

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

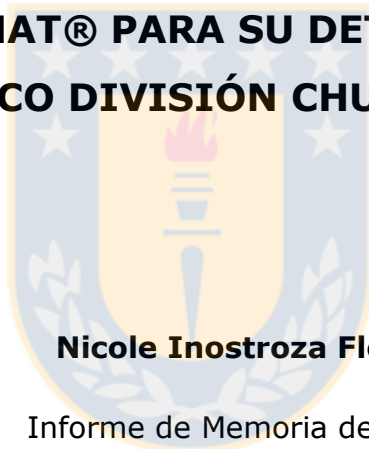
Profesor Patrocinante:

**Froilán Vergara.**

Ingeniero Supervisor:

**Sr. Jaime Contreras.**

**ANÁLISIS MULTIVARIABLE DE GENERACIÓN DE  
CORTOCIRCUITOS Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE  
TECNOLOGIA MAT® PARA SU DETECCIÓN TEMPRANA,  
CODELCO DIVISIÓN CHUQUICAMATA**



**Nicole Inostroza Flores**

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

**Ingeniero Civil Metalúrgico**

Noviembre 2017

## RESUMEN

Los cortocircuitos (CC) son eventos no deseados en refinerías (ER) e inducen a pérdidas de energía e interrupciones locales en la producción. Su detección y eliminación temprana se hace necesaria y la refinería Chuquicamata no escapa a lo anterior.

Se realizó un análisis multivariable de una base de datos de 9 meses del año 2015 (abril-diciembre) para identificar las principales causas de generación de CC y se evaluó la incorporación de una nueva tecnología que tiene como objetivo su detección temprana. Del análisis se identificaron tres variables relevantes que influyeron en la generación de CC durante el periodo considerado, estos son, la densidad de corriente, la calidad de los ánodos Chuquicamata (CCC) y la relación entre la concentración de bismuto ( $\text{Bi}^{+3}$ ) y cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ). La densidad de corriente es la variable más fuerte que incide en los CC y lo hace de manera directamente proporcional, es decir, al aumentar la densidad de corriente cerca de los 311 A/m<sup>2</sup> se acelera el crecimiento del depósito y ante una zona con menor resistencia crecerá rápidamente un nódulo hasta formar un CC. La sobredimensión de los ánodos CCC, impide que se logre la distancia inter-electródica apropiada entre los electrodos, teniendo menos resistencia en algunas zonas y favoreciendo así la generación de CC. La concentración de  $\text{Bi}^{+3}$  y  $\text{Cu}^{+2}$  en el electrolito tiene una fuerte relación con los CC, al aumentar la concentración de  $\text{Bi}^{+3}$  es necesario que la concentración de  $\text{Cu}^{+2}$  se mantenga sobre los 45g/L para que los CC se mantengan bajos.

Para mantener una alta eficiencia de corriente y bajo consumo de energía, es fundamental la detección y eliminación temprana de los CC, por lo que la Refinería Chuquicamata desea incorporar una nueva tecnología llamada MAT®, cuya función principal es la detección automatizada de CC disminuyendo el tiempo de permanencia del CC y por ende, mejorar la eficiencia de corriente. Se realizó una evaluación preliminar a nivel industrial de los prototipos MAT® obteniendo efectividad en la detección e identificación de los CC durante los primeros dos ciclos catódicos, luego la tela sufre alteraciones (quemaduras y pérdida de funcionalidad del pigmento), por lo que es necesario continuar probando materiales más resistentes para que pueda ser utilizada en la nave.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi madre Jaquelinne Flores quien ha sido mi pilar y mi ejemplo a seguir. Con su amor, alegría, sabiduría y el permanente apoyo me ha hecho sentir la hija más afortunada. Agradezco todo tu esfuerzo para darme siempre lo mejor. Gracias a mi abuelita Ana Muñoz Castro que con su amor, paciencia y comprensión siempre estuvo a mi lado para aconsejarme, darme su apoyo y regalarme con su magnífica habilidad en la cocina. Y gracias a mi tío Alejandro Flores que con inteligencia y sabiduría me ha fomentado la iniciativa para crecer tanto en lo profesional como en lo personal.

A mis grandes amigos, Silvana, Valentina, Camila, Tania, Paola, Sebastián, Nicolás, entre otros, gracias por acompañarme durante este camino, no pude encontrar a mejores personas para compartir la etapa universitaria y generar lazos de amistad que aún perduran. Gracias por apoyarme en los buenos y malos momentos y por ser de mi vida más feliz.

A mi tutor en la División, Jaime Contreras, por su preocupación, dedicación y por hacerme sentir parte importante en el grupo de trabajo. Al jefe de turno de la SIP Owen Álvarez, quien brindo su apoyo incondicional y la chispa de alegría el día a día en la planta, al igual que el equipo de trabajo de la SIP quien me recibió con gran amabilidad y disponibilidad.

A Richard y Pamela, con quienes cree un círculo de confianza y apoyo, haciendo la experiencia como memorista mucho más grata, en especial a Manual Duran en quien encontré un gran amigo. También a Luis Pérez de Innovaxxion gracias por guiarme en el desarrollo de mi memoria.

A mi tutor de la Universidad Froilán Vergara, por su compromiso, dedicación y apoyo para poder culminar mi proceso de titulación.

A la empresa CODELCO, por darme la oportunidad de finalizar mi etapa universitaria en esta gran escuela.

## **NOMENCLATURA**

C.E.E : Consumo específico de energía [kWh/ton]

CC : Cortocircuitos

CCC : Ánodos provenientes de Chuquicamata

TTE : Ánodos proveniente de Teniente

ALT : Ánodos provenientes de Alto Norte

MPA : Maquina preparadora de ánodos

SIP : Superintendencia de ingeniería de procesos

ER : Electrorefinación

MAT : Manta termocromática

PI : Plant Information (Información de planta)



## CONTENIDO

1. INTRODUCCION. ....	1
1.1. Objetivo principal. ....	2
1.2. Objetivos específicos. ....	2
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	3
2.1. Antecedentes de la empresa.....	3
2.1.1. División Chuquicamata. ....	3
2.2. Proceso de electrorefinación. ....	4
2.3. Descripción general de refinería Chuquicamata. ....	6
3. MARCO TEORICO. ....	10
3.1. Eficiencia de corriente.....	10
3.2. Cortocircuitos. ....	12
3.3. Inspección catódica .....	14
3.4. Calidad catódica.....	16
4. ANALISIS DE VARIABLES.....	18
4.1. Herramientas estadísticas.....	18
4.1.1. Regresión lineal múltiple.....	18
4.1.2. Matriz de correlación de Pearson.....	20
4.2. Estudio de las variables generadoras de cortocircuitos en Refinería Chuquicamata. ....	22
4.2.1. Análisis multivariable.....	23
4.2.2. Análisis de variables en terreno .....	25
4.3. Resultados y discusiones.....	26
4.3.1. Resultados y discusiones de análisis multivariable.....	26
4.3.2. Resultados y discusiones de análisis en terreno. ....	35
5. TRABAJO EXPERIMENTAL MAT®.....	49
5.1. Tecnología MAT®, .....	49

5.2. Temperatura para la identificación de CC. ....	51
5.3. Pigmento termocromático.....	55
5.4. Prototipos de telas y clips MAT®. ....	56
5.5. Metodología para prueba industrial de tecnología MAT®.....	58
5.6. Resultados de la tecnología MAT®.....	62
5.5.1. Resultados de la primera prueba.....	62
5.5.2. Resultados de la segunda prueba.....	67
6. CONCLUSIONES. ....	72
7. RECOMENDACIONES.....	73
8. BIBLIOGRAFIA. ....	74
9. ANEXOS. ....	76
Anexo A.- Nave de electro refinación de División Chuquicamata de Codelco. ....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Proceso de electrorefinación.....	5
Figura 2.- Nave electrorefinación.....	6
Figura 3.- Planta de refinación electrolítica. ....	9
Figura 4.- Etapas de crecimiento de un nódulo hasta un cortocircuito. ....	13
Figura 5.- Cámara infrarroja. ....	15
Figura 6.- Cuadrilla de inspección. ....	16
Figura 7.- Cátodos rechazados por nodulaciones. ....	17
Figura 8.- Cátodos empaquetados para comercialización. ....	17
Figura 9.- Significado del valor de correlación de Pearson.....	21
Figura 10.- Gráfica superficie de contorno de CC versus cobre-bismuto.....	34
Figura 11.- Ánodos con orejas chuecas. ....	35
Figura 12.- Ánodos en celdas con orejas chuecas. ....	36
Figura 13.- Orejas de anodos frezados y no frezados. ....	37
Figura 14.- Problema de verticalidad de ánodos en celdas. ....	37
Figura 15.- Nódulos en la zona inferior del cátodo. ....	38

Figura 16.- Protuberancias en ánodos CCC. ....	38
Figura 17.- Histograma de espesor de ánodos CCC. ....	39
Figura 18.- Histograma de espesor de ánodos TTE. ....	40
Figura 19.- Histograma de espesor de ánodos ALTN. ....	41
Figura 20.- Cambio en compuerta de celdas de electrorefinación. ....	42
Figura 21.- Medición de ánodo no sumergido en electrolito. ....	42
Figura 22.- Cátodo con nódulos en la zona superior. ....	44
Figura 23.- Mal centrado de los ánodos. ....	45
Figura 24.- Planilla de control de voltajes en la nave de ER. ....	47
Figura 25.- Tecnología MAT®. ....	50
Figura 26.- Escenario final esperado. ....	50
Figura 27.- Termómetro laser para mediciones de temperaturas de contacto. ....	51
Figura 28.- Histograma temperatura de cátodos en CC. ....	52
Figura 29.- Histograma temperatura de cátodos adyacente a cátodos en CC. ....	53
Figura 30.- Histograma temperatura de cátodos con CC, cálculo de positivos verdaderos. ....	54
Figura 31.- Histograma temperatura de cátodos adyacentes, cálculo de falsos positivos. ....	54
Figura 32.- Porcentaje de error y acierto a diferentes temperaturas de cátodos en CC. .....	55
Figura 33.- Disminución de temperatura transferida de la oreja de cátodos hasta la superficie de la tela. ....	56
Figura 34.- Plastisol utilizado para tecnología MAT®. ....	56
Figura 35.- Prototipo 1 de clips termocromáticos. ....	58
Figura 36.- Prototipo 2 de clips termocromáticos. ....	58
Figura 37.- Efectividad del cortocircuito identificado por la tela MAT®. ....	62
Figura 38.- Tela prototipo A quemada por alta temperatura de catados en CC. ....	63
Figura 39.- Resultado de telas prototipo B. ....	64
Figura 40.- Resultado de tela prototipo C. ....	64
Figura 41.- Resultados de porosidad de prototipo B. ....	65
Figura 42.- Resultado de porosidad de prototipo C. ....	66
Figura 43.- Resultado de prototipo 1 de los clips ....	66
Figura 44.- Resultados clips prototipo 2. ....	67

Figura 45.- Comprobación de detección de cortocircuito. ....	68
Figura 46.- Estado final de las primeras pruebas de telas MAT®.....	69
Figura 47.- Tela manchada con ácido. ....	69
Figura 48.- Funcionamiento correcto de los clips termocromáticos. ....	70
Figura 49.- Visión a través de los sensores identificadores de CC.....	71
Figura 50.- Disposición de circuitos hidráulicos y secciones.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. - Variables operacionales. ....	24
Tabla 2.- Primer análisis descriptivo de las variables operacionales.....	26
Tabla 3. -Correlaciones de Pearson.....	28
Tabla 4.-Segundo análisis descriptivo de las variables operacionales.....	29
Tabla 5.- Correlaciones de Pearson.....	30
Tabla 6.- Resumen del modelo de regresión lineal múltiple.....	31
Tabla 7.- Coeficientes del modelo de regresión múltiple y su significancia P-valor.....	31
Tabla 8.- Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.....	32
Tabla 9.- Correlaciones de Pearson.....	33
Tabla 10.- Valores fijos de las variables operacionales.....	34
Tabla 11.- Correlaciones de Pearson.....	43

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1) .....	4
Ecuación (2) .....	4
Ecuación (3) .....	4
Ecuación (4) .....	4
Ecuación (5) .....	10
Ecuación (6) .....	10
Ecuación (7) .....	11
Ecuación (8) .....	11
Ecuación (9) .....	18



Ecuación (10) ..... 18  
Ecuación (11) ..... 19  
Ecuación (12) ..... 19  
Ecuación (13) ..... 19  
Ecuación (14) ..... 19  
Ecuación (15) ..... 20  
Ecuación (16) ..... 20  
Ecuación (17) ..... 20



## 1. INTRODUCCION.

Los CC son eventos no deseados en cualquier planta electrolítica dado que inducen tanto a pérdidas de eficiencia del proceso como a pérdidas de calidad del producto, y las plantas de electrorefinación de cobre no escapan a lo anterior.

Para obtener un bajo número de cortocircuitos en la nave de electrorefinación es necesario mantener un buen control de las condiciones del electrolito, como son temperatura, flujo y composición química; de la calidad de los ánodos, como son verticalidad, espesor, calidad superficial y de sus orejas y de la densidad de corriente del cátodo [10]. Sumado a esto, está el control mediante la inspección catódica, cuya función es alinear los electrodos manteniendo un espaciamiento uniforme entre ellos y detectar tempranamente los cortocircuitos para ser eliminados.

El funcionamiento y el estado en que se encuentra el proceso de electrorefinación es difícil de monitorear con exactitud. El gran número de celdas, el gran volumen de electrolito en recirculación, el hecho que se trata de un proceso de múltiples variables correlacionadas entre sí, hace dificultosa la detección e identificación de los motivos precisos de la generación de cortocircuitos [13].

Es por esto que se desea identificar la o las variables críticas en la generación de CC que actualmente se presentan en la refinería Chuquicamata, para tener un mayor control de estas y así minimizar los cortocircuitos en la nave.

Si bien los cortocircuitos hoy en día son identificados por una cámara infrarroja mediante la cuadrilla de inspección, es necesario modernizar esta labor. Es por esto que se desea incorporar una nueva tecnología, MAT®, la cual pretende identificar tempranamente la generación de un nódulo o cortocircuito. Esta tecnología mantendrá constantemente monitoreada la nave mejorando la metodología de trabajo y supervisión de la cuadrilla de inspección. En este estudio se realizan pruebas preliminares para visualizar el comportamiento y la eficacia de esta tecnología.

### **1.1. Objetivo principal.**

Relacionar la presencia de CC con las principales variables de procesos y evaluar una innovación tecnológica llamada MAT®, orientada a la detección temprana de los CC.

### **1.2. Objetivos específicos.**

- Determinar las variables a evaluar y recopilar datos históricos de ellas.
- Realizar un análisis de las variables operacionales que se relacionan con los cortocircuitos en refinería mediante un análisis estadístico multivariable y en terreno.
- Encontrar relaciones de valor agregado a los datos de análisis de la refinería.
- Realizar una planificación, seguimiento y evaluación de pruebas piloto industriales de la tecnología de detección de cortocircuitos, tela termocromática identificadora de cortocircuitos, MAT®.



## 2. ANTECEDENTES GENERALES.

### 2.1. Antecedentes de la empresa [6].

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.

#### 2.1.1. División Chuquicamata.

La división Chuquicamata, perteneciente a Codelco, se ubica en la comuna de Calama, a 1650 kilómetros al norte de Santiago de Chile y a 2870 metros sobre el nivel del mar.

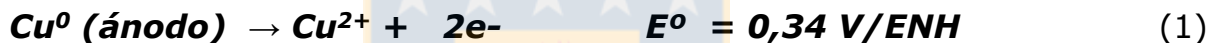
Este yacimiento posee el rajo más grande del mundo, cuya producción corresponde a cátodos electrorefinados y electroobtenidos con una pureza de 99,99 % de cobre. También produce fino de molibdeno. Además, se obtienen otros subproductos, como barros anódicos y ácido sulfúrico.

## 2.2. Proceso de electrorefinación [10].

La electrorefinación de cobre, es la etapa última del proceso pirometalúrgico de tratamiento de los minerales sulfurados de cobre, es un proceso de purificación electrolítica, en el cual se le aplica una corriente eléctrica continua entre un electrodo positivo llamado ánodo y un electrodo negativo llamado cátodo, ambos sumergidos en una celda que contiene una solución de sulfato de cobre acidificada (Figura 1), generando las siguientes reacciones:

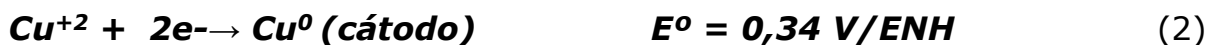
- a) El cobre del ánodo se disuelve electroquímicamente dentro de la solución con lo que se producen cationes de cobre

Reacción anódica (oxidación)



- b) Los cationes  $\text{Cu}^{+2}$  en la solución se mueven por difusión y convección hacia el electrodo negativo (cátodo), para producir cobre metálico que se deposita sobre la plancha de acero inoxidable (tecnología de cátodo permanente).

Reacción catódica (reducción)



La reacción global de la celda es:



La cual ocurrirá a una diferencia de potencial termodinámico estándar ( $\Delta E^{\circ}$ ) de 0.00 voltios. Sin embargo, el voltaje de la celda real es mayor que el teórico pues consta de varios componentes asociados al proceso cinético y que se resumen en la siguiente expresión:

$$\mathbf{\Delta E = n_a + n_c + (I * R) + E_c} \quad (4)$$

donde,

$\Delta E$ : Potencial total de celda

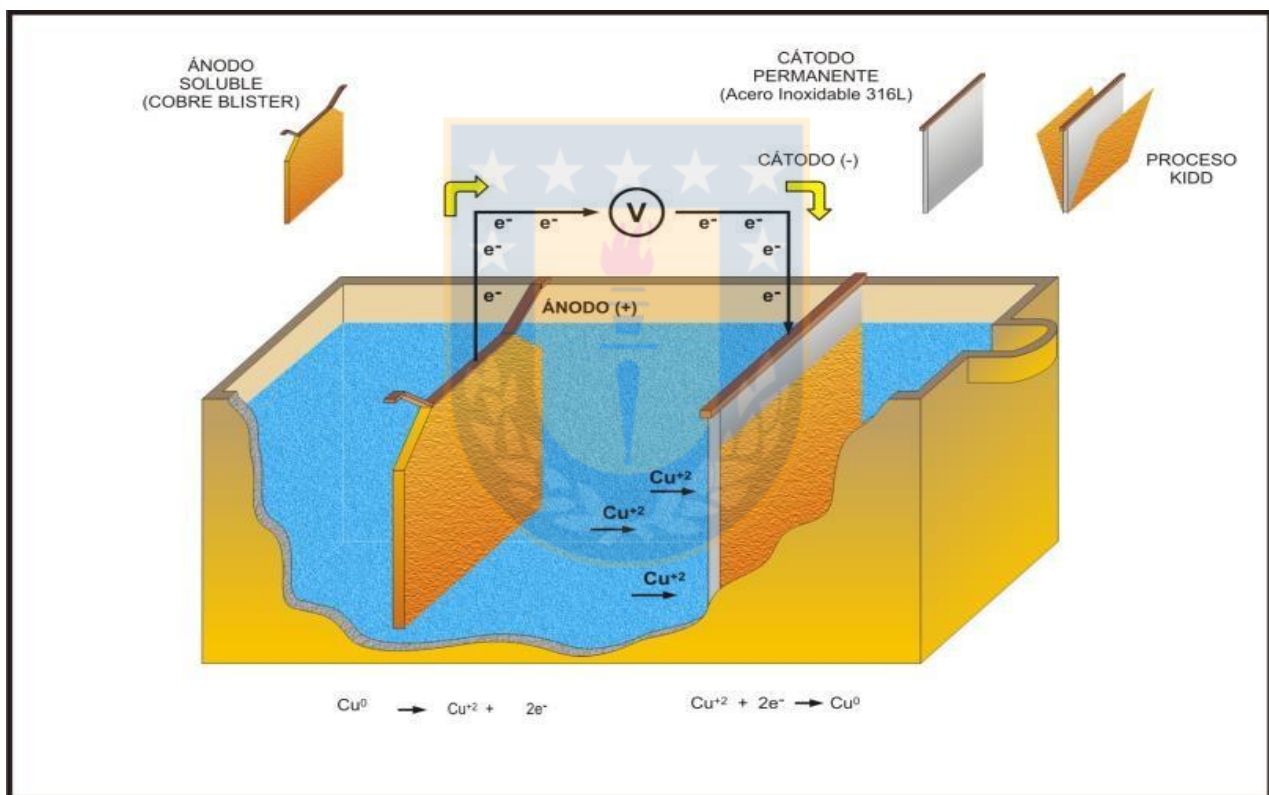
$n_a$ : Sobre potencial anódico

$n_c$ : Sobre potencial catódico

$(I \cdot R)$ : Caída de potencial en el electrolito

$E_c$ : Caída de potencial por contactos eléctricos

La tensión en las celdas industriales de refinación electrolítica alcanza un valor entre 0,25 a 0,4 V.



**Figura 1.-** Proceso de electrorefinación.

### 2.3. Descripción general de refinería 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 [14].

La nave de electrorefinación de Chuquicamata (Figura 2) 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 [10].



**Figura 2.-** Nave electrorefinación.

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 hemisección 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 electrorefinado por año, operando con una densidad de corriente nominal de  $320 \text{ [A/m}^2\text{]}$  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  $9,67 \text{ [m}^3\text{]}$  al encontrarse sin electrodos y de  $6,86 \text{ [m}^3\text{]}$  cuando está cargada con ánodos y cátodos.

El electrolito se encuentra a una temperatura aproximada de  $64 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , cuyo flujo de alimentación a cada celda está en torno a  $20 \text{ [l/min]}$ . Éste contiene aproximadamente  $45 \text{ [g/l]}$  de cobre y  $180 \text{ [g/l]}$  de ácido sulfúrico, además de aditivos como cola, thiourea 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 [10].

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

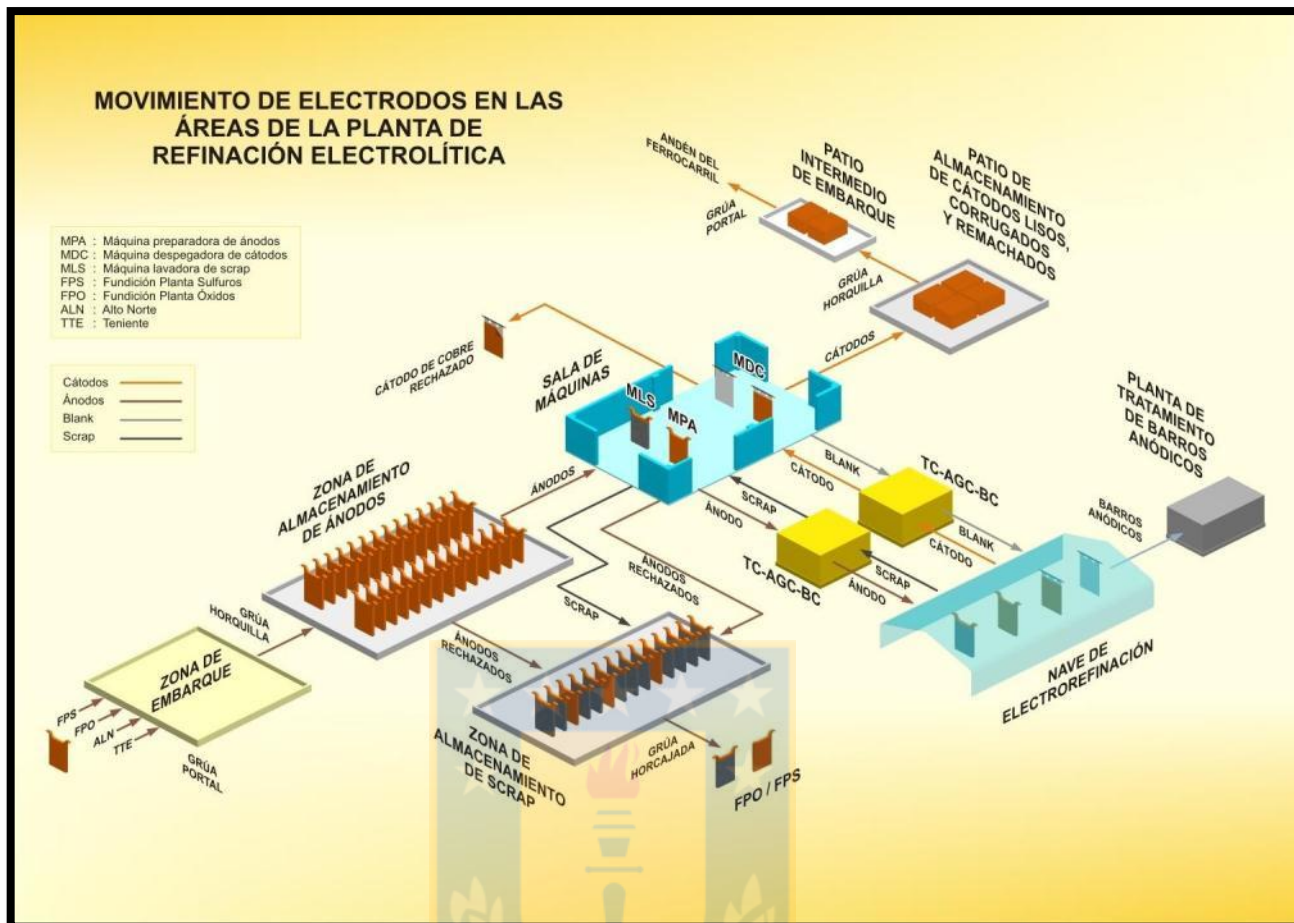


en la zona superior del cátodo, debido a los sulfatos que se generan en la zona superficial del electrolito.

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, 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.

Una gran parte de las impurezas de los ánodos forman los barros anódicos, que sedimentan en las celdas. Al final de cada ciclo anódico, se procede a retirar los barros 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 barros son espesados y lixiviados para la recuperación de cobre y además se obtiene el barro anódico descubrizado, el cual es vendido a plantas de metales preciosos, principalmente para la recuperación de oro y plata.

Las celdas de electrorefinación, 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.-** Planta de refinación electrolítica.

Una de las grandes preocupaciones en las refineries de cobre es la calidad de cobre obtenido. Los cátodos deben poseer una buena calidad física además de su alta pureza y el proceso debe ocurrir con eficiencias de corriente entre 94% y 98%, lo cual es una labor compleja ya que el crecimiento de los cátodos está influenciado por parámetros operacionales como temperatura, composición de electrolito y ánodo, espaciamiento entre electrodos, dosificación de aditivos, densidad de corriente y flujo de electrolito [10].

### 3. MARCO TEORICO.

#### 3.1. 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 en 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.

En la ecuación 5 se detallan las variables involucradas en el cálculo de esta variable:

$$M_{Cu} = \frac{I * t * P_{Cu}}{n * F} \quad (5)$$

donde,

$M_{Cu}$ : Masa teórica de cobre depositada en cátodos o disuelta en ánodos [g]

$I$  : Corriente aplicada a la celda [A]

$t$  : Tiempo que pasa la corriente [s]

$P_{Cu}$  : Peso atómico del cobre  $\left[\frac{g}{mol}\right]$

$F$  : Constante de Faraday  $\left[\frac{C}{mol}\right]$

$n$  : Número de valencia del cobre como ion en la solución electrolítica

Para el cálculo de las eficiencias de corriente anódica y catódica se utiliza las ecuaciones 6 y 7, 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 electrorefinación:

$$\eta_{anódica} = \frac{M_{Cu \text{ real disuelto}}}{M_{Cu \text{ teórica}}} \quad (6)$$

$$\eta_{catódica} = \frac{M_{Cu \text{ real depositado}}}{M_{Cu \text{ teórica}}} \quad (7)$$

Los problemas de eficiencia de corriente en electro refinación se asocian a fugas de corriente a tierra minimizadas por la prevención de derrame de electrolito y a corto circuitos, causados por crecimiento nodular o dendrítico en el cátodo, 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.

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 8.

$$CEE = \frac{V * I * t}{M_{Cu \text{ real depositado}}} \quad (8)$$

donde:

*CEE*: Consumo específico de energía [kWh/ton]

*V*: Voltaje de celda [V]

*I*: Corriente aplicada [A]

*t*: Tiempo que se aplica la corriente[h]

*M<sub>Cu real depositado</sub>*: Masa de cobre real depositada en celda [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 de cobre el consumo específico de energía varía entre 300 y 400 [kWh/ton].

### 3.2. Cortocircuitos.

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.

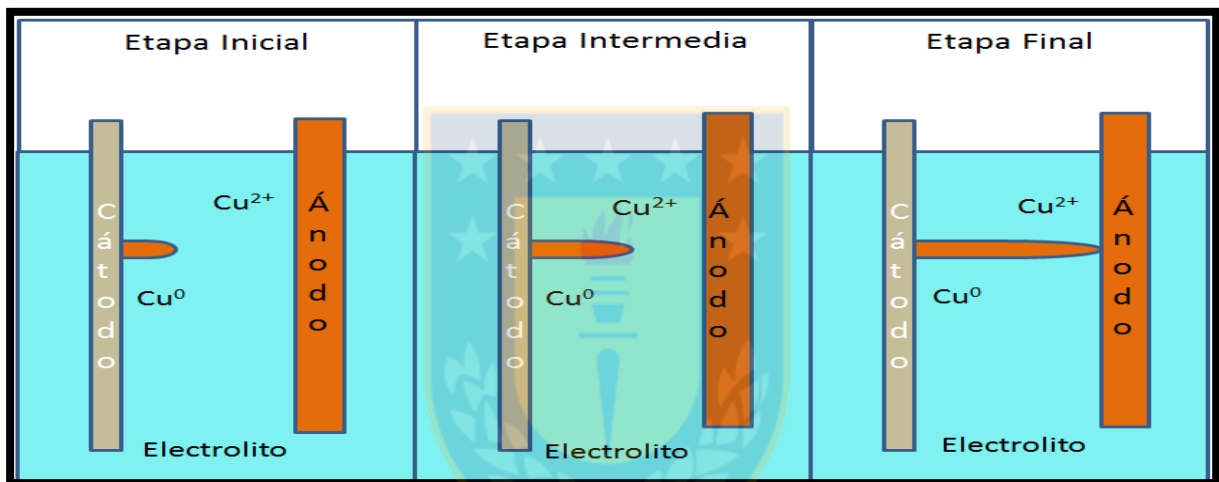
Es de gran importancia mantener una resistencia uniforme en toda la nave de modo de asegurar una buena distribución de corriente por celdas y por pares de electrodos además en la superficie del cátodo para obtener una distribución homogénea de la corriente en el cuerpo de los electrodos. No olvidar que la unidad básica de una planta de electrorefinación son las celdas 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 medular 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, disminuyendo la resistencia óhmica del electrolito, 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 lo que a corto plazo generara 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 dando lugar a un crecimiento preferencial, como por ejemplo; la composición, la temperatura y el flujo del electrolito, 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 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 al

paso de corriente 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 4).



**Figura 4.-** Etapas de crecimiento de un nódulo hasta un cortocircuito.

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 electrorefinación debido a que la resistencia del electrolito va disminuyendo y la corriente circula preferentemente en esa área, alterando la depositación 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, donde aún no es tan grande la pérdida de eficiencia, 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.

Es necesario tener en cuenta que se le llamará en adelante cortocircuito al nódulo en cualquiera de estas tres etapas, pudiendo estar en la etapa inicial o final.

### **3.3. 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 5.-** Cámara infrarroja.

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 6). 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 6.-** Cuadrilla de inspección.

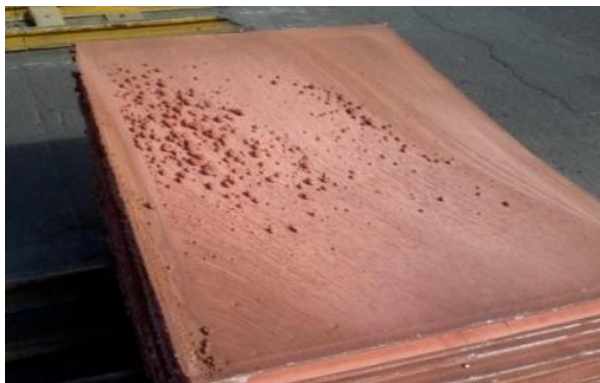
Luego se continúa inspeccionando las celdas en operación hasta el término del ciclo catódico. Junto con esta operación, el personal de la inspección catódica también está encargado de la regulación de niveles de electrolito en celda y de revisar y mantener las celdas con buena circulación de electrolito.

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.

### **3.4. 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 Figura 7.



**Figura 7.-** Cátodos rechazados por nodulaciones.

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 8).



**Figura 8.-** Cátodos empaquetados para comercialización.

## 4. ANÁLISIS DE VARIABLES

### 4.1. Herramientas estadísticas [29] [30] [31].

#### 4.1.1. Regresión lineal múltiple

Una variable dependiente o respuesta "y" puede estar relacionada con k variables independientes o regresoras según:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_k \cdot x_k + \epsilon \quad (9)$$

donde:

$\beta_j$ , para  $j=1, 2, \dots, k$ , representan los coeficientes de regresión.

$\epsilon$ , es un término de error aleatorio.

Ahora bien, si existen k variables de regresión y n observaciones ( $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_i$ , para  $i= 1, 2, \dots, n$ ), la ecuación 9 es un sistema de n ecuaciones que puede expresarse en notación matricial como:

$$\bar{y} = \bar{X} \cdot \bar{\beta} + \bar{\epsilon} \quad (10)$$

donde,

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

Luego, se desea encontrar el vector de estimadores de acuerdo al método de los mínimos cuadrados  $\hat{\beta}$ , que minimiza:

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \bar{\epsilon}' \cdot \bar{\epsilon} = (\bar{y} - \bar{X} \cdot \bar{\beta})' (\bar{y} - \bar{X} \cdot \bar{\beta}) \quad (11)$$

haciendo:

$$\frac{\partial L}{\partial \bar{\beta}} = 0$$

se obtiene:

$$(\bar{X}' \cdot \bar{X}) \cdot \bar{\beta} = (\bar{X}' \cdot \bar{y})$$

luego, se obtiene la siguiente expresión:

$$\bar{\beta} = (\bar{X}' \cdot \bar{X})^{-1} \cdot (\bar{X}' \cdot \bar{y}) \quad (12)$$

La prueba de significancia de la regresión es una de las pruebas de hipótesis utilizadas para medir la bondad de ajuste del modelo. Esta prueba determina si existe una relación lineal entre la variable respuesta y alguna de las variables regresoras. La hipótesis estadística adecuada para un factor A es:

$$H_0 : \alpha_1 = \dots = \alpha_0 = 0 \text{ (el factor A no influye)} \quad (13)$$

$$H_1 : \text{algún } \alpha_i \neq 0 \text{ (el factor A influye)} \quad (14)$$

Si el valor-p de la prueba de significancia es menor o igual a un nivel predeterminado de significancia  $\alpha = 0,05$ , se rechaza la hipótesis nula y da crédito a la alterna.

Para corroborar que la regresión lineal múltiple es válida, es necesario cumplir el supuesto de normalidad de los residuos del modelo, es decir, si los valores de la variable dependiente siguen una distribución normal en la población a la que pertenece

la muestra. Para esto se realiza la prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov, donde su hipótesis estadística es:

$$H_0 : \text{Los residuos del modelo presentan distribución normal} \quad (15)$$

$$H_1 : \text{Los residuos del modelo no presentan una distribución normal} \quad (16)$$

La toma de decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula, puede llevarse a cabo mediante el p-valor. Por lo tanto, para un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ , la regla de decisión es si el valor p es mayor o igual a  $\alpha$ , se acepta hipótesis nula, y si valor p es menor a  $\alpha$ , se rechaza hipótesis nula y da crédito a la alterna.

#### 4.1.2. Matriz de correlación de Pearson

En el estudio descriptivo de sistemas multivariantes, la matriz de correlación es la representación matricial de los coeficientes de correlación de Pearson (R) conjuntos de una variable i con otra variable j. Por ejemplo, si se tienen n datos:

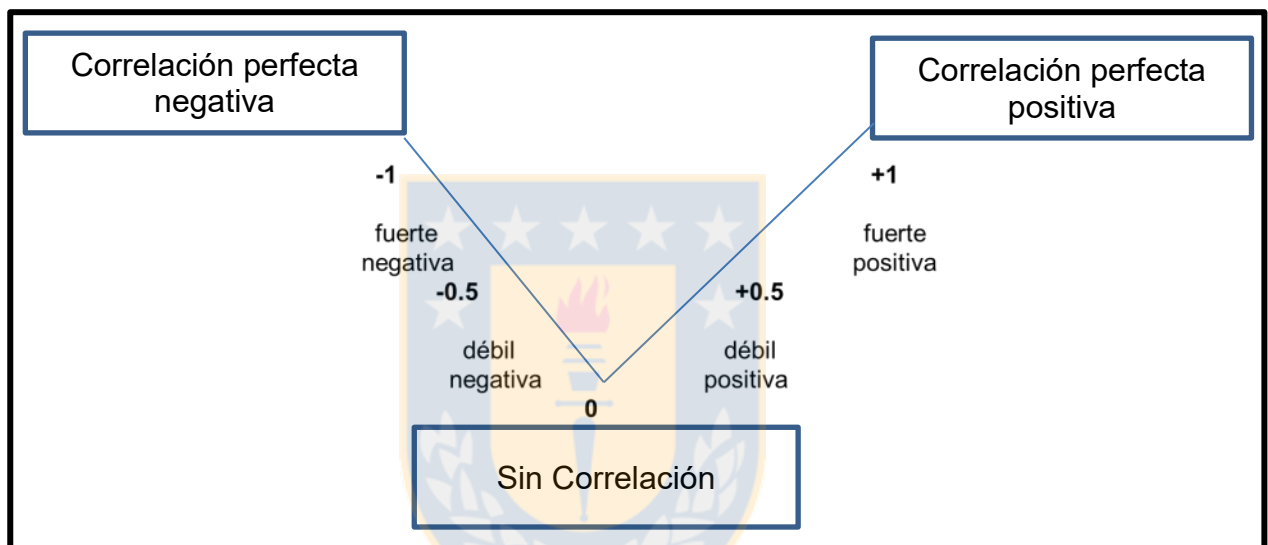
$$\begin{array}{cccc}
 & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\
 x_1 & 1 & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\
 x_2 & R_{21} & 1 & \cdots & R_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 x_n & R_{n1} & R_{n2} & \cdots & 1
 \end{array}$$

Una vez obtenida la matriz de correlación, es posible aplicar criterios (definidos de acuerdo al problema en particular) que permitan descartar y/o incorporar variables de entrada para obtener una funcionalidad de la siguiente forma:

$$\bar{y} = \text{fun}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n) \quad (17)$$

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas, es un índice que mide el grado de covarianza entre distintas variables relacionadas linealmente.

Los valores del coeficiente de correlación oscilan entre  $-1$  y  $+1$ , en donde la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente ( $0-1$ ) y el signo representa la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de  $+1$  como de  $-1$ , sólo que en el primer caso es perfecta positiva y en el segundo caso perfecta negativa.



**Figura 9.-** Significado del valor de correlación de Pearson.

Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero.

#### **4.2. Estudio de las variables generadoras de cortocircuitos en Refinería Chuquicamata.**

Los cátodos de cobre deben reunir criterios de calidad tales como un depósito liso ( sin presencia de nódulos ni dendritas), un bajo nivel de impurezas y un bajo nivel de porosidad, siendo esto una tarea compleja ya que el crecimiento de los cátodos está influenciado por muchos parámetros tales como la densidad de corriente, temperatura del electrolito, composición del electrolito, composición del ánodo, espaciamiento ánodo-cátodo, flujo del electrolito y una de las más importantes, la dosificación y concentración de aditivos.

Si bien es cierto que en la refinería Chuquicamata la calidad química de los ánodos se mantiene bajo control, la calidad física es un punto que sigue siendo crítico. La formación de cortocircuitos afecta en la obtención de cátodos con depósitos lisos, es por esto que el objetivo principal del presente capítulo es analizar las variables de refinería para identificar la o las variables más influyentes en la generación de cortocircuitos durante el periodo en planta.

Se recopilaron datos en línea desde PI System (software con datos en línea de planta) desde abril hasta diciembre del 2015, en donde los resultados obtenidos durante ese periodo fueron bastantes favorables, con una eficiencia de corriente de 97% con un promedio de 32 cortocircuitos por sección-día operando a una densidad de corriente ( $i$ ) promedio de 286 A/m<sup>2</sup>.

Para identificar la variable más significativa en la generación de CC, se realizó un análisis multivariable de los siguientes parámetros que poseían registro diario de su valor: la densidad de corriente, calidad del electrolito ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), impurezas ( $\text{As}^{+5}$ ,  $\text{Sb}^{+5}$ ,  $\text{Bi}^{+3}$ ), temperatura y flujo del electrolito.

Según la ley de Faraday, la corriente aplicada y la cantidad de masa depositada es directamente proporcional. La calidad del electrolito y temperatura influyen en la conductividad del electrolito. Las impurezas, como el arsénico, antimonio y bismuto, que tienen un potencial de disolución comparable al cobre, dependiendo de su concentración y otros parámetros operacionales se pueden encontrar en el electrolito

formando un amplio rango de compuestos insolubles, denominados "lamas flotantes" que están formadas de arseniato de antimonio ( $\text{SbAsO}_4$ ) y arseniato de bismuto ( $\text{BiAsO}_4$ ) y pueden flotar en la superficie del electrolito pudiendo contaminar el cátodo. El flujo es importante para mantener una concentración y temperatura homogénea, además de controlar los niveles de sólidos en suspensión en el electrolito.

Si bien es cierto que hay otros parámetros operacionales importantes que inciden en el correcto depósito de cobre en los cátodos, estos no pudieron ser incluidos en el análisis multivariable por falta de registro diario de ellos, pero no obstante, se realiza un análisis en terreno de ellos, en donde se observaron irregularidades importantes. Estas variables son la calidad física de los ánodos y una mala ejecución de la labor de la inspección catódica.

La calidad física de los ánodos afecta en la distancia entre electrodos, es decir, al encontrarse un ánodo fuera de norma, la distancia electródica disminuirá entre ánodo-cátodo disminuyendo la resistencia del electrolito, siendo muy probable la formación de un cortocircuito. El mal centrado del ánodo con respecto al cátodo aumenta la posibilidad de generar CC.

A pesar que los aditivos son un variable con efecto directo y muy importante en la calidad del depósito catódico (control en tamaño y depositación homogénea), no se incluyó en este análisis por falta de medición y registro de su concentración en el electrolito. Si bien es cierto hay un registro de la concentración teórica de estos aditivos, determinada por las toneladas de cobre depositado que se desea, la corriente eléctrica y la utilización de celdas, falta un registro diario de la concentración real de éstos en el electrolito.

#### **4.2.1. Análisis multivariable**

Las variables utilizadas para realizar un análisis multivariable y poder visualizar su relación con los cortocircuitos son las siguientes:



**Tabla 1.-** Variables operacionales.

<b>Variable</b>	<b>Detalle</b>
<b>Densidad de corriente</b>	Ampere por metro cuadrado de superficie de cátodo [A/m <sup>2</sup> ]
<b>Cortocircuitos</b>	Promedio de cortocircuitos por sección diarios.
<b>As<sup>+5</sup> electrolito</b>	Gramos por litro de Arsénico en el Electrolito [g/L].
<b>Sb<sup>+5</sup> electrolito</b>	Gramos por litro de Antimonio en el Electrolito [g/L].
<b>Bi<sup>+3</sup> electrolito</b>	Miligramos por litro de Bismuto en el Electrolito [mg/L].
<b>Cu<sup>+2</sup> electrolito</b>	Gramos por litro de Cobre en el Electrolito [g/L].
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolito</b>	Gramos por litro de ácido en el Electrolito [g/L].
<b>Flujos electrolito</b>	Litros por minutos de electrolito alimentando a celda [L/m].
<b>T<sup>o</sup> electrolito</b>	Temperatura del electrolito [°C] (Promedio de entrada y salida)

Se toma el registro de cada variable durante 275 días, lo que genera un conjunto de 2475 datos a analizar.

#### **4.2.1-1 Metodología de análisis multivariados.**

Este análisis se basará en el método de correlación y de regresión lineal para identificar las variables más influyentes en la generación de CC. La correlación estudia cuan estrecha es la asociación entre variables y la regresión plantea un modelo con el cual se puede llegar a predecir el valor de la variable respuesta si se conoce el valor de una variable explicativa.

Los datos de las variables operacionales fueron llevados a una planilla Excel y luego, los análisis estadísticos fueron desarrollados en los software Minitab 17, SPSS Versión 19.00 y Microsoft Excel Versión 2010 (Tablas dinámicas). Se les realizó un tratamiento estadístico de data representativa y se consideró un nivel de significación del 0.05, esto quiere decir que toda hipótesis estadística será rechazada si la significancia (Valor-P) de la misma es inferior a dicho valor.

Los métodos estadísticos utilizados para el estudio fueron:

- Análisis descriptivo.
- Análisis de correlación.
- Análisis de regresión lineal múltiple.
- Test de Normalidad Kolmogorov-Smirnov.
- Análisis de superficie de contorno.

#### 4.2.2. Análisis de variables en terreno

De las variables que influyen en los cortocircuitos generados que carecen de registro diario, fue necesario realizar un registro de ellas en terreno, por lo que se le realizó un seguimiento a la calidad física del ánodo y a la conducta de la inspección catódica.

En cuanto a la calidad física del ánodo, se observaron 4 problemas: ánodos con orejas chuecas, orejas de ánodos con irregularidades en la zona de contacto, protuberancias en el cuerpo del ánodo y ánodos con dimensiones de espesor fuera de estándar y en cuanto a la conducta de la inspección catódica, se realizó un seguimiento en el procedimiento empleado.



### 4.3. Resultados y discusiones.

#### 4.3.1. Resultados y discusiones de análisis multivariable.

##### 4.3.1.-1 Análisis Descriptivo.

Para poder observar el comportamiento de los datos se considera un análisis estadístico descriptivo.

Para el periodo de análisis desde abril a diciembre del año 2015 se tienen los siguientes valores:

**Tabla 2.-** Primer análisis descriptivo de las variables operacionales

Resúmenes de casos						
	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>CC</b>	275	31,8	31	8,55	12	59
<b>I</b>	275	289,6	290,7	22,38	200,2	313,7
<b>Flujo</b>	275	20,2	20,3	0,37	19,18	20,75
<b>Temperatura</b>	275	65,4	65,5	0,46	64,2	66,3
<b>As</b>	275	8,1	8,2	0,62	6,6	9,5
<b>Sb</b>	275	0,3	0,32	0,058	0,15	0,44
<b>Bi</b>	275	18,8	18	6,87	10	44
<b>Cu</b>	275	43,9	44,1	1,41	40	47,5
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	275	170,0	169	7,07	158,8	196,5

En Tabla 2 se presentan las medidas de resumen de cada variable en un periodo de 275 días (N), en donde se muestra la media que representa al promedio general, la mediana que presenta la mitad del total de datos, la desviaciones estándar que representa cuanto se desvían los datos de la mediana, el valor mínimo y el valor máximo de total de datos por variable.

### 4.3.1-2 Análisis de correlación.

Del análisis de correlación en Tabla 3, se observa una fuerte correlación positiva entre la densidad de corriente y la generación de cortocircuitos. Esto se representa con un valor de 0,66 de correlación de Pearson, que significa una relación lineal positiva entre la densidad de corriente y los CC, es decir, al aumentar la densidad de corriente aumentan los CC en la nave de ER.

La confianza de esta relación la da una significancia menor a 0,05 y un gran tamaño de muestra.

Como se explicó anteriormente, la densidad de corriente se relaciona directamente con la capacidad productiva de la planta, es decir, si aumenta la densidad de corriente aumentará la cantidad de cobre obtenida en un tiempo determinado. Esto implica que la depositación de cobre sea a una mayor velocidad, que podría traer consigo un depósito de cobre esponjoso o una morfología de grano desordenada, induciendo el crecimiento local de nódulos y al poco tiempo pueden provocar cortocircuitos, si ésta fuera demasiado alta.

En el periodo de tiempo analizado, según lo muestra la estadística descriptiva, los valores de densidad de corriente van desde los 200,2 hasta los 313,7 A/m<sup>2</sup>, variabilidad que es normal en plantas de ER. Sin embargo, esta gran variabilidad en los valores de densidad de corriente podría demostrar claramente su incidencia en los CC.

Por lo tanto, considerando la densidad de corriente como principal predictor del número de cortocircuitos, es necesario mantener esta variable constante para cuantificar efectivamente el efecto de las otras variables en estudio. Es por este motivo que para el posterior análisis se utilizaron los datos que estuvieron a una densidad de corriente cercana a la nominal, por sobre los 300 A/m<sup>2</sup>, para que los resultados no estuvieran interferidos por la variabilidad de la densidad de corriente (Tabla 4).

**Tabla 3.** -Correlaciones de Pearson.

Correlaciones de Pearson y Significancia bilateral										
		CC	i	Flujo	T [°C]	As	Sb	Bi	Cu	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>CC</b>	<b>Correlación</b>	<b>1</b>	<b>0,658**</b>	<b>0,433**</b>	<b>0,326**</b>	<b>0,434**</b>	<b>-0,342**</b>	<b>0,203**</b>	<b>0,326*</b>	<b>0,075</b>
	<b>Sig.</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,001</b>	<b>0</b>	<b>0,213</b>
	<b>N</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>	<b>275</b>
<b>I</b>	<b>Correlación</b>	0,658**	1	0,841**	0,719**	0,687**	-0,265**	-0,086	0,455**	0,014
	<b>Sig.</b>	0		0	0	0	0	0,157	0	0,816
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>Flujo</b>	<b>Correlación</b>	0,433**	0,841**	1	0,541**	0,699**	-0,311**	-0,126*	0,531**	-0,006
	<b>Sig.</b>	0	0		0	0	0	0,037	0	0,92
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>T [°C]</b>	<b>Correlación</b>	0,326**	0,719**	0,541**	1	0,354**	0,130*	0,031	0,159**	0,204**
	<b>Sig.</b>	0	0	0		0	0,032	0,609	0,008	0,001
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>As</b>	<b>Correlación</b>	0,434**	0,687**	0,699**	0,354**	1	-0,494**	-0,345**	0,639**	0,063
	<b>Sig.</b>	0	0	0	0		0	0	0	0,294
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>Sb</b>	<b>Correlación</b>	-0,32**	-0,26**	-0,31**	0,130*	-0,49**	1	0,35**	-0,35**	-0,24**
	<b>Sig.</b>	0	0	0	0,032	0		0	0	0
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>Bi</b>	<b>Correlación</b>	0,203**	-0,086	-0,126*	0,031	-0,34**	0,358**	1	-0,19**	-0,118
	<b>Sig.</b>	0,001	0,157	0,037	0,609	0	0		0,001	0,051
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>Cu</b>	<b>Correlación</b>	0,326**	0,455**	0,531**	0,159**	0,639**	-0,357**	-0,199**	1	0,08
	<b>Sig.</b>	0	0	0	0,008	0	0	0,001		0,186
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	<b>Correlación</b>	0,075	0,014	-0,006	-0,204**	0,063	-0,242**	-0,118	0,08	1
	<b>Sig.</b>	0,213	0,816	0,92	0,001	0,294	0	0,051	0,186	
	<b>N</b>	275	275	275	275	275	275	275	275	275

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).  
\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Filtrando los datos a una densidad de corriente sobre los 300 A/m<sup>2</sup>, se obtienen un total de 89 datos.

**Tabla 4.-**Segundo análisis descriptivo de las variables operacionales.

<b>Resúmenes de casos</b>						
	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>CC</b>	89	37,7595	36	6,495	28	59
<b>I</b>	89	310,5392	311,6	2,82826	303,6	313,7
<b>Flujos</b>	89	20,4453	20,485	0,16702	19,97	20,75
<b>Temperatura</b>	89	65,757	65,9	0,3161	64,3	66,2
<b>As</b>	89	8,3316	8,3	0,39857	7,5	9,4
<b>Sb</b>	89	0,3286	0,33	0,02804	0,26	0,4
<b>Bi</b>	89	21,7468	20	8,23605	10	44
<b>Cu</b>	89	44,4532	44,5	0,78034	42,1	46,1
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	89	167,7797	167,4	2,88312	160	173,8

En Tabla 4 se presentan las medidas de resumen de cada variable filtradas a una densidad de corriente mayor a 300 A/m<sup>2</sup> sumando un total de 89 datos (1 dato por día de cada variable), en donde se muestra la media que representa al promedio general, la mediana que presenta la mitad del total de datos, la desviaciones estándar que representa cuanto se desvían los datos de la mediana, el valor mínimo y el valor máximo de total de datos por variable. Se observa la menor variación de la densidad de corriente en comparación a los datos de Tabla 2, fluctuando desde los 303,6 a los 313,7 A/m<sup>2</sup>.

**Tabla 5.-** Correlaciones de Pearson.

<b>Correlaciones</b>										
		<b>CC</b>	<b>i</b>	<b>Flujos</b>	<b>T°C</b>	<b>As</b>	<b>Sb</b>	<b>Bi</b>	<b>Cu</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>
<b>CC</b>	Correlación Pearson	1	0,13	-0,332**	0,302**	-0,279*	-0,136	<b>0,541**</b>	<b>-0,504**</b>	-0,256*
	Sig. (bilateral)		0,254	0,003	0,007	0,013	0,233	0	0	0,023
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>I</b>	Correlación Pearson	0,13	1	,308**	-0,027	0,093	0,215	,360**	-0,116	-0,006
	Sig. (bilateral)	0,254		0,006	0,814	0,416	0,058	0,001	0,307	0,957
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>Flujos</b>	Correlación Pearson	-,332**	,308**	1	-0,135	0,075	0,012	0,015	0,004	,235*
	Sig. (bilateral)	0,003	0,006		0,235	0,513	0,915	0,893	0,974	0,037
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>T°C</b>	Correlación Pearson	,302**	-0,027	-0,135	1	-,364**	-0,005	,415**	-,350**	-0,063
	Sig. (bilateral)	0,007	0,814	0,235		0,001	0,962	0	0,002	0,584
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>As</b>	Correlación Pearson	-,279*	0,093	0,075	-,364**	1	-0,034	-,402**	,384**	0,107
	Sig. (bilateral)	0,013	0,416	0,513	0,001		0,767	0	0	0,348
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>Sb</b>	Correlación Pearson	-0,136	0,215	0,012	-0,005	-0,034	1	0,021	0,028	-0,07
	Sig. (bilateral)	0,233	0,058	0,915	0,962	0,767		0,857	0,806	0,539
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>Bi</b>	Correlación Pearson	,541**	,360**	0,015	,415**	-,402**	0,021	1	-,412**	-0,064
	Sig. (bilateral)	0	0,001	0,893	0	0	0,857		0	0,573
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>Cu</b>	Correlación Pearson	-,504**	-0,116	0,004	-,350**	,384**	0,028	-,412**	1	,261*
	Sig. (bilateral)	0	0,307	0,974	0,002	0	0,806	0		0,02
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Correlación Pearson	-,256*	-0,006	,235*	-0,063	0,107	-0,07	-0,064	,261*	1
	Sig. (bilateral)	0,023	0,957	0,037	0,584	0,348	0,539	0,573	0,02	
	N	89	89	89	89	89	89	89	89	89

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Del análisis de correlación en Tabla 5, se observa una fuerte correlación de los CC con el bismuto y el cobre. Esto se representa con un valor de correlación de Pearson sobre los 0,5 absolutos. El bismuto tiene una relación positiva con los CC y el cobre una relación negativa con los CC. Cabe resaltar que estos resultados no están siendo interferidos por la fluctuación de la densidad de corriente ya que se filtró a valores sobre los 300 A/m<sup>2</sup>.

### 4.3.1-3 Análisis de Regresión lineal múltiple.

Del análisis de regresión lineal de los datos a una densidad de corriente sobre los 300 A/m<sup>2</sup> se obtuvo un resumen de modelo (Tabla 6) y los coeficientes de la regresión múltiple (Tabla 7) según se muestra a continuación:

**Tabla 6.-** Resumen del modelo de regresión lineal múltiple.

<b>Resumen del modelo (b)</b>				
Modelo	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,75(a)	<b>0,56</b>	0,52	4,55

(a) Predictores: (Constante), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Bi, Flujos, Cu, Temperatura, Sb, As

(b) Variable dependiente: CC

De Tabla 6, el valor que más importa es el R<sup>2</sup>, coeficiente de determinación, ya que significa que este modelo de regresión puede explicar el 56% de la variación total observada en la variable dependiente a partir de las variables predictoras, lo cual es alto considerando que se trabaja con datos de planta.

**Tabla 7.-** Coeficientes del modelo de regresión múltiple y su significancia P-valor.

<b>Coeficientes(a)</b>			
Modelo	Coeficientes no estandarizados		P-valor.
	B	Error estándar	
1 (Constante)	480,819	162,238	<b>0,004</b>
Flujos	-12,577	3,323	<b>0,203</b>
Temperatura	-0,578	1,946	<b>0,767</b>
As	0,638	1,536	<b>0,679</b>
Sb	-31,596	19,003	<b>0,101</b>
Bi	0,346	0,077	<b>0</b>
Cu	-2,672	0,813	<b>0,002</b>
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-0,189	0,198	<b>0,343</b>

(a) Variable dependiente: CC



De los coeficientes de la regresión lineal múltiple que se observan en Tabla 7 se tiene:  
 -La concentración de bismuto tiene  $p\text{-valor}=0,00$ , siendo un valor menor a  $\alpha= 0,05$ , por lo tanto hay evidencia significativa, es decir, la variable bismuto es influyente en el modelo de cortocircuito.

-La concentración de cobre tiene un  $p\text{-valor}=0,00$ , siendo un valor menor a  $\alpha= 0,05$ , por lo tanto hay evidencia significativa, es decir, la variable cobre es influyente en el modelo de cortocircuito.

Al igual que los resultados obtenidos en Tabla 5 de correlación de Pearson, las variables más significantes en la regresión lineal son el bismuto y el cobre. Ambas variables tienen un valor de correlación similar, siendo un poco mayor la del bismuto.

#### 4.3.1-4 Análisis de Normalidad.

Para corroborar que la regresión lineal múltiple es válida, es necesario cumplir el supuesto de normalidad de los residuos del modelo.

Si el valor  $p$  es menor o igual a un nivel predeterminado de significancia ( $\alpha = 0,05$ ), se rechaza la hipótesis nula y da crédito a la alterna.

**Tabla 8.-** Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.

<b>Prueba de normalidad</b>			
	Kolmogorov-Smirnov (a)		
	Estadístico	gl	P-valor
Standardized Residual	0,094	98	<b>0,081</b>

De los resultados de la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov que se observan en Tabla 8, el  $p\text{-valor}$  es 0,81, siendo un valor mayor a 0,05 por lo tanto no hay evidencia suficiente para rechazar  $H_0$ , es decir, los residuos de la variable de interés cortocircuitos presentan distribución normal.

Al cumplir este supuesto podemos afirmar que el modelo de regresión lineal se ajustó correctamente a la realidad.

### 4.3.1-5 Análisis superficie de respuesta.

Para el análisis de superficie de respuesta se utilizan las variables que tuvieron mayor correlación con los CC, siendo en este caso la concentración de bismuto y la concentración de cobre. Se realiza este análisis para ver cómo se relacionan estas dos variables en conjunto con la generación de CC.

**Tabla 9.-** Correlaciones de Pearson.

Correlaciones				
		CC	Bi	Cu
<b>CC</b>	Correlación de Pearson	1	0,541**	-0,504**
	Sig. (bilateral)		0	0
	N	89	89	89
<b>Bi</b>	Correlación de Pearson	,541**	1	-,412**
	Sig. (bilateral)	0		0
	N	79	79	79
<b>Cu</b>	Correlación de Pearson	-,504**	-,412**	1
	Sig. (bilateral)	0	0	
	N	89	89	89

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Según los resultados obtenidos se puede inferir que los cortocircuitos a una alta densidad de corriente, están fuertemente correlacionados con la concentración de  $\text{Bi}^{+3}$  y la concentración de  $\text{Cu}^{+2}$ .

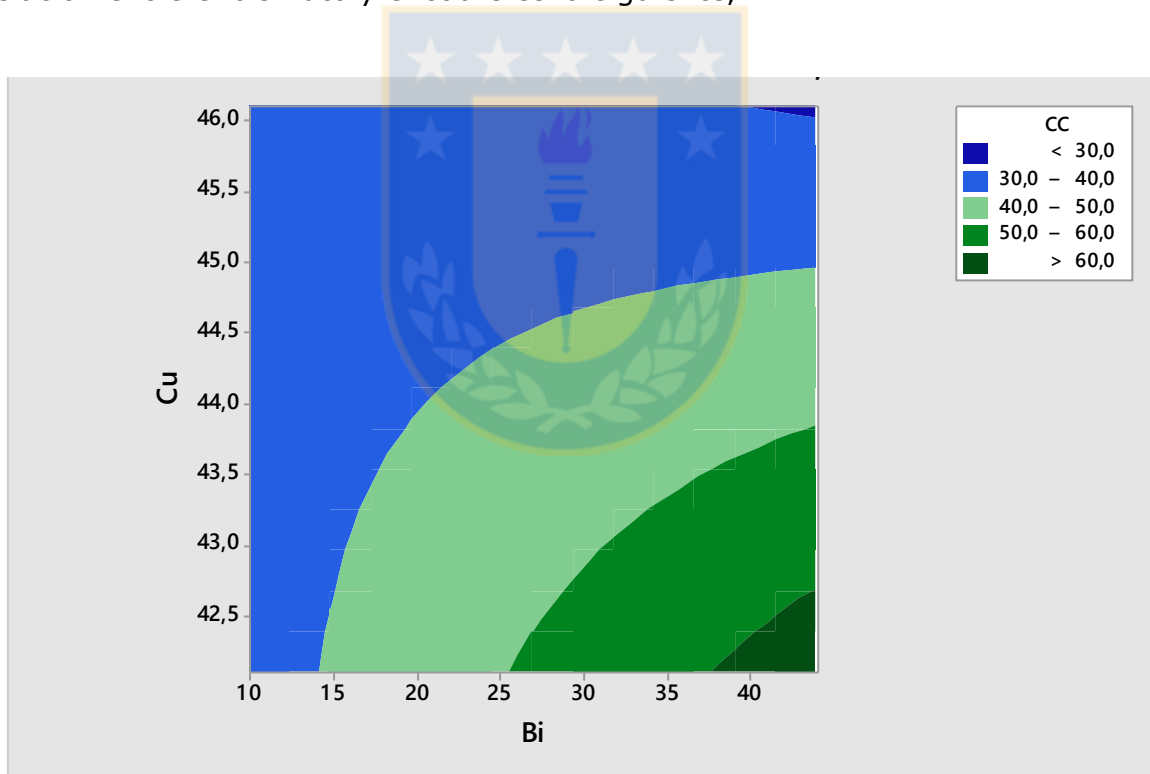
Para el siguiente análisis, en base a lo conversado con los supervisores de la refinería, se decidió que el rango entre 30-40 CC por día es un buen escenario para la operación considerando que se trabaja a una densidad de corriente alta, cercana a la nominal ( $320 \text{ A/m}^2$ ) y se consideraron valores fijos para las variables restantes del análisis, es decir, del flujo, la temperatura, arsénico, antimonio y ácido sulfúrico. Los valores fijos se muestran en Tabla 10.

**Tabla 10.-** Valores fijos de las variables operacionales.

Valores fijos	
Flujo	20,36 L/m
Temperatura	65,25 °C
As	8,5 g/L
Sb	0,33 g/L
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	166,9g/L

En Figura 10 se presenta un gráfico de superficie de contorno que muestra en que concentración deben estar relacionados estos 2 elementos más importantes para obtener un número bajo de cortocircuitos.

La relación entre el bismuto y el cobre es la siguiente,

**Figura 10.-** Gráfica superficie de contorno de CC versus cobre-bismuto.

Por lo tanto, del gráfico de contorno se infiere que para obtener cortocircuitos bajo los 40 por día, la relación debe ser la siguiente: la concentración de Bi<sup>+3</sup> puede variar entre 10-40 mg/L, mientras que el Cu<sup>+2</sup> debe estar en concentraciones de 45 mg/L hasta 47 mg/L, por lo tanto el cobre es la variable determinante para mantener los CC bajo los

40 por día, ya que a todo rango de bismuto, es necesario que el cobre este sobre los 45g/L.

Si bien es cierto que hoy en día los niveles de impurezas se mantienen bajo control gracias a la planta de intercambio iónico, hay excepciones en que la eficiencia de dicha planta no es el esperado o la concentración de impurezas en el ánodo es más alta de lo esperado. Por lo que es necesario tener un seguimiento de la calidad química de los ánodos para saber si es necesario aumentar el cobre en la solución.

### 4.3.2. Resultados y discusiones de análisis en terreno.

#### 4.3.2-1 Ánodos con orejas chuecas.

En Figura 11 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 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 (Figura 12).

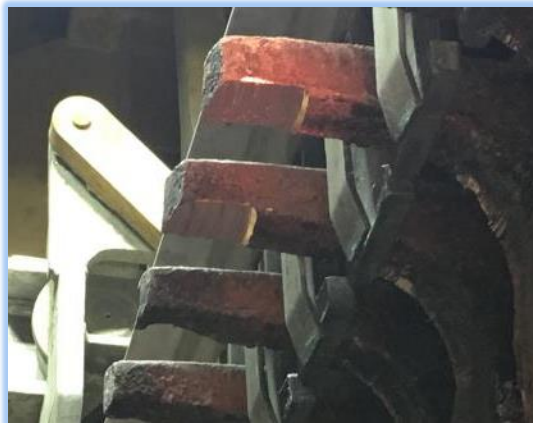


**Figura 12.-** Ánodos en celdas con orejas chuecas.

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.

#### **4.3.2-2 Orejas de ánodos con zona de contacto irregulares.**

Debido a problemas en 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 (Figura 14). La MPA posee una estación de fresado que debe mitigar este desperfecto, pero en terreno se identificó que esta función no se cumple al 100% por falta de nivelación de las cuchillas de fresado (Figura 13).



**Figura 13.-** Orejas de ánodos frezados y no frezados.



**Figura 14.-** Problema de verticalidad de ánodos en celdas.

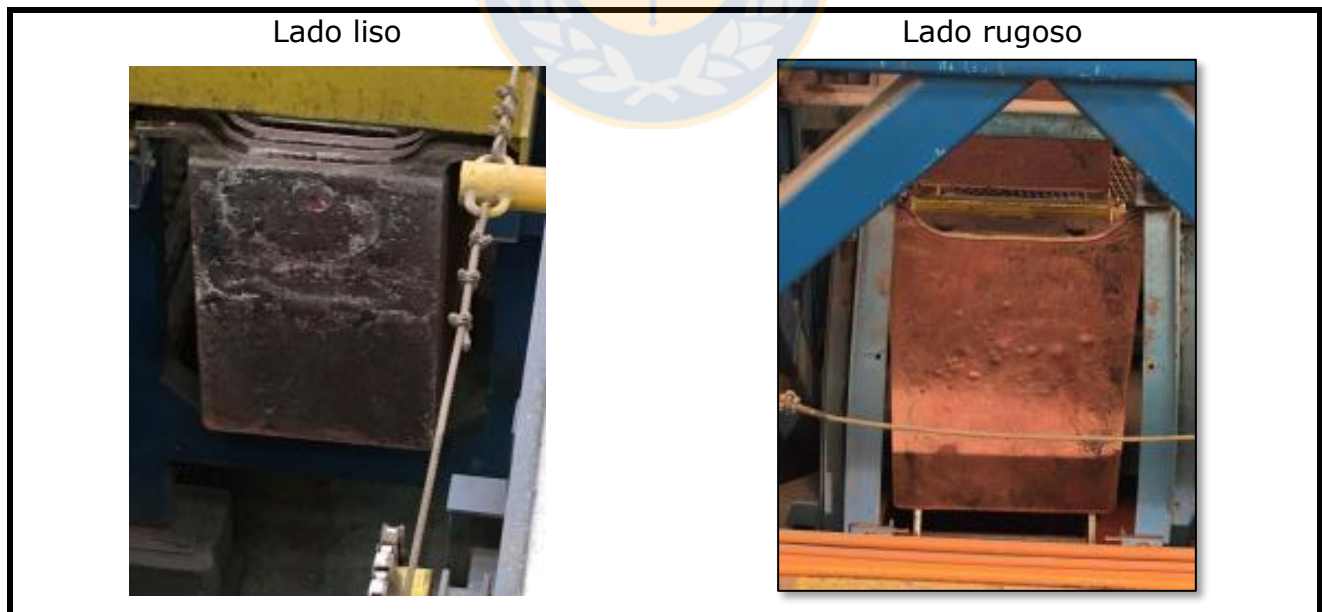
La mala verticalidad de los ánodos tiene como resultados la aparición de nódulos y/o cortocircuitos en la parte inferior del cátodo (Figura 15).



**Figura 15.-** Nódulos en la zona inferior del cátodo.

#### 4.3.2-3 Protuberancias 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.



**Figura 16.-** Protuberancias en ánodos CCC.

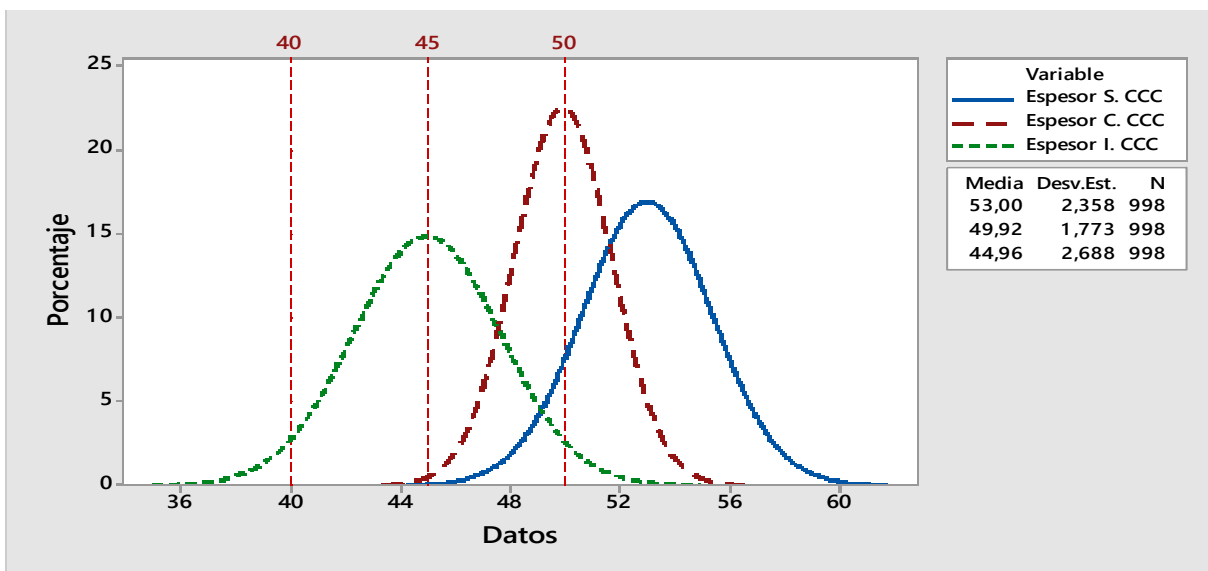
Estas protuberancias en la superficie del ánodo (Figura 16) resultan en una menor resistencia entre los electrodos en esos puntos, con la posible formación de cortocircuitos como consecuencia del crecimiento local de nódulos en la cara frontal del cátodo.

#### 4.3.2-4 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. 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, si esta distancia disminuye, la calidad del depósito será deficiente y lo más probable es que conducirá a un cortocircuito.

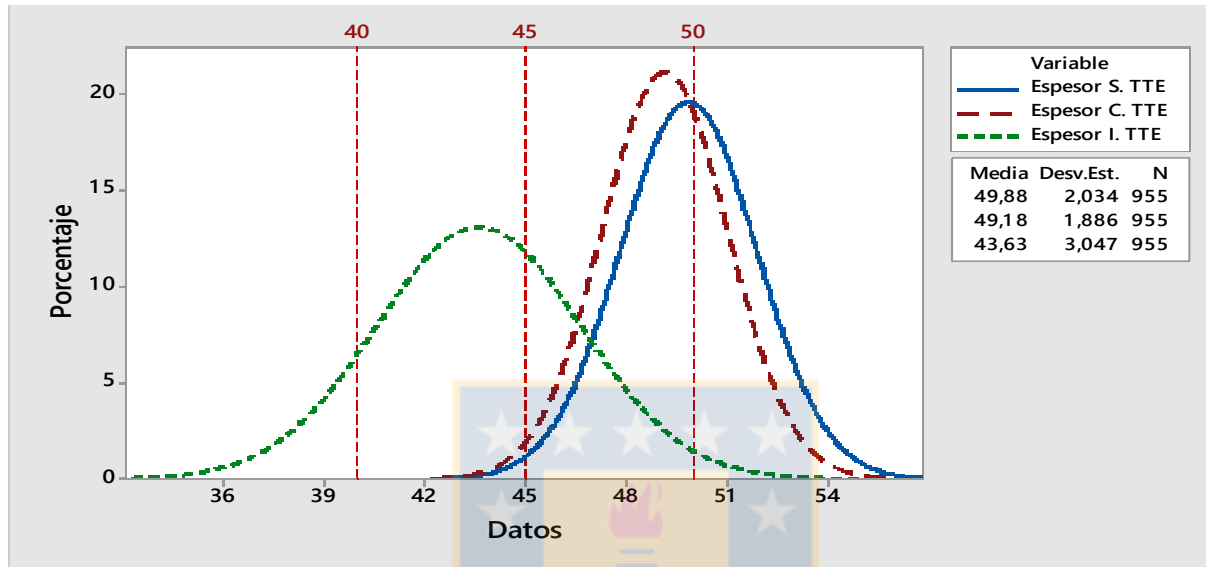
La nave es cargada con ánodos CCC, TTE y ALTN, en una proporción aproximada de 63%, 26% y 11%, respectivamente. A continuación en Figura 17 a Figura 19 se muestran histogramas del espesor de estos tres tipos de ánodos.



**Figura 17.-** Histograma de espesor de ánodos CCC.

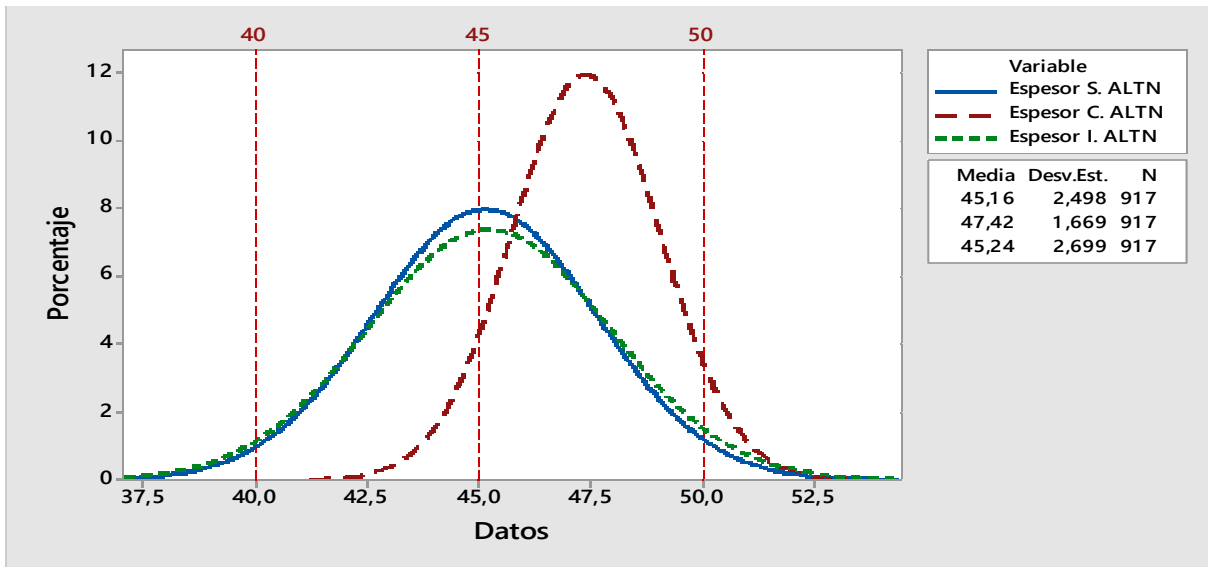


En Figura 17 se observa la distinta distribución de espesor en el largo de los ánodos CCC. En la parte superior promedia 53 mm, la parte central promedia 50 mm y la parte inferior promedia 45 mm. Hay una tendencia a ser más gruesos en la parte superior, superando el máximo establecido de sus dimensiones.



**Figura 18.-** Histograma de espesor de ánodos TTE.

En Figura 18 se observa la distinta distribución de espesor en el largo de los ánodos TTE. En la parte superior promedia 50 mm, la parte central promedia 49 mm y la parte inferior promedia los 44 mm. Hay una tendencia a ser más gruesos en la parte superior. Aun cuando no es uniforme a lo largo de cuerpo, se mantiene dentro de las dimensiones establecidas.

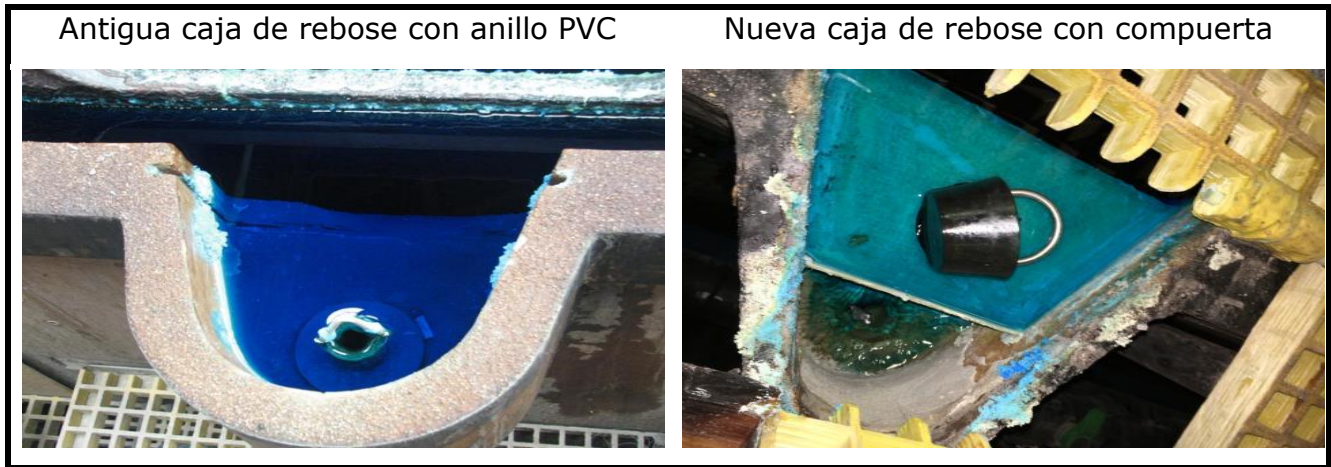


**Figura 19.-** Histograma de espesor de ánodos ALTN.

En Figura 19 se observa un mayor espesor en la zona central del cuerpo de los ánodos ALTN. En la parte superior promedia 45 mm, la parte central promedia 47 mm y la parte inferior promedia los 45 mm. Este tipo de ánodo es el más cercano a las dimensiones establecidas, teniendo una leve tendencia a ser más gruesos en la parte central, pero no supera el máximo establecido de sus dimensiones.

Si bien estas medidas de ánodos son iguales o muy similares a la obtenida para ánodos del año 2015, en el año 2016 el sobredimensionamiento de ánodos, en especial la parte superior de los ánodos CCC, se agravó con un cambio estructural realizado en las celdas de electrorefinación.

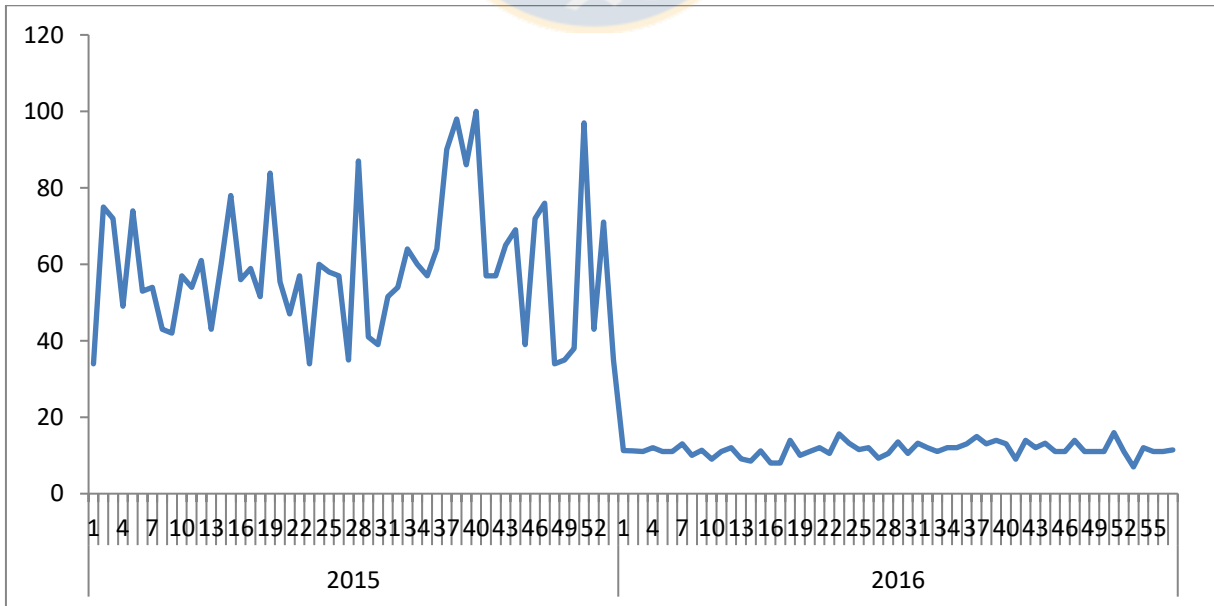
Debido a que era difícil regular el nivel deseado de electrolito con los anillos (tubos de PVC) situados en la caja de rebose de la celda, a principios del año 2016 se incorporaron compuertas a la caja de rebose de las celdas, con el fin de mantener un nivel de electrolito fijo durante todo el ciclo catódico (Figura 20).



**Figura 20.-** Cambio en compuerta de celdas de electrorefinación.

Este cambio trajo como consecuencia un aumento del volumen del electrolito en las celdas y por consiguiente, un aumento del área de disolución del ánodo en su parte superior, el cual al ser más ancho en esa zona provocó un mayor número de CC. Esto se verificó con un seguimiento de 440 cátodos con CC, en donde un 76 % de los CC fueron en la zona superior del cátodo.

La Figura 21 muestra la medida de ánodo no sumergido en el año 2015 y el 2016, sin las compuertas había unos 60 mm del ánodo que no se sumergían en el electrolito, con las compuertas este valor disminuyó a unos 12 mm.



**Figura 21.-** Medición de ánodo no sumergido en electrolito.

Ademas, se realizó un analisis de correlacion con los tres tipos de ánodos cargados en la nave y los CC generados durante el año 2015 versus el año 2016 (Tabla 11). De los resultados obtenidos, solo el año 2016 hubo una correlación signicativa entre los ánodos CCC y ALTN con la generacion de CC.

**Tabla 11.-** Correlaciones de Pearson.

Correlaciones 2015-311 A/m2					Correlaciones 2016-311A/m2						
		CC	CCC	TTE	ALTN			CC	CCC	TTE	ALTN
<b>CC</b>	Corr.	<b>1</b>	<b>-0,053</b>	<b>0,084</b>	<b>-0,053</b>	<b>CC</b>	Corr.	<b>1</b>	<b>,566**</b>	<b>-0,16</b>	<b>-,45**</b>
	Sig.		0,664	0,491	0,666		Sig.		0	0,14	0
	N	70	70	70	69		N	82	82	82	82
<b>CCC</b>	Corr.	-0,053	1	<b>-,84**</b>	<b>-0,22</b>	<b>CCC</b>	Corr.	<b>,558**</b>	1	<b>-,62**</b>	<b>-,455**</b>
	Sig.	0,664		0	0,07		Sig.	0		0	0
	N	70	70	70	69		N	82	82	82	82
<b>TTE</b>	Corr.	0,084	<b>-,84**</b>	1	<b>-,34**</b>	<b>TTE</b>	Corr.	<b>-0,164</b>	<b>-,621**</b>	1	<b>-,407**</b>
	Sig.	0,491	0		0,004		Sig.	0,14	0		0
	N	70	70	70	69		N	82	82	82	82
<b>ALTN</b>	Corr.	-0,053	<b>-0,22</b>	<b>-,34**</b>	1	<b>ALTN</b>	Corr.	<b>-,45**</b>	<b>-,455**</b>	<b>-,40**</b>	1
	Sig.	0,666	0,07	0,004			Sig.	0	0	0	
	N	69	69	69	69		N	82	82	82	82
** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).											

Según Tabla 11, en el año 2016 existe una correlación fuerte positiva con los ánodos CCC y los CC, es decir, al aumentar el número de ánodos CCC en la nave aumentan los cortocircuitos y existe una fuerte correlación negativa con los ánodos ALTN, es decir al aumentar la cantidad de ánodos ALTN en la nave disminuyen los cortocircuitos. La alta correlación positiva de los ánodos CCC y los CC en el año 2016, demuestra la incidencia que tuvo el cambio de anillos a compuertas a diferencia del año 2015, y que a la vez se refuerza con el 76% de CC en la parte superior de los cátodos, y la alta correlación negativa de ánodos ALTN y los CC, se relaciona a que estos ánodos son los únicos con dimensiones más cercanas a la estándar.

A continuación en Figura 22 se muestra un ánodo con cortocircuitos en su parte superior.



**Figura 22.-** Cátodo con nódulos en la zona superior.

#### **4.3.2-5 Inspección catódica**

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

Durante el periodo en la planta se realizó un seguimiento en terreno a las actividades de la cuadrilla de inspección, en donde se identificaron tres actividades que no se realizan correctamente, generando como consecuencia la formación de cortocircuitos.

- 1- Eliminación parcial de los nódulos en el cátodo levantado (70% del total de nódulos del cátodo), quedando en la superficie del ánodo nódulos con alta probabilidad de cortocircuitos.
- 2- Levantamiento parcial de los cátodos, es decir, del total de los cátodos marcados con cortocircuitos se levantaron completos el 75% de ellos y los restantes se levantaron hasta la mitad. El levantar a la mitad el cátodo es una

metodología que ocupan la mayoría de los operadores al ver que el cortocircuito está en la zona superior, descartando la opción de que en la zona inferior hayan más nódulos que puedan generar cortocircuitos.

- 3- Mal alineamiento de electrodos. Si bien está estipulado que la distancia entre electrodos es única y el cátodo debe quedar centrado entre los dos ánodos con una distancia inter-electródica equitativa para ambos, los operadores tienen su propio criterio para cuando un cátodo tiene un cortocircuito. Cuando un cátodo tiene un CC en su cara 1, lo alejan del ánodo adyacente a esa cara y el cátodo es acercado al ánodo que le sigue a la cara 2 del mismo cátodo (cara sin nódulo). Esto al poco tiempo será una alto potencial de generación de nuevos cortocircuitos en la cara 2 (Figura 23).



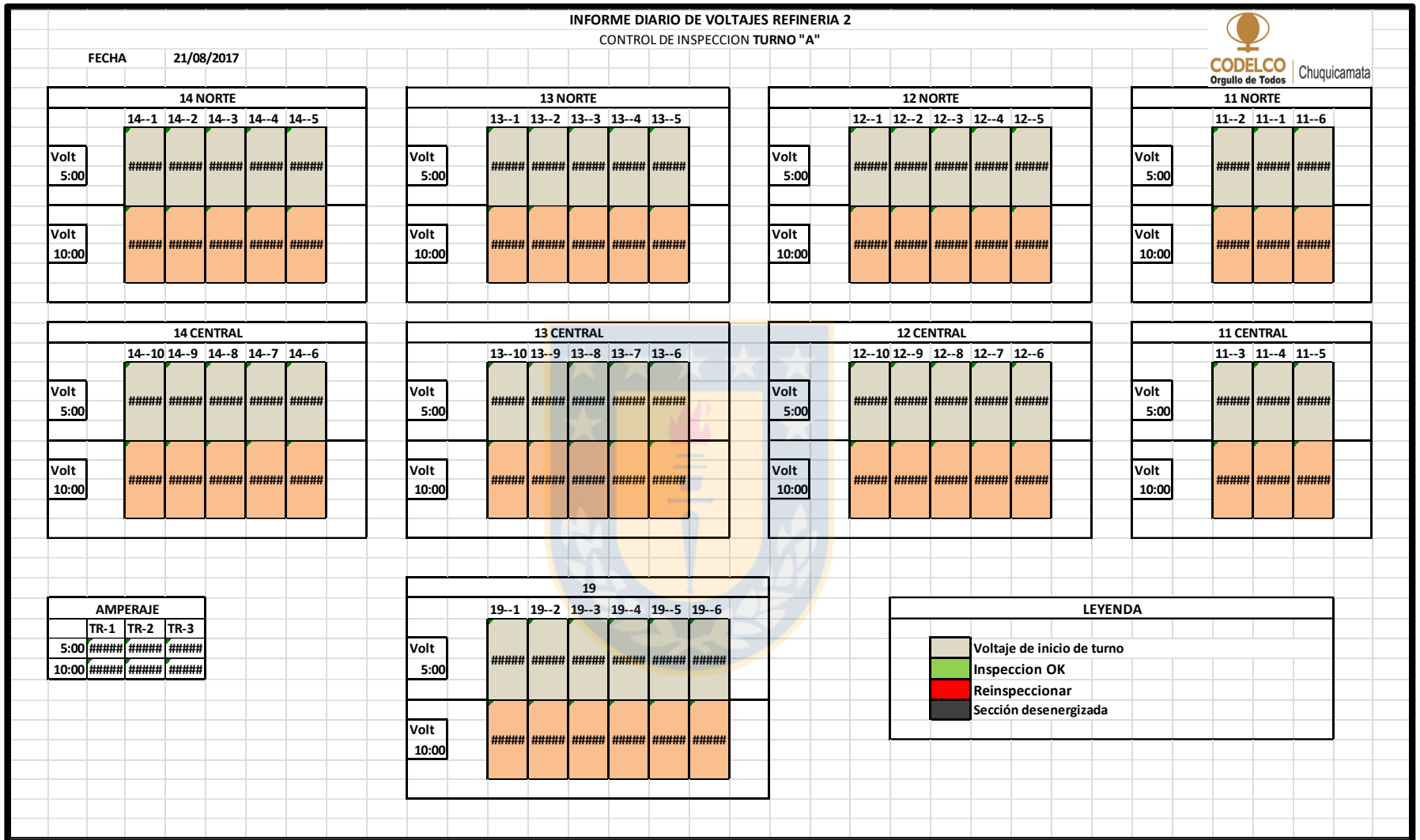
**Figura 23.-** Mal centrado de los ánodos.

La labor de la inspección catódica carece de supervisión, por lo que fue necesario de crear una planilla de control de voltaje por sección. Debido que el factor más importante que hace oscilar el voltaje son los cortocircuitos, es que se decidió tomar como referencia este parámetro para controlar la efectividad en la eliminación de los cortocircuitos de la cuadrilla de la inspección en sus respectivas secciones.

Según lo observado en planta, el voltaje disminuye en función de la presencia de CC. Es por esto que después de pasar la cuadrilla de inspección y eliminar los CC, el voltaje debiese aumentar, dado que se incrementa la fracción de corriente empleada en el proceso en lugar de forma óhmica y por lo tanto aparecen más sobretensiones que llevan a aumentar el voltaje de celdas.

Se construyó una planilla con la información de voltajes promedio por sección registrada cada 15 minutos en el PCS7 (Figura 24). Esta planilla muestra el valor del voltaje en los circuitos de la nave antes y después de la inspección catódica. Si el voltaje aumenta después de realizada la inspección catódica, la sección cambia a color verde, es decir, la inspección realizada eliminó los cortocircuitos existentes. Si el voltaje se mantiene o disminuye después de realizada la inspección catódica, la sección cambia a color rojo, es decir, aún existe presencia de cortocircuitos que están consumiendo parte del voltaje.





**Figura 24.-** Planilla de control de voltajes en la nave de ER.



## **5. TRABAJO EXPERIMENTAL MAT®.**

### **5.1. Tecnología MAT® [17].**

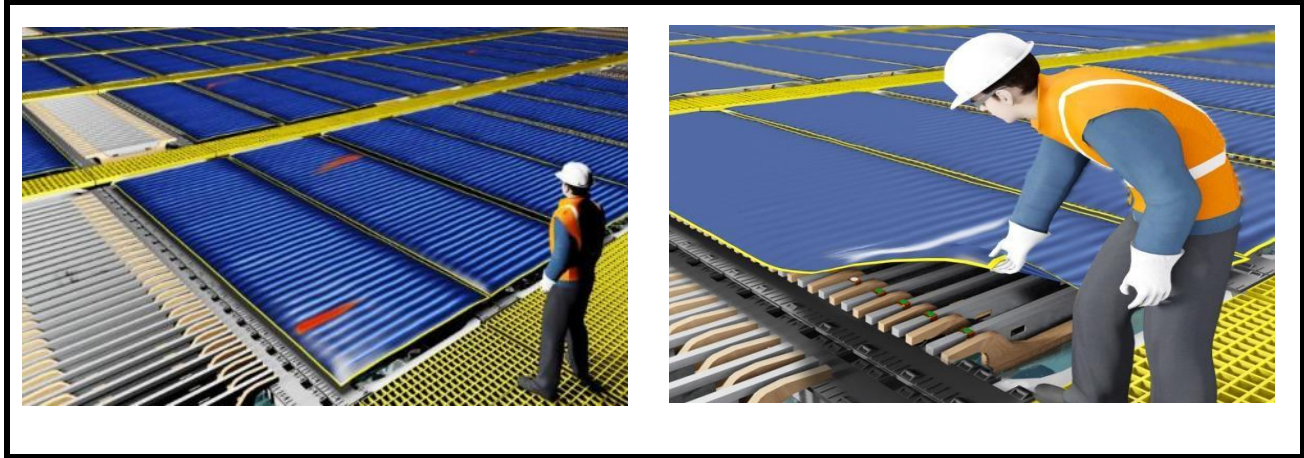
Como quedó en evidencia en los análisis anteriores, los cortocircuitos son un problema diario en la refinería, el cual es necesario mitigar al poco tiempo de su iniciación para evitar disminuir la eficiencia de corriente.

Considerando que se desea trabajar a una alta densidad de corriente, es necesario un constante monitoreo de la planta ya que independiente de su origen, la existencia de nódulos al poco tiempo formará un cortocircuito entre ánodo y cátodo.

Por esto, es necesario que la refinería Chuquicamata modernice y optimice el sistema de detección actual, basándose en un control prematuro de un posible cortocircuito franco, es decir, identificando el nódulo en sus etapas iniciales.

Para lograr esto, se propone incorporar la tecnología MAT®, una innovación creada y desarrollada por la empresa Innovaxxion, cuya función es monitorear 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 nódulo perjudicial para la eficiencia de corriente. 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®. En Figura 25 y 26 se puede apreciar lo que propone esta tecnología.



**Figura 25.-** Tecnología MAT®.

Con la incorporación de esta tecnología se espera disminuir el tiempo de permanencia de los cortocircuitos, ya que se podrá redirigir la cuadrilla de inspección a la zona con más cortes.



**Figura 26.-** Escenario final esperado.

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. 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 dar inicio a esta evaluación, se realizó un levantamiento de temperatura de los cátodos en CC para poder definir el pigmento que se utilizaría en los prototipos ya definidos de las telas y los clips. Con los prototipos y el pigmento ya definidos, se realizaron las pruebas necesarias para la evaluación del comportamiento y efectividad tanto de las telas y clips, como de los sensores identificadores de cortocircuitos y el software que interpretará la información entregada por los sensores.

## 5.2. Temperatura para la identificación de CC.

Para definir el pigmento que se utilizaría en la tecnología MAT®, se levantó información de la temperatura mínima a la que se identificaban los nódulos con tendencia a formar cortocircuitos.

Para esto, se realizó un levantamiento de temperaturas de cátodos con cortocircuito junto con el equipo de la SIP. Se acompañó a las cuadrillas de inspección durante su rutina, midiendo con un termómetro láser, la temperatura de las partes superiores de cátodos en cortocircuitos marcados previamente por el operador de la cuadrilla de inspección mediante la cámara infrarroja.

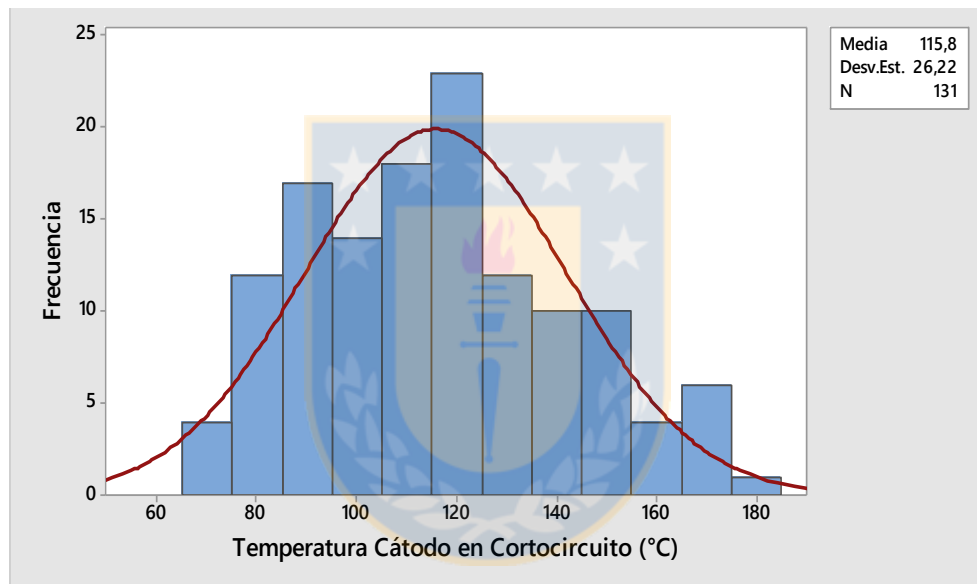


**Figura 27.-** Termómetro laser para mediciones de temperaturas de contacto.

Se identificó, tanto la temperatura de los cátodos en CC como la temperatura de los cátodos adyacentes al CC, pensando en una posible transferencia de temperatura a estos, los que más adelante podrían alertar como CC falsos. A partir de estos datos se

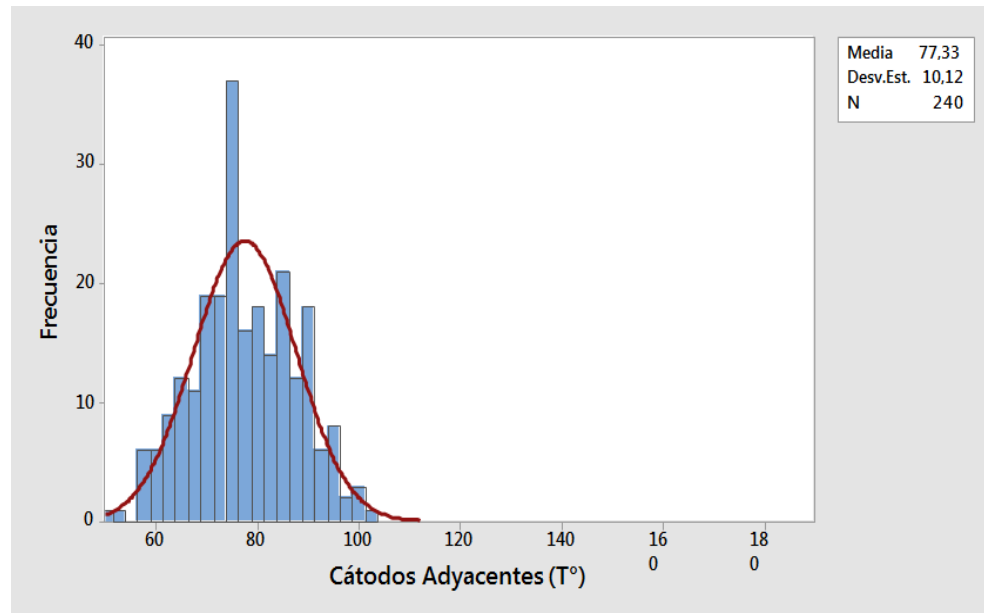
realizó un análisis estadístico buscando esclarecer la temperatura con la que un cátodo sería considerado en cortocircuito, cubriendo la mayor cantidad de casos de cortocircuitos con la menor cantidad de falsos positivos (cátodos sin corto pero con alta temperatura).

En Figura 28 se aprecia que el rango de temperatura de cortocircuito en oreja del cátodo va desde 64° a 180° con un promedio de 116°C y una desviación estándar de 26°C, lo que indica que el 68% de los datos está contenido en el rango de 90° a 142°C (asumiendo distribución normal).



**Figura 28.-** Histograma temperatura de cátodos en CC.

A su vez, en Figura 29 se observa que el rango de temperatura de los cátodos adyacentes a los cátodos cortocircuitados va desde 50° a 100°C, con un promedio 77°C y una desviación estándar de 10°C, asumiendo distribución normal se tiene que el 68% de los datos están contenidos en el rango de 67 a 87°C.



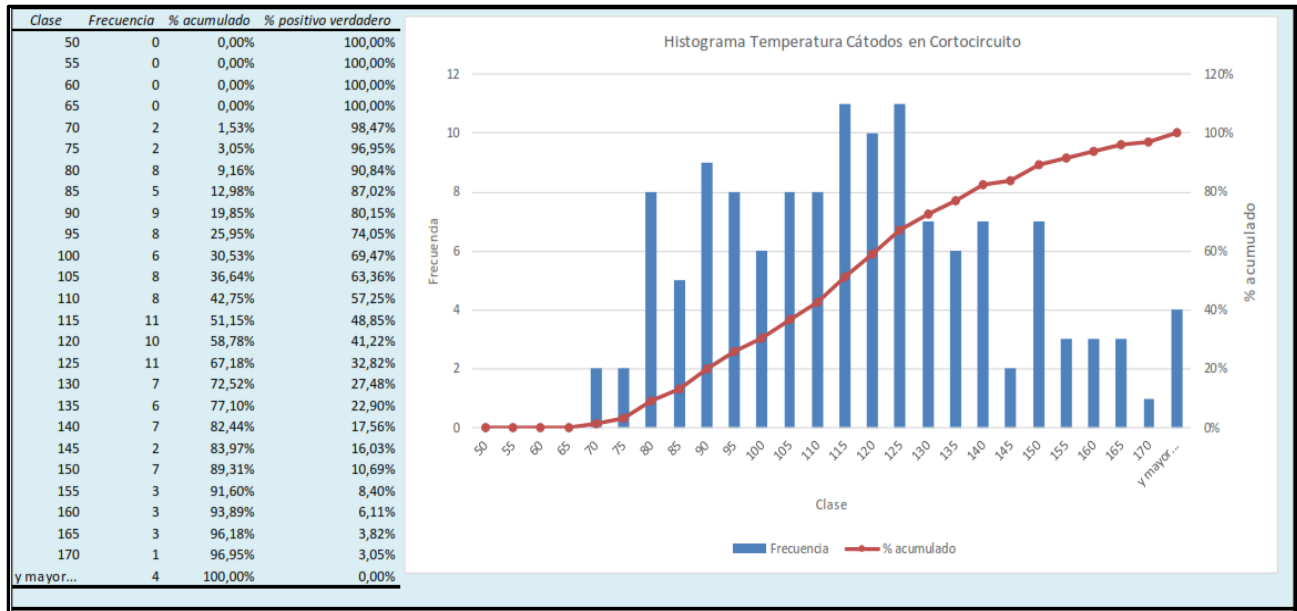
**Figura 29.-** Histograma temperatura de cátodos adyacente a cátodos en CC.

Aunque esta diferencia de temperaturas de los cátodos en CC y los cátodos adyacentes no es significativa, se tiene un rango de temperatura en común, de 65 a 100°C, en el cual es difícil determinar la temperatura de corte óptima, y es necesario tener una metodología adecuada que permita definir la mejor temperatura de corte y discriminar si un cátodo se encuentra o no en cortocircuito.

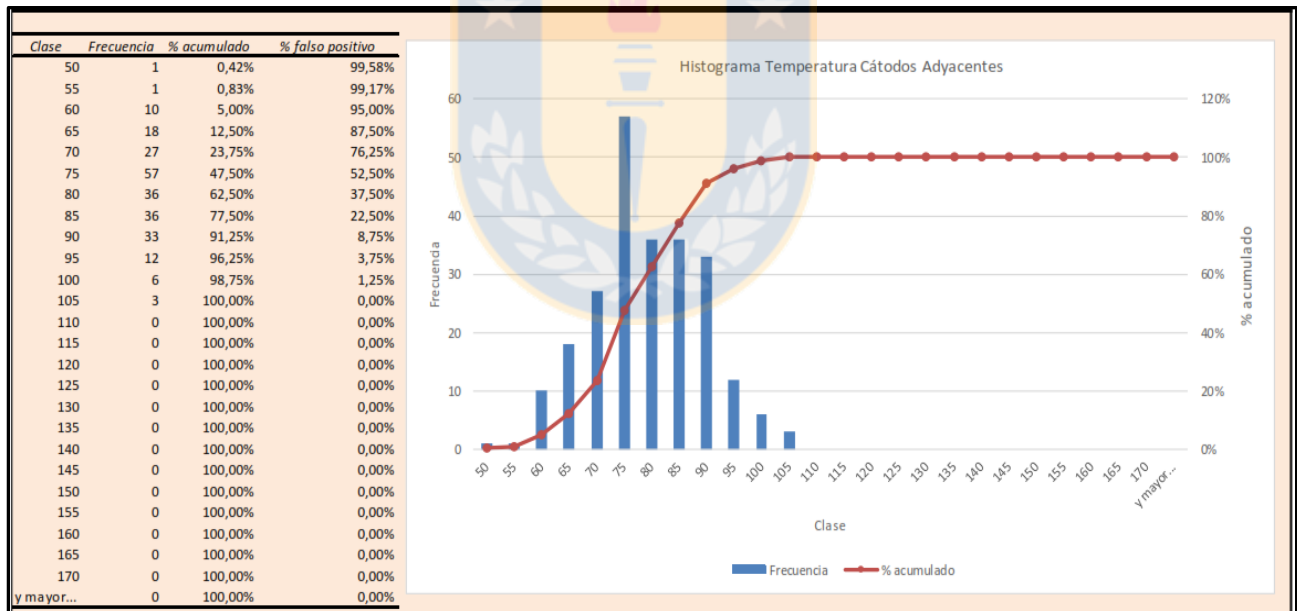
Con los valores de porcentajes acumulados por clase de temperaturas se puede determinar la temperatura de corte que entregue la menor cantidad de falsos positivos (cátodos en rango de temperatura de cortocircuito, pero que no presentan cortocircuitos efectivos), sin perder un gran porcentaje de positivos verdaderos (cátodos en rango de temperatura de cortocircuito, que presentan cortocircuito efectivo).

En Figura 30 y 31 se observa la distribución de temperaturas de cátodos en cortocircuitos y la temperatura de cátodos sin cortocircuitos, junto al porcentaje acumulado por cada clase.

Se procedió a calcular el porcentaje de positivos verdaderos, con los datos de temperatura de cátodos en cortocircuito y el porcentaje de falsos positivos, con los datos de temperatura de cátodos adyacentes.

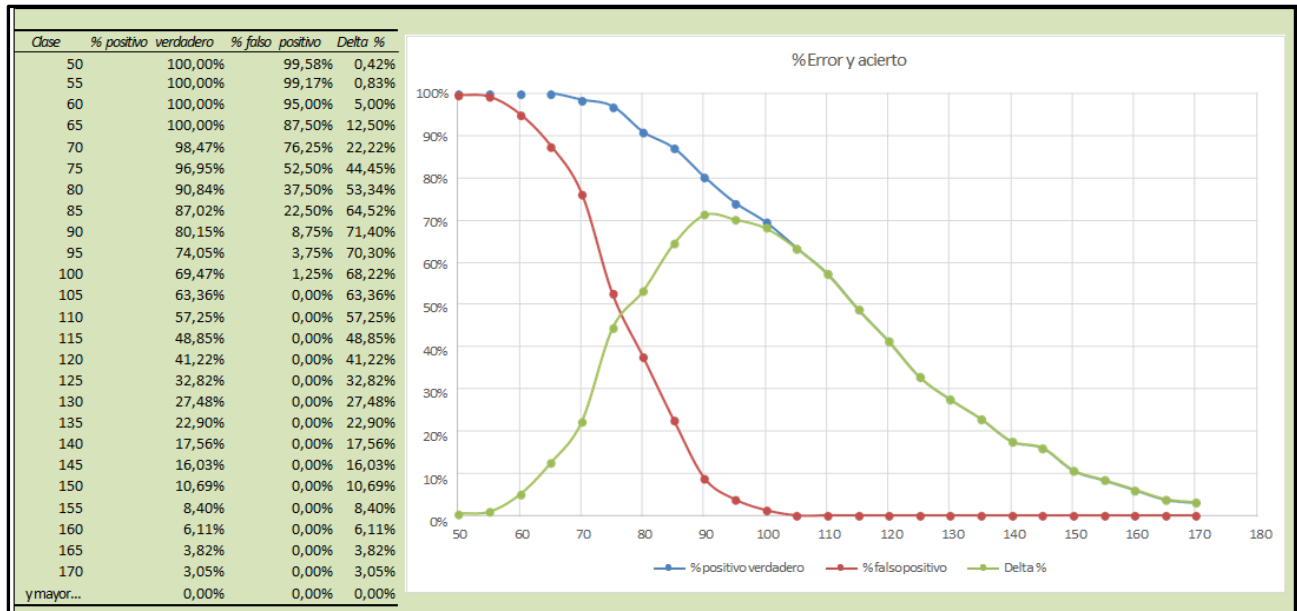


**Figura 30.-** Histograma temperatura de cátodos con CC, cálculo de positivos verdaderos.



**Figura 31.-** Histograma temperatura de cátodos adyacentes, cálculo de falsos positivos.

En Figura 32 se muestran los valores de falsos positivos (errores) y los positivos verdaderos (aciertos). Con estos porcentajes de error y acierto se definió la temperatura de corte para el pigmento termocromático.



**Figura 32.-** Porcentaje de error y acierto a diferentes temperaturas de cátodos en

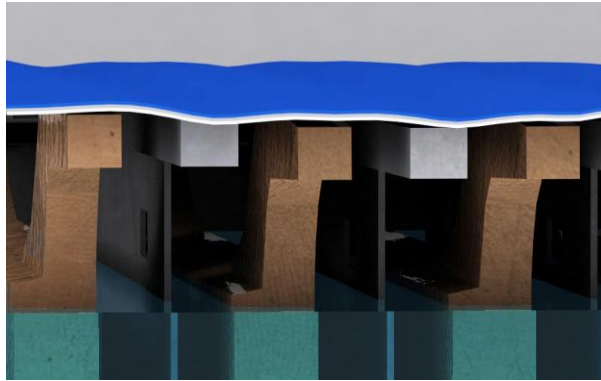
CC.

Por lo tanto, luego de realizar este análisis estadístico, se concluye que la temperatura que cubre la mayoría de los positivos verdaderos con la menor cantidad de falsos positivos es de **90°C**.

### 5.3. Pigmento termocromático.

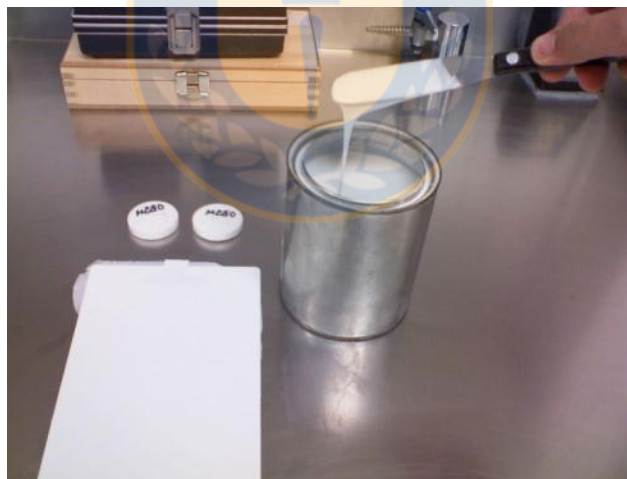
Para la definición del pigmento a utilizar fue necesario considerar la pérdida de temperatura que existe desde la parte superior de la oreja del cátodo hasta la superficie de la tela donde está adherido el pigmento. Esta disipación de temperatura es producto del aire entre la tela, la oreja de cátodo y del material de la tela (Figura 33). Por lo tanto, fue necesario utilizar para las pruebas de prototipos un pigmento que cambie de color a una temperatura menor a los 90°C.

Para las pruebas se utilizó un pigmento que cambia de color a las 80°C (suponiendo una disipación de temperatura entre el aire y el material de unos 10°C aproximadamente).



**Figura 33.-** Disminución de temperatura transferida de la oreja de cátodos hasta la superficie de la tela.

Para adherir el pigmento a la tela se utilizó una base epóxica llamada plastisol (Figura 34), que es una mezcla de resina, de un plastificante y otros aditivos. Esta base además protege al pigmento del medio ácido, corrosivo y temperaturas altas de las celdas. El plastisol debe ser correctamente curado a una cierta temperatura para que mantenga sus propiedades físicas.



**Figura 34.-** Plastisol utilizado para tecnología MAT®.

#### 5.4. Prototipos de telas y clips MAT®.

Para la tela 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 abrasivos, y tiene una densidad de  $0,9-0,91 \text{ g/cm}^3$ .

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.

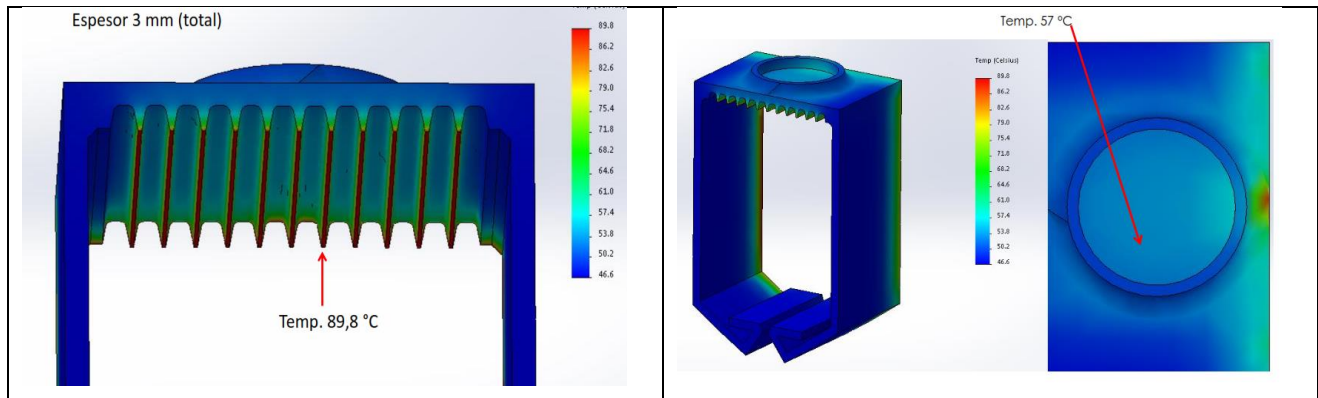
La tela de polietileno de alta densidad (HDPE), es uno de los polímeros termoplásticos más utilizados en el mundo y además es de bajo costo, si bien se sabe que es menos resistente que el PP a las altas temperaturas, esta es más flexible y tiene gran resistencia química, a la abrasión, al impacto y al desgaste, y su densidad es de  $0,94-0,97 \text{ g/cm}^3$  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.

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 dissipador de calor y tiene un grosor de 3 mm. Si se considera una temperatura de  $90^\circ\text{C}$  de la barra del cátodo al iniciar un nódulo, con el dissipador y por su grosor, se obtendrá una temperatura de  $57^\circ\text{C}$  en el contenedor de pigmento termocromático. Se puede observar este prototipo en Figura 35.



**Figura 35.-** Prototipo 1 de clips termocromáticos.

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 Figura 36.



**Figura 36.-** Prototipo 2 de clips termocromáticos.

### 5.5. Metodología para prueba industrial de tecnología MAT®.

Para la evaluación de telas y clips se realizaron dos pruebas, una prueba inicial que consistió en el seguimiento del comportamiento de los tres prototipos de tela y los dos prototipos de clips y luego se realizó una segunda evaluación por más tiempo de la tela y clips que tuvieron mejor resultados en la prueba 1.

La primera prueba industrial fue en el circuito 11, sección 1 hemi sección A (11-6A) de la Refinería Chuquicamata. Se utilizaron los 3 prototipos de tela, cada uno diseñado para cubrir una celda completa. Fueron ubicadas al centro de la hemi sección, en las celdas 9, 10 y 11. En cuanto a los clips, se utilizaron 55 unidades de cada prototipo (1 y 2), puesto en una oreja del cátodo (lado de contacto oreja-barras intermedia). Esta prueba abarcó un ciclo anódico de 14 días, en donde la corriente aplicada fue de 30000[A].

La segunda prueba industrial fue en el circuito 14, sección 3 hemi sección A y B (14-3A - 14-3B) de la refinería Chuquicamata. Se utilizó el prototipo de tela y clip con mejores resultados en la primera prueba; el prototipo C de las telas, "Poliéster con textura micro polar", y el prototipo 2 de los clips, "clips con adhesivo adosado a la oreja". Se utilizaron dos telas de dimensiones de 1 celda de ancho por 10 celdas de largo y 10 telas de dimensiones de 1 celda de ancho y 2 celdas de largo, cubriendo así una sección completa (40 celdas). En cuanto a los clips, se utilizaron 5000 unidades, puestos en ambas orejas de los cátodos.

Esta prueba abarcó 2 ciclos anódicos, en donde la corriente aplicada fue de 38900[A]. Se probaron además, 6 sensores identificadores de cortocircuitos y se trabajó con el software que interpreta las imágenes.

Para realizar estas pruebas se generaron, en conjunto con la SIP, los siguientes documentos para la instalación e inspección de telas MAT® y clips termocromáticos:

- Protocolo de instalación de telas y clips termocromáticos
- Procedimiento de inspección catódica telas y clips termocromáticos
- Instructivo de condiciones de satisfacción de la prueba
- Hoja de control inspección catódica

Durante el desarrollo de estas pruebas se trabajó con el personal de Innovaxxion para la instalación de esta tecnología y del personal de las cuadrillas de inspección para el seguimiento diario del comportamiento de las telas y clips MAT®.

Los indicadores para la evaluación del comportamiento de las telas y clips en las dos pruebas son:

**1- Verificar detección de cortocircuitos por parte del MAT® y los clips termocromáticos.**

En esta prueba se verificó el funcionamiento del cambio de color de la tela MAT® y de los clips. Para ello se realizó inspección visual diaria, apoyado de actual cámara infrarroja que utiliza la cuadrilla de inspección, para corroborar si efectivamente la tela y los clips marcan todos los cátodos en CC detectados.

En la planilla de control se anotó si efectivamente existe cambio de color además de, el número de celda y el número del cátodo en corto.

**2- Inspección visual del estado de las telas.**

Se verificó el estado del material frente a la constante exposición de altas temperaturas, se verificó sulfatación de la tela luego de un ciclo anódico, se verificó maleabilidad y por último se verificó el comportamiento de la tela frente a la larga exposición de electrolito, si se oxida o no. Esto se realizó mediante inspección visual

**3- Inspección del estado del pigmento termocromático y plastisol.**

Se verificó si el plastisol mantuvo sus propiedades y por ende un buen estado el pigmento termocromático.

**4- Verificar porosidad de la tela.**

Se verificó porosidad de la tela MAT® mediante la sulfatación de contactos. Se realizó una inspección visual de los contactos contrastándolos con otra celda adyacente pero cubierta con tela normal.

**5- Comportamiento de los clips frente al ambiente ácido y altas temperatura de las celdas.**

Se verificó el estado de los clips respecto de las presencia de deformaciones.

Se consideró que al momento de realizar cada medición, registrar corriente aplicada y voltaje de sección, de modo de complementar datos y observaciones.



## 5.6. Resultados de la tecnología MAT®.

### 5.5.1. Resultados de la primera prueba.

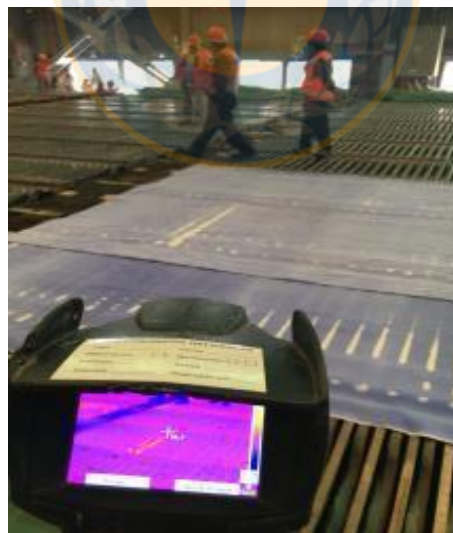
La fecha de inicio de estas pruebas fue el jueves 28 de abril y los resultados obtenidos, después de 14 días de prueba, con prototipos A, B y C de las telas y los prototipos 1 y 2 de los clips, se describen a continuación.

#### 5.5.1-1. Detección de CC.

Para el prototipo A, se obtuvo una detección del 100% de los cortocircuitos.

Para el prototipo B, se obtuvo una detección del 97% de los cortocircuitos, el 3% de los cortocircuitos que no identificó la tela, fue debido a que este se encontraba bajo el umbral de sensibilidad definida para el pigmento, 90°C.

Para el prototipo C, se obtuvo una detección del 100% de los cortocircuitos. Ver Figura 37.



**Figura 37.-** Efectividad del cortocircuito identificado por la tela MAT®.

### 5.5.1-2. Estado de las telas MAT®.

Para el prototipo A, se visualizaron quemaduras en la tela en las zonas donde hubo cortocircuitos. Sin embargo la tela mantuvo buena maleabilidad. Ver Figura 38.

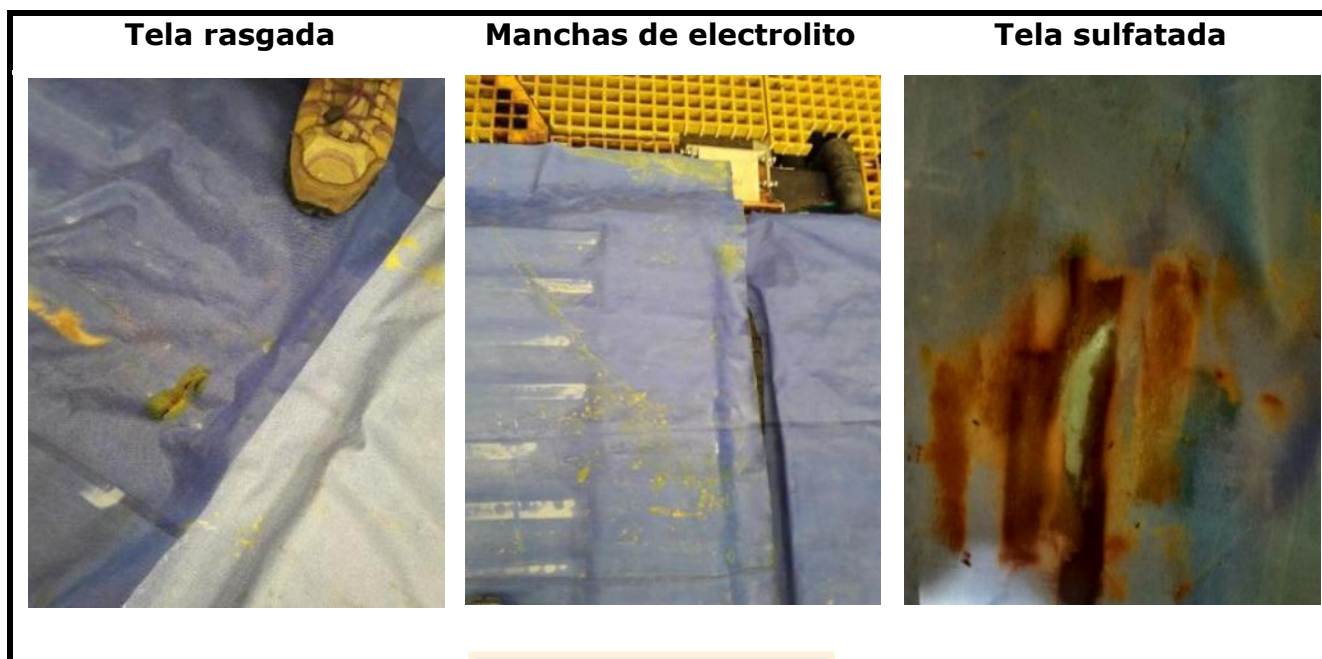
Para el prototipo B, se visualizaron manchas de electrolito, provocando el rompimiento de la tela, también presentó sulfatación.

A pesar de que la tela es de carácter hidrófobo, el problema ocurre cuando el electrolito se seca sobre la tela, afectando al plastisol y al pigmento, provocando las manchas de color amarillo. Ver Figura 39.

Para el prototipo C, no se visualizaron daños. Ver Figura 40.



**Figura 38.-** Tela prototipo A quemada por alta temperatura de catados en CC.



**Figura 39.-** Resultado de telas prototipo B.



**Figura 40.-** Resultado de tela prototipo C.

### 5.5.1-3. Estado del pigmento termocromático y plastisol.

Para el prototipo A y B, el plastisol no resistió las altas temperaturas degradándose. Esto trae como consecuencia que el pigmento pierda propiedad termocromática a quedar expuestas a las condiciones de la celda de electrorefinación.



Para el prototipo C, el plastisol resistió a las altas temperaturas manteniendo al pigmento en condiciones óptimas para el segundo ciclo catódico.

#### **5.5.1-4. Porosidad de la tela.**

Para el prototipo A, los contactos cubiertos por esta tela se mantuvieron igual que los contactos cubiertos con la tela actual de la refinera.

Para el prototipo B, se observó condensación superficial, sin embargo, los contactos cubiertos por esta tela se mantuvieron igual que los contactos cubiertos con la tela actual de la refinera. Ver Figura 41.

Para el prototipo C, no se observó condensación superficial. A pesar de que la tela es menos respirable que la actualmente utilizada en la refinera, no presentó sulfatación de contactos. Ver Figura 42.



**Figura 41.-** Resultados de porosidad de prototipo B.



**Figura 42.-** Resultado de porosidad de prototipo C.

### 5.5.1-5 Estado de los clips.

Para el prototipo 1, en el primer ciclo catódico los clips acertaron en un 100% en cortocircuitos sobre 90°C, pero en el segundo ciclo catódico fueron perdiendo su capacidad de identificación, por degradación del pigmento y del plástico.



**Figura 43.-** Resultado de prototipo 1 de los clips

Para el prototipo 2, los clips detectaron todos los cortocircuitos mediante el cambio de color pero existieron algunos que perdieron su capacidad termocromática con el tiempo o una vez expuestos a temperaturas muy altas a causa de un cortocircuito franco. Se identificaron algunos clips con tonalidad intermedia a una temperatura media de oreja de  $75 \pm 6,8$  °C. Ver Figura 44.



**Figura 44.-** Resultados clips prototipo 2.

### **5.5.2. Resultados de la segunda prueba.**

De los resultados de la primera prueba, el que obtuvo un mejor comportamiento fue la tela prototipo C y el clip prototipo 2, por lo que se utilizaron estos prototipos para la segunda prueba. Se instaló una primera serie de 2200 clips termocromáticos mejorados del prototipo 2 en un sólo lado de la oreja del blanks. Luego de la primera cosecha se concluyó que era necesario instalar los clips en ambas orejas, ya que es altamente probable que los blanks no vuelvan a la celda en la misma posición inicial, lo que afectaría en que los clips no estarían en lado de contacto con la barra intermedia (que es donde la temperatura aumenta en caso de encontrarse un cortocircuito). Es por esto, que finalmente se instalaron clips en las orejas restantes completando finalmente los 4400 clips instaladas en cada oreja de la sección.

La hemi sección 14-3A se cubrió con dos telas de 1 celda de ancho por 10 de largo, y la hemi sección 14-3B se cubrió con diez telas de 1 celda de ancho por 2 de largo. Además, se realizó una prueba con los sensores identificadores de cortocircuitos. Los resultados obtenidos después de 2 ciclos catódicos, se describen a continuación.

#### **5.5.2-1. Detección de cortocircuitos.**

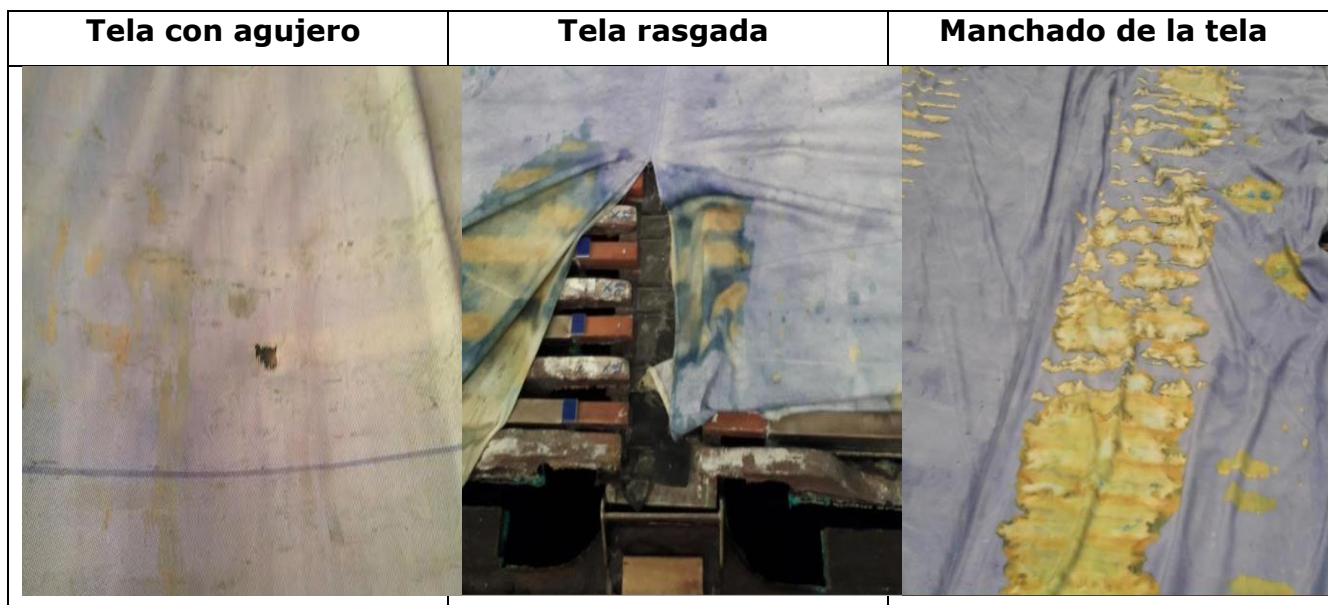
Se obtuvo una detección del 98% de los cortocircuitos (Figura 45). El 3% de los cortocircuitos que no identificó la tela, fue debido a que éste se encontraba bajo el umbral de sensibilidad definida para el pigmento, los 90°C.



**Figura 45.-** Comprobación de detección de cortocircuito.

#### **5.5.2-2. Estado de las telas.**

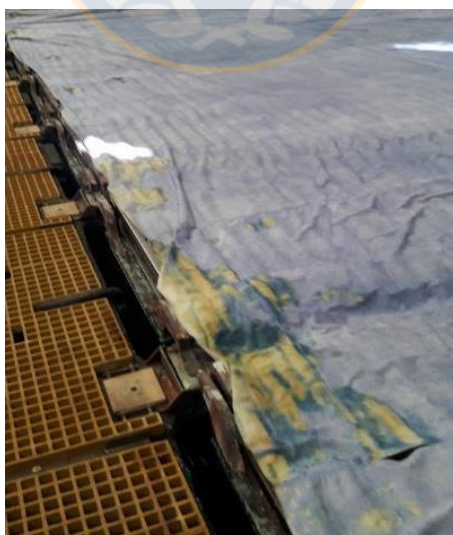
Al segundo ciclo catódico las telas de micro polar presentaron agujeros y se rasgó la tela del formato 1 celda de ancho por 10 de largo. Además, erróneamente se colocaron las telas en sentido inverso, esto quiere decir que el pigmento termocromático quedó en contacto directo con el electrolito generando un manchado profundo de la tela (Figura 46).



**Figura 46.-** Estado final de las primeras pruebas de telas MAT®.

### 5.5.2-3. Estado del pigmento termocromático y plastisol.

El pigmento se vió afectado por el ácido, principalmente en las puntas que entran a la celda (Figura 47).



**Figura 47.-** Tela manchada con ácido.

#### 5.5.2-4. Porosidad de la tela.

Los contactos cubiertos por esta tela se mantuvieron igual que los contactos cubiertos con la tela actual de la refinería.

#### 5.5.2-5. Estado de los clips.

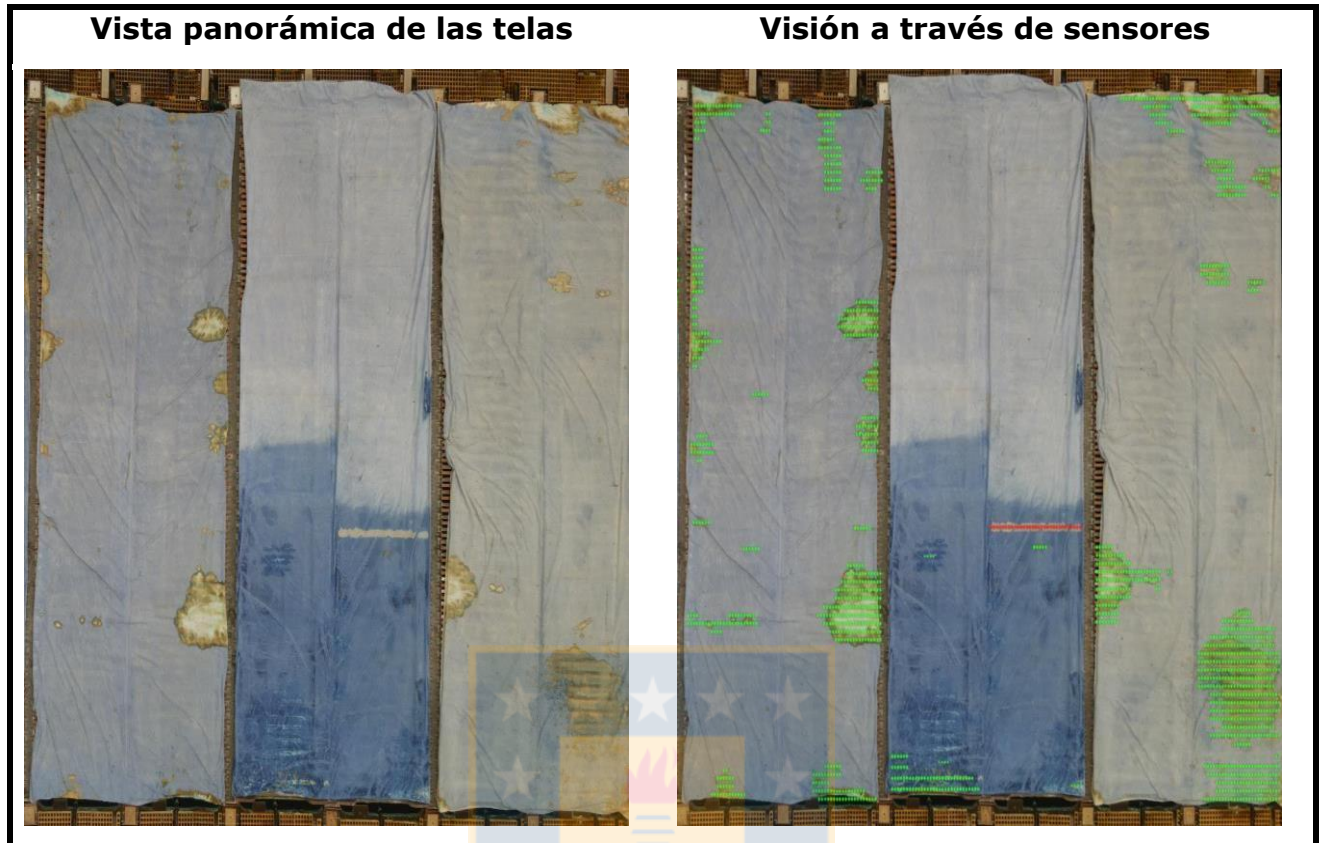
La detección de CC sobre los 90°C fue un 98% (Figura 48), el 2% que no fue detectado porque algunos clips perdieron la eficacia del pigmento. No hubo ningún falso positivo detectado. Los clips no presentaron deformación pero un 5% de ellos se despegaron por estar expuestos sobre los 120°C.



**Figura 48.-** Funcionamiento correcto de los clips termocromáticos.

#### 5.5.2-6 Resultados de los sensores identificadores de cortocircuitos.

Se obtuvo una detección del 99% de los cortocircuitos. El software de detección de CC diferencia un cortocircuito de una mancha. El cortocircuito lo identifica de color rojo y las manchas de color verde (Figura 49).



**Figura 49.-** Visión a través de los sensores identificadores de CC.

De los resultados obtenidos se tiene efectividad en la detección e identificación de los cortocircuitos por la tela MAT®, asegurando igual confiabilidad que entrega la cámara infrarroja pero el material utilizado no es resistente a las condiciones de la nave ER, telas y clips no duran más que un ciclo anódico.

Innovaxion está trabajando en una versión de tela mejorada a la que el pigmento sea adherido en la fibra de la tela y a la vez está trabajando en una versión de clips que es de una sola pieza inyectada en plástico termocromático, de esta manera el pigmento está inserto en el plástico y por lo tanto más protegido del ataque químico y de altas temperaturas.

## 6. CONCLUSIONES.

1.-Del primer análisis multivariable de los 2475 datos, la variable con mayor correlación de Pearson con los CC (cerca a los 0,66) fue la **densidad de corriente**, siendo la única variable con una correlación fuertemente positiva. La fiabilidad de este resultado lo comprueba el valor 0,0 de su significancia y el alto valor de datos analizados.

2.-Filtrando los datos a una densidad cercana a la nominal, sobre los 300 A/m<sup>2</sup>, las variables con mayor relación con los CC fueron la concentración de bismuto (Bi<sup>+3</sup>) y la concentración de cobre (Cu<sup>+2</sup>). La concentración de bismuto tiene una correlación de Pearson de 0,54 con los CC, siendo una correlación fuertemente positiva, es decir, al aumentar la concentración de bismuto, aumentan la generación de CC. La concentración de cobre tiene una correlación de Pearson de -0,5 con los CC, siendo una correlación fuertemente negativa, es decir, al aumentar la concentración de cobre disminuyen los CC.

Del análisis de superficie de contorno, se obtuvo que la concentración del cobre es la determinante en la generación de CC, es decir, al estar el cobre por sobre los 45g/L, se logra mantener un bajo número de cortocircuitos a todo rango de concentración de bismuto 10-40 ml/L.

3.-Del análisis en terreno, se determinó que la variable más incidente es la calidad del ánodo, reflejado principalmente en su espesor, además de una falta de eficacia en la corrección por parte de las máquinas preparadoras de ánodos (MPA).

4.-La inspección catódica es una labor importante para mantener bajo control, tanto el crecimiento nodular como la formación de CC. Para reformar esta labor se creó la planilla de voltajes para controlar la eficiencia de ésta y a su vez identificar secciones con más CC y redirigir a una cuadrilla a ese sector para mitigar estas fallas en un menor tiempo posible.

5.- En cuanto a la tecnología MAT®, la detección e identificación de los cortocircuitos es conforme a lo esperado, siendo igual de efectivo que la cámara infrarroja pero la resistencia del material no supera el ciclo anódico, las telas y clips pierden efectividad en su desempeño ya que la tela sufre quemaduras que dañan tanto la tela como el pigmento. Las cámaras o sensores que identifican los CC capturaron una buena calidad de imagen, logrando que el software reconociera los CC conforme a lo esperado.



## 7. RECOMENDACIONES.

1.-Es importante mantener todas las variables operacionales en los rangos establecidos para evitar la formación de cortocircuitos, aun cuando se trabaja a densidades de corrientes altas, ya que ante cualquier irregularidad se puede inducir un gran número de CC en la nave. Aunque no se nombraron en el análisis de variables de este trabajo, es importante mantener en buen estado y correcta preparación de los aditivos, para obtener una buena homogeneidad en la solución electrolítica de ellos y poder obtener un depósito deseado.

2.-Es necesario solicitar a fundición mejorar la nivelación en sus moldes para poder obtener ánodos uniformes, y que no exceda los máximos establecidos. También es necesario realizar una mantención periódica de MPA's para que puedan cumplir su objetivo de enderezar las orejas de ánodos que han sufrido una mala manipulación durante su traslado y que se realice el fresado a todos los ánodos que entran a la nave, con el fin de asegurar la verticalidad de ellos en las celdas y mantener una distancia inter-electródica correcta.

3.-Para las telas MAT® se recomienda desarrollar telas más resistentes. Además, incorporar tubos plásticos en sus bordes, para evitar la inmersión de las puntas en el electrolito y realizar un reforzamiento de costuras debido a que algunas cedieron con la manipulación constante por parte de los operadores.

Se recomienda ajustar altura de los clips termocromáticos a la altura máxima de la barra de los blanks y redondear sus bordes, para evitar que la tela se enganche en ellos. Además, se debe utilizar un adhesivo para los clips más resistente a altas temperaturas en cobre.

4.-De no lograr mejorar material de la tecnología MAT®, se recomienda evaluar opción de incorporar cámaras infrarrojas instaladas en altura, que de manera constante tengan la visualización de toda las celdas de la refinería y que del mismo modo que las cámaras infrarrojas utilizadas hoy en día por los operadores, identifiquen los CC en la nave, con sólo modificar el grosor de las telas verdes actuales (manteniendo la evaporación adecuada) para que la cámara pueda detectar a mayor distancia el aumento de temperatura de los cátodos en CC.

## 8. BIBLIOGRAFIA.

- [1] R. Moskalyk y A. Alfantazi, Review of copper metallurgical practice: today and tomorrow, 2003.
- [2] J. Ibañez, Electro-refinación de cobre.[diapositivas].Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso-Chile, 2014.
- [3] A. P. López, Curso de electrorefinación de cobre,1999.
- [4] I. Gacés, Industria del cobre, Universidad de Antofagasta, Chile.
- [5]«Codelco orgullo de todos,»[En línea]. Available: [www.codelco.com/chuquicamata](http://www.codelco.com/chuquicamata).
- [6] Codelco, Memoria anual, 2015.
- [7] S. Estay, Aleaciones de cobre.[diapositivas].Universidad Técnica Federico Santa María.Valparaíso,2013.
- [8] Electro refining of copper. Metalurgia Extractiva I. Universidad Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [9] «CodelcoEduca,»2016.[En línea]. Available: <https://www.codelcoeduca.cl>.
- [10] Codelco División Chuquicamata, Proceso de electrorefinación aplicado, 2015.
- [11] A. Filzwieser y I. Filzwieser, Method for operating copper electrolysis cells, 2009.
- [12] F. V. Sepúlveda, Factibilidad técnica de aumentar la densidad de corriente en Refinería Electrolítica de Potrerillos con tecnología convencional. Memoria (Ing. Civil Metalúrgica).Universidad de Concepción, 2004.
- [13] G. Cifuentes, C. Vargas y J. Simpson, «Análisis de las principales variables de proceso que influyen en el rechazo de los cátodos durante el electrorrefino de cobre,» *Revista de Metalurgia*, mayo-junio2009.
- [14] Temas de electroquímica avanzada, electro refinación de cobre, Universidad Técnica Federico Santa María, 2005.
- [15] C. Cuadra y J. Standen, Tendencias en la tecnología de electrorefinación de cobre, 2005.

- [16] M. Solar, Fundamentos operacionales del refino a fuego para moldeo de ánodos, 2013.
- [17] Innovaxxion, «Proyecto MAT®, Pruebas preliminares de prototipos.
- [18] M. S. Fernández, Cambio tecnológico refinerías electrolíticas, 2003.
- [19] J. B. N.T Beukes, Copper electrowinning: theoretical and practical design, 2009.
- [20] C. Vargas R, Curso de capacitación USACH. Operación de plantas de electro obtención., 2006.
- [21] J. H. Muñoz, Estudio de eficiencia energética utilizando tecnología Optibar. Memoria (Ing. Civil Electrónico). Universidad de Concepción, 2011.
- [22] K. H. Harris, Alternativas de mejora de eficiencia energética de la refinería electrolítica de la División Ventanas de Codelco Chile. Memoria (Ing. Civil Químico). Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile, 2012.
- [23] E.C. Altamirano, Modificación de variables relevantes para disminuir el consumo y optimizar la eficiencia energética en la refinería electrolítica de la División Ventanas de Codelco Chile. Memoria (Ing. Civil Químico). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso-Chile, 2014.
- [24] P. Paunovic y S. Hadzi Jordanov, Electrometallurgy: electro chemical, economic and environmental (3E) aspects, 2011.
- [25] B. Aguilar Chacon, «Física, electricidad y magnetismo,» 19 junio 2012.
- [26] E. Castillo Martínez, Caracterización del electrolito de la Refinería Potrerillos para su control operacional en planta, División Salvador, Codelco. Memoria (Ing.Civil Metalúrgica). Universidad de Concepción. Concepción-Chile, 2014.
- [27] J. Ibañez, Electro-obtención. [diapositivas]. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso-Chile, 2014.
- [28] C. De Maere y R. Winand, Study of the influence of additives in copper electrorefining, simulating industrial conditions, 1995.
- [29] J.L. Pérez, «La estadística: una orquesta hecha instrumento. Curso de estadística,»
- [30] «Soporte técnico de software estadístico Minitab,»
- [31] «Soporte técnico de software estadístico IBM SPSS Statistics 23»

## 9. ANEXOS.

**Anexo A.-** Nave de electro refinación de División Chuquicamata de Codelco.



**Figura 50.-** Disposición de circuitos hidráulicos y secciones.



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

**Título: ANÁLISIS MULTIVARIABLE DE GENERACIÓN DE CORTOCIRCUITOS Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE TECNOLOGIA MAT® PARA SU DETECCIÓN TEMPRANA**

**Nombre Memorista:** Nicole Arlette Alejandra Inostroza Flores

<b>Modalidad</b>		<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>		
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Prof. Froilán Vergara</b>
		<b>Ingeniero Supervisor: Marco Cifuentes-Jaime Contreras</b>
		<b>Institución: Codelco, división Chuquicamata</b>

<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda	Prof. Antonio Pagliero

**Resumen**

Los cortocircuitos (CC) son eventos no deseados en refinerías (ER) e inducen a pérdidas de energía e interrupciones locales en la producción. Su detección y eliminación temprana se hace necesaria y la refinería Chuquicamata no escapa a lo anterior. Por este motivo en el presente trabajo se desea identificar las variables influyentes en la generación de CC y para esto se realizó un análisis multivariable de una base de datos de 9 meses del año 2015 (abril-diciembre) con las variables más relevantes de la refinería para identificar las principales causas de generación de CC, siendo las más significativas la densidad de corriente, la calidad de los ánodos Chuquicamata y la relación entre la concentración de bismuto y cobre. Y en paralelo al análisis estadístico, con el fin de disminuir el tiempo de permanencia de un CC, se evaluó incorporar una nueva tecnología llamada MAT®, cuya función principal es la detección automatizada de CC disminuyendo el tiempo de permanencia del CC y por ende, mejorando la eficiencia, en donde se obtuvieron resultados favorable en cuanto la detección e identificación de los CC los primeros dos ciclos catódicos, luego la tela sufre quemaduras que perjudican su funcionamiento.

