Plieth, 1998). La tiourea se adsorbe uniformemente en toda la superficie del cátodo, es fuertemente selectiva para cobre y tiene un

efecto inhibitorio para la reacción de descarga de hidrógeno. La tiourea es una molécula orgánica de color blanco, de cristales pulidos o sólidos escamosos, soluble en agua, etanol y casi insoluble en éter. En electrolitos de ácido sulfúrico con sulfato de cobre, la Tiourea (TH) reduce  $\text{Cu}^{2+}$  a  $\text{Cu}^{+}$ , formando disulfuro de formamida (DSF) y además, forma en el proceso complejos con  $\text{Cu}^{+}$  del tipo  $[\text{CuTH}]^{+}$  o  $[\text{CuDSF}]^{+}$ . Lo importante de la formación del complejo  $[\text{CuTH}]^{+}$  es que esta molécula se degrada lentamente en orden de días y esto le permite permanecer como agente activo una mayor cantidad de tiempo. Al igual que la Tiourea, la formación del complejo y su interacción con la superficie del electrodo de trabajo, afectan los procesos físicos y químicos que ocurren en la interfase electrodo- electrolito.

La cola es una mezcla de productos orgánicos poliméricos constituido en mayor proporción por péptidos de variados pesos moleculares y alto número de proteínas. En mayor cantidad, es obtenido de huesos y tejido animal. Sólo aquellas moléculas de cola de masa molar mayor a 10000 unidades, son útiles en la electrodeposición y que se comportan como cola activa en la solución. Por definición, la cola activa se refiere a aquellas moléculas que tienen la habilidad de formar una capa resistiva en el cátodo. Al igual que la tiourea, interactúa en la interfase facilitando la formación de mono capas con baja rugosidad. Esto permite obtener granos más finos.

El avitone es un corte de petróleo que también actúa como aditivo en la refinación del cobre. Puede ser descrito como un derivado de sulfonatos hidrolizados de un hidrocarburo de parafina descrito por el proceso Henkel (US Patente nº 6965043B1, 1998). Se cree que su fórmula química es aproximadamente  $\text{C}_{14}\text{H}_{29}\text{SO}_3\text{Na}$  aunque no sea la exacta por ser una mezcla de compuestos de hidrocarburos alifáticos. El avitone tiene una indirecta influencia en la calidad del depósito, específicamente mejorando la acción de la cola, y además, su adición reduce la cantidad de cola que debe ser adicionada a la solución electrolítica. Aunque este aditivo mejora la calidad de la solución electrolítica, el avitone no puede ser usado sin la presencia de cola, ya que produce depósito de calidad totalmente nodular y rugosa y, por lo tanto, no puede reemplazar a la cola como aditivo. El avitone ha sido descrito como un aditivo con acción floculante en el proceso de electro refinación (SCHREBLER ARRATIA, AROS MENESES, SCHREBLER GUZMAN, & CARLES JARA, 2012).

En cada ciclo catódico, el nivel de electrolito no es fijo: los primeros 4 días aproximadamente, el nivel se mantiene elevado gracias a un anillo posicionado en el rebose de la celda; posteriormente se saca este anillo y disminuye el nivel alrededor de unos 4 [cm]; por último se vuelve a elevar el nivel 20 horas aproximadamente antes del término del ciclo catódico; esto con el fin de evitar

problemas en el depósito en la zona superior del cátodo, debido a los sulfatos que se generan en la zona superficial del electrolito por la propia evaporación del proceso.

En años anteriores al 2014, por falta de disponibilidad de ánodos y por otras razones, la planta de electro refinación de Chuquicamata no había podido alcanzar la producción anual de diseño, sólo llegando a una producción cercana a 560.000 toneladas métricas de cobre. Las problemáticas a las que se enfrentó la Refinería ese año fueron diversas, pero todas terminaron repercutiendo en un significativo rechazo catódico del tipo físico (poroteo, u otro desperfecto en la confección del cátodo), alcanzando un 20% aproximadamente. Como una manera de bajar los niveles de rechazo catódico y obtener un cátodo de buena calidad, se optó por mantener un nivel de impurezas adecuado en el electrolito, específicamente de antimonio y bismuto, mediante una Planta de Intercambio Iónico, la cual se terminó de construir en septiembre de 2014 y sus pruebas pre operacionales comenzaron en octubre y las operacionales en diciembre de ese año, culminando en junio de 2015, mes en que comenzó su operación continua y etapa de mejoramiento, disminuyendo a un 5% de rechazo físico. (CODELCO, 2015)

Una gran parte de las impurezas de los ánodos forman los barro anódicos, que sedimentan en las celdas. Al final de cada ciclo anódico, se procede a retirar los barro anódicos crudos (BAC) en el fondo de la celda, mediante una operación denominada “desborre de celdas”. Luego éstos son enviados a la Planta de Tratamiento de Barro Anódico (PTBA). En esta planta los barro son espesados y lixiviados para la recuperación de cobre y además se obtiene el barro anódico descobrizado.

Las celdas de electrowin, los equipos de manejo y tratamiento de electrodos y el control de las variables de proceso, son los elementos principales de la Refinería (Figura 3). Parte de estos elementos actúan como un sistema totalmente automatizado incorporados a una Plataforma de Automatización (PDA).

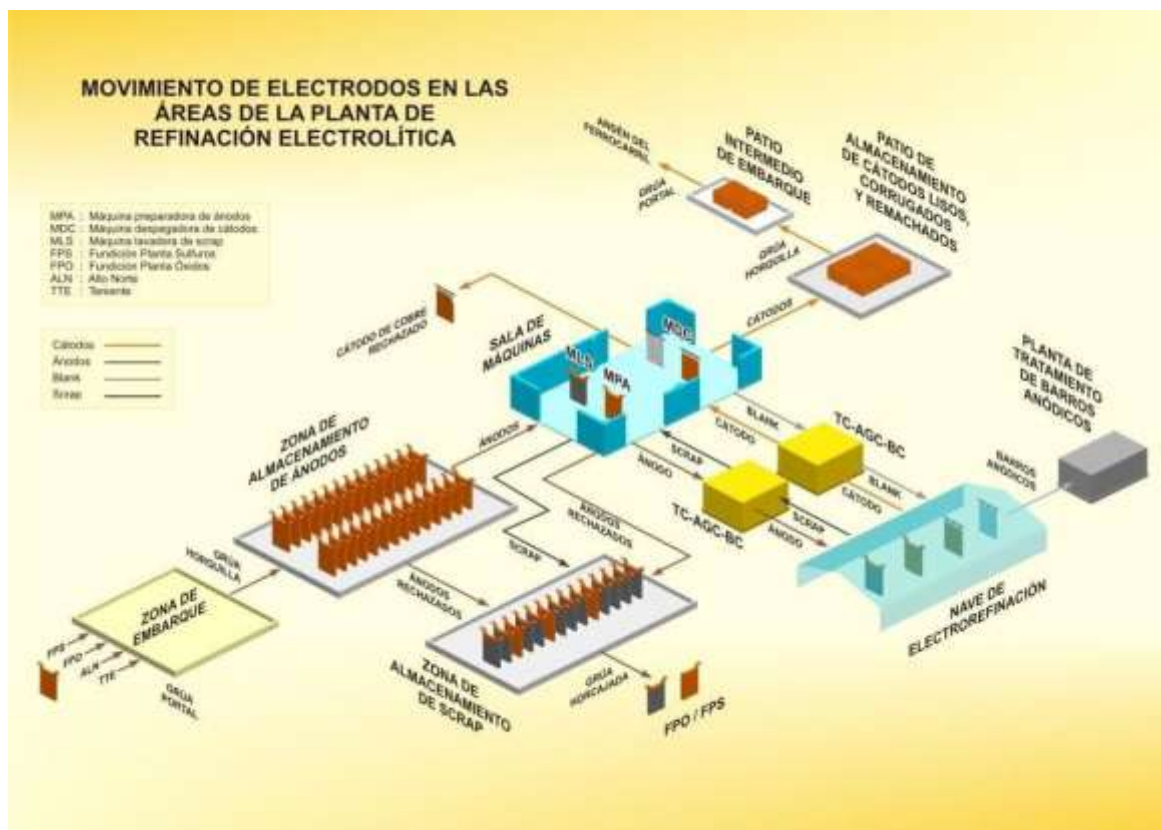


Figura 3 - Esquema general refinería Chuquicamata (CODELCO, 2015)

Una de las grandes preocupaciones en las refinerías de cobre es la calidad de cobre obtenido. Los cátodos deben poseer una alta pureza (99,99% de Cu) y el proceso debe ocurrir con eficiencias de corriente entre 94% y 98%, lo cual es una labor compleja en los tiempos actuales ya que el crecimiento de los cátodos está influenciado por parámetros de proceso para los cuales la refinería se encuentra diseñada, pero también por parámetros operacionales, tales como planes de mantenimiento, reducciones de personal o personal no adecuado para las tareas diarias que se deben realizar para el mantenimiento del proceso (CODELCO, 2015).

## 4. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dan a conocer los principales conceptos y fundamentos que afectan la nodulación y productividad catódica.

### 4.1 Electrocrystalización

La electrocrystalización se define como la técnica de obtener un metal de interés sobre un sustrato en una celda electrolítica.

Varios autores han desarrollado este tema a lo largo del tiempo, de los cuales 3 resaltan: Fisher (1954) realizó un estudio respecto a la influencia de los inhibidores en la nucleación y crecimiento durante la electrodeposición, además de realizar una clasificación de los depósitos compactos del metal según su microestructura y morfología. Winand (1975) logró caracterizar los depósitos metálicos e implementó un diagrama que predice el tipo de depósito a formarse en función de la intensidad de inhibición y las condiciones de operación (corriente). Budevski (2000) estudió los mecanismos de electrocrystalización, desarrolló la técnica de preparación de electrodos que presentan un solo plano cristalográfico, lo cual permite estudiar en un amplio rango los problemas del electro-deposición de los metales sobre un sustrato.

### 4.2 Fundamentos de la Electrocrystalización

Los metales tienden a formar empaquetamientos esférico-compactos, los que refleja la isotropía de las fuerzas interatómicas involucradas. En el caso particular del cobre, la estructura característica es cúbica centrada en las caras (Grágeda, 2007) Los pasos principales de la electrocrystalización se describen a continuación (Despic, 1983).

- Transporte del ion hasta la capa límite.
- Difusión del ion a través de la capa límite, hasta la capa externa de Helmholtz.
- Transferencia de electrones desde el metal hasta el ion.
- Desolvatación parcial y formación de un ad-átomo
- Difusión superficial del ad-átomo.
- Colisión reactiva con un defecto superficial (kink, escalón)
- Nucleación en 1 o 2 dimensiones.

- Nucleación tridimensional

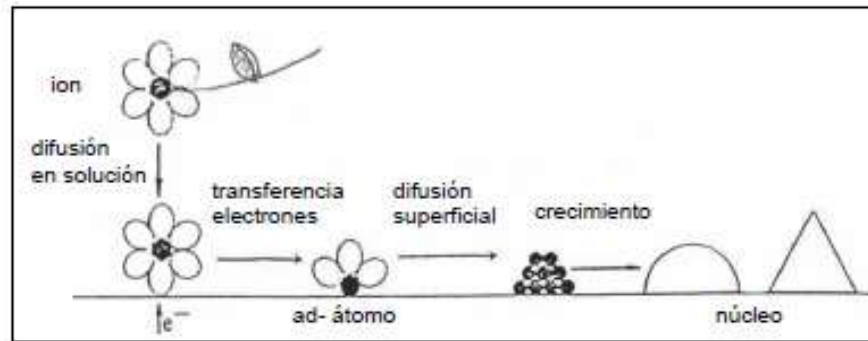


Figura 4 - Secuencia de electrocristalización

La electrodeposición se lleva a cabo como una combinación de todos estos fenómenos, que pueden ocurrir en serie o en paralelo. Sin embargo, se encuentran defectos de diferente dimensionalidad, debido a que las redes cristalinas no tienen una ordenación perfecta, los cuales pueden inducir a la formación de inhomogeneidades superficiales como lo pueden ser (Winand, 1992).

- 0-D: Inhomogeneidades puntuales: vacancias, intersticios, puntos de emergencia de dislocaciones de borde y tornillo, ad-átomos, sitios kink.
- 1-D: Escalones Monoatómicos: generados por dislocaciones, líneas de intersección de borde de grano, defectos de apilamiento, islas epitaxiales.
- 2-D: Dominios Superficiales: intersección de los granos con la superficie, macroescalones, islas.
- 3-D: Dominios Volumétricos: Fuerte distorsión de la red, agrupación de defectos puntuales, precipitaciones de fases.

En la siguiente imagen se pueden apreciar la dimensionalidad de los depósitos.

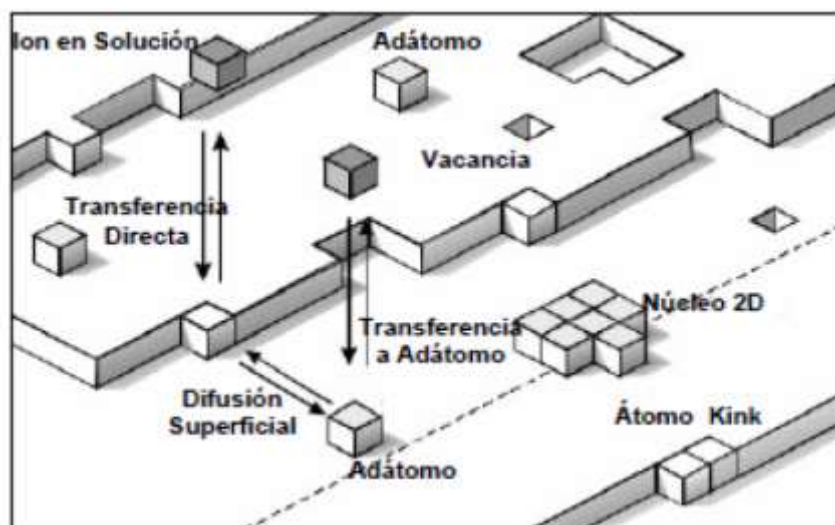


Figura 5 - Tipos de inhomogeneidades

### 4.3 Nucleación

La nucleación es muy importante en el proceso de electrocristalización. Tanto la nucleación como el crecimiento determinan la granulometría además de las propiedades físicas, químicas, eléctricas y magnéticas del depósito. A altas tasas de nucleación durante la deposición, los granos del depósito son más finos.

Cuando la inhibición y la densidad de corriente son bajas, se forman preferentemente estructuras bi-dimensionales, caso contrario cuando son mayores se forman núcleos tri-dimensionales. Esto ocurre debido a los cambios en el sobrepotencial de cristalización, el que determina las tasas de nucleación en el sistema, es decir, el número de núcleos que se puede formar por unidad de área del electrodo y por unidad de tiempo (Segura , 2005).

La teoría de la deposición de un metal está basada generalmente en la ecuación de Butler-Volmer, la cual establece a la densidad de corriente en el sustrato como función de un sobre-potencial  $\eta$  (Budevski).

$$i = i_0 \left[ \exp \left( \frac{\alpha z F \eta}{RT} \right) - \frac{(1 - \alpha) z F \eta}{RT} \right] = i_0 V(\eta)$$

Donde  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $z$  es el número de electrones transferidos por la reacción,  $\alpha$  es el parámetro cinético de la reacción ( $0 < \alpha < 1$ ),  $F$  es la constante de Faraday,  $\eta$  es el

sobre-potencial de la celda,  $R$  es la constante universal de los gases y  $T$  es la temperatura absoluta del electrolito.

Esta ecuación se deriva bajo el supuesto de que el control del proceso es la de transferencia de carga. Una segunda suposición que se hizo es que la superficie es homogénea, de modo que la densidad de corriente se distribuye uniformemente sobre toda la superficie sólida.

La formación de una nueva fase, requerida en la fase inicial de la deposición del metal en un sustrato extraño, es cinéticamente limitada por la energía de formación de Gibbs que depende del clúster de la nueva fase en su tamaño  $N$ , donde  $N$  es el número de átomos formando el clúster. La energía de formación de Gibbs,  $\Delta G(N)$ , de un clúster de  $N$  átomos contiene dos términos (Budevski).

$$\Delta G(N) = -Nze|\eta| + \Phi(N)$$

Donde el primer término está conectado con la transferencia de  $N$  iones desde el electrolito a la superficie del sustrato bajo la acción de un sobre-potencial  $|\eta|$ . Este término siempre es negativo. El segundo término  $\Phi(N)$  representa un exceso de energía libre, teniendo en cuenta las contribuciones de energía derivados de la desviación de la nueva fase (Budevski). La variación de la energía libre en función del número de átomos formando clústers se representa en la siguiente figura.

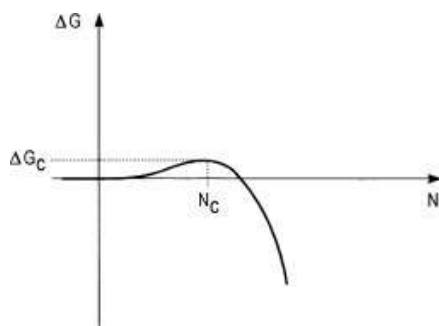


Figura 6 - Energía libre de formación de un clúster como función del tamaño  $N$

Junto con la creación de nuevos efectos límites adicionales, como por ejemplo, tensiones internas, desviación desde la disposición del átomo grueso, etc. La relación  $\Delta G(N)$ - $N$  es una función con una máxima determinación en una barrera energética  $\Delta G_{crit}(N)$  a un clúster de tamaño  $N_{crit}$ , conocido como el núcleo. Dicho esto, se puede decidir directamente los tamaños críticos para los clúster estables de ad-átomos. Para los núcleos 2D.

$$N_{crit} = \frac{b\Omega\varepsilon^2}{(Ze|\eta|)^2}$$

Para los núcleos 3D.

$$N_{crit} = \frac{8BV_m^2\sigma^3}{27(Ze|\eta|)^3}$$

La ley de nucleación para la probabilidad uniforme con un tiempo  $t$  de conversión de un sitio en el electrodo durante la nucleación está dada por lo siguiente.

$$N = N_0(1 - \exp(-At))$$

Donde  $N_0$  es el total de sitios (la máxima cantidad posible de núcleos en la unidad de superficie) y  $A$  es constante de velocidad de nucleación. Esta ecuación representa el modelo cinético de primer orden de la nucleación. Además la existencia de una barrera energética hace a la nucleación un proceso probabilístico, con una razón  $J$  (núcleos/cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) dada por la probabilidad de su formación (eq. Volmer – Weber) (Budevski).

$$J = A_j \exp\left(-\frac{\Delta G_{crit}}{KT}\right)$$

Finalmente se debe mencionar que existen diversas zonas en la superficie de un sustrato, las cuales tienen distintos números de coordinación para la estructura cristalina del metal que se está depositando. Las zonas que tienen números de coordinación más altos se denominan puntos activos y la formación de núcleos será más factible en ellas. En la siguiente figura se pueden observar estas zonas.

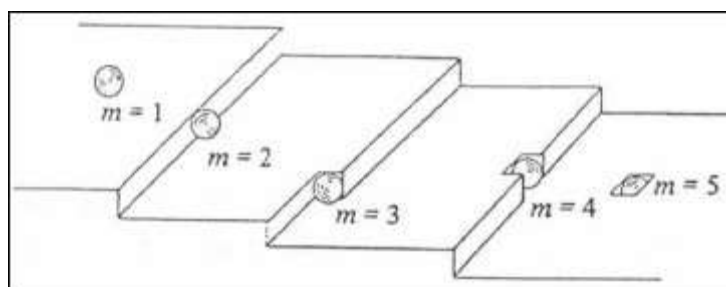


Figura 7 - Zonas con su respectivo número de coordinación.

En esta figura el sitio de coordinación  $m=1$  corresponde a sitios superficiales y son los menos factibles para la formación del núcleo. Los sitios  $m=2$  son sitios de bordes, los sitios  $m=3$  son sitios

de esquinas, los sitios  $m=4$  son sitios de vacancias de borde y finalmente los sitios  $m=5$  son sitios de vacancia superficiales.

#### 4.4 Crecimiento

Dada la nucleación, la capa inicial de depósito se puede generar mediante recubrimiento directo con núcleos recién formados o por crecimiento y coalescencia de una población relativamente baja de núcleos (Winand, 1992).

En los sustratos iguales al metal a depositar, el mecanismo de crecimiento depende de la perfección del sustrato y sobre-potencial. En los sustratos diferentes del metal a depositar, tanto la interacción metal-sustrato y el correcto encajado cristalográfico del metal-sustrato, así como el sobre potencial son los parámetros más importantes en el mecanismo de la deposición (Budevski).

La competición entre los procesos de nucleación y el crecimiento están fuertemente influenciados por el potencial del cátodo. Por lo tanto, los principales factores que determinan el crecimiento son:

- La estructura de la doble capa eléctrica, incluyendo la concentración de diferentes especies presentes en la solución.
- Concentración de ad-iones en la superficie.
- El radio y el tamaño de los núcleos críticos.
- Velocidad de nucleación.
- Velocidad de crecimiento vertical y lateral de los granos.

Seiter encontró una correlación entre el sobre-potencial  $\eta$  y la forma del crecimiento del cobre electrodepositado en una lámina de cobre con textura de (100), la cual semuestra en la siguiente imagen (Paunovic, 2006).

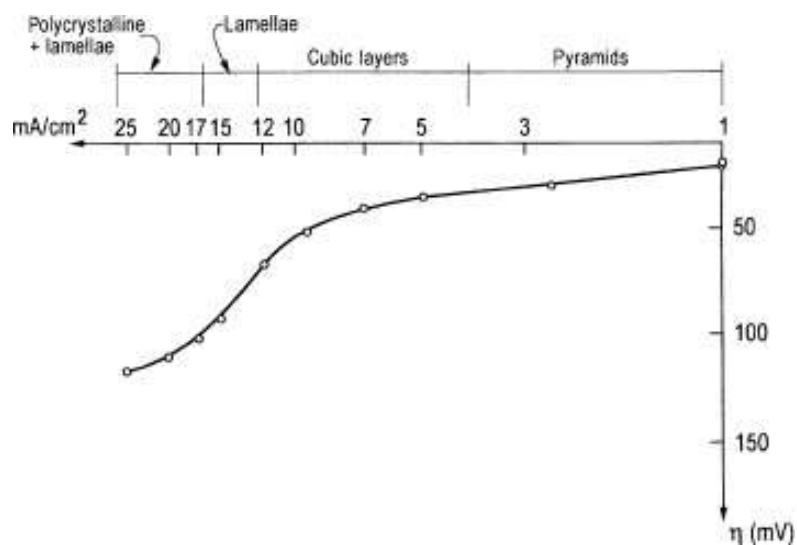


Figura 8 - Relación entre sobre potencial y crecimiento

Adicionalmente Barnes observó similares resultados en superficies monocristalinas de cobre: bajo 10 [mV] se observan depósitos rugosos, entre 40 a 70 [mV] depósitos laminares, entre 70 a 100 [mV] se observan depósitos en bloques y finalmente sobre 100 [mV] depósitos policristalinos.

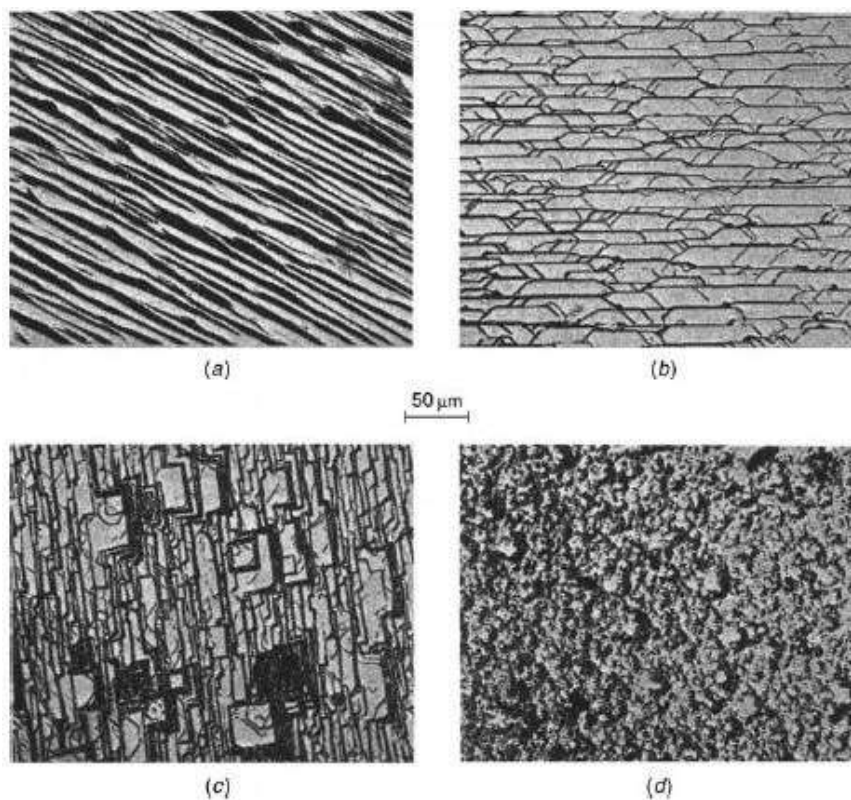


Figura 9 - Formas estructurales básicas de cobre depositado

Donde la imagen a) corresponde a una estructura rugosa (0-10 [mV]), b) estructura laminar (40-70 [mV]), c) estructura de bloque (70-100 [mV]) y d) depósitos policristalinos (100- [mV]). Cabe destacar que una estructura policristalina es la deseada al momento de obtener cátodos de cobre.

## 4.5 Ley de Faraday

La ley de Faraday establece que la masa del metal depositado es proporcional a la cantidad de corriente que circula a través de la celda y al tiempo de operación de la electrólisis (Cáceres, 2007).

$$m_F = \frac{M}{nF} * I * t$$

Donde:

mF: Masa depositada [g]

M: Peso molecular del metal depositado

n: Valencia del ion metálico en la solución

F: Constante de Faraday (96487 [Coulomb/Equivalente]) (1 Coulomb=1Ax1s)

I: Corriente que circula [A]

T: Tiempo de operación de la electrólisis [s]

El equivalente electroquímico (EEQ) de la sustancia transformada, se define como la cantidad de sustancia que es afectada por el paso de una corriente de 1 A en 1 hora. El equivalente electroquímico de un metal queda determinado por las siguientes constantes (Cáceres, 2007).

### 4.5.1 Corto Circuitos

Los cortocircuitos se generan por el contacto directo entre el cátodo y el ánodo y es una consecuencia del crecimiento local de nódulos en el cátodo.

El crecimiento nodular es una alteración del patrón ordenado de incorporación de los ad-átomos de cobre a la superficie catódica, dando lugar a un depósito nodular o dendrítico, que prontamente puede formar un cortocircuito. Lo anterior es dado por falta o una concentración errónea en el electrolito de inhibidores químicos.

No olvidar que la unidad básica de una planta de electrorefinación es la celda y que estas se conectan en serie para dar origen a las secciones y posteriormente a los circuitos. Al interior de las celdas, los electrodos ánodos-cátodos, están conectados en paralelo por lo tanto aquí está lo modular de la distribución de corriente por celdas por cuanto esta se distribuye según la ley de Ohm preferencialmente por las vías menos resistivas. Al tener un nódulo en la cara del cátodo, habrá una menor distancia inter-electródica entre cátodo-ánodo, teniendo como consecuencia que una mayor magnitud de corriente circule por esa zona en desmedro de las zonas aledañas al nódulo. Esto provoca una depositación preferencial con el potencial de generar un cortocircuito. Esto hace que los cortocircuitos sean uno de los factores que afectan significativamente en la eficiencia de corriente y el consumo de energía.

Varios factores pueden producir un cambio en la resistencia eléctrica dando lugar a un crecimiento preferencial de nódulos en el electrodo, como por ejemplo; la composición química, la temperatura éstos se relacionan con la conductividad del electrolito por lo que es necesario mantenerlos en los niveles establecidos; un alto nivel de impurezas en el electrolito (Bi, As, Sb,  $\text{Fe}^{+3}$ ) pueden electro depositarse y por el mal centrado de los electrodos o por una mala calidad física del ánodo pueden afectar en la distancia inter-electródica establecida (51mm entre cátodo-ánodo), disminuyendo la resistencia en esa zona.

Según el efecto Joule, el paso de corriente en un material provoca un aumento de su temperatura, por lo tanto, a medida que el nódulo crece y haya menos resistencia eléctrica en esa zona, la corriente que circule por ese punto aumentara, incrementando la temperatura del cátodo. Esta alza de temperatura asociada al CC ayuda a identificar los cátodos cortocircuitados. Según la etapa en que se encuentre el nódulo, su temperatura puede ir desde los 70°C, en los inicios del nódulo, hasta 180°C, en un cortocircuito franco. Este aumento de temperatura es el que se utiliza para identificar y controlar los cortocircuitos.

A continuación se describe las etapas de un nódulo hasta generar un cortocircuito franco.

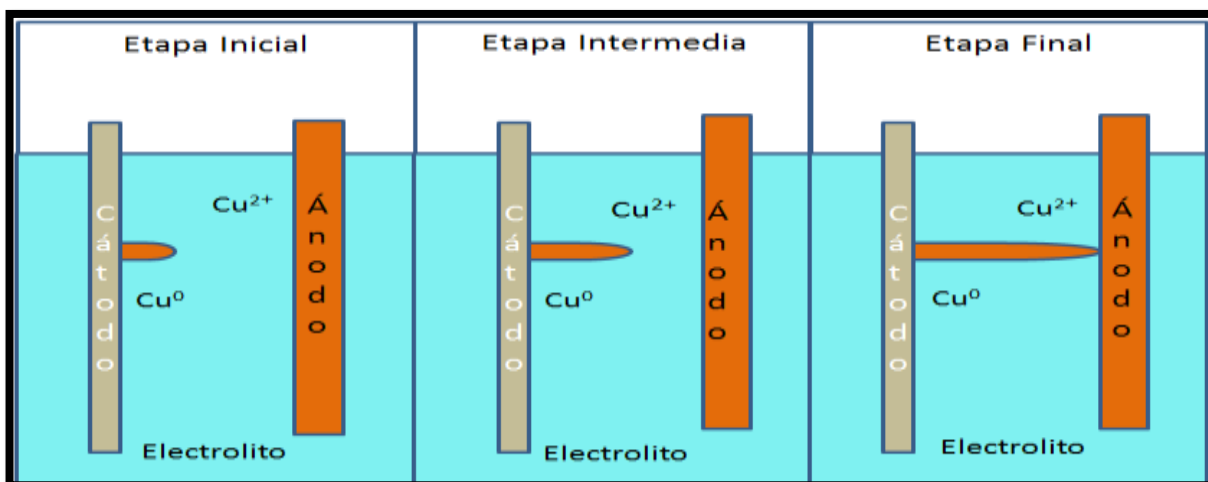


Figura 10 - Generación de Corto Circuito.

En la etapa inicial se observa la formación de un nódulo, en la etapa intermedia se distingue el crecimiento del nódulo y en la etapa final se observa un cortocircuito franco. A medida que el nódulo va creciendo se vuelve más perjudicial para el proceso de electro refinación debido a que la resistencia eléctrica va disminuyendo y la corriente circula preferentemente en esa área, alterando la deposición uniforme en el mismo cátodo y en los cátodos restantes de la celda. En cada etapa la temperatura va aumentando, la temperatura del cátodo en la etapa final es mayor que la del cátodo en la etapa intermedia y esta es a su vez mayor que la del cátodo en la etapa inicial.

Es importante poder identificar el nódulo en su etapa inicial, para evitar su posterior conversión a corto circuito con resultado de disminución de eficiencia farádica, por lo que es necesario un constante monitoreo de las temperaturas de los cátodos, para poder detectar el nódulo en su etapa inicial y/o intermedia y evitar la generación de un cortocircuito y así una pérdida significativa de eficiencia de corriente y el consumo de energía eléctrica.

La experiencia industrial ha demostrado que un cátodo en proceso de cortocircuito con un ánodo, implica que de la corriente que por él circula, sólo es aprovechada en depositar un 30% a 40% de ella, esto demuestra la importancia de la detección y eliminación a tiempo del nódulo, tanto al inicio como durante el proceso de electro refinación.

Las principales causas de corto circuitos en la refinación son las siguientes.

## 4.6 Eficiencia de corriente

La eficiencia de corriente catódica se define como la relación existente entre el cobre producido a una corriente aplicada y la cantidad teórica de cobre a producir para esa misma corriente y es normalmente expresada en porcentaje. De manera análoga para el cálculo de eficiencia de corriente anódica, se utiliza el cobre disuelto el ánodo y la cantidad teórica para la misma corriente aplicada. Para la cantidad teórica de cobre depositada o disuelta se hace uso de la ley de Faraday, la cual dice que esa cantidad es proporcional a la intensidad de corriente aplicada y al tiempo que circula la corriente.

$$M = \frac{PM * I * t * A}{n * F}$$

Donde:

*M: Material depositado (g)*

*PM: Peso molecular (g/mol)*

*I: Corriente Circulante (A/m<sup>2</sup>)*

*A: Área de depositación (m<sup>2</sup>)*

*t: Tiempo (s)*

*n: Número de electrones transferidos*

*F: Constante de Faraday (C/mol)*

Para el cálculo de las eficiencias de corriente anódica y catódica se utiliza las ecuaciones 3 y 4, respectivamente. La masa real de cobre disuelto o depositado, puede ser obtenida por el pesaje de los electrodos en una celda antes y después del proceso de electro refinación.

$$\eta_{anódica} = \frac{M_{Cu \text{ real disuelto}}}{M_{Cu \text{ teórico}}}$$

$$\eta_{catódica} = \frac{M_{Cu \text{ real depositada}}}{M_{Cu \text{ teórico}}}$$

Los problemas de eficiencia de corriente se asocian a fugas de corriente a tierra minimizadas por la prevención de derrame de electrolito; cerca de un 1% de pérdida de eficiencia de corriente (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011); y a corto circuitos, causados por crecimiento nodular o dendrítico en el cátodo con una pérdida cercana al 3% (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2011), el cual puede minimizarse por la aplicación óptima de aditivos o mediante la eliminación manual de estos nódulos. Además de lo anterior que son problemas asociados a la faena operativa también se tienen pérdidas de eficiencia asociada a la calidad del electrolito debido a la existencia de reacciones parásitas o secundarias que consumen directamente parte de la energía entregada al sistema tales como las reacciones de  $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$  (Ruiz, 2018).

Es importante destacar que un aumento en la densidad de corriente también generará una menor eficiencia de corriente, principalmente porque favorece el crecimiento dendrítico y la probabilidad de corto circuitos.

La eficiencia de corriente por sí sola, no es suficiente para tener una idea completa de los aspectos energéticos en el proceso de electro refinación. Resulta necesario referirse al consumo específico de energía, pues relaciona la energía utilizada y la cantidad de cobre producido, cuyo cálculo está dado por la ecuación 5.

$$CEE = \frac{V \cdot I \cdot t}{M_{\text{Cu real depositado}}} \quad (5)$$

Donde:

*CEE: Consumo específico de energía  $\left(\frac{\text{KWh}}{\text{t}}\right)$*

*V: Diferencia de potencial en la celda (V)*

*I: Amperaje en la celda (A)*

*t: Tiempo que se aplica la corriente en la celda (h)*

*$M_{\text{Cu real depositada}}$ : Masa de cobre real depositada (Kg)*

El consumo específico de energía se define como la cantidad de energía utilizada en un proceso para producir una cierta cantidad de masa del metal. En la electro refinación y, en especial en Chuquicamata, el consumo específico de energía varía entre 300 y 400 [kWh/t] (CODELCO, 2015).

## 4.7 Sobrepotencial de cristalización

Cuando se trabaja con electrodos de iones metálicos, además de los sobrepotenciales de transferencias, difusión y reacción puede aparecer todavía un sobrepotencial de cristalización  $\eta_k$ , que se atribuye a la inhibición del pasaje de los iones metálicos del estado de átomo adsorbido en la superficie (ad-átomo) a la red cristalina ordenada, o viceversa. La magnitud del sobrepotencial se obtiene a partir de la afinidad química del proceso de electro cristalización.

$$\eta_k = \frac{RT}{z_r F} * v_{ad} * \ln \left( \frac{a_{ad}}{a_{ad,eq}} \right)$$

Donde  $a_{ad}$  y  $a_{ad,eq}$  son las actividades de los ad-átomos cuando hay flujo de corriente y cuando hay flujo en equilibrio, respectivamente.  $a_{ad}$  depende de la velocidad del proceso de cristalización.

## 4.8 Factores influyentes en la estructura del metal depositado

Existen factores que pueden influir más marcadamente en el tamaño, forma y distribución de los cristales en un depósito metálicos. Estos factores son la densidad de corriente, concentración del electrolito e inhibición.

### 4.8.1 Densidad de corriente

A densidades de corriente muy bajas, los sobrepotenciales son pequeños y por ello, las probabilidades de nucleación son escasas, logrando así un depósito con granos gruesos. A medida que se aumenta la densidad de corriente y el sobrepotencial, aumenta la frecuencia de nucleación y los depósitos se hacen más finos.

En el caso de la deposición de metales sobre electrodos de otros metales, es necesario que ocurra la aparición de una sobrepolarización, que se atribuye a la necesidad de un elevado sobrepotencial para la formación de los primeros núcleos tridimensionales sobre el metal extraño. Una vez formado el número suficiente de núcleos, se necesita un solo pequeño sobrepotencial para que siga el crecimiento. Si la densidad de corriente y el sobrepotencial son tan grandes como para que se desprenda hidrógeno simultáneamente con la deposición del metal, el depósito será poroso o esponjoso, debido al desprendimiento de burbujas de este gas. Como la solución en las cercanías del electrodo puede volverse alcalina por la descarga de los iones  $H^+$ , a veces se pueden formarse hidróxidos o sales básicas, que se incorporan al depósito y le dan un aspecto fino y oscuro. Esto se

observa, por ejemplo, en la deposición de hierro o cromo a partir de soluciones neutras (Wolfgang, 1971).

### 4.8.2 Inhibición

La inhibición puede definirse como la disminución de la velocidad de uno o más pasos parciales de la reacción total en el electrodo. La inhibición se debe a la presencia en la superficie del electrodo, en la capa doble o en la capa de difusión de sustancias diferentes del metal o del correspondiente ad-átomo. Estas sustancias dificultan el proceso catódico y son llamadas inhibidores. Usualmente no cubren la superficie catódica completamente y favorecen los sitios activos (Grágeda, 2007) (Winand, 1992).

La inhibición en la interfase electrodo-electrolito puede disminuir la velocidad de los procesos físicos, electroquímico y/o químico de la electrodeposición de los metales que ocurren inmediatamente en la interfase metal-electrolito (Grágeda, 2007).

Dependiendo del origen de los inhibidores, la inhibición puede ser clasificada como primaria o secundaria. La inhibición primaria es causada por sustancias cuya composición estequiometría es la misma al principio y al final de la deposición. La inhibición secundaria es causada por sustancias que son generadas durante la reacción electrolítica, electroquímica o química (Grágeda, 2007) (Paunovic, 2006).

Cuatro principales efectos de inhibición en el proceso catódico deben ser considerados (Winand, 1992).

- La catálisis negativa de una reacción previa o posterior.
- Reducción simultánea de los inhibidores, resultando en una disminución en la densidad de corriente parcial para la reducción catódica de  $Me^{n+}$  y, a su vez, de la eficiencia de corriente. Usualmente resulta también en una contaminación del metal por la descomposición residual de la molécula inhibidora.
- Cambio en la microestructura y en la textura cristalográfica del depósito.
- Cambio en el valor del sobre-potencial

La sensibilidad de los metales a la inhibición puede ser estimada por medio de la siguiente ecuación

## 5. Condiciones Operativas que favorecen los Corto Circuitos

### 5.1 Ánodos con orejas Chuecas

En Figura siguiente se observa ánodos con orejas chuecas, lo cual puede ser causado por una mala ejecución al retirar o despegar los ánodos de su molde o producto de una mala manipulación durante el traslado hacia la refinería.



*Figura 11 - Ánodos con orejas chuecas.*

Antes de que los ánodos entren a la nave de electrorefinación, pasan por la Máquina Preparadora de Ánodos (MPA), en donde una de sus funciones es enderezar las orejas. En terreno se observó ánodos con orejas chuecas, lo que significa que la MPA no cumple un 100% su función.

Esta situación trae problemas en el centrado del ánodo, ya que sus orejas son ubicadas en el lugar asignado pero no se logra cumplir la distancia inter electródica entre el cuerpo de los electrodos; un lado del ánodo queda más cercano al cátodo, aumentando la probabilidad de generar cortocircuitos.



*Figura 12 - Ánodos con orejas chuecas en celda.*

### 5.1.1 Orejas de ánodos con zonas de contacto irregulares

Existen ciertos factores de la rueda de moldeo, como por ejemplo rápido enfriamiento, alta velocidad en la rueda de moldeo o desperfecto en moldes, la zona de contacto de las orejas de ánodos es irregular, lo que trae consecuencias negativas en la conductividad entre el electrodo y la barra intermedia y en su verticalidad una vez situados en las celdas. La Máquina Preparadora de Ánodos (MPA) posee una estación de fresado que debe mitigar este defecto, pero en terreno se identificó que esta función no se cumple al 100% por falta de nivelación de las cuchillas de fresado.

La mala verticalidad de los ánodos tiene como resultados la aparición de nódulos y/o cortocircuitos en la parte inferior del cátodo.



Figura 13 - Orejas frezadas y no frezadas.

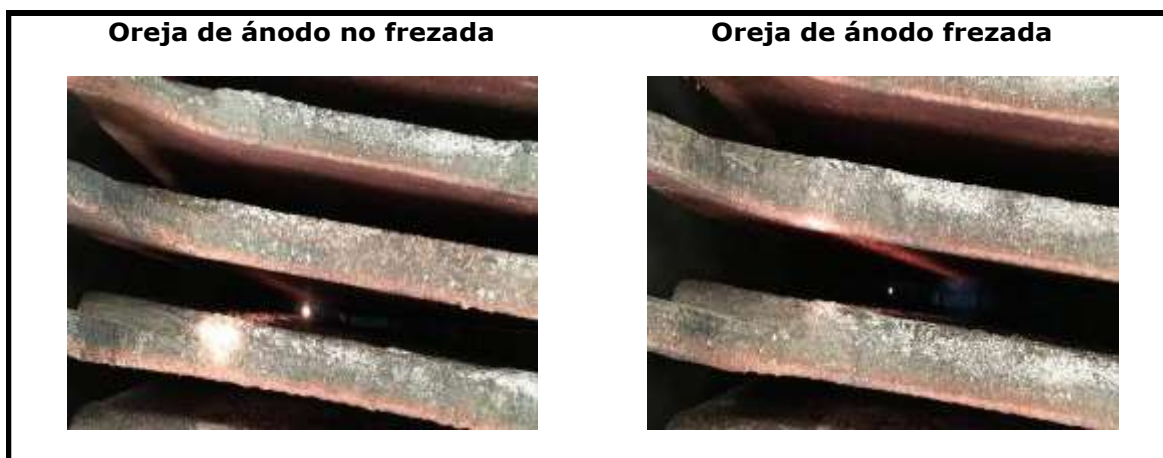


Figura 14 - Oreja frezada y no frezada en celda.

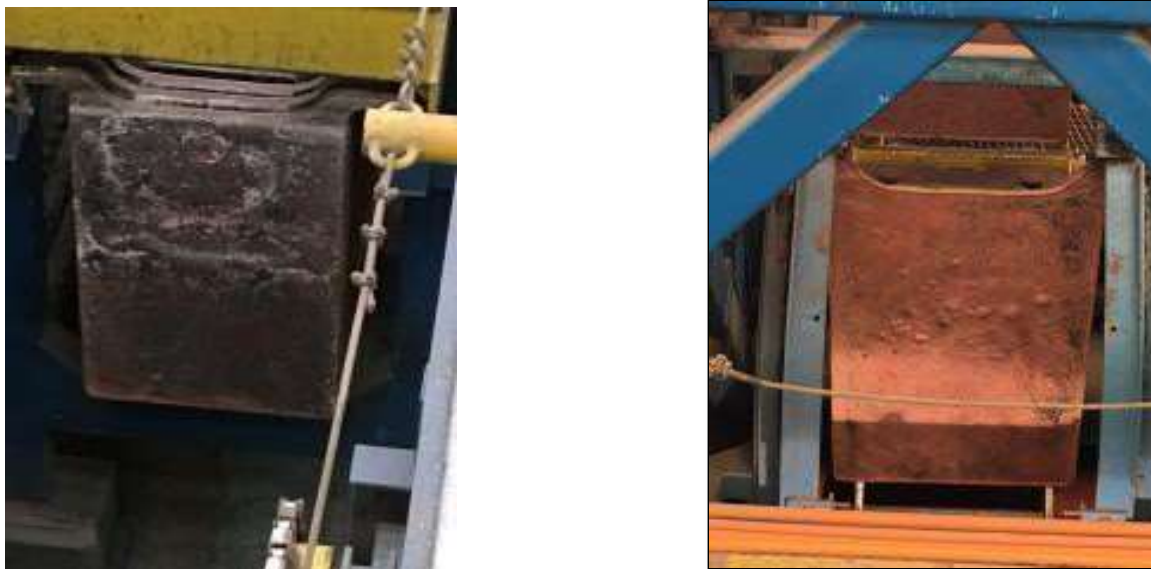


*Figura 15 - Nodulación en zona inferior del cátodo.*

### 5.1.2 Protuberancia en ambas caras del ánodo

Esta es una anomalía que puede ser producto de un mal enfriamiento en la rueda de moldeo, composición indeseada de oxígeno o de un mal estado de los moldes.

Estas protuberancias pueden llegar a favorecer el crecimiento de nodulos, con la posible formación de cortocircuitos como consecuencia del crecimiento local de nódulos en la cara frontal del cátodo.



*Figura 16 - Protuberancias en ambas caras del ánodo.*

### 5.1.3 Ánodos Sobredimensionados

Las dimensiones establecidas para el espesor del cuerpo del ánodo son  $45 \pm 5$  mm en todo su largo, las cuales no son cumplidas por los ánodos cargados en la nave debido a una mala nivelación en sus moldes (Wastavino, 2021). Estas diferencias en sus espesores, afecta en la distancia inter-electródica estipulada por diseño, en la refinería es de 102 mm de ánodo a ánodo o de cátodo a cátodo.

Considerando que la distancia punto a punto entre electrodos está fuertemente relacionada con la velocidad y calidad de la depositación, ya que la conductividad eléctrica es inversa a la distancia entre electrodos (Gómez-Biedma, 2002), si esta distancia disminuye habrá una mayor cantidad de depósito en ese lugar y por tanto existirá una posible formación de corto circuito.

La nave es cargada con ánodos Chuquicamata (CCC), Teniente (TTE) y Alto Norte (ALTN), en una proporción aproximada de 63%, 26% y 11%, respectivamente. A continuación se muestran histogramas del espesor de estos tres tipos de ánodos.

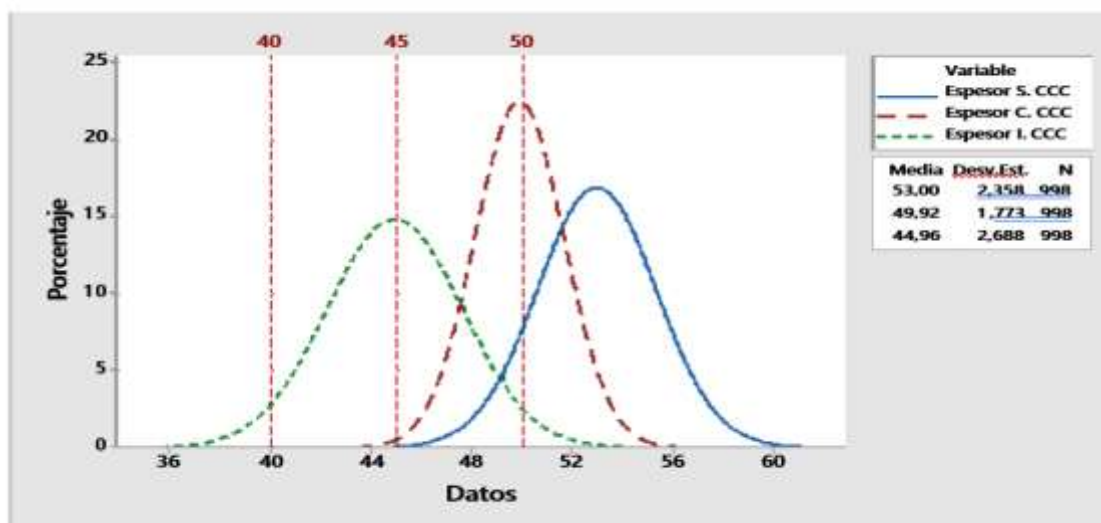


Figura 17 - Espesor ánodos Chuquicamata

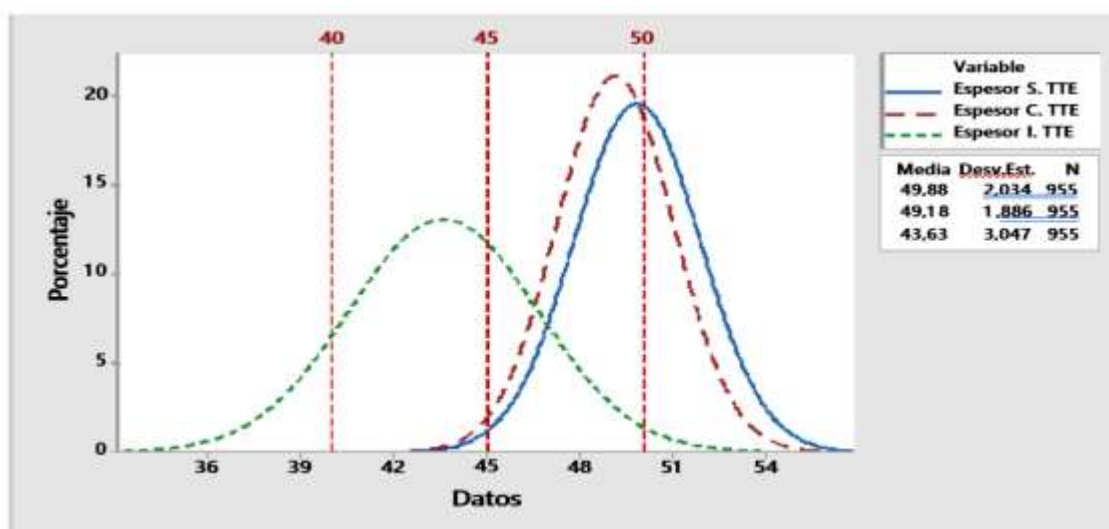


Figura 18 - Espesor ánodos Teniente

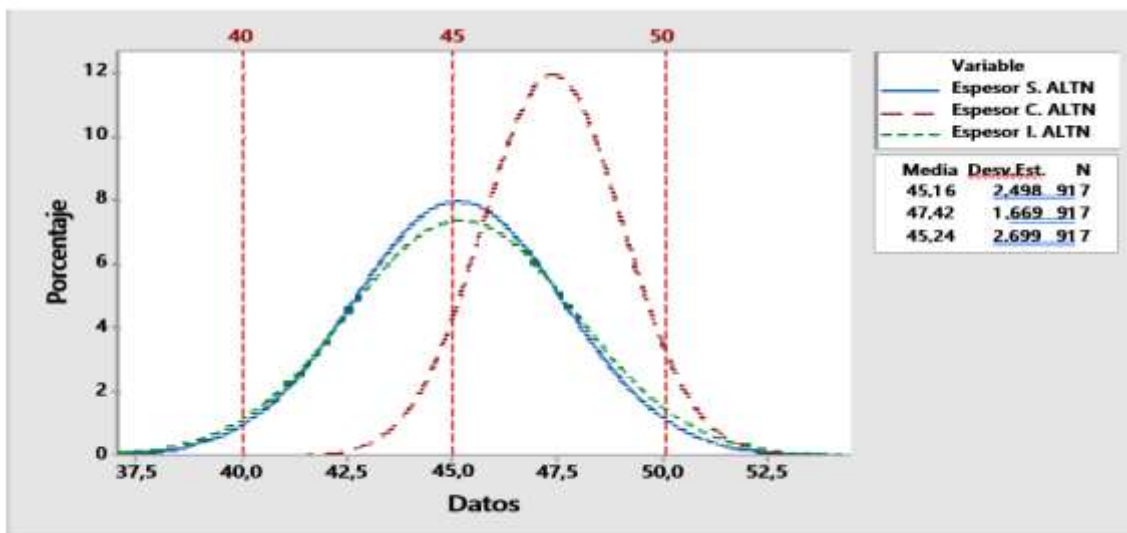


Figura 19 - Espesor ánodo Alto Norte

## 5.2 Inspección Catódica

La inspección catódica es una de las operaciones importantes que controla el proceso en la nave de electro refinación. Consiste en mantener controlada la operación de la nave, minimizando los cortocircuitos y pérdidas de corriente en las secciones en producción, manteniendo la eficiencia de corriente en niveles altos.

Actualmente en la Refinería de Chuquicamata, se tienen dos cuadrillas de inspección catódica por turno (turno A, B y C). En cada cuadrilla trabajan 5 operadores, uno encargado de manejar la grúa de inspección con que se levantan los cátodos, otro encargado de visualizar los cortocircuitos con una cámara infrarroja llamada Gauss meter (Figura 5) y marcarlos para su posterior identificación y los 3 operadores restantes encargados de retirar las telas antivaporantes (previo a la inspección) y levantar los cátodos en corte y eliminar sus nódulos.



*Figura 20 - Cámara térmica*

Para realizar las inspecciones, se usa un instrumento llamado Gauss meter o comúnmente cámara infrarroja, la cual percibe la radiación emitida de los electrodos (cátodos/ánodos) detectados y la transforma en imágenes luminosas para ser visualizadas por el ojo humano, de color rojo las temperaturas más altas representando cátodos en CC y de color azul oscuro las temperatura bajas representando cátodos aislados.

Los cátodos encontrados en cortocircuito son marcados con tiza por el operador encargado y luego otros operadores retiran dichos cátodos de las celdas con la grúa de inspección y los ganchos anclados a ellas y eliminan los cortocircuitos con raspadores metálicos (Figura 15 ). Una vez terminada esta operación, el cátodo vuelve a ingresar a la celda, en donde los operadores con la ayuda de los raspadores metálico lo alinean, priorizando el centrado del cátodo respecto a los ánodos adyacentes a él.

En caso de que el cátodo esté aislado los operadores, una vez levantado el cátodo, utilizan una escobilla metálica para limpiar la parte inferior de la barra de suspensión del cátodo y la barra de transferencia eléctrica de la celda, con el fin de mejorar la conducción eléctrica por medio de los contactos entre el cátodo y la barra de transferencia.



*Figura 21 - Cuadrilla de inspección*

Luego se continúa inspeccionando las celdas en operación hasta el término del ciclo catódico. Junto con esta operación, el personal de la inspección catódica también está encargado de la regulación de niveles de electrolito en celda y de revisar y mantener las celdas con buena circulación de electrolito.

Cada cuadrilla debe realizar esta inspección dos veces en su turno. Cada turno tiene sus secciones programadas a inspeccionar, las cuales a veces pueden ser reprogramadas para no producir retraso en la cosecha de cobre o por algún trabajo externo que se pueda estar realizando en el área a inspeccionar.

### 5.3 Calidad Catódica

Los cátodos de cobre deben reunir ciertos criterios de calidad para su comercialización, calidad física asociado a la morfología de los cátodos, es decir, un depósito catódico liso, sin nódulos ni dendritas y calidad química asociada al nivel de impurezas. Por lo general los depósitos lisos, sin nódulos y no porosos contienen muy bajo nivel de impurezas.

Existen dos tipos de rechazo catódico: físico y químico. El rechazo catódico físico es el de mayor importancia en una refinería y básicamente está asociado a masa de cobre fuera de norma en los cátodos y a la presencia de nodulaciones, como se aprecia en la siguiente figura.



*Figura 22 - Cátodo rechazado por nodulación*

En cuanto al rechazo catódico químico, éste se encuentra asociado a la presencia de impurezas sobre la norma establecida por la empresa. Actualmente la refinería Chuquicamata no tiene cátodos con rechazo químico.

Finalmente, los cátodos que cumplen con criterios de calidad son empaquetados para su posterior comercialización



*Figura 23 - Cátodos empaquetados para comercialización.*

## 6. TECNOLOGÍA PARA DETECCIÓN DE CORTO CIRCUITOS

En los capítulos anteriores se dio a conocer la teoría y causas operacionales de la formación de corto circuitos, muchas de las causales son debido a problemas con los electrodos o con las maquinas que preparan los electrodos. La formación de corto circuitos en el procesos electroquímico de la refinería Chuquicamata posee dos aristas, la primera enfocada en la calidad anódica que llega a las celdas, y la segunda arista es desde la operación de la refinería. En ambos casos se pueden realizar mejoras continuas que ayuden a disminuir la formación de corto circuitos. Una detección temprana de corto circuitos (este concepto se traduce en detectar el corto lo mas pronto a su formación, no esperando que se cumpla la ruta de inspección) ayudaría a la refinería a poder trabajar a una mayor densidad de corriente, acortando los días de depositación, aumentando su productividad y pudiendo además poder trabajar a mayores densidades de corriente.

En este sentido se han probado innovaciones, tanto a nivel de materiales (diferentes polímeros resistentes al ambiente ácido del proceso con diferente porosidades y pigmentos) como electrónicas, asociadas a la industria 4.0 para abordar la detección temprana de corto circuitos.

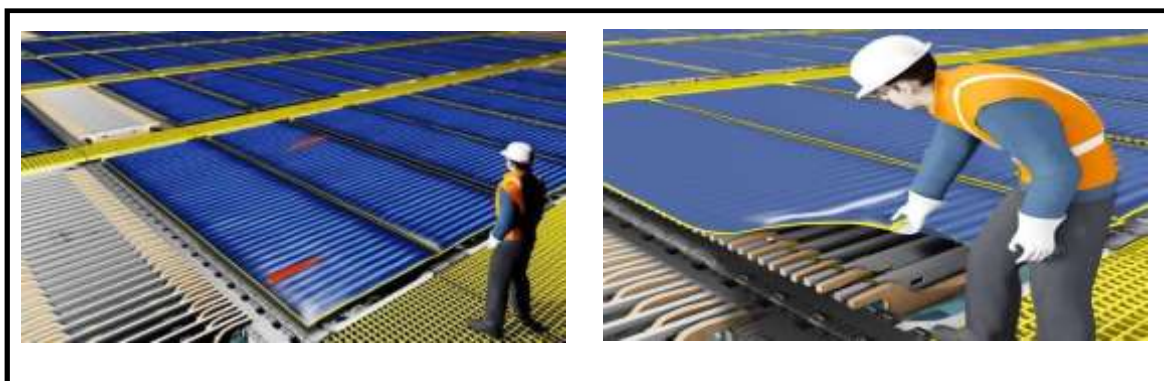
Dentro de innovación en materiales para la detección temprana de corto circuitos, durante el año 2015 se realizaron pruebas de materiales que alertaban de manera instantánea un aumento repentino de la temperatura en alguno de los electrodos, esta tecnología se conoció como MAT (tecnología patentada).

### 6.1 Tecnología MAT

La tecnología MAT® es una innovación creada y desarrollada por la empresa Innovaxxion, cuya función es monitorear (Aumento de temperatura y tiempo que lleva el corto circuito desde que se generó) los cortocircuitos en las celdas de la refinería en tiempo real y a gran escala, sin necesidad de levantar las cubiertas ni inspecciones con cámaras infrarrojas, mejorando los tiempos de respuestas de eliminación de un CC.

Este proyecto consiste en reemplazar las actuales telas antivaporantes que cubren las celdas por un nuevo tipo de cubierta con aislación térmica mejorada y con pigmento termocromático calibrado para cambiar de color a una temperatura que indique el inicio de un corto circuito. Con el aumento de temperatura que presenta el cátodo con CC, se pretende una fácil y rápida visualización de ellos mediante el cambio de color en la tela, los cuales serán identificados por sensores de detección

ubicados en altura y que mantendrán monitoreada las celdas constantemente. Estos sensores estarán asociados a un software que permitirá llevar la trazabilidad de los cortocircuitos en toda la nave de refinería, generando informes al instante de la cantidad de cortocircuitos en la nave. La tecnología MAT® consiste además en clips plásticos termocromáticos adosados en las orejas de los cátodos como sensor puntual, el que indicará que cátodo está en cortocircuito una vez que la cuadrilla de inspección levante la tela MAT®. A continuación se puede apreciar lo que propone esta tecnología.



*Figura 24 - Tecnología MAT*

Con la incorporación de esta tecnología se espera disminuir el tiempo de permanencia ( tiempo en que el corto circuito se encuentra activo antes de ser eliminado) de los cortocircuitos, ya que se podrá redirigir la cuadrilla de inspección a la zona con más cortes.



*Figura 25 - Resultado final esperado de la tecnología MAT*

La tecnología MAT® pretende disminuir en un 50% la pérdida de eficiencia de corriente provocada por los cortocircuitos. En el año 2015 la eficiencia fue de 96%, teniendo un 4% de pérdida de eficiencia, de los cuales se estima que un 30% es provocado por los cortocircuitos, lo que equivale a un 1,2% de la pérdida de eficiencia. Por lo tanto, la tecnología pretende aumentar la eficiencia en un 0,6%. Al ser esta tecnología una innovación en el mercado, fue necesario realizar evaluaciones preliminares de su comportamiento a escala industrial. Para la tela MAT se disponen tres prototipos, los que fueron evaluados en laboratorio en condiciones similares a la de una celda de electrorefinación y comparados con el desempeño de la tela actualmente utilizada en refinería (porosidad, resistencia a medios ácidos, resistencia a temperatura). Estas telas además de tener las condiciones de porosidad necesarias para mantener la temperatura del electrolito y evitar la sulfatación de contactos, deben aceptar la carga del pigmento y tener buena adherencia a la superficie de la celda. La malla actual que se utiliza en la refinería, con la que se comparó el desempeño, es de polipropileno (PP), que es un polímero termoplástico muy resistente a altas temperaturas y a los ácidos, y tiene una densidad de 0,9-0,91 g/cm<sup>3</sup>.

Los prototipos utilizados para las pruebas a escala industrial fueron:

- Prototipo A: Tela Polietileno de alta densidad, HDPE.
- Prototipo B: Tela Poliéster con textura lisa.
- Prototipo C: Tela Poliéster con textura micro polar.

La tela de polietileno de alta densidad (HDPE), es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados en el mundo y además es de bajo costo, si bien se sabe que es menos resistente que el PP a las altas temperaturas, esta es más flexible y tiene gran resistencia química, a la abrasión, al impacto y al desgaste, y su densidad es de 0,94- 0,97 g/cm<sup>3</sup> y dos malla de poliéster, una con textura lisa y otra con textura de micro polar. El poliéster es un polímero, en forma de fibra, muy resistente e inarrugable.

A estos prototipos de les adicionó en su superficie el pigmento seleccionado mezclado con el plastisol (Resina de PVC).

En paralelo a las pruebas de las telas se evaluó el comportamiento de 2 prototipos de clips:

- Prototipo 1: Clips de cuerpo entero que envuelve la oreja
- Prototipo 2: Clips con adhesivo adosado a la oreja

El prototipo 1 posee un disipador de calor y tiene un grosor de 3 mm. Si se considera una temperatura de 90°C de la barra del cátodo al iniciar un nódulo, con el disipador y por su grosor, se obtendrá una temperatura de 57°C en el contenedor de pigmento termocromático. Se puede observar este prototipo en las siguientes figuras.

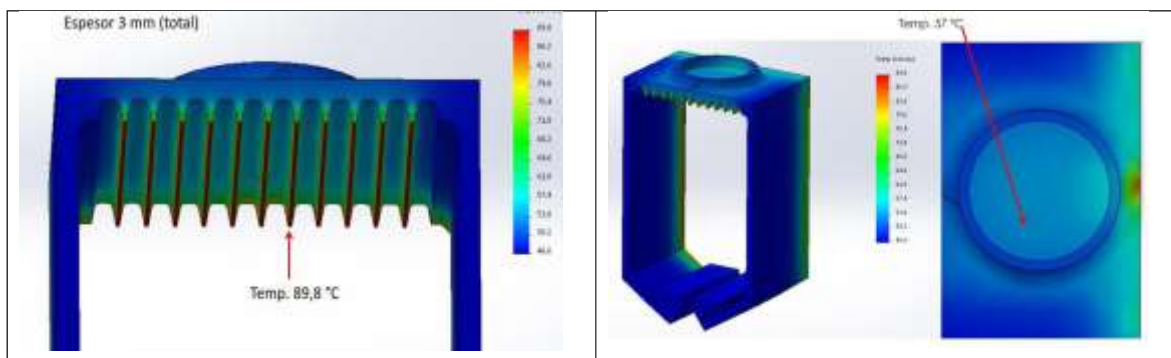


Figura 26 – Prototipo 1 Clip MAT

El prototipo 2 posee diferentes capas cuadradas pegadas con cloroformo. La capa superior es un polímero que tiene adicionado el pigmento termocromático de color azul, la capa intermedia es un polímero aislante de color blanco que ayuda a disipar la temperatura y la inferior es un pegamento, una cinta doble contacto resistente a altas temperaturas para ser adherido a las orejas de los blanks y es de color negro. Esto se muestra en la siguiente figura.



Figura 27 - Prototipo 2 Clip MAT

Las pruebas preliminares indicaron que las telas de la tecnología MAT no soportan de manera correcta las condiciones operativas de la refinería. A continuación, se puede ver el daño presentado por las telas luego de dos ciclos anódicos completos (Figura 29).



*Figura 28 - Clip MAT afectado por la temperatura.*



*Figura 29 - Telas MAT luego del primer ciclo catódico.*

Lo anterior indica que, si bien la innovación era prometedora, no cumple con los requisitos para poder operar en la refinería.

## 6.2 Sistema térmico de detección temprana de corto circuitos

Luego de la experiencia de telas termocromáticas, se saca como conclusión que, independiente del tiempo y todos los problemas que presento el piloto, una detección temprana de los cortos circuitos es fundamental para un control óptimo de la eficiencia de corriente.

De acuerdo con lo anterior, la evolución natural de un sistema de detección temprana de corto circuito es vía un sistema térmico, similar a lo que se utiliza actualmente en las cuadrillas de inspección, pero de manera que la detección sea automática y no dependiendo de la cuadrilla. En otras palabras, un sistema de detección autónomo.

El sistema en si debe estar constituido por sensores térmicos, los cuales se deben instalar en la parte superior de la nave electrolítica, una plataforma de usuario que sea capaz de procesar los datos de imágenes térmicas, indicar la sección o lugar en donde se encuentra ese corte y su duración. Otro aspecto relevante del sistema es una interfaz de usuario en donde los jefes de turno, operadores e ingenieros puedan ver las estadísticas del sistema. Finalmente, y no menos importante, un sistema de conteo de electrodos para poder identificar el electrodo en corto.

Lo anterior se describe en la siguiente figura. Esta describe un sistema denominado comercialmente como iMat.



Figura 30 - Descripción del sistema iMAT

La descripción de cada componente se detalla a continuación.

### 6.2.1 Sensores de visión Térmica (iMAT Vision)

Los sensores de visión térmica son capaces de determinar un aumento de temperatura en un electrodo(figura 31). Su instalación se realiza en lo mas alto de las vigas superiores de la nave electrolítica. Estos sensores deben estar protegidos ante la corrosión química, esto debido al

ambiente ácido propio del proceso. Para esta protección por lo general se consideran materiales poliméricos tales como HDPE o PPE.



*Figura 31 - iMAT Vision*

### **6.2.2 Plataforma de base de datos (iMAT Plataform)**

La base de datos del sistema debe tener la función tanto de almacenar los datos, como también correr algoritmos que identifiquen un aumento de temperatura en un electrodo.

Además, debe georeferenciar el electrodo en corto.

### **6.2.3 Interfaz de usuario (iMAT User Interface)**

El usuario final, en este caso, jefes de turno y supervisores de la refinería Chuquicamata, deben ser capaces de poder ingresar a un sistema de fácil acceso con múltiples plataformas y opciones para la detección temprana y correcta del Corto Circuito. Así como también, estadísticas de desempeño de cuadrillas.

Por lo tanto, debe ser un software amigable y que sea de gran utilidad para poder reemplazar las actuales tablas de Excel que se encuentran en uso actualmente. Estas tablas no permiten unificación de información, lo cual conduce a problemas de información internos graves que afectan directamente la producción (figura 25).



Figura 32 - Mockup referencial

#### 6.2.4 Identificador de electrodo (iMAT Capboard)

Uno de los grandes problemas que se han detectado al incluir este sistema de detección temprana de CC es que al ser un sistema de detección en altura, a la hora de detectar el electrodo a nivel de suelo, no hay referencia clara para contar un electrodo. Por tanto se hace imprescindible el poder marcar los electrodos a nivel de la celda. Una solución es colocar stickers, de un polímero resistente al ataque ácido, en el Capping board (figura 33).

Dentro de los beneficios del Sistema iMat® desarrollado por Innovaxxion se encuentra la detección temprana de corto circuitos que permite la gestión eficiente de cuadrillas de inspección y la medición de la eficiencia de inspección. Además de, poder determinar la recurrencia de CC en la misma zona, las zonas con mayor frecuencia de corto circuitos, el problema de verticalidad de electrodos y la generación de reportes automáticos a distintos perfiles de operación.

En la prueba ya realizada en una operación minera se obtuvo una disminución de un 52% en el tiempo de la eliminación de CC detectados con la solución y se encontró una potencialidad de eficiencia en la asignación de las cuadrillas, dado que un 18% de los turnos realizaron inspección sin CC.



Figura 33 - iMAT Capboard

### 6.3 Resultados de sistema térmico de detección temprana de Corto Circuito

En la refinería de Chuquicamata se realizó un piloto para validar la tecnología. Para ello se instalaron 6 dispositivos iMAT Vision a 8 metros de altura. Cada dispositivo fue capaz de ver 8 celdas continuas. En total se observaron 20 celdas de electro refinación por un periodo de 3 meses.



Figura 34 - iMAT Vision prototipo para piloto

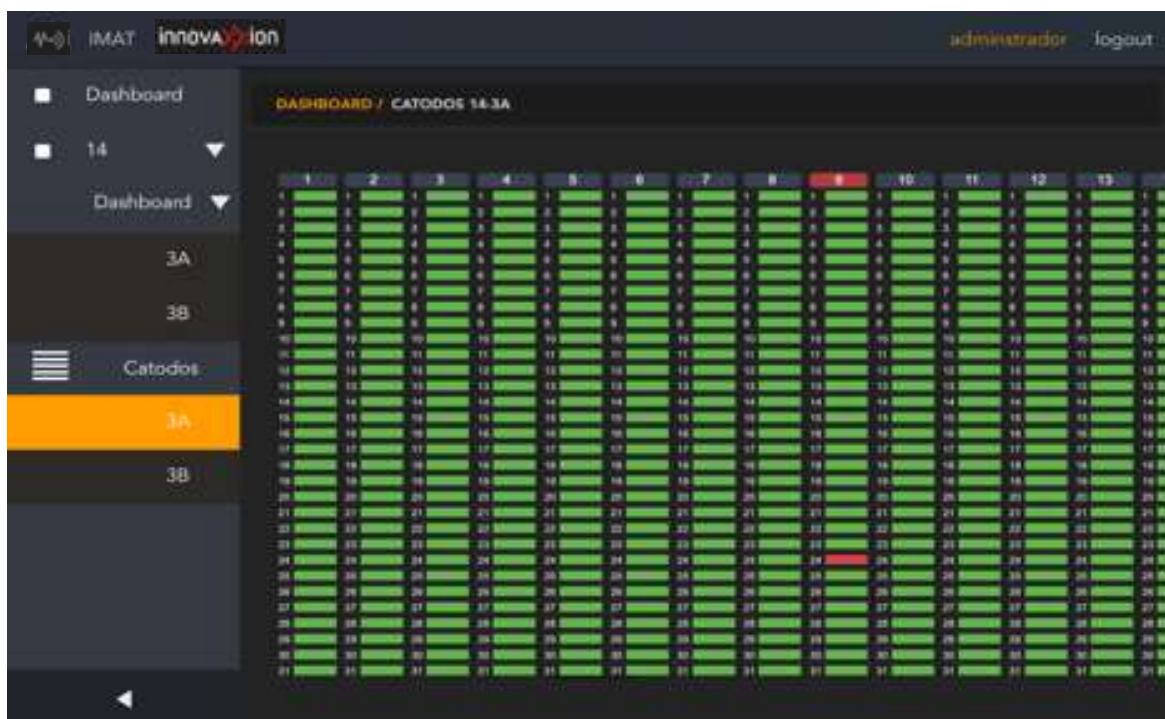


Figura 35 - Plataforma iMAT para piloto

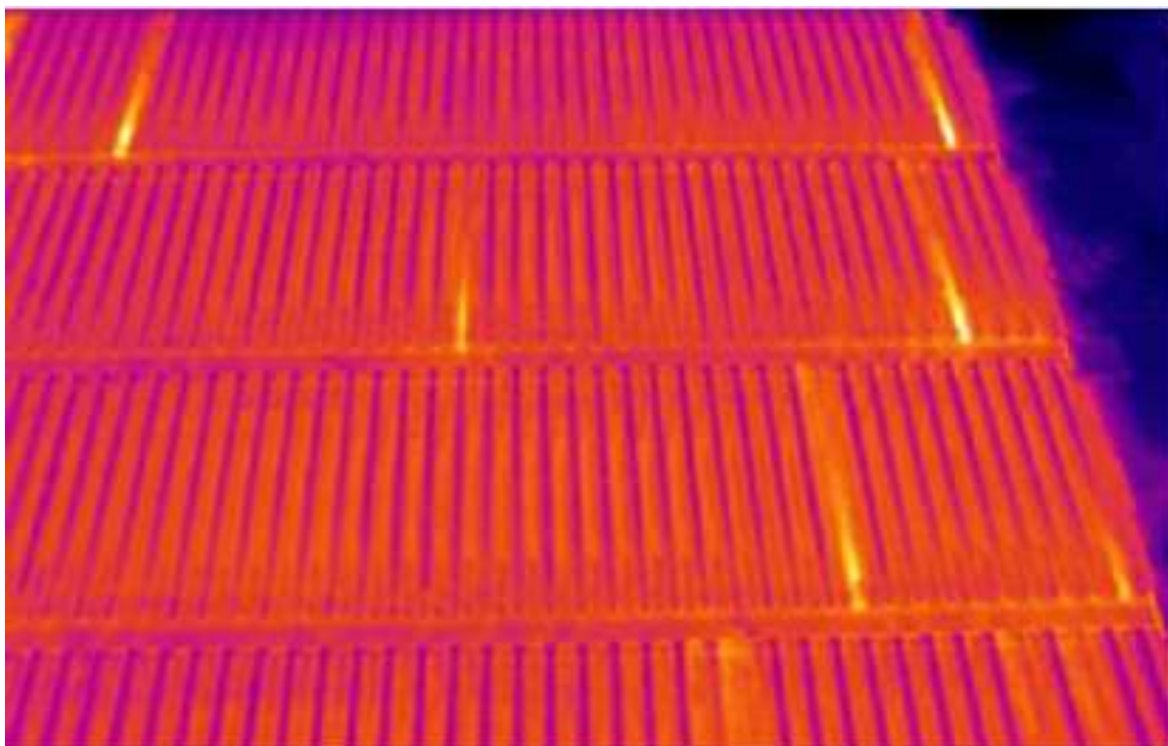


Figura 36 - Detección de corto circuitos a 8 metros de altura

Los resultados obtenidos del pilotaje del sistema iMAT se dan a conocer a continuación (figura 37).

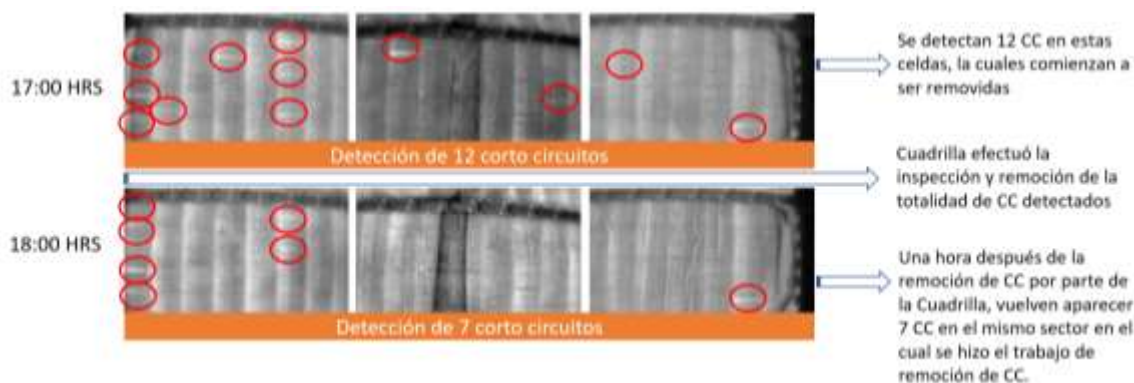


Figura 37 - Detección de corto circuitos con iMAT

Dentro de los resultados relevantes del piloto de sistema de detección térmico de corto circuitos en la refinería se destacan los siguientes.

- La cuadrilla de inspección de corto circuito, compuesta por 5 operarios, los cuales se desglosan en dos operarios con cámara térmica manual, un operario de grúa puente y 2 operarios con herramientas para eliminar nodulación (también conocido como “porotos”) de cobre que son la causa del corto circuito, pasaron por la sección en prueba un 18% del tiempo sin que hubiera corto circuito. Por tanto, es un tiempo perdido, HH que son mal utilizadas.

Si se considera que el turno posee 12 horas diarias, considerando 5 operarios, se tiene un escenario en el que de 60 HH disponibles diarias por turno, 11 HH son mal utilizadas o distribuidas por turno.

Considerando que durante un ciclo catódico la cuadrilla debe hacer un recorrido cada 2 días en la sección, se obtiene un total de 9 inspecciones para una cosecha total de cátodos. De todo lo anterior obtenemos la siguiente tabla.

| Item                                        | Valor     | Descripción |
|---------------------------------------------|-----------|-------------|
| Cuadrilla de inspección                     | 5         | Personas    |
| Horas de turno                              | 12        | Horas       |
| HH totales por turno                        | 60        | HH          |
| Inspecciones durante Cosecha Total          | 9         | -           |
| HH durante Cosecha Total                    | 540       | HH          |
| % HH mal distribuida                        | 18%       | -           |
| <b>HH mal distribuidas en Cosecha Total</b> | <b>97</b> | <b>HH</b>   |

Tabla 5 - HH mal distribuidas

- Otro resultado importante a destacar es que durante el piloto solo se logró eliminar el 52% de los corto circuitos detectados, esto quiere decir que de 100 corto circuitos eliminados, 48 volvieron a aparecer. Este resultado es relevante si se considera que actualmente, en la forma manual de inspección que hoy en día posee la refinería, no existe forma de determinar en un plazo de minutos u horas que un corto circuito fue bien eliminado o no. Este resultado involucra dos frentes importantes a analizar. El primero de ellos es que la baja eliminación de corto circuitos se debe a un mal manejo de la cuadrilla de inspección a la hora de eliminar el corto circuito.

El segundo es que la reaparición de corto circuito se debe a un defecto físico del electrodo y por tanto el problema radica, ya sea en las máquinas que posee la refinería para preparar los ánodos, o directamente el problema físico proviene desde la fundición de cobre o en la posición inicial de los electrodos en las celdas.

Por tanto, se del piloto se concluye que la tecnología es factible de utilizar en la refinería y que posee la ventaja de detectar de manera temprana los corto circuitos con ello poder reasignar recursos humanos a la inspección para eliminar el corto circuito lo antes posible.

## 7. Análisis económico

El análisis económico se realizará comparando el escenario actual de la refinería con las cuadrillas de inspección, sin tecnología aplicada y con los costos asociados al personal y costo oportunidad de las pérdidas de cobre por corto circuito, versus un escenario tecnologizado con el sistema iMAT, los costos asociados a inversión inicial, mantenimiento, y los costos oportunidad que trae el sistema.

### 7.1 Escenario actual

Actualmente la refinería de Chuquicamata concentra gran parte de sus costos en el proceso mismo de electro refinación como en el mantenimiento de sus activos. Lo anterior se detalla a continuación, en la figura 38.

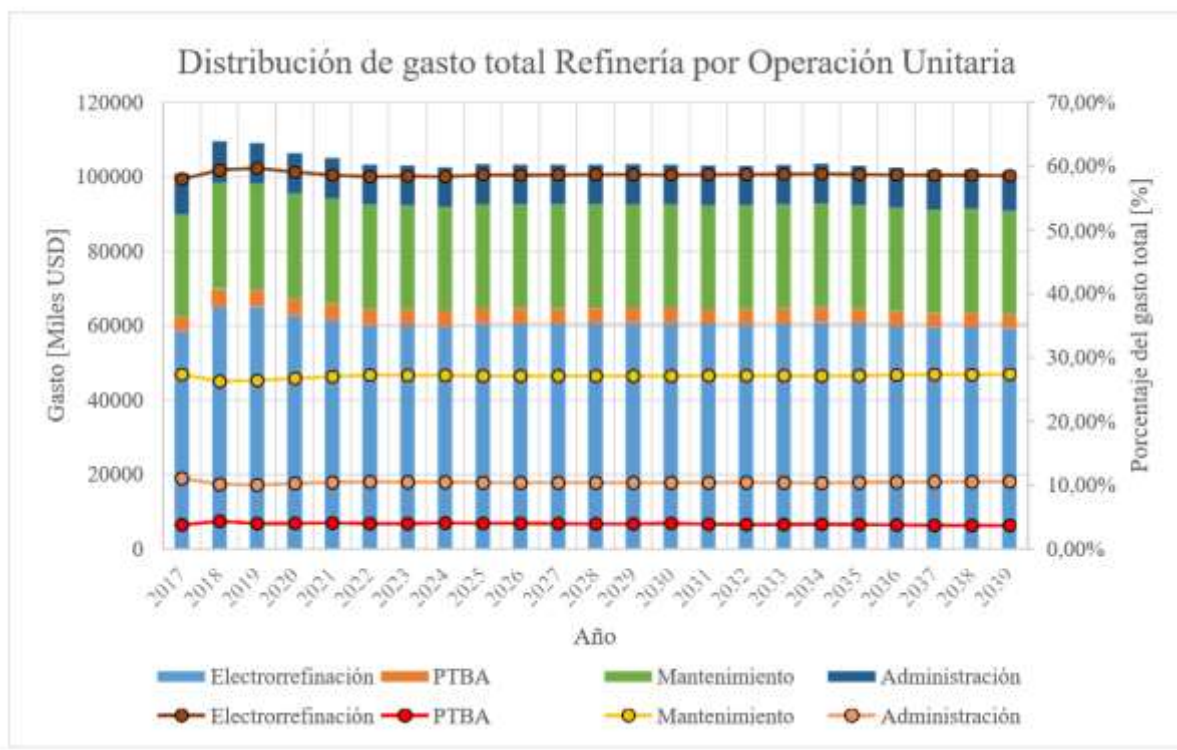


Figura 38 - Distribución de costos Refinería CHQ

Como se observa de la figura (distribución de gasto total refinería Chuquicamata) anterior los costos en la operación de electrorrefinación, al año 2021 alcanza 62 millones de dólares, este costo involucra suministros necesarios para el procesos, así como también incluye HH del personal operario y supervisores. Lo anterior se presenta en la siguiente figura. Por otro lado, el costo de mantenimiento bordea los 30 millones de dólares.

Ambos factores son los mas importantes a la hora de poder determinar el beneficio de la automatización de ciertos procesos productivos al interior de la refinería.

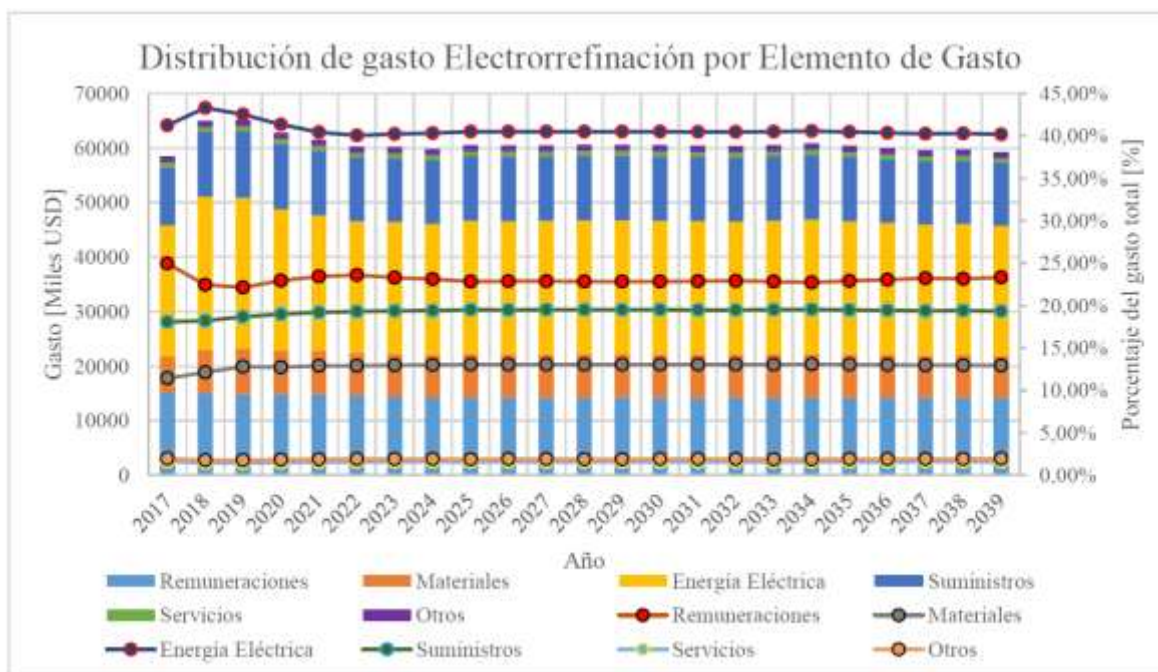


Figura 39 - Distribución de gastos en electrorrefinación

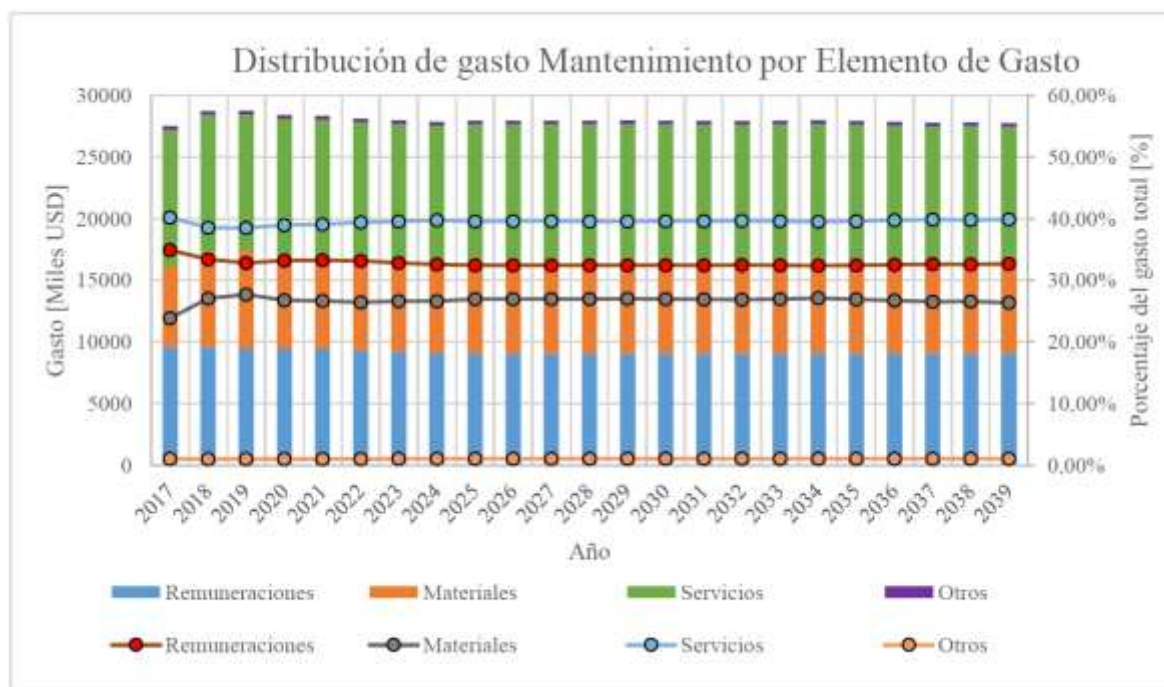


Figura 40 - Distribucion de gastos en Mantenimiento Refinería

Al detallar los costos por elemento, es posible observar que el elemento remuneraciones equivale al 30% de los costos totales siendo el ítem más importante en la estructura de costos de la refinería. Lo anterior se detalla a continuación.

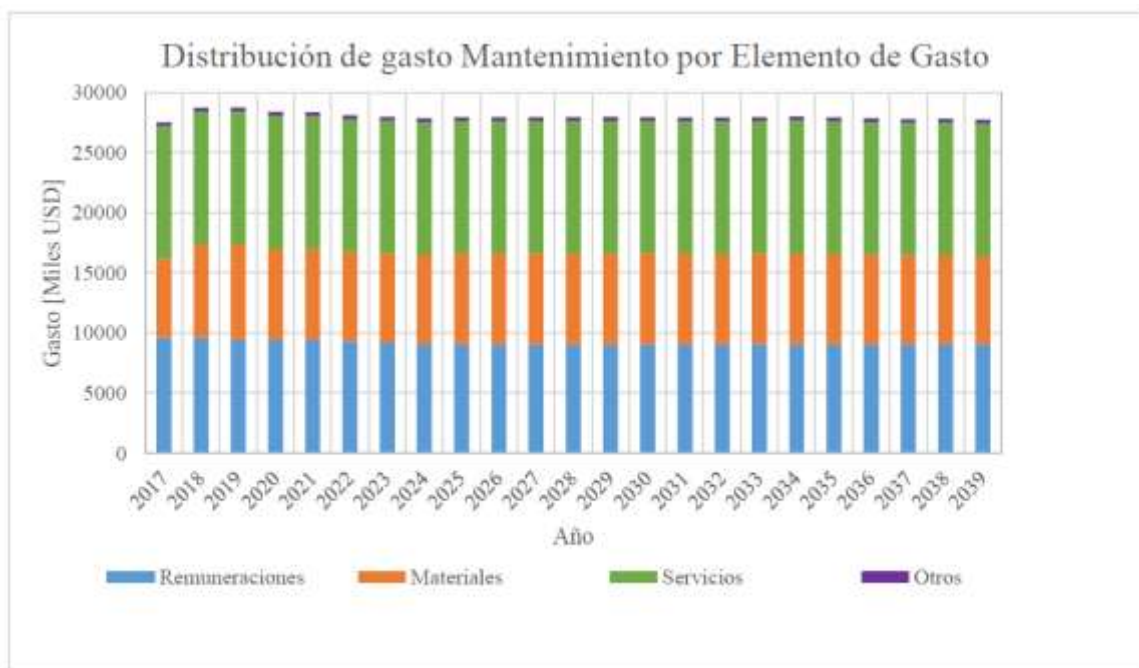


Figura 41 - Distribución de costos por elemento

De acuerdo con la figura anterior las remuneraciones alcanzan cerca de los 30 millones de dólares en el año 2021. La dotación de trabajadores de la refinería se detalla a continuación.

Tabla 6 - Dotación de personal refinería CHQ de acuerdo turno.

| Dotación por turno       | Unidad           | 2017       |
|--------------------------|------------------|------------|
| Operadores 6x1 6x2 6x3   | #Personas        | 84         |
| Mantenedores 6x1 6x2 6x3 | #Personas        | 45         |
| Supervisores y otros 4x3 | #Personas        | 68         |
| <b>TOTAL DOTACIÓN</b>    | <b>#Personas</b> | <b>197</b> |
| Dotación de terceros     | #Personas        | 95         |

De la tabla 6, el enfoque se realizará en los operadores 6x1 6x2 6x3, ya que, parte de ellos son los responsables para realizar la inspección de corto circuito que se realiza por turno todos los días. En este sentido el desglose de costo por operador se detalla a continuación.

Tabla 7 - Costo unitario operadores

|                                              |        |
|----------------------------------------------|--------|
| Operadores 6x1 6x2 6x3                       | 84     |
| Costos Operadores (Miles USD)/año            | 12.792 |
| Costo unitario operadores (Miles de USD)/año | 152    |

Según lo presentado en la tabla anterior por cada operador se tiene un costo unitario de 152.000 USD anuales. Lo anterior significa que por cada cuadrilla de inspección de 5 operadores tiene un costo de 760.000 USD anuales.

## 7.2 Escenario con tecnología Térmica

De acuerdo a los datos recopilados desde el piloto realizado en la refinería, y según lo capturado por la cámara térmica los sensores necesarios para escalar hacia la totalidad de celdas operativas en la refinería (1.300 celdas actualmente) son las siguientes.

*Tabla 8 - Sensores iMAT escalamiento al total de la refinería*

|                         |      |         |
|-------------------------|------|---------|
| Alcance cámara iMAT     | 8    | celdas  |
| Total celdas operativas | 1300 | celdas  |
| Total Cámaras iMAT      | 163  | cámaras |

La inversión inicial considerando una compra de un 10% de sensores de repuestos es la siguiente.

*Tabla 9 - inversión inicial*

|                                |            |     |
|--------------------------------|------------|-----|
| Costo unitario Sensor térmico  | \$ 4.500   | USD |
| Cantidad de sensores térmicos  | 160        | -   |
| Cantidad de sensores Repuestos | 16         | -   |
| Total Sensores térmicos        | 176        | -   |
| Inversión inicial              | \$ 792.000 | USD |

El mantenimiento de la solución considera dos ítems, un mantenimiento por parte de la empresa externa que se adjudique la licitación correspondiente y un mantenimiento por parte de la refinería, la cual a su vez también posee una empresa externa que posee un contrato de mantenimiento amplio en la refinería.

*Tabla 10 - Costos Mantenimiento anual de la solución.*

|                                                                |            |     |
|----------------------------------------------------------------|------------|-----|
| Costo mantenimiento externo por sensor térmico                 | \$ 500     | USD |
| Total costo mantenimiento externo (empresa proveedora) por año | \$ 80.000  | USD |
| Costo mantenimiento interno por sensor térmico                 | \$ 3.000   | USD |
| Total costo mantenimiento interno por año                      | \$ 480.000 | USD |

Lo anterior, reflejado en la tabla 9, se grafica en la siguiente figura.

## DISTRIBUCION DE COSTOS DE LA SOLUCIÓN TÉRMICA

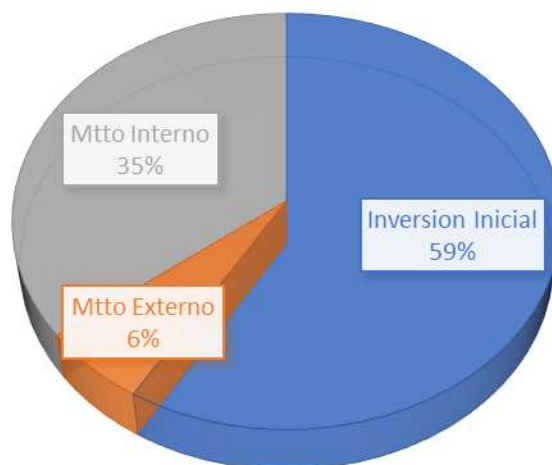


Figura 42 - Distribución de costos (Elaboración propia)

## DISTRIBUCION DE COSTOS DE MANTENIMIENTO EN EL TIEMPO

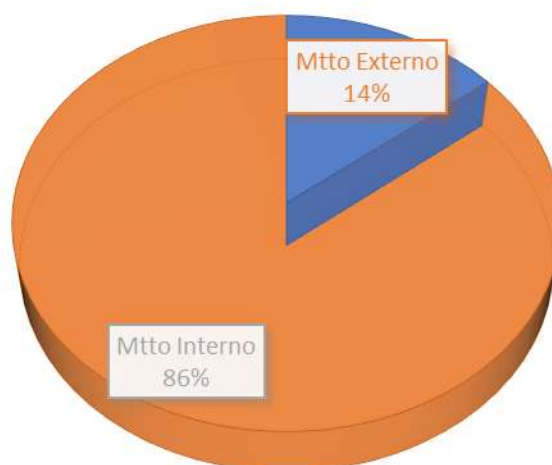


Figura 43 - Distribución de costos de Mantenimiento por año.

Durante el piloto realizado en la refinería, no se realizó un mantenimiento del sistema en uso, sino más bien hubieron arreglos menores a las fijaciones del equipo que se debieron realizar a los sensores instalados durante la prueba y en base a eso se ha determinado el valor de un mantenimiento de un sistema térmico 100% implementado en la nave electrolítica.

### 7.3 Escenario con tecnología Térmica

De acuerdo con los resultados obtenidos en el piloto, el sistema de tecnología térmica para detección de corto circuitos es capaz de disminuir la horas-hombre de inspección en un 18% debido a la detección temprana y mejor planificación del recorrido de las cuadrillas, esto se traduce en 97 horas disponibles para otros trabajos.

El otro resultado destacable es la determinación que solo el 52% de los cortos detectados fue correctamente eliminado, con lo cual, en el escenario actual, deberían pasar un par de días antes de volver a repasar el corto circuito. Con la implementación de este sistema térmico, se podría volver inmediatamente o dentro del turno a eliminar nuevamente el corto. Con esto se espera que la eficiencia de corriente del proceso aumente debido a que la pérdida actual debido a corto circuito, que equivale a un 1,2% del global de eficiencia se reduzca, según apreciaciones de la refinería, a cerca de un 0,5%.

Con lo anterior se estiman los beneficios, tanto en HH como en eficiencia de corriente, esto ultimo se traduce en toneladas de cobre depositadas.

| <b>BENEFICIOS POR HORA HOMBRE</b>        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Item</b>                              | <b>Caso Base</b>   | <b>Año1</b>        | <b>Año2</b>        | <b>Año3</b>        | <b>Año4</b>        | <b>Año5</b>        | <b>Año 6</b>       | <b>Año 7</b>       |
| N° de Trabajadores por inspección/Turno  | 5                  | 5                  | 5                  | 5                  | 5                  | 5                  | 5                  | 5                  |
| N° de Turnos/día                         | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  |
| N° operadores reemplazo                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  | 4                  |
| Total de trabajadores por inspección/día | 24                 | 24                 | 24                 | 24                 | 24                 | 24                 | 24                 | 24                 |
| Costo empresa por operador (USD\$/año)   | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          | \$120.000          |
| Horas de trabajo por turno               | 8                  | 8                  | 8                  | 8                  | 8                  | 8                  | 8                  | 8                  |
| Números de días trabajados por año       | 360                | 360                | 360                | 360                | 360                | 360                | 360                | 360                |
| HH Totales al año                        | 69.120             | 56.678             | 56.678             | 56.678             | 56.678             | 56.678             | 56.678             | 56.678             |
| Costo total por año HH en inspección     | <b>\$2.880.000</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> | <b>\$2.361.600</b> |
| <b>Ahorro por HH (Caso base actual)</b>  | <b>\$0</b>         | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   | <b>\$518.400</b>   |

Tabla 11 - Ahorro por operadores

| <b>BENEFICIOS POR EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>                    |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                      |
|----------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Item</b>                                                    | <b>Caso base</b>    | <b>Año 1</b>        | <b>Año 2</b>        | <b>Año 3</b>        | <b>Año 4</b>        | <b>Año 5</b>        | <b>Año 6</b>        | <b>Año 7</b>         |
| Producción Ton Cu/Año                                          | 412.800             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000              |
| Consumo Específico de energía (CEE) KWh/Ton Cu                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                  |
| Eficiencia Energética (%)                                      | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                  |
| Costo USD/KWh                                                  | \$ 0,102            | \$ 0,105            | \$ 0,108            | \$ 0,111            | \$ 0,115            | \$ 0,118            | \$ 0,122            | \$ 0,125             |
| <b>Costo Energía Refinería USD</b>                             | <b>\$13.158.000</b> | <b>\$12.475.875</b> | <b>\$12.850.151</b> | <b>\$13.235.656</b> | <b>\$13.632.725</b> | <b>\$14.041.707</b> | <b>\$14.462.958</b> | <b>\$ 14.896.847</b> |
|                                                                |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                      |
| Perdida de Eficiencia eléctrica (%)                            | 4%                  | 4%                  | 4%                  | 4%                  | 4%                  | 4%                  | 4%                  | 4%                   |
| Perdidas por corto circuito (%)                                | 30%                 | 30%                 | 30%                 | 30%                 | 30%                 | 30%                 | 30%                 | 30%                  |
| Perdida global por corto circuito (%)                          | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                | 1,2%                 |
| %Reducción de ciclo de detección de CC con sistema térmico (%) | -                   | 40%                 | 50%                 | 50%                 | 50%                 | 50%                 | 50%                 | 50%                  |
| Perdida global por corto circuito (%) con sistema térmico      | -                   | 0,5%                | 0,6%                | 0,6%                | 0,6%                | 0,6%                | 0,6%                | 0,6%                 |
| Perdida de Eficiencia eléctrica (%) con sistema térmico        | -                   | 3,5%                | 3,4%                | 3,4%                | 3,4%                | 3,4%                | 3,4%                | 3,4%                 |
| Eficiencia Energética (%) con sistema térmico                  | -                   | 96,5%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%                |
| <b>Costo Energía Refinería USD</b>                             | -                   | <b>\$12.413.806</b> | <b>\$12.770.337</b> | <b>\$13.153.447</b> | <b>\$13.548.050</b> | <b>\$13.954.492</b> | <b>\$14.373.126</b> | <b>\$ 14.804.320</b> |
| <b>Ahorro USD en energía</b>                                   | -                   | <b>\$ 62.069</b>    | <b>\$ 79.815</b>    | <b>\$ 82.209</b>    | <b>\$ 84.675</b>    | <b>\$ 87.216</b>    | <b>\$ 89.832</b>    | <b>\$ 92.527</b>     |

Tabla 12 - Ahorro por eficiencia eléctrica

| <b>BENEFICIOS EN RECUPERACIÓN DE COBRE</b>               |                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                      |
|----------------------------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Item</b>                                              | <b>Caso base</b> | <b>Año 1</b>        | <b>Año 2</b>        | <b>Año 3</b>        | <b>Año 4</b>        | <b>Año 5</b>        | <b>Año 6</b>        | <b>Año 7</b>         |
| Producción Ton Cu/Año                                    | 412.800          | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000             | 380.000              |
| Consumo Específico de energía (CEE) KWh/Ton Cu           | 300              | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                 | 300                  |
| Eficiencia Energética (%)                                | 96%              | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                 | 96%                  |
| KWh anual                                                | 129.000.000      | 118.750.000         | 118.750.000         | 118.750.000         | 118.750.000         | 118.750.000         | 118.750.000         | 118.750.000          |
| Eficiencia Energética (%) con sistema térmico            | -                | 96,5%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%               | 96,6%                |
| KWh anual con sistema térmico                            | -                | 118.159.204         | 118.012.422         | 118.012.422         | 118.012.422         | 118.012.422         | 118.012.422         | 118.012.422          |
| Ahorro en KWh                                            | -                | 590.796             | 737.578             | 737.578             | 737.578             | 737.578             | 737.578             | 737.578              |
| Ton de Cu recuperables por eficiencia de corriente       | -                | 1.969               | 2.459               | 2.459               | 2.459               | 2.459               | 2.459               | 2.459                |
| USD promedio ton Cu                                      | -                | 9.500               | 9.500               | 9.500               | 9.500               | 9.500               | 9.500               | 9.500                |
| <b>USD por Cu recuperado por eficiencia de corriente</b> | -                | <b>\$18.708.541</b> | <b>\$23.356.625</b> | <b>\$23.356.625</b> | <b>\$23.356.625</b> | <b>\$23.356.625</b> | <b>\$23.356.625</b> | <b>\$ 23.356.625</b> |

Tabla 13 - Beneficios en recuperación de cobre

| <b>BENEFICIOS TOTALES CON SISTEMA TÉRMICO</b>     |                  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                      |
|---------------------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Item</b>                                       | <b>Caso base</b> | <b>Año 1</b>        | <b>Año 2</b>        | <b>Año 3</b>        | <b>Año 4</b>        | <b>Año 5</b>        | <b>Año 6</b>        | <b>Año 7</b>         |
| Beneficios por HH (Caso base actual)              | -                | \$ 518.400          | \$ 518.400          | \$ 518.400          | \$ 518.400          | \$ 518.400          | \$ 518.400          | \$ 518.400           |
| Beneficios USD en energía                         | -                | \$ 62.069           | \$ 79.815           | \$ 82.209           | \$ 84.675           | \$ 87.216           | \$ 89.832           | \$ 92.527            |
| USD por Cu recuperado por eficiencia de corriente | -                | \$18.708.541        | \$23.356.625        | \$23.356.625        | \$23.356.625        | \$23.356.625        | \$23.356.625        | \$ 23.356.625        |
| <b>Beneficios totales con sistema térmico USD</b> | -                | <b>\$19.289.010</b> | <b>\$23.954.840</b> | <b>\$23.957.234</b> | <b>\$23.959.701</b> | <b>\$23.962.241</b> | <b>\$23.964.857</b> | <b>\$ 23.967.552</b> |

Tabla 14 - Beneficios Totales USD

Con el detalle de los costos y beneficios del sistema térmico es posible realizar el análisis correspondiente de la solución.

**EVALUACIÓN DE BENEFICIOS - IMAT - REFINERÍA DCHQ**

En USD

|                                                         | Año 0 | Año 1      | Año 2      | Año 3      | Año 4      | Año 5      | Año 6      | Año 7      | TOTAL       |             |
|---------------------------------------------------------|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| BENEFICIOS                                              |       | 19.289.010 | 23.954.840 | 23.957.234 | 23.959.701 | 23.962.241 | 23.964.857 | 23.967.552 | 163.055.435 |             |
| Beneficios por HH USD                                   |       | 518.400    | 518.400    | 518.400    | 518.400    | 518.400    | 518.400    | 518.400    | 3.628.800   |             |
| Beneficios por eficiencia energ. (↓ cantidad de CC) USD |       | 62.069     | 79.815     | 82.209     | 84.675     | 87.216     | 89.832     | 92.527     | 578.343     |             |
| Beneficios por Cu recuperado USD                        |       | 18.708.541 | 23.356.625 | 23.356.625 | 23.356.625 | 23.356.625 | 23.356.625 | 23.356.625 | 158.848.292 |             |
|                                                         |       |            |            |            |            |            |            |            |             |             |
| Inversión solución imat                                 | -     | 1.792.000  | - 580.000  | - 580.000  | - 580.000  | - 580.000  | - 580.000  | - 580.000  | - 5.852.000 |             |
| Inversión inicial                                       |       | 792.000    |            | -          | -          | -          | -          | -          | 792.000     |             |
| Valor anual por renovación                              | -     |            | 20.000     | 20.000     | 20.000     | 20.000     | 20.000     | 20.000     | 140.000     |             |
| Implementación                                          |       | 1.000.000  |            |            |            |            |            |            | 1.000.000   |             |
| Mantenimiento interno                                   | -     |            | 480.000    | 480.000    | 480.000    | 480.000    | 480.000    | 480.000    | 3.360.000   |             |
| Mantenimiento externo                                   | -     |            | 80.000     | 80.000     | 80.000     | 80.000     | 80.000     | 80.000     | 560.000     |             |
|                                                         |       |            |            |            |            |            |            |            |             |             |
| FCN (USD\$)                                             | -     | 1.792.000  | 18.709.010 | 23.374.840 | 23.377.234 | 23.379.701 | 23.382.241 | 23.384.857 | 23.387.552  | 157.203.435 |

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| TIR            | 1066,4%         |
| VAN M\$USD     | \$97.987.944,37 |
| Tasa Descuento | 10,0%           |

Tabla 15 - VAN Solución Térmica escenario ideal.

### EVALUACIÓN DE BENEFICIOS - IMAT - REFINERÍA DCHQ

En USD

|                                                         | Año 0 | Año 1     | Año 2   | Año 3   | Año 4   | Año 5   | Año 6   | Año 7   | TOTAL     |           |           |
|---------------------------------------------------------|-------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| BENEFICIOS                                              |       | 580.469   | 598.215 | 600.609 | 603.075 | 605.616 | 608.232 | 610.927 | 4.207.143 |           |           |
| Beneficios por HH USD                                   |       | 518.400   | 518.400 | 518.400 | 518.400 | 518.400 | 518.400 | 518.400 | 3.628.800 |           |           |
| Beneficios por eficiencia energ. (↓ cantidad de CC) USD |       | 62.069    | 79.815  | 82.209  | 84.675  | 87.216  | 89.832  | 92.527  | 578.343   |           |           |
| Beneficios por Cu recuperado USD                        |       | -         | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -         |           |           |
| Inversión solución imat                                 | -     | 1.792.000 | -       | 580.000 | -       | 580.000 | -       | 580.000 | -         | 5.852.000 |           |
| Inversión inicial                                       |       | 792.000   |         | -       |         | -       |         | -       |           | 792.000   |           |
| Valor anual por renovación                              | -     |           | 20.000  | 20.000  | 20.000  | 20.000  | 20.000  | 20.000  |           | 140.000   |           |
| Implementación                                          |       | 1.000.000 |         |         |         |         |         |         |           | 1.000.000 |           |
| Mantenimiento interno                                   | -     |           | 480.000 | 480.000 | 480.000 | 480.000 | 480.000 | 480.000 |           | 3.360.000 |           |
| Mantenimiento externo                                   | -     |           | 80.000  | 80.000  | 80.000  | 80.000  | 80.000  | 80.000  |           | 560.000   |           |
| FCN (USD\$)                                             | -     | 1.792.000 | 469     | 18.215  | 20.609  | 23.075  | 25.616  | 28.232  | 30.927    | -         | 1.644.857 |

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| TIR            | -37,1%          |
| VAN M\$USD     | \$-1.543.239,67 |
| Tasa Descuento | 10,0%           |

Tabla 16 - VAN Solución Térmica sin recuperación de cobre.

**EVALUACIÓN DE BENEFICIOS - IMAT - REFINERÍA DCHQ**

En USD

|                                                         | Año 0 | Año 1             | Año 2             | Año 3             | Año 4             | Año 5             | Año 6             | Año 7             | TOTAL              |                    |
|---------------------------------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| <b>BENEFICIOS</b>                                       |       | <b>19.226.941</b> | <b>23.875.025</b> | <b>23.875.025</b> | <b>23.875.025</b> | <b>23.875.025</b> | <b>23.875.025</b> | <b>23.875.025</b> | <b>162.477.092</b> |                    |
| Beneficios por HH USD                                   |       | 518.400           | 518.400           | 518.400           | 518.400           | 518.400           | 518.400           | 518.400           | <b>3.628.800</b>   |                    |
| Beneficios por eficiencia energ. (↓ cantidad de CC) USD |       | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                  |                    |
| Beneficios por Cu recuperado USD                        |       | 18.708.541        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | <b>158.848.292</b> |                    |
|                                                         |       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |
| <b>Inversión solución imat</b>                          | -     | <b>1.792.000</b>  | -                 | <b>580.000</b>    | -                 | <b>580.000</b>    | -                 | <b>580.000</b>    | -                  | <b>5.852.000</b>   |
| Inversión inicial                                       |       | 792.000           |                   | -                 |                   | -                 |                   | -                 |                    | <b>792.000</b>     |
| Valor anual por renovación                              | -     |                   | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            |                    | <b>140.000</b>     |
| Implementación                                          |       | 1.000.000         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    | <b>1.000.000</b>   |
| Mantenimiento interno                                   | -     |                   | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           |                    | <b>3.360.000</b>   |
| Mantenimiento externo                                   | -     |                   | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            |                    | <b>560.000</b>     |
|                                                         |       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |
| <b>FCN (USD\$)</b>                                      | -     | <b>1.792.000</b>  | <b>18.646.941</b> | <b>23.295.025</b> | <b>23.295.025</b> | <b>23.295.025</b> | <b>23.295.025</b> | <b>23.295.025</b> |                    | <b>156.625.092</b> |

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| TIR            | 1062,9%         |
| VAN M\$USD     | \$97.629.461,68 |
| Tasa Descuento | 10,0%           |

Tabla 17 - VAN Sistema Térmico escenario sin recuperación de eficiencia energética

**EVALUACIÓN DE BENEFICIOS - IMAT - REFINERÍA DCHQ**

En USD

|                                                         | Año 0 | Año 1             | Año 2             | Año 3             | Año 4             | Año 5             | Año 6             | Año 7             | TOTAL              |                    |
|---------------------------------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| <b>BENEFICIOS</b>                                       |       | <b>18.770.610</b> | <b>23.436.440</b> | <b>23.438.834</b> | <b>23.441.301</b> | <b>23.443.841</b> | <b>23.446.457</b> | <b>23.449.152</b> | <b>159.426.635</b> |                    |
| Beneficios por HH USD                                   |       | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                  |                    |
| Beneficios por eficiencia energ. (↓ cantidad de CC) USD |       | 62.069            | 79.815            | 82.209            | 84.675            | 87.216            | 89.832            | 92.527            | <b>578.343</b>     |                    |
| Beneficios por Cu recuperado USD                        |       | 18.708.541        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | 23.356.625        | <b>158.848.292</b> |                    |
| <b>Inversión solución imat</b>                          | -     | <b>1.792.000</b>  | -                 | <b>580.000</b>    | -                 | <b>580.000</b>    | -                 | <b>580.000</b>    | -                  | <b>5.852.000</b>   |
| Inversión inicial                                       |       | 792.000           |                   | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 |                    | <b>792.000</b>     |
| Valor anual por renovación                              | -     | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            | 20.000            |                    | <b>140.000</b>     |
| Implementación                                          |       | 1.000.000         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    | <b>1.000.000</b>   |
| Mantenimiento interno                                   | -     | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           | 480.000           |                    | <b>3.360.000</b>   |
| Mantenimiento externo                                   | -     | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            | 80.000            |                    | <b>560.000</b>     |
| <b>FCN (USD\$)</b>                                      | -     | <b>1.792.000</b>  | <b>18.190.610</b> | <b>22.856.440</b> | <b>22.858.834</b> | <b>22.861.301</b> | <b>22.863.841</b> | <b>22.866.457</b> | <b>22.869.152</b>  | <b>153.574.635</b> |

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| TIR            | 1038,0%         |
| VAN M\$USD     | \$95.693.591,35 |
| Tasa Descuento | 10,0%           |

Tabla 18 - VAN Sistema Térmico escenario sin reducción de HH

De acuerdo con el análisis anterior queda claro que la única forma de que la solución sea rentable es mediante recuperación de cobre gracias al aumento de eficiencia de corriente.

Por tanto, el análisis de sensibilidad de la efectividad del proyecto es dependiente del aumento en recuperación de cobre de acuerdo con un aumento de eficiencia de corriente.

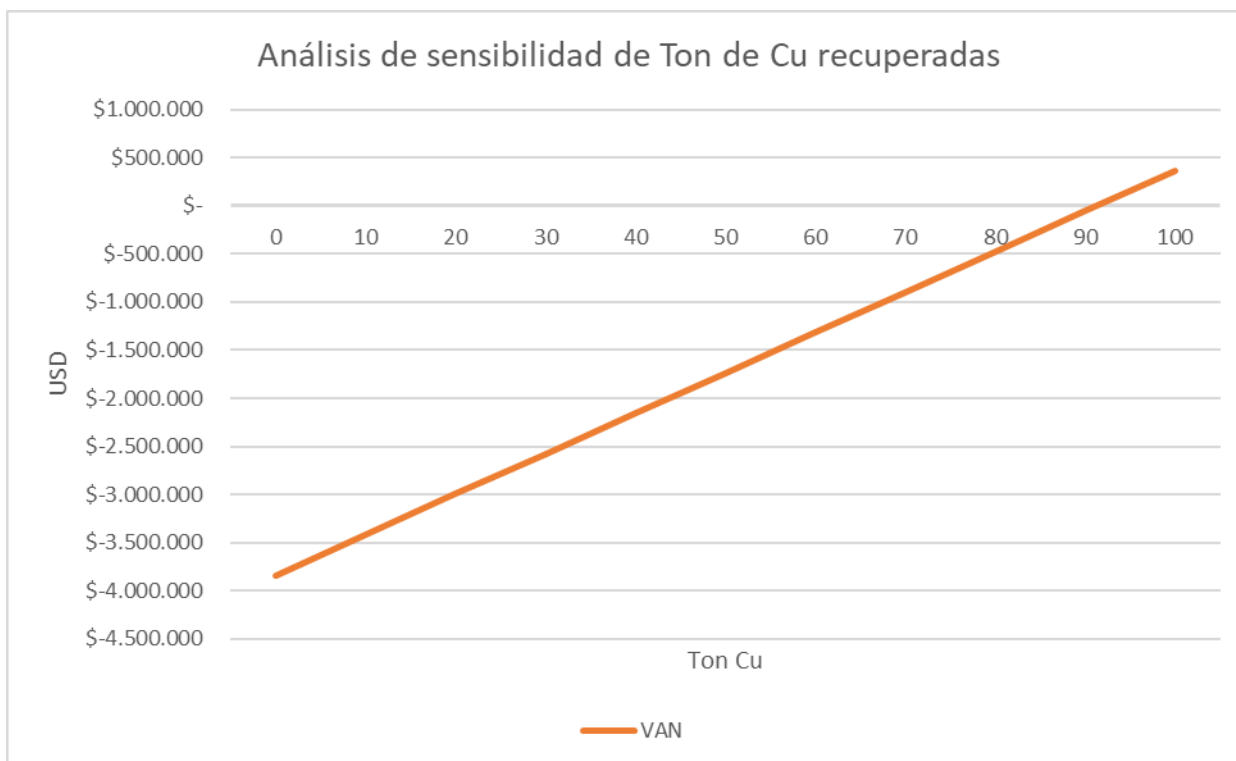


Figura 44 - Análisis de sensibilidad del VAN

## 8. Conclusiones

De acuerdo con lo presentado en el presente trabajo, los corto circuitos son una de las principales causas de la baja en la eficiencia de corriente en el proceso de electro refinación de cobre. Actualmente su detección se realiza a través de pistolas térmicas manuales, las cuales las maneja una cuadrilla de inspección de 5 personas por turno.

La necesidad de poder automatizar la inspección y detección temprana de corto circuitos en el proceso hizo a la refinería pasar por varias tecnologías en un roadmap tecnológico, antes de determinar que un sistema térmico autónomo aparece en el horizonte cercano como la solución mas factible.

El sistema térmico de detección temprana de corto circuitos impacta en 3 pilares esenciales al proceso. El primero de ellos es en horas hombre, el segundo es en un aumento de eficiencia de corriente, y, finalmente, en una posibilidad de aumentar la producción de cobre.

Económicamente hablando, en un horizonte de 7 años, la única manera del que el sistema de detección temprana de corto circuitos sea rentable es aumentando las toneladas producidas. Actualmente la refinería posee una ocupación operativa de un 86,5%. Desde el punto de vista económico y de acuerdo con el análisis de sensibilidad correspondiente, el principal efecto sobre los costos del sistema y su viabilidad financiera, recaen en un aumento de producción. Lo anterior se traduce en un aumento de cobre catódico grado A producido. A un horizonte de 7 años, esto se traduce en casi 630 toneladas más de cobre catódico grado A producidos.

Desde el punto de vista de horas hombre y eficiencia de corriente, el sistema no es viable desde el punto de vista financiero.

Finalmente, se ve una tremenda oportunidad de cambiar una practica arraigada en la operación, como son las cuadrillas de inspección, un cambio de paradigma y una implementación de tecnologías que apuntan hacia la llamada industria 4.0.

## Bibliografía

- (COCHILCO), N. C. (2018). *Cochilco/Data bases/ Mining exportations*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Exportaciones-Mineras.aspx>
- Aggarwal, C. (2013). *Outliers Analysis*. New York: Springer.
- Barnet, V., & Lewis, T. (1994). *Outliers in Statistical Data*. USA: John Wiley.
- Bell, D. (1976). *The coming of Post-Industrial Society a venture in social forecasting*. Harmondsworth: Peregrine.
- Brachman, R. J., & Anand, T. (1996). *The Process of Knowledge Discovery in Databases*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees*. Belmont, California: Wadsworth International Group.
- Breunig, M., Kriegel, H., NG, R., & Sander, J. (2000). LOF: Identifying Density-Based local Outliers. *ACM SIGMOD Conference*.
- Budevski, E. (s.f.). Electrocrystallization Nucleation and growth phenomena. En *Electrochimica Acta* 45 (págs. 2559-2547).
- Cáceres, G. (2007). *Hidrometalurgia y Electrometalurgia*. Universidad de Atacama.
- Chapman, P. (2000). *CRISP-DM Step by step data mining guide*.
- Cochilco. (14 de 11 de 2018). *Corporación Chilena del Cobre - Base de datos*. Obtenido de [http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/index/index.jsf;jsessionid=aqGbw\\_iyWazwyU1Su7ShhraDNfzMsP0F85kSDCeX.webcochilco](http://www.cochilco.cl:4040/boletin-web/pages/index/index.jsf;jsessionid=aqGbw_iyWazwyU1Su7ShhraDNfzMsP0F85kSDCeX.webcochilco)
- Codata. (s.f.). <http://www.codata.info/resources/databases/key1.html>.
- CODELCO. (2015). *Procesos de electro refinación aplicados*. Calama.
- Cristianini, N., & Shawe-Taylor, J. (2000). *An Introduction to Support vector Machines*. Cambridge university Press.
- Cuadras, M. C. (2018). *Nuevos metodos multivariados*. Barcelona: CMC Editions.
- De'ath, G., & Fabricius, K. (2000). Classification and Regression Trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*, 3178 - 3192.
- Deconinck, E., Zhang, M., Coomans, D., & Heyden, Y. (2006). Classification Tree Models for the prediction of blood-brain barrier passage drugs. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1410 - 1419.
- Despic, A. (1983). *Deposition and Dissolution of Metals and Alloys. Part B: Mechanisms, Kinetics, Texture and Morphology*. NY: Plenum Press.
- Fayyad, M. (1996). *Advances in Knowledge Discovery and data Mining*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Gómez-Biedma, S. (2002). Análisis electroquímico. *SciElo*, 5-6.
- Grágeda, M. (2007). *Diseño, desarrollo experimental y modelación matemática de una celda de electro obtención de cobre basada en edr y caracterización físico-química del electro depósito*. Santiago: Universidad de Chile.
- Group, I. C. (2018). *The World Copper Factbook*. Portugal.
- Hammarstrom, J. M. (2014). *USGS Global Mineral Resource Assessment Team*. Obtenido de <http://minerals.usgs.gov/global/>
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (1990). *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC.
- Hawkins, D. (1980). *Identifiication of Outliers*. Chapman & Hall.
- Herbé, A., & Williams, L. (2010 Volumen 2). Principal Component Analysis. *Computer Statistics*, 433 - 459.
- ICSG. (2018). *ICSG Directory of Copper Mines and Plants H1 Edition*.
- ICSG, I. (2018). *Directory of Copper Mines and Plants*. Lisbon: ICSG.
- ICSG, I. (2018). *The world copper factbook*. Lisbon: ICSG.
- ICSG, I. (2018a). *The world copper factbook*. Lisbon: ICSG.
- ICSG, I. (2018b). *Directory of Copper Mines and Plants*. Lisbon: ICSG.
- Kenneally, C. J., Busch, G. A., & Gansmuller, E. W. (1998). *US Patente n° 6965043B1*.
- lukomska, A., & Slominski, S. (2001). "Adsorption of thiourea on monocrystalline copper electrodes". *Electrochimica Acta*. 46, 3111 - 3117.

- MacQueen, J. (1967). Some Method for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 281 - 297.
- Muñoz G., J., & Uribe, I. (2013). Técnicas para detección de outliers Multivariables. *Telecomunicaciones e Informática*, 11-25.
- Papadimitrou, S., Kitagawa, H., Gibbons, P., & Faloutsos, C. (2003). Fast Outlier Detection using the Local Correlation Integral. *International conference of Data Engineering (ICDE)*. Bangalore.
- Paunovic, M. (2006). *Fundamentals of Electrochemical Deposition*. New York: John Wiley & Sons.
- Reents, B., & Plieth, W. (1998). "Influence of Thiourea on Silver deposition: Spectroscopic investigación". *Journal of Electroanalytical Chemistry* 453, 121 - 127.
- Rouaud, M. (2013). *Probability, Statistics and Estimation*.
- Ruiz, B. (2018). *CONTROL DE CONCENTRACIÓN DE CLORURO EN ELECTROLITO DE ELECTROOBTENCIÓN MEDIANTE EL USO DE CELDA DE SACRIFICIO*. Valparaíso: USM.
- Santos, M., & Azevedo, C. (2005). *Data Mining, Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados*. FCA Publisher.
- Schlesinger, M., King, M., Sole, K., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier.
- SCHREBLER ARRATIA, R., AROS MENESES, H., SCHREBLER GUZMAN, R., & CARLES JARA, C. (2012). USE OF POLYETHYLENE GLYCOL AS ORGANIC ADDITIVE IN COPPER ELECTRODEPOSITION OVER STAINLESS STEEL CATHODES. *Latin American Applied Research*, 371-376.
- Segura, J. (2005). *Estudio experimental y modelación de la formación de electro depósitos de cobre*. Santiago: Universidad de Chile.
- Simon, N., Friedman, J., & Hastie, T. (2013). A Blockwise Descent Algorithm for Group-penalized Multiresponse and Multinomial Regression. *Journal of Statistics Software*, 2 - 11.
- Taylor, J. (17 de 06 de 2018). *Decision Management Solutions*. Obtenido de <http://www.decisionmanagementsolutions.com/wp-content/uploads/2018/07/CRISP-DM-and-Decision-Management-061718.pdf>
- Tufféry, S. (2011). *Data mining and Statistics for Decision Making*. WILEY.
- USGS. (2017). *USGS MINERALS*. Obtenido de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcsapp2017.pdf>
- Vidal, R., Ma, Y., & Sastry, S. (2003). *Generalized Principal Component Analysis*. London: Springer.
- Wastavino, G. (2021). *Informe SIP*. Calama: Codelco.
- Winand, R. (1992). *Electrocrystallization – Theory and applications*.
- Wolfgang, F. (1971). *Cinética Electroquímica*. Buenos Aires: Editorial universitaria de Buenos Aires.

## 9. Anexo A

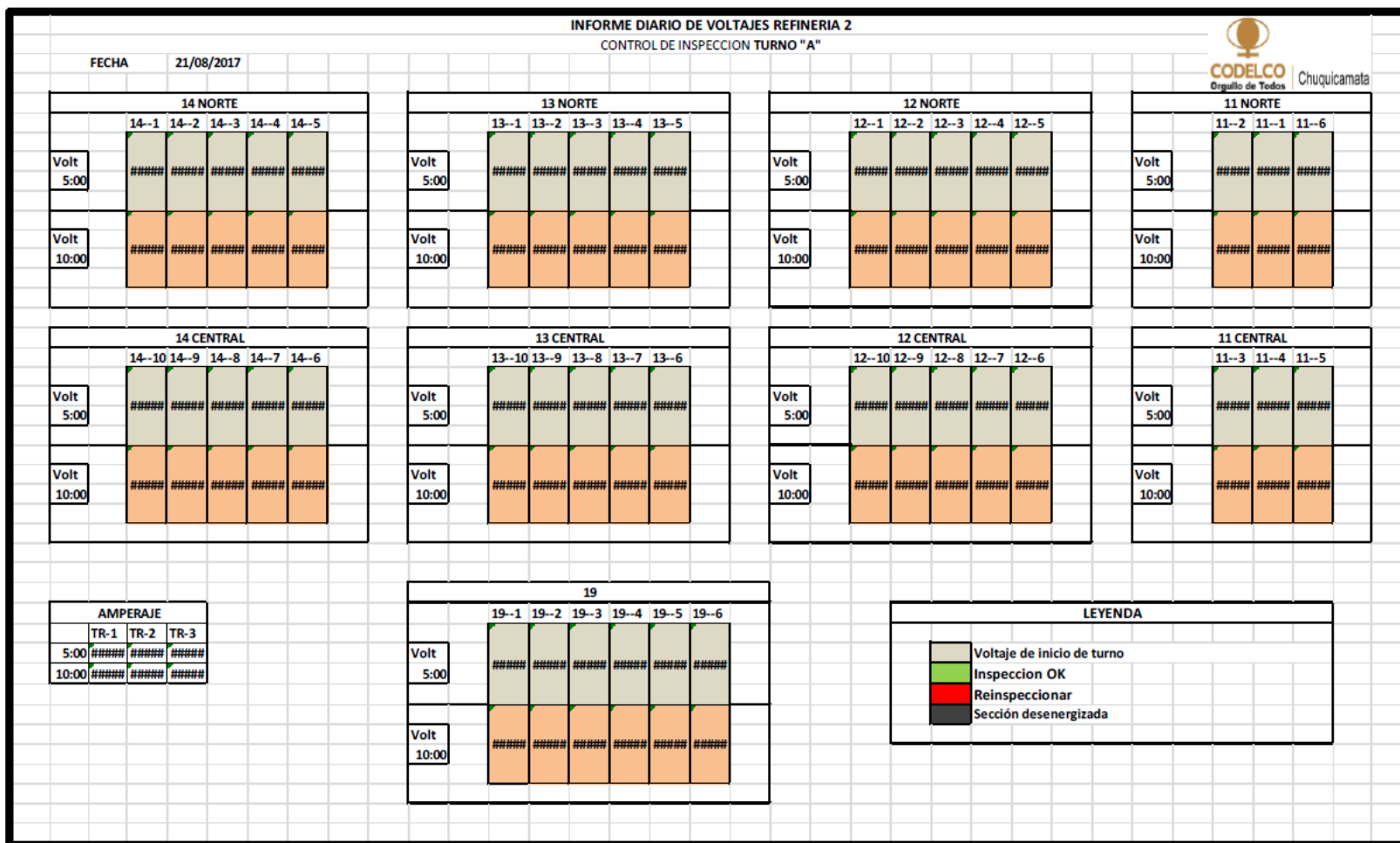


Figura 45 - Esquema Refinería DCH