

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA**



TESIS

CARATULA

**“ESTUDIO TÉCNICO DE OCURRENCIA DE CORTOCIRCUITOS
EN LA ELECTRODEPOSICIÓN DE ZINC PARA MEJORAR SU
EFICIENCIA -Votorantim Metais S.A- Cajamarquilla”**

PRESENTADO POR:

BACHILLER: Vilma Aurea LEGUIA HUAMACCTO

ASESOR: Ing° Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH

LIMA – PERÚ

2018

DEDICATORIA

A Dios por ser fuente de amor.

A mis padres Aurea y Moisés por darme toda su dedicación y amor.

A Edwin, mi amigo y compañero de aula, ahora de vida.

A Zaed Jesús, mi motor.

AGRADECIMIENTO

Deseo hacer llegar mi sincero agradecimiento a mi Alma Máter UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA, en cuyas aulas inculcaron y forjaron el valor del aprendizaje continuo.

Al Ing. Abel Nilo Juscamayta Tomasevich y al Ing. Bernardo Enciso López, maestros y amigos, quienes con sus orientaciones encaminaron las ideas para mejorar el presente trabajo.

Así mismo a la Empresa VOTORANTIM METAIS S.A. (Refinería de Cajamarquilla) por permitir la investigación.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis se ha desarrollado en la Refinería de Zinc de Cajamarquilla, unidad minera de la empresa brasilera Votorantim Metais S.A., ubicada en Lima, Perú; cuya capacidad de producción de zinc es de 320 000 t anuales.

El proceso de electrodeposición del zinc es realizada por aplicación de corriente eléctrica a través de electrodos insolubles (cátodos de aluminio y ánodos de plomo-plata), lo cual origina la descomposición del electrolito de sulfato de zinc y la deposición de zinc metálico en el ánodo.

Debido a las pérdidas de corriente por cortocircuitos, redisolución del zinc depositado y reacciones electroquímicas secundarias; el zinc realmente depositado es siempre menor que el zinc teórico-calculado, de aquí la importancia de la eficiencia de corriente. Cabe mencionar que la eficiencia indica la relación que se establece entre el metal efectivamente depositado y el que debiera depositarse, de acuerdo con la cantidad de corriente eléctrica aplicada.

Los cortocircuitos son perjudiciales en la electrodeposición, ya que su presencia conlleva una disminución de la eficiencia de corriente, desgaste acelerado de materiales aislantes en el proceso, asimismo, desgaste de los electrodos y barras conductoras y, aumentan la posibilidad de contaminación por Pb en las láminas de zinc. Esto motivó la realización de la presente Tesis.

El objetivo de la tesis es realizar el estudio técnico de ocurrencia de cortocircuitos

en electrodeposición de zinc con la finalidad de mejorar la eficiencia de corriente.

La tesis involucra recopilación y tratamiento estadístico de datos de las variables que impactan la eficiencia de corriente (datos previos al estudio de tesis) consideradas en la Planta de estudio tales como: cortocircuitos, temperatura de electrolito, calidad de la solución purificada (contenido de Zn, Fe, Sb, Cu), peso del depósito, ciclo de succión (limpieza de lodos anódicos en celda electrolítica) y ciclo de planchado de ánodos. Asimismo, se realizó monitoreo en campo para identificación y registro cuantitativo de causas de cortocircuitos, se describió el método de corrección de cortocircuitos. También se monitoreó la durabilidad de materiales aislantes y barras conductoras; % de Pb en láminas de zinc y su relación con los cortocircuitos. Se presenta también el beneficio económico de la tesis, basado en consumo de energía y eficiencia de corriente.

INDICE

CARATULA	1
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO	2
INTRODUCCIÓN	3
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
LISTA DE TABLAS	11
LISTA DE FIGURAS	12
DICCIONARIO DE TÉRMINOS	15
CAPÍTULO I	17
ASPECTOS GENERALES	17
1.1 HISTORIA DE LA REFINERIA DE ZINC CAJAMARQUILLA	17
1.2 NEGOCIO DE VOTORANTIM METAIS - CAJAMARQUILLA	18
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.3.1 Planteamiento de la realidad problemática	19
1.3.3 Problemas específicos	20
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.4.1 Objetivo General	20
1.4.2 Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO II	22
MARCO TEORICO	22
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL ZINC	22
2.2 EL ZINC	24
2.2.1 Propiedades Químicas	24
2.2.2 Propiedades Físicas	25
2.3 USOS DEL ZINC	26

2.4	HISTORIA DEL PROCESO ELECTROLÍTICO DE OBTENCIÓN DE ZINC	27
2.5	ELECTRÓLISIS	27
2.6	ELECTRÓLISIS DEL ZINC	28
2.7	EQUIVALENTE ELECTROQUÍMICO	30
2.8	CORRIENTE CONTINUA	30
2.9	LEY DE FARADAY	30
2.10	EFICIENCIA DE CORRIENTE	31
2.11	COMPONENTES DE UNA CELDA	32
2.12	CORTOCIRCUITO EN ELECTRÓLISIS	33
2.12.1	Tipos de cortocircuito:	35
2.12.2	Impacto de Cortocircuito	35
2.12.3	Control de cortocircuito en electrólisis	36
CAPÍTULO III		38
METODOLOGÍA		38
3.1	DISEÑO DEL ESTUDIO	38
3.2	MÉTODOS Y TÉCNICAS	39
3.1.1	VARIABLES DE IMPACTO EN EFICIENCIA DE CORRIENTE	39
3.1.2.1	Método Infrarrojo	41
3.1.2.2	Método Termográfico	42
3.1.2.3	Método manual	45
3.1.3	USO DE MINITAB	45
3.3	INSTRUMENTOS	45
CAPÍTULO IV		46
PROCESO PRODUCTIVO DE LA REFINERÍA DE ZINC		46
CAJAMARQUILLA		46
4.1	MANIPULEO DE CONCENTRADOS	46
4.2	PLANTA DE TOSTACIÓN	47
4.3	PLANTAS DE ÁCIDO SULFURICO	49
4.4	LIXIVIACIÓN	50
4.4.1	Lixiviación neutra	50
4.4.2	Lixiviación ácida caliente	51
4.4.3	Etapas de Reducción Ácida	51
4.4.4	Pre neutralización	51

4.4.5	Precipitación y filtración de goethita	51
4.4.6	Lixiviación súper ácida	52
4.5	PURIFICACIÓN	52
4.5.1	Purificación fría	53
4.5.2	Purificación caliente	53
4.5.3	Enfriamiento de la Solución Pura	54
4.6	PLANTA DE ELECTRÓLISIS	54
4.6.1	Almacenamiento de solución pura	58
4.6.2	Enfriamiento y circulación de electrolito	58
4.6.3	Adición de reactivos	58
4.6.4	Manipuleo de electrodos	59
4.6.5	Deslaminado de cátodos	59
4.6.6	Limpieza de ánodos	60
4.6.7	Limpieza y mantenimiento de celdas	60
4.7	PLANTA DE FUSIÓN Y MOLDEO	63
CAPÍTULO V		65
VARIABLES DE IMPACTO EN LA EFICIENCIA DE CORRIENTE		65
5.1	ARBOL DE CAUSAS DE VARIABLES DE IMPACTO	65
5.2	ANÁLISIS COMPARATIVO DE VARIABLES	66
5.3	APLICACIÓN DE MINITAB	79
5.4	EVALUACIÓN DE VARIABLES	80
CAPÍTULO VI		85
ESTUDIO TÉCNICO DE OCURRENCIA DE CORTOCIRCUITO		85
6.1	IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO	85
6.2	PROCEDIMIENTO PARA CORRECCIÓN DE CORTOCIRCUITO	93
6.3	MONITOREO DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO	97
6.4	EVALUACIÓN DE TIEMPO DE VIDA DE ÁNODOS	104
6.5	EVALUACIÓN DE DURABILIDAD DE MATERIALES AISLANTES	106
6.6	RELACIÓN DE CONTAMINACIÓN DE LÁMINAS DE ZINC CON Pb POR CORTOCIRCUITO	114
6.7	REPORTES DE CONTROL DE CORTOCIRCUITO	115
6.8	PLAN DE ACCIÓN PARA CONTROL DE CORTOCIRCUITO	118
6.9	EVALUACIÓN ECONÓMICA	119

CAPÍTULO VII	122
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	122
7.1 IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO	122
7.2 MONITOREO DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO	126
7.3 RESULTADO EVALUACIÓN DE TIEMPO DE VIDA DE ÁNODOS	131
7.4 DURABILIDAD DE MATERIALES AISLANTES	134
7.5 RELACIÓN DE CONTAMINACIÓN DE LÁMINAS CON Pb POR CORTOCIRCUITO	134
CONCLUSIONES	140
RECOMENDACIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	143
ANEXOS	146
ANEXO N°1: DATOS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE VARIABLES PERIODO MARZO-MAYO	146
ANEXO N°2: REPORTE DE MÉTODO TERMOGRÁFICO- CON CORTOCIRCUITO	150
ANEXO N°3: REPORTE DE MÉTODO TERMOGRÁFICO- SIN CORTOCIRCUITO	151

RESUMEN

La presente tesis estudia las ocurrencias de cortocircuito en electrodeposición de zinc con la finalidad de mejorar la eficiencia de corriente.

En el primer capítulo denominado Aspectos Generales, se describe el lugar donde se desarrolló la tesis, asimismo se plantea la problemática, se establece el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis.

El capítulo II, se presenta la revisión de la bibliografía en donde se describe la historia del zinc, sus propiedades físicas y químicas, sus usos. También se encontrará la historia del proceso electrolítico del zinc, la descripción de la electrólisis del zinc con sus respectivas reacciones químicas; eficiencia de corriente, componentes de la celda electrolítica, qué son los cortocircuitos, sus tipos e impacto de los mismos y alternativas de control de cortocircuitos.

En el capítulo III se presenta la metodología empleada para la realización de la tesis, la cual consistió en la identificación, métodos y técnicas, instrumentos empleados en la identificación de cortocircuitos.

El capítulo IV describe el proceso productivo de la Refinería de Zinc Cajamarquilla, desde la recepción de concentrados de zinc hasta la obtención del zinc metálico a 99.995% de pureza.

El capítulo V menciona y se evalúa las variables de impacto en eficiencia de corriente, y un análisis de su tendencia con la finalidad de encontrar la variable problema para el periodo marzo- mayo. El capítulo VI presenta el estudio de ocurrencia de cortocircuitos en electrodeposición de zinc donde se presentan los datos obtenidos a lo largo del estudio.

El capítulo VII se presenta los resultados y discusión del estudio. Por último se tiene las conclusiones, recomendaciones y el anexo del trabajo.

ABSTRACT

This thesis studies the occurrences of short circuit in electrodeposition of zinc with the purpose of improving the current efficiency.

In the first chapter called General Aspects, the place where the thesis was developed is described, the problem is also raised, the general objective and the specific objectives of the thesis are established.

Chapter II presents the review of the biographies describing the history of zinc, its physical and chemical properties, its uses. You will also find the history of the electrolytic process of zinc, the description of the electrolysis of zinc with its respective chemical reactions; current efficiency, components of the electrolytic cell, what are short circuits, their types and their impact and short-circuit control alternatives.

Chapter III presents the methodology used for the realization of the thesis, which consisted in the identification, methods and techniques, instruments used in the identification of short circuits.

Chapter IV describes the productive process of the Cajamarquilla Zinc Refinery, from the reception of zinc concentrates to the obtaining of metallic zinc at 99.995% purity.

Chapter V mentions and evaluates the variables of impact on current efficiency, and an analysis of its trend in order to find the problem variable for the March-May period. Chapter VI presents the study of the occurrence of short circuits in zinc electrodeposition where the data obtained throughout the study are presented.

Chapter VII presents the results and discussion of the study. Finally we have the conclusions, recommendations and the annex of the work.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Estructura electrónica del zinc

Tabla 2.2 Propiedades físicas del zinc

Tabla 2.3 Lista del equivalente electroquímico

Tabla 3.1 Medición de variables que impactan en eficiencia de corriente

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de la sala de electrólisis

Tabla 5.1 Rangos permitidos de variables que afectan eficiencia de corriente

Tabla 5.2 Resumen de rangos y media de variables de impacto en eficiencia de corriente mes marzo-mayo

Tabla 6.1 Procedimiento de corrección de cortocircuito de acuerdo a las causas

Tabla 6.2 Datos de cortocircuito y temperatura de barra por fila

Tabla 6.3 Temperaturas de barra de causa de cortocircuito

Tabla 6.4 Característica del ánodo

Tabla 6.5 Monitoreo tiempo de vida de ánodo

Tabla 6.6 Tiempo promedio de vida de ánodo por fila y N° promedio de cortocircuito

Tabla 6.7 Tiempo teórico de durabilidad de ánodo

Tabla 6.8 Monitoreo de durabilidad de soporte de barra equipotencial

Tabla 6.9 Monitoreo de durabilidad de bandeja de barra y electrodos

Tabla 6.10 Monitoreo de durabilidad de soporte de cabezal de ánodo

Tabla 6.11 Monitoreo de durabilidad de soporte de cabezal de cátodo

Tabla 6.12 Monitoreo de durabilidad de separador de cabezal de ánodo

Tabla 6.13 Monitoreo de durabilidad de separador de cuerpo de ánodo

Tabla 6.14 Monitoreo de cortocircuito y contenido de % Pb en lámina de zinc

Tabla 6.15 Plan de acción para control de cortocircuitos

Tabla 6.16 Ganancia por incremento de eficiencia

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.1 Refinería Cajamarquilla
- Fig. 1.2 Vista satelital de la Refinería de Cajamarquilla
- Fig. 1.3 Flujo del proceso productivo de la Refinería de Cajamarquilla
- Fig. 2.1 Celda electrolítica
- Fig. 2.2 Celda simplificada de electrólisis de zinc
- Fig. 2.3 Disposición de ánodo y cátodo en celda
- Fig. 2.4 Representación gráfica de cortocircuito
- Fig. 2.5 Gránulo de cortocircuito
- Fig. 3.1 Variables de Impacto en eficiencia de corriente
- Fig. 3.2 Pirómetro de infrarrojo
- Fig. 3.3 Medición de temperatura con pirómetro
- Fig. 3.4 Cortocircuito detectado con cámara termográfica (vista de una celda)
- Fig. 3.5 Ubicación del escáner en la grúa de cátodos
- Fig. 3.6 Pantalla de PC de uso del escáner
- Fig. 3.7 Opciones de uso del escáner en PC
- Fig. 4.1 Planta de electrodeposición de zinc Refinería de Cajamarquilla
- Fig. 4.2 Grúa con carga de cátodos
- Fig. 4.3 Limpieza de celdas
- Fig. 4.4 Proceso de electrodeposición de zinc en la Refinería Votorantim Metais
- Fig. 4.5 Proceso de refinación de zinc en la Refinería de zinc Cajamarquilla
- Fig. 5.1 Tendencia de contenido de Zinc en solución pura
- Fig. 5.2 Tendencia de contenido de Fe en solución pura
- Fig. 5.3 Tendencia de contenido de Sb en solución pura
- Fig. 5.4 Tendencia de contenido de Cu en solución pura

Fig. 5.5 Tendencia de temperatura en el electrolito de salida de celda

Fig. 5.6 Tendencia de ciclo de planchado

Fig. 5.7 Tendencia de ciclo de Succión

Fig. 5.8 Tendencia de peso del depósito

Fig. 5.9 Tendencia de cortocircuitos

Fig. 5.10 Tendencia de eficiencia de corriente

Fig. 5.11 Tendencia de consumo de corriente

Fig. 5.12 R-cuad para eficiencia de corriente diaria

Fig. 5.13 Regresión múltiple para eficiencia de corriente diaria

Fig. 5.14 Regresión múltiple para predicción de eficiencia de corriente

Fig. 5.15 Regresión múltiple para eficiencia- informe de construcción del modelo

Fig. 6.1 Cortocircuito por depósito sobre pedazo de lámina

Fig. 6.2 Cortocircuito por desgaste de contacto de cátodos

Fig. 6.3 Cortocircuito por desalineamiento de cátodo

Fig. 6.4 Cortocircuito por cátodo doblado

Fig. 6.5 Cortocircuito por ánodo doblado

Fig. 6.6 Cortocircuito por falta de separador de ánodo

Fig. 6.7 Cortocircuito por crecimiento de bióxido en el ánodo

Fig. 6.8 Costras de bióxido en el ánodo

Fig. 6.9 Representación desalineamiento de bandeja

Fig. 6.10 Cortocircuito por desalineamiento de bandeja

Fig. 6.11 Electrodo desalineados

Fig. 6.12 Ubicación de bandeja entre celdas

Fig. 6.13 Árbol de causas de ocurrencia de cortocircuito

Fig. 6.14 Izamiento de ánodo

Fig. 6.15 Corrección de cortocircuito

Fig. 6.16 Operador alineando electrodos

Fig. 6.17 Alineamiento de electrodos

Fig. 6.18 Pareto de causas de cortocircuitos –Junio

Fig. 6.19 Pareto de causas de cortocircuitos –Julio

Fig. 6.20 Pareto de causas de cortocircuitos –Agosto

Fig. 6.21 Cortocircuito acumulado mensual Junio-Agosto

Fig. 6.22 Ánodo

Fig. 6.23 Bandeja

Fig. 6.24 Soporte de barra equipotencial

Fig. 6.25 Soporte de cabezal de ánodo

Fig. 6.26 Soporte de cabezal de cátodo

Fig. 6.27 Separador de cuerpo de ánodo

Fig. 6.28 Separador de cabezal de ánodo

Fig. 6.29 Bandeja deteriorada

Fig. 6.30 Reemplazo de bandeja

Fig. 6.31 Muestreo de lámina de zinc

Fig. 6.32 Documento de datos para monitoreo de cortocircuito

Fig. 6.33 Documento de datos para monitoreo de causas de cortocircuito

Fig. 7.1 Pareto de causas de ocurrencia de cortocircuito periodo junio-Agosto

Fig. 7.2 Representatividad de causas de cortocircuitos

Fig. 7.3 Intervalos de temperatura de barra de causas de cortocircuito

Fig. 7.4 Cortocircuito vs. Temperatura de barra

Fig. 7.5 Regresión para cortocircuito vs. Temperatura

Fig. 7.6 Representación de temperatura de barra sin cortocircuito

Fig. 7.7 Representación de temperatura de barra con 1 cortocircuito

Fig. 7.8 Representación de temperatura de barra con 2 cortocircuitos

Fig. 7.9 Espesor de ánodo vs. Tiempo de vida

Fig. 7.10 Largo de ánodo vs. Tiempo de vida

Fig. 7.11 Ancho de ánodo vs. Tiempo de vida

Fig. 7.12 Tiempo de vida de ánodo vs. Cantidad de cortocircuito

Fig. 7.13 Regresión para cortocircuito vs. % Pb en lámina

Fig. 7.14 Tendencia de eficiencia de corriente mes junio-agosto

Fig. 7.15 Gráfica de caja de cortocircuitos junio-agosto

Fig. 7.16 Regresión para eficiencia de corriente vs. Cortocircuitos

Fig. 7.17 Gráfica de predicción para eficiencia de corriente y cortocircuito

DICCIONARIO DE TÉRMINOS

- **Electrolito:** Un medio acuoso, con iones que migran permitiendo el paso de corriente entre los electrodos.
- **Celda electrolítica:** También conocida como cuba electrolítica, es el lugar físico que contiene la solución electrolítica, además contiene los electrodos.
- **Ánodo:** Material sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de oxidación con liberación de electrones.
- **Cátodo:** Electrodo sólido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de reducción con los electrones provenientes del ánodo.
- **Jarosita:** Es un sulfato de potasio y hierro hidratado básico.
- **Goethita:** Es un óxihidróxido de hierro (III), de fórmula $\alpha\text{-FeO(OH)}$, con un contenido del 63% en hierro, y donde puede encontrarse hasta un 5% de manganeso.
- **Cosecha:** retirar los cátodos de la celda electrolítica.
- **Cash cost:** es el indicador que mide el Costo de Tratar y/o producir una Tonelada/Libra/Onza de un producto minero.
- **LME:** La Bolsa de Metales de Londres (LME, por sus siglas en inglés), se define como "el centro mundial de metales industriales de comercio" en donde los valores descubiertos "se utilizan como el precio de referencia mundial".
- **R -Cuad:** se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El R Cuadrado, también llamado coeficiente de determinación, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar
- **Norma ASTM B6:** estándar de especificación para el zinc.
- **Multitester:** también denominado polímetro o tester, es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas, como corrientes y potenciales (tensiones), o pasivas, como resistencias, capacidades y otras.
- **Filete:** material de plástico que se coloca en el borde de la chapa del cátodo.
- **Deslaminado:** acción de quitar las láminas del cuerpo del cátodo.

- **Temperatura de barra:** medida de temperatura en la superficie de la barra que nos indica la temperatura de los electrodos.
- **Barra:** material de Cu que es conductor de corriente eléctrica en electrodeposición de zinc.
- **Fila:** conjunto de celdas electrolíticas, forman parte del circuito eléctrico.
- **MAT450:** Plástico reforzado con fibra de vidrio
- **Zona de stand by:** zona de descanso de la grúa de cátodos.
- **Prueba de normalidad:** Los resultados de la prueba indican si usted debe rechazar o no puede rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades de una población distribuida normalmente).
- **Valor p:** se define como la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido
- **Desv.Est. (General):** La desviación estándar general es la desviación estándar de todas las mediciones y es una estimación de la variación general del proceso.. En ese caso, representa la variación real del proceso que el cliente experimenta en el tiempo.
- **Percentil:** es una medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo de observaciones
- **Mediana:** representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados
- **Regresión multivariable:** cuando estudiamos la posible relación entre varias variables independientes (predictoras o explicativas) y otra variable dependiente.
- **r:** La correlación estadística es medida por lo que se denomina coeficiente de correlación
- **Succión:** actividad de limpieza de remoción de lodo anódico (bióxido de manganeso) en celdas.
- **Planchado:** actividad de enderezamiento de placas de ánodos, esto se realiza con una máquina planchadora.
- **Capping board:** o también conocido como soporte de barra equipotencial, usado en electrólisis.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 HISTORIA DE LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA

Según la memoria descriptiva de Votorantim Metais (2015, p.4), la refinería de zinc Cajamarquilla, ubicada a 15 Km del centro de Lima, en el distrito de Chosica entró en operación en 1981 como propiedad de la empresa estatal Minero Perú. Al iniciarse tenía una capacidad de 101500 t/año de zinc electrolítico de alta calidad, obteniéndose como subproductos 176000 t/año de ácido sulfúrico, 1000 t/año de concentrado de plata, 1600 t/año de cemento de Cu y 360 t/año de cadmio. En febrero, 1995: privatizada a favor de Teck–Cominco – Marubeni. En junio de 1998 se completó la ampliación a 120 000 t por año con una inversión de US \$ 32 Millones.

En diciembre del 2005 fue adquirida por el consorcio brasilero Votorantim Metais. En el 2007, se incrementó la producción a 160 000 t. En el 2008, se inicia el proyecto de ampliación de planta a 320 000 t.



Figura 1.1 Refinería Cajamarquilla
Fuente: Votorantim Metais

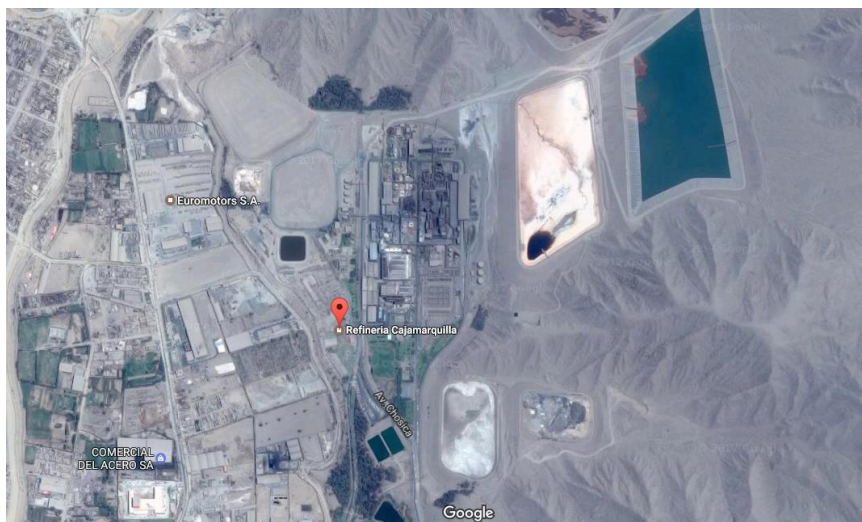


Figura 1.2 Vista satelital de la Refinería de Cajamarquilla

Fuente: Votorantim Metais

1.2 NEGOCIO DE VOTORANTIM METAIS - CAJAMARQUILLA

De acuerdo a la Memoria Descriptiva (2015, p.6), Votorantim Metais ocupa el quinto puesto a nivel mundial en producción de zinc metálico, produciendo el 1,5% de la demanda actual en el mundo con presencia en más de 20 países. Cajamarquilla forma parte de las unidades productoras de zinc de Votorantim Metais.

El objetivo del negocio es producir zinc de la más alta pureza de 99,995% y con los más altos estándares de calidad del producto conforme a las especificaciones químicas y físicas indicadas en la norma ASTM B6; preservando el medioambiente, la salud y seguridad de las personas; así como también fomentar valores y prácticas en la sociedad, que contribuyan al desarrollo sostenible.

El proceso productivo de Cajamarquilla, inicia en la compra de concentrados de zinc para ser tratados en los tostadores y así producir óxido de zinc o “calcina” para el proceso de lixiviación en el área de hidrometalurgia. La solución resultante de este proceso se purifica con el fin de eliminar los metales tales como Cu, Co, Mn, Ni, etc. y obtener la solución de sulfato de zinc, que se envía al área de Electrometalurgia para que a partir de un proceso de electrodeposición se obtengan las láminas de zinc que son llevados al área de Fusión y Moldeo, donde se cuentan con cuatro líneas de producción de zinc refinado: 2 líneas para producción de barras (Zn-302 S SHG) , y 2 líneas para

producción de jumbos de 1 t y 2 t con diferentes porcentajes de aluminio.



Figura 1.3 Flujo del proceso productivo de la Refinería Cajamarquilla

Fuente: Votorantim Metais

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La existencia de cortocircuitos en electrodeposición de la Refinería de Cajamarquilla, es una causa de la disminución en la eficiencia de corriente. El problema se hace persistente si no se conocen las causas de su aparición. Los cortocircuitos provocan desgaste acelerado de materiales aislantes usados en el proceso de electrodeposición, aumento del contenido de % Pb (es un contaminante) en las láminas de zinc.

1.3.1 Planteamiento de la realidad problemática

La electrodeposición de zinc en la Refinería de Cajamarquilla se debe optimizar el consumo de energía eléctrica para tener una eficiencia de corriente alta. La eficiencia de corriente se ve disminuida por reacciones secundarias, pérdidas de corriente por cortocircuitos (se puede evitar y es el tema en estudio) o por redisolución del zinc depositado. Cuando los cortocircuitos se “evidencian”, ya

se tuvo pérdida de corriente (por lo tanto disminución de eficiencia), ya hubo desgaste de material aislante cercano al cortocircuito y también contaminación con Pb en las láminas de zinc cortocircuitado (el Pb proviene del ánodo que es de Pb-Ag); por lo que es necesario conocer las causas para evitar la aparición de cortocircuitos. También se evitaría accidentes por explosiones (debido a elevadas temperaturas en los electrodos por presencia de cortocircuito) que perjudican la seguridad personal y la empresarial.

1.3.2 Problema general

- La pérdida de eficiencia de la corriente por la ocurrencia de cortocircuitos en la electrodeposición del zinc en la refinería Votorantim Metais- Cajamarquilla.

1.3.3 Problemas específicos

- a) Falta de determinación de las causas de ocurrencia de cortocircuito en la electrodeposición de zinc de la refinería de Cajamarquilla.
- b) Reposición constante de materiales aislantes en contacto con los electrodos cortocircuitados, ya que éstos últimos se recalientan.
- c) Contaminación con plomo de las láminas de zinc, lo que origina almacenar láminas de zinc contaminadas con Pb o reciclar a la fundición estos productos.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

- Realizar el estudio técnico de ocurrencia de cortocircuitos en la electrodeposición de zinc para mejorar la eficiencia del uso de corriente en la Refinería Votorantim Metais.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar las causas de ocurrencia de cortocircuitos en la electrodeposición de zinc.
- b) Evaluar durabilidad de materiales aislantes en contacto con electrodos cortocircuitados.
- c) Relacionar cantidad de ocurrencias de cortocircuito y cantidad de plomo en láminas de zinc contaminadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL ZINC

El zinc metálico fue conocido probablemente por los pueblos antiguos. De hecho, hay referencias que parecen hablar del zinc, al que Strabos llamaba plata falsa, en Misia (Grecia), donde se encontraron depósitos de blenda y otros sulfuros. (Ballester ,2010). También se hallaron algunos objetos de zinc en diferentes lugares: una estatuilla en Transylvania y un frontal de fuente en las ruinas de Pompeya. Hay referencias romanas del 200 a. de C. en las que se puede probar el uso del latón por los romanos e incluso, en los tiempos de Augusto, se describe un procedimiento para fabricar latón reduciendo lentamente óxido de zinc en un crisol lleno de chatarra de cobre.

En la Edad Media, los alquimistas conocían procedimientos para transmutar el cobre en oro; realmente, la operación consistía en fabricar latón. Al parecer, la primera referencia sobre el zinc metal y sus propiedades se encuentra en la obra de Paracelso. Un escritor chino del siglo VII habla del uso del zinc y de cómo hacerlo maleable para fabricar monedas y espejos. En la India hay referencias que dicen que, conocido desde antes, se fundía comercialmente en el siglo XIV. En Zawar aparecen multitud de restos metalúrgicos y mineros de metal; en particular, llaman la atención las retortas de barro cocido, las alargaderas y condensadores y los grandes escoriales y escombreras encontrados allí, lo cual denota una actividad minera y metalúrgica importante sobre centenares de miles de toneladas.

Durante los siglos XVII y XVIII se importaron de Asia cantidades importantes de zinc en placas llamadas spelter. A mediados del siglo XVIII los ingleses importaron de China la tecnología de fabricación de zinc y montaron en Bristol un horno similar a los utilizados para vidrio que podía alcanzar 1000°C; también comienza en Silesia

la obtención de zinc a finales del mencionado siglo en hornos de vidrio en los que se introducían las retortas, saliendo gases y vapores por la parte alta de la carga a un condensador del que drenaba el metal a un plato. Los belgas desarrollaron un horno de reverbero con la posibilidad de cargar varias filas de retortas horizontales con sus correspondientes condensadores acoplados en la parte externa del horno. El proceso belga se instaló en Estados Unidos a mediados del siglo XIX. (Ballester ,2010).

La laminación de chapa de zinc se realizó en Lieja en 1812 y en América se implantó a mediados del mismo siglo. En esta segunda mitad del siglo XIX se consiguieron pocos avances que no sean la mejora de la calidad y durabilidad de las retortas, algunos ahorros de energía y mejoras en la condensación y recolección del metal. Por esta época, se puso a punto el proceso para la reoxidación del metal reducido a través de una parrilla perforada con el fin de fabricar óxido de zinc: proceso Wetherill.

A finales de siglo, se instalaron regeneradores en los hornos y se introdujo el calentamiento con gas. Los hornos evolucionaron hacia grandes túneles con varias filas de retortas para aumentar la capacidad. También en esta época se tostaba blenda para obtener ácido y el tostado (mal llamado calcine) se enviaba a las plantas para su reducción. También se comenzó a lixiviar el tostado para producir sulfato y se intentó electrolizar la disolución, aunque el proceso resultó un fracaso.

El descubrimiento de la flotación con espumas a principios del siglo XX revolucionó la industria del zinc, en particular cuando se puso en marcha la flotación diferencial. La Primera Guerra Mundial hizo aumentar la producción de zinc y fue entonces cuando el proceso electrolítico se desarrolló de forma industrial.

La elaboración de zinc en horno de cuba se desarrolló en Inglaterra en los años cincuenta al ponerse en marcha la tecnología del horno Imperial Smelting, que conlleva una sinterización distinta y un condensador de plomo fundido.

Hoy día, a comienzos del siglo XXI, hay que decir que la tecnología electrolítica es el desarrollo que más tonelaje de metal produce, por su economía y por la calidad del metal. Un hito importante, que hizo muy rentable la recuperación electrolítica, fue el descubrimiento español, en los años sesenta, de la precipitación jarosítica. Las precipitaciones goetítica y hematítica supusieron nuevos avances que culminaron con en el proceso electrolítico asociado a la digestión a presión de la mena sulfurada, lo

cual facilitó enormemente el problema de residuos.

2.2 EL ZINC

El zinc es un metal de color blanco azulado que arde en el aire con llama verde azulada, cuyo punto de fusión es 420°C y de ebullición 907°C. A temperatura ambiente es frágil, pero se torna maleable por encima de 100°C. Una aplicación importante del zinc es su aleación con cobre formando los latones los cuales tienen una amplia gama de propiedades físicas para diversos usos. (Ballester ,2010).

El zinc, a pesar de su nobleza, tiene muy buena resistencia a la corrosión atmosférica utilizándose en la protección del acero (galvanizado). Las posiciones relativas del hierro y el zinc en la tabla electroquímica de potenciales colocan a éste como un material menos noble que el primero, esto hace que, en un medio acuoso salino, cuando se establece una pila, el zinc actúe de ánodo de sacrificio protegiendo al acero, a quien recubre en el galvanizado, en aquellos puntos en los que se una fisura de la capa protectora. Por tanto, su carácter electronegativo hace que el zinc se utilice como ánodo de sacrificio en estructuras de acero, usándose también en pilas secas.

2.2.1 Propiedades Químicas

El zinc constituye el grupo IIB de la Tabla Periódica y su estructura electrónica es la siguiente:

Tabla 2.1 Estructura electrónica del zinc

Elemento	N° atómico	Orbital					
		k	l	m	n	o	p
Zn	30	2	8	18	2		

Fuente: Ballester, A. & otros, Metalurgia Extractiva, Vol II- 2010

El zinc puede perder fácilmente sus dos electrones de valencia para dar lugar a compuestos del tipo $ZnCO_3$. También forma compuestos iónico-covalentes como el $ZnCl_2$. Finalmente, da lugar a zincatos, como es el caso del Na_2ZnO_2 , demostrando entonces un carácter anfótero. (Mantell, 1980).

En presencia de aire húmedo y CO₂, produce un carbonato básico hidratado que se adhiere fuertemente al metal base produciendo su pasivación. El zinc se disuelve fácilmente en la mayoría de los ácidos. También se disuelve este metal en disoluciones acuosas de bases fuertes o en sus sales fundidas, formando zincatos. El zinc se usa en forma de polvo o gránulos como precipitante (cementante) al ser un metal reductor de otros más nobles (Cu.Cd). También es un buen agente reductor de iones tales como el férrico, manganato y cromato.

2.2.2 Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del zinc se resumen en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades físicas del zinc

Propiedad	Unidad	Valor
Número atómico		30
Peso atómico		65,37
Valencia		2
Isótopos 64, 66, 67, 68, 70	%	50,9;27,3;3,9;17,4;0,5
Estructura cristalina		Hexagonal compacta
Radio atómico	nm	13,32
Radio iónico (Zn ²⁺)	nm	7,5
Punto de fusión	°C	419,5
Punto de ebullición (1 atm)	°C	907
Densidad (25°C)	g.cm ⁻³	7,14
Calor de fusión (419,5°C)	J.mol ⁻¹	7384,76
Calor de vaporización (907°C)	J.mol ⁻¹	114767,12
Capacidad calorífica (sólido)	J.mol ⁻¹	Cp=22,4+10,05*10 ⁻³ T
Capacidad calorífica (líquido)	J.mol ⁻¹	Cp=31,40
Capacidad calorífica (gas)	J.mol ⁻¹	Cp=20,80
Resistividad eléctrica (0-100°C)	μΩ.cm	P=5.46(1+0,00427)

Fuente: Ballester, A. & otros, Metalurgia Extractiva, Vol II- 2010

2.3 USOS DEL ZINC

Los usos del zinc son los siguientes:

- Principalmente como un agente anti-corrosivo en productos de metal. Se utiliza en el proceso de galvanización. La galvanización es el recubrimiento de otros metales con hierro o acero. Aproximadamente la mitad del zinc que se usa en el mundo es para galvanización. La galvanización se utiliza para fabricar tela metálica, barandillas, puentes colgantes, postes de luz, techos de metal, intercambiadores de calor y carrocerías de coches.
- También se utiliza para el ánodo en las baterías. En pilas de zinc y carbono se utiliza una lámina de este metal.
- El zinc es aleado con cobre para crear latón. El latón se utiliza en una amplia variedad de productos tales como tuberías, instrumentos, equipos de comunicaciones, herramientas y válvulas de agua.
- En aleaciones con elementos como el níquel, el aluminio (para soldar) y el bronce.
- En algunos países, tales como los Estados Unidos, el zinc se utiliza para fabricar monedas.
- El zinc se utiliza con el cobre, el magnesio y el aluminio en las industrias del automóvil.
- El óxido de zinc se utiliza como un pigmento blanco en pinturas y tintas de fotocopiadoras.
- El óxido de zinc se utiliza también en el caucho para protegerlo de la radiación UV.
- El cloruro de zinc se utiliza en la madera como retardante del fuego y para conservarla.
- El sulfuro de zinc se utiliza como pintura luminiscente de las superficies de los relojes, rayos X, pantallas de televisión y pinturas que brillan en la oscuridad.
- En fungicidas agrícolas.

- En los suplementos dietéticos. Es de gran ayuda en la curación de heridas, la reducción de la duración y severidad de los resfriados y tiene propiedades antimicrobianas que ayudan a aliviar los síntomas de la gastroenteritis.
- En protectores solares. Se utiliza en los dentífricos para evitar el mal aliento y en champús para detener la caspa. (Bolaños, 2005)

2.4 HISTORIA DEL PROCESO ELECTROLÍTICO DE OBTENCIÓN DE ZINC

En el caso del zinc existen varios procesos que conducen a la obtención del zinc metal: procesos de reducción térmica, proceso de retortas horizontales, proceso de retortas verticales, proceso electrotérmico, proceso ISF y el proceso electrolítico. (Ballester, 2010)

La primera patente del proceso electrolítico de zinc por vía sulfato es de 1881 pero no tuvo aplicación industrial. Entre 1910 y 1915 se desarrolló un proceso de base cloruro de zinc utilizando cátodos de hierro y ánodos de carbono. Se obtenía cloro gaseoso y zinc, pero el proceso no tuvo éxito debido a problemas de corrosión y electrodeposición deficiente.

Se volvió pronto, por la vía sulfato de zinc. Como se sabe el zinc es más electronegativo que el hidrógeno y para poder depositarlo, aprovechando el sobrepotencial gaseoso, es preciso que la disolución no contenga impurezas, en particular Sb, As, Co, Ge. Fue preciso desarrollar técnicas de purificación de las disoluciones de sulfatos de zinc hasta que la concentración de los contaminantes fuera lo suficientemente baja como para permitir la deposición continuada del zinc metal.

La primera planta comercial fue la de la Anaconda, en Montana (EEUU) en 1915. El proceso electrolítico creció desde entonces hasta la capacidad actual que sobrepasa el 80% de la producción mundial.

2.5 ELECTRÓLISIS

La electrólisis es un proceso que permite la separación de metales desde soluciones acuosas que lo contienen con el uso de una corriente eléctrica continua. La reducción (toma de electrones) de iones metálicos (cationes) propicia su precipitación como

metales sobre placas conductoras denominadas cátodos en las que suceden reacciones electroquímicas, como contraparte, suceden reacciones anódicas (oxidación) con liberación de electrones cerrando el circuito eléctrico. (Bolaños, 2005)

En la figura 2.1 se esquematiza una celda de electrólisis. El cátodo (polo negativo) es el electrodo en el que se consumen los electrones y el ánodo (polo positivo) es el electrodo donde se producen.

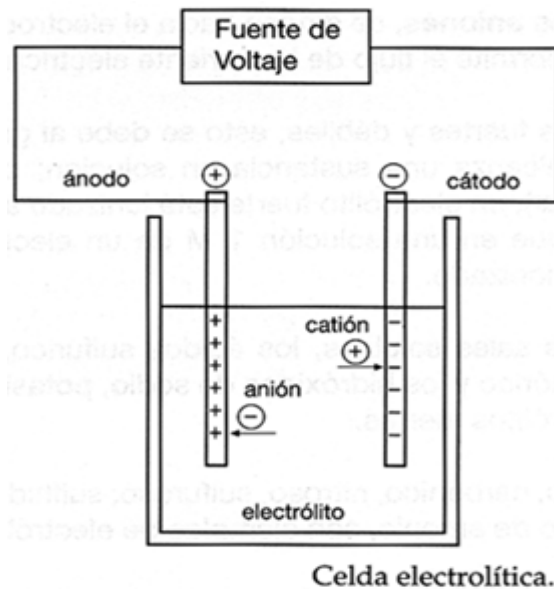


Figura 2.1: Celda electrolítica

Fuente: <http://www.pps.k12.or.us>

2.6 ELECTRÓLISIS DEL ZINC

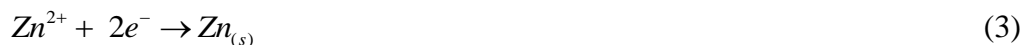
La electrólisis se efectúa dentro de las celdas electrolíticas en las que están suspendidas en forma alternada láminas aluminio puro como cátodos y planchas de aleación plomo-plata como ánodos. La imposición de una diferencia de potencial (voltaje de corriente continua) logra que zinc metálico se deposite electroquímicamente en los cátodos, mientras que en los ánodos se genera gas oxígeno simultáneamente. (Ballester, 2010)

El éxito del proceso depende, fundamentalmente, de las reacciones en los electrodos. Las reacciones se expresan así:

a) Reacción de disociación



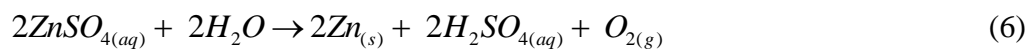
b) Reacciones del cátodo



c) Reacciones del ánodo



d) Reacción general



Donde los subíndices se refieren a lo siguiente:

(aq): componente de especie acuosa, es decir, disuelto en agua

(s): componente de fase sólida, en este caso zinc metálico

(g): componente de fase gaseosa, en este caso gas oxígeno

e^- : electrones cargados negativamente

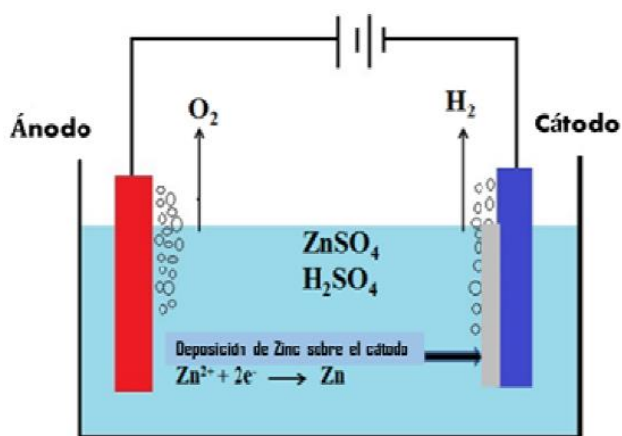


Figura 2.2: Celda simplificada de electrólisis de zinc
Fuente: Votorantim Metais, Memoria descriptiva del proceso-2015

2.7 EQUIVALENTE ELECTROQUÍMICO

El equivalente-gramo de un metal es químicamente alterado en cada electrodo y depositado por una corriente eléctrica de 1 Faraday, es decir, 96500 Coulomb en una celda electrolítica. Por lo que se llama equivalente electroquímico a la masa de sustancia que se transforma al paso de un culombio de electricidad durante la electrólisis y se puede determinar como cociente entre el equivalente químico de la misma y el número de Faraday. (Mantell, 1980).

Tabla 2.3 Lista de equivalente electroquímico

Elemento	Peso atómico (g)	Valencia	Equivalente gramo (g)	Equivalente electroquímico (g/A-h)
Zn ²⁺	65.37	2	32.69	1.22
Cu ²⁺	63.54	2	31.77	1.18
Co ²⁺	58.93	2	29.47	1.10
Ni ²⁺	58.71	2	29.36	1.09
Ag ⁺	107.87	1	107.87	4.02
Au ³⁺	197	3	65.67	2.45
2H ⁺	1.0	1	1	0.04

Fuente: Mantell, C., Ingeniería Electroquímica, 1980

2.8 CORRIENTE CONTINUA

Podemos encontrarnos con dos tipos básicos de corriente eléctrica, la que denominamos corriente alterna, cuyos valores instantáneos cambian continuamente con el tiempo y la corriente continua en la que el valor se mantiene constante en cualquier lugar en que lo consideremos. (Bolaños, 2005)

2.9 LEY DE FARADAY

Se utiliza para calcular la cantidad teórica de masa de un metal X que se depositaría en una celda electrolítica. (Bolaños, 2005)

La expresión de la ley de Faraday para el cálculo de la masa de material depositado es:

$$Q = Ee * A * t \quad (7)$$

Donde:

Q: masa teórica de metal depositado (g)

Ee: equivalente electroquímico del metal (g/ampere-hora)

A: corriente eléctrica aplicada (Amperes)

t: tiempo de aplicación de la corriente eléctrica (hora)

2.10 EFICIENCIA DE CORRIENTE

Se define la eficiencia de corriente como la razón entre el depósito real del metal dividido por el depósito teórico del metal, según el cálculo proporcionado por la ley de Faraday: (Bolaños, 2005)

$$Ec = \frac{Qr}{Q} * 100 \quad (8)$$

Donde:

Ec: eficiencia de corriente (%)

Q: masa teórica de metal depositado (g)

Qr: masa real de metal depositado (g)

La masa real de metal depositado Qr, está dado por la siguiente relación

$$Qr = Q * \frac{Ec}{100} \quad (9)$$

Equivalente a:

$$Qr = Ee * A * t * n^{\circ}C * \frac{Ec}{100} \quad (10)$$

Donde:

n°C= número de celdas electrolíticas

2.11 COMPONENTES DE UNA CELDA

Una celda electrolítica cuenta con 4 componentes básicos: (Aguilera ,2010)

Ánodos: Electrodo positivo, que recibe el flujo de electrones desde el rectificador y los entrega nuevamente a la fuente de corriente continua; la superficie de este electrodo se caracteriza por ser deficitaria en electrones, lo que permite la realización de las reacciones anódicas u oxidaciones de generación de ácido sulfúrico y liberación de oxígeno.

Los ánodos empleados en el proceso deben ser idealmente inertes químicamente, o sea no presentar transformaciones que faciliten su corrosión o degradación.

Deben ser conductor electrónico y estar sometidos a condiciones oxidantes electroquímicas por corrosión anódica y ambiente químico del electrolito ácido – oxigenado en la vecindad de la superficie anódica.

Cátodos: Es el electrodo negativo de una celda electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos (cationes) dentro del electrolito y es el lugar donde abundan los electrones.

Electrolito: El electrolito constituye la materia prima abastecedora del metal a la celda y es uno de los componentes de mayor significación e influencia que afecta el desempeño del proceso. Las características físico-químicas del electrolito afectan significativamente las siguientes respuestas del proceso:

- La calidad física y química de los cátodos.
- La eficiencia de corriente
- El consumo específico de energía

Conductores de corriente: En la realización de un proceso electrolítico, debe existir un circuito cerrado de circulación de la corriente eléctrica constituido por: conductores externos, electrodo y electrolito.

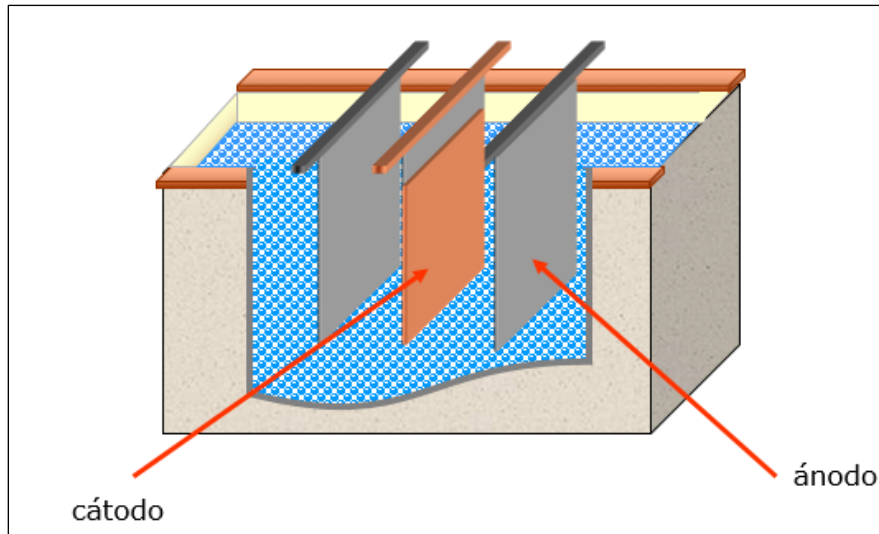


Figura 2.3: Disposición de ánodo y cátodo en celda
Fuente: Propia

2.12 CORTOCIRCUITO EN ELECTRÓLISIS

Se conoce como cortocircuito a la condición física que hace que la corriente pase entre los electrodos sin participar en las reacciones electrolíticas. Cuando se presenta un cortocircuito existe un alto amperaje (corriente) y como el espacio entre los electrodos es nulo esto provoca un efecto térmico adverso, y también una disminución del voltaje en la celda. (Aguilera, 2010)

Los cortocircuitos son producidos cuando existe contacto entre el cátodo y el ánodo. Este contacto se puede producir debido a que los electrodos no son completamente paralelos entre sí o a zonas con depósitos preferenciales en la superficie del cátodo, estas aumentarían su tamaño hasta realizar contacto con la superficie del ánodo, lo que aumenta la corriente aproximadamente un 250% en estos electrodos debido a una menor resistencia al paso de la corriente en ese punto. Los cortocircuitos son dañinos para un correcto funcionamiento de la planta, debido a que la sobre corriente hace elevar la temperatura de los electrodos, dañando su estructura física por deformaciones y favoreciendo la corrosión de los ánodos. (Fernández, 2015)

Además, los cortocircuitos causan una mala distribución de corriente en los electrodos vecinos, lo que causa que el proceso de deposición sea más lento.

La eficiencia de corriente se ve afectada al existir cortocircuitos, ya que la energía consumida no es usada para la deposición de cobre, esta se pierde forma de calor. Cuando los cátodos reciben corrientes muy elevadas, estos tienden a formar protuberancias del metal. Estas protuberancias hacen que la distancia entre el cátodo y el ánodo disminuya, disminuyendo la resistencia del electrolito y así aumentando la corriente. En caso de que la protuberancia del cátodo toque el ánodo, se produce un cortocircuito eléctrico que se puede manifestar por la carbonización total del capping board o bien por una llama entre la barra y el capping board. (Henriquez, 2011)

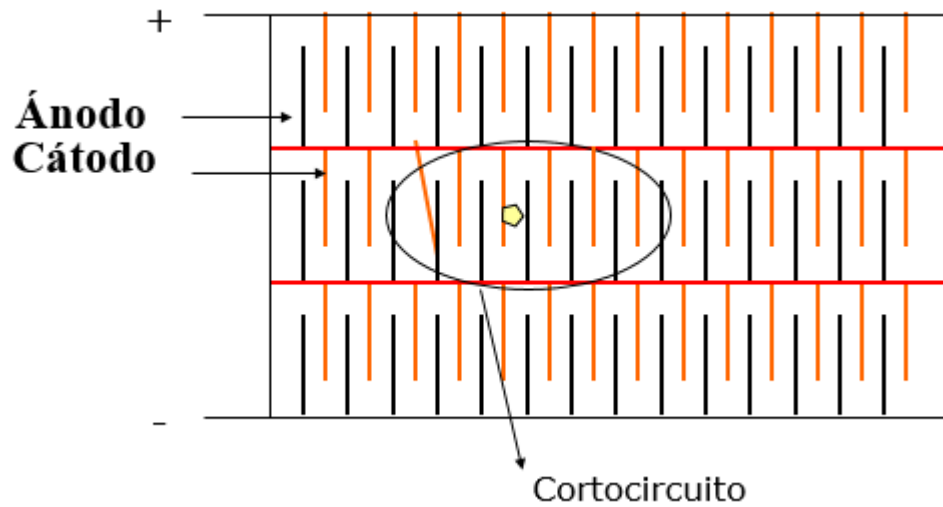


Figura 2.4: Representación gráfica de cortocircuito por desalineamiento y granulación
Fuente: Propia



Figura 2.5: Gránulo de cortocircuito
Fuente: Propia

2.12.1 Tipos de cortocircuito:

Los cortocircuitos se pueden clasificar en dos tipos:

- a) Cortocircuitos por proximidad: ocurren cuando las placas catódicas entran en contacto directo con el ánodo o quedan extremadamente cerca de este. Esto puede ocasionarse debido a: placas catódicas dobladas, placas catódicas que están fuera de la vertical, electrodos excesivamente mal alineados y placas anódicas de plomo dobladas.
- b) Cortocircuitos por crecimiento: se acelera el crecimiento porque continuamente atrae más corriente, y por lo tanto crece más rápidamente el nódulo del metal. Finalmente el crecimiento nodular o dendrítico hace contacto con el ánodo y se produce el contacto entre ánodo y el cátodo consumiendo corriente eléctrica sin un aporte positivo. El aditivo catódico puede inhibir este crecimiento nodular. (Informe Formación de cortocircuitos, 2016)

2.12.2 Impacto de Cortocircuito

La presencia de cortocircuitos entre ánodos y cátodos en las celdas es una situación indeseable para el proceso debido a que causa diversos efectos adversos como son los siguientes:

- Disminución del voltaje en las celdas.
- Disminuye la deposición de láminas debido a la reducción en la eficiencia

de corriente.

- Favorece la corrosión, degradación y deformación de los ánodos.
- Promueve la formación de depósitos delgados del metal, que causan problemas en la operación de despegue en la máquina.
- La plancha anódica se calienta y al calentarse aumenta la producción de PbO_2 y el riesgo de desprendimiento, provocando el desgaste acelerado de los ánodos.
- Incrementa la contaminación por plomo de los cátodos.
- Promueve la degradación de materiales plásticos en contacto con los electrodos cortocircuitados.
- El calentamiento aumenta la corrosión de las barras equipotenciales y en casos su derretimiento. (Aguilera, 2010)

2.12.3 Control de cortocircuito en electrólisis

El control de los cortocircuitos se realiza por inspección o detección y su pronta eliminación para dejar la celda en operación normal.

La detección puede realizarse por varias formas, basados ya sea en los efectos térmicos eléctricos provocados por el cortocircuito.

Dentro de éstas se tienen:

- Visual: Los electrodos que están consumiendo gran cantidad de corriente se calientan y hasta pueden derretir el aislador plástico. La barra colgadora también se coloca al rojo vivo debido al alto consumo de corriente. Este método de detección visual es tardío porque el daño está realizado. Sólo se puede minimizar este problema.
- Por gaussiómetro: Es un instrumento sencillo, utilizado como herramienta principal para la detección de los cortocircuitos en la pequeña y mediana minería. Indica alta corriente en un cátodo debido a la elevada fuerza magnética asociada que induce movimiento en un resorte cargado en una armadura de hierro contenido en el gaussiómetro

- Medición de voltaje con multímetro: Se puede medir corriente y voltaje de contacto de cada electrodo individualmente. Los cortocircuitos registran corrientes y voltajes de contacto mucho más alto. La verificación por este método es tediosa. Sólo se usa para chequeos al azar.
- Métodos infrarrojos: Se usan las cámaras portátil o montadas en puentes grúas. Detectan el calor generado por los materiales conductores que están en cortocircuito y generando consumo de corriente alta, lo que a su vez se detecta como un aumento de la temperatura.
- Sistema de control del voltaje de las celdas: Para controlar el voltaje de las celdas se usan sistemas computarizados que miden el voltaje de cada celda. El costo de este método es alto y también el mantenimiento. (Informe Formación de cortocircuitos, 2016)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DEL ESTUDIO

En la electrodeposición de metales, en este caso del zinc, ocurren comúnmente cortocircuitos que son perjudiciales pues es una variable que disminuye la eficiencia de corriente, lo que se ve reflejado en la real producción del metal con respecto a lo calculado para un determinado consumo de corriente.

Para mejorar la eficiencia de corriente se debe identificar y cuantificar las variables que impacten dicho resultado. Una vez identificados las variables “problema”, se busca alternativas de solución para mejorar el resultado.

Mediante recopilación de datos cuantitativos de las variables se realizó el análisis (regresión múltiple) para determinar la variable problema, que en este caso evidenció a los cortocircuitos para el periodo marzo-mayo del 2017 en la Planta de Estudio.

Se tuvo que identificar las causas de ocurrencia de cortocircuitos (tomando datos de temperatura de barras, observación visual in situ); describir las técnicas de identificación empleadas y el procedimiento de corrección de cortocircuitos. A su vez, se evidenció que los cortocircuitos no solo perjudica a la eficiencia de corriente; incide en la durabilidad de materiales aislantes usados para la electrodeposición, % de Pb en láminas de zinc, tiempo de vida de los ánodos. Por ello, una vez identificado y estudiado el problema (cantidad de cortocircuito), se propuso un Plan de Acción (pág.) el cual buscará a futuro minimizar las pérdidas materiales y económicas por ocurrencia de cortocircuitos.

3.2 MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.1.1 VARIABLES DE IMPACTO EN EFICIENCIA DE CORRIENTE

El registro de variables de impacto en eficiencia de corriente presentado en el Anexo 1, fueron obtenidos de la base de datos de la Planta en estudio, sin embargo se presenta brevemente las técnicas de medición de las mismas.

Tabla 3.1 Medición de variables que impactan en eficiencia de corriente

<i>Variable</i>	<i>Técnica de Medición</i>
Temperatura de electrolito	Termómetro digital
Peso promedio de depósito por cátodo	Balanza
Contenido de Sb, Cu, Fe, Zn	Absorción atómica
Ciclo de planchado	De acuerdo a la programación por fechas
Ciclo de succión	De acuerdo a la programación por fechas
Número de cortocircuito	Escáner, pirómetro, registros

Fuente: Propia

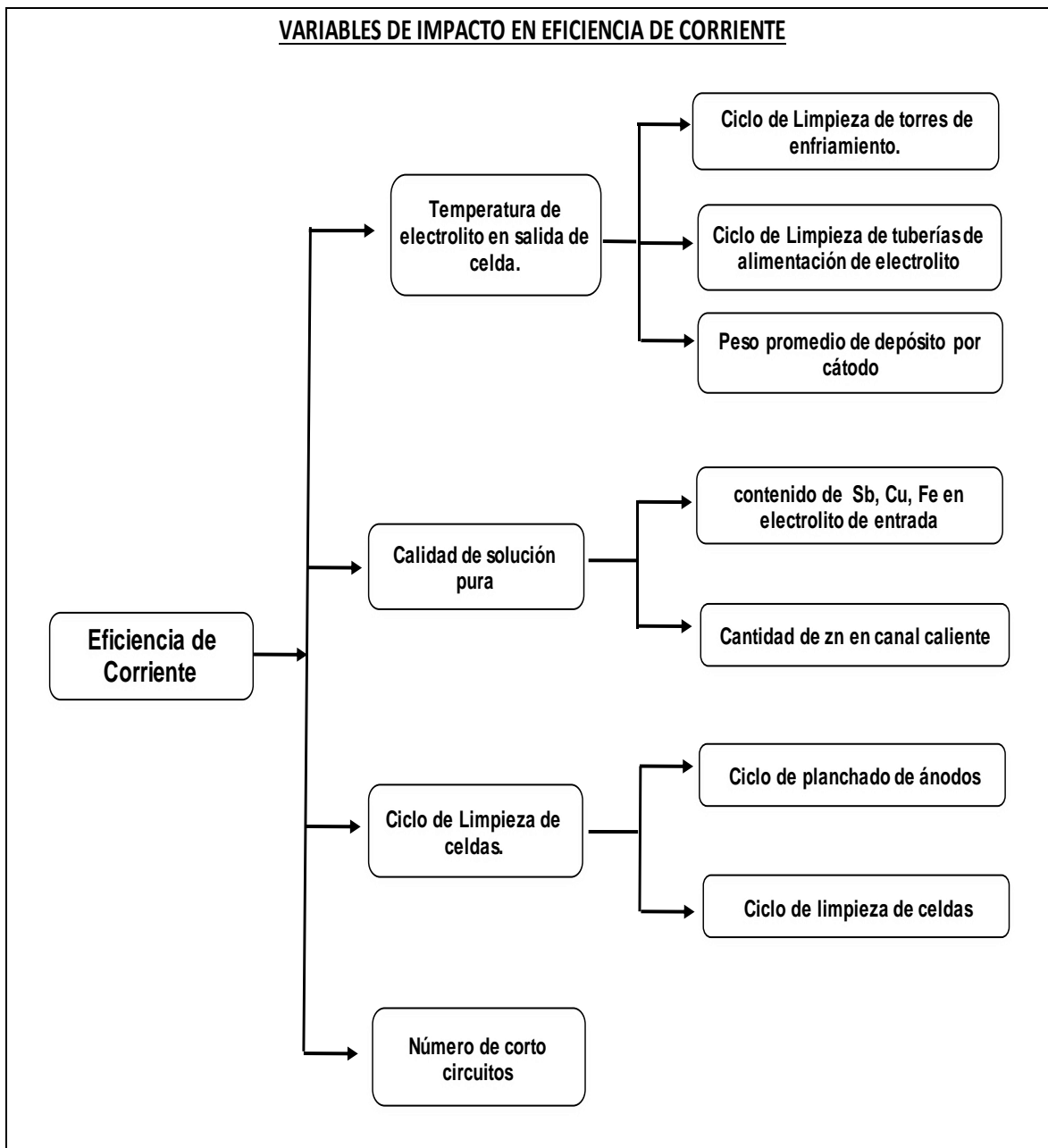


Figura 3.1 Variables de impacto en eficiencia de corriente

Fuente: Propia

3.1.2 CORTOCIRCUITOS

El desarrollo de la tesis tuvo lugar en la casa de celdas electrolíticas conocida como “Sección 70”, de la Empresa Votorantim Metais. La Tabla 4.1 muestra las especificaciones técnicas de la Planta.

Los inspectores son los encargados de realizar el trabajo de identificación y eliminación de cortocircuitos en la Planta mencionada, su trabajo consta de 3 turnos de 8 horas cada uno. Para la identificación de cortocircuitos en la Planta de estudio, se emplean tres métodos por diferencia de temperaturas: infrarrojo o pirómetro, termográfico o escáner y método manual o paleta. Los dos primeros basan su identificación en la temperatura generada por el paso de corriente en las barras equipotenciales y contactos de electrodos; que al encontrarse un cortocircuito la manifestación de calor es mayor.

Sin embargo, el método manual intuye cortocircuitos de acuerdo al tiempo de deposición de deposición del zinc y la introducción de una “paleta” para la “eliminación”. Dichos métodos se describen a continuación:

3.1.2.1 Método Infrarrojo

Este método emplea pirómetro de infrarrojo con un rango de temperatura de 0°C a 650°C. Se usa el pirómetro realizando una inspección de toda la barra equipotencial, detectando puntos calientes (> 90°C). Se pone la pistola en dirección a la barra, se presiona el gatillo y se dirige el láser al inicio de la barra (ingreso de electrolito a la celda) y se mantiene presionado el gatillo mientras se camina por toda la extensión de la celda con el láser en dirección y apuntando la barra, hasta llegar al rebose de la celda.



Figura 3.2: Pirómetro de infrarrojo

Fuente: Propia



Figura 3.3: Medición de temperatura con pirómetro
Fuente: Propia

Durante el barrido que se realiza en toda la extensión de la barra con la pistola se detectarán cortocircuitos, falsos contactos, mal alineamiento. Entonces se procede a registrar el punto con mayor temperatura detectado en la barra, en el Reporte de Inspección.

Se procederá a marcar el punto con mayor temperatura con precinto de plástico en el gancho del cátodo o ánodo al que corresponde. Esta actividad dura aproximadamente 30-35 minutos por fila.

3.1.2.2 Método Termográfico

Este método, también denominado escáner, usa una cámara termográfica que está montada en una grúa de cátodos, con la cual se pueden observar las diferencias de temperatura de los electrodos. Esta cámara está vinculada hacia un computador el cual muestra el reporte del escáner y nos muestra cortocircuitos en celda y falsos contactos mediante diferencia de colores y rangos de temperatura. (Ver anexo 2 y 3).

Como se puede observar en la Figura 3.4, el cátodo cortocircuitado posee un color intenso al resto de los cátodos presentes en la celda electrolítica. Mediante esta información se distinguen la existencia de un cortocircuito.

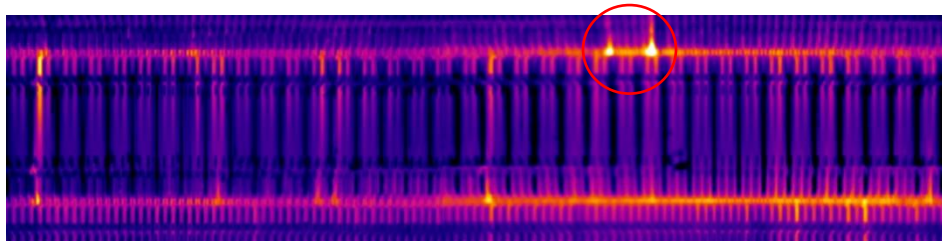


Figura 3.4: Cortocircuitos detectado con cámara termográfica (vista de una celda)

Fuente: Propia



Figura 3.5: Ubicación del escáner en la grúa de cátodos

Fuente: Propia

Procedimiento de uso del escaner

Use ubica la grúa en la posición inicial del escaneo (celda 29 de la fila respectiva). Encender el PC del escáner. Aparecerá enseguida la ventana CTMS-Operador Interfase, el operador deberá observar sobre dicho recuadro que el indicador de comunicaciones este de color verde, indicando que el escáner está listo para ser operado.



Figura 3.6: Pantalla de PC de uso del escáner
Fuente: Votorantim Metais

Luego hacer click en el botón **preparar para escanear**, espera hasta que el botón **arranque automático/arranque manual** esté de color verde y seleccionar la opción según sea el caso.



Figura 3.7: Opciones de uso del escáner en PC
Fuente: Votorantim Metais

Cumpliendo el paso anterior y verificando que el indicador de comunicaciones en la PC esté en verde, dirigirse a la grúa y presionar el pulsador instalado en el tablero de mando de grúa (botón verde) que sirve para activar la luz roja de escaneo.

La grúa inicia su desplazamiento a través de la fila en baja velocidad, a medida que avanza la grúa toma mayor velocidad. El operador en todo momento acompaña a la grúa hasta que termine su recorrido en toda la fila.

El operador trae de retorno la grúa a su posición inicial, luego se dirige hacia la PC para ver el registro de escaneo. Esta actividad dura aproximadamente 10-15 minutos por fila.

El reporte muestra mediante diferencia de colores el estado de recalentamiento de las barras, cortos circuitos, falsos contactos.

3.1.2.3 Método manual

Si no se contara con ninguna de las herramientas anteriores se puede usar una paleta de polipropileno de 1.8m de largo por 30 cm de ancho y 6 mm de espesor, la cual es introducida entre el espacio de cátodo y ánodo y se procede a raspar los posibles gránulos, de acuerdo al tiempo de deposición del zinc en los cátodos. Las cosechas de láminas se realizan en un tiempo de 48 horas de electrodeposición del zinc, en este tiempo los cátodos tienen un peso promedio de 80 kg de zinc, por lo que con este método se prioriza el paleteo en las celdas donde se está próximo a deslaminar con un tiempo de referencia de 40 horas en adelante. Este método no es preciso y no se puede llevar un adecuado control con el mismo.

3.1.3 USO DE MINITAB

Regresión múltiple:

- Representar los datos en un gráfico
- Identificar su aspecto y sus desviaciones
- Descripciones numéricas que informen sobre los datos y su posible relación.
- Descripción matemática resumida del aspecto general del problema.

3.3 INSTRUMENTOS

3.3.1 Variables de impacto en eficiencia de corriente

Base de datos del “registro de variables” de la Planta de estudio.

3.3.2 Cortocircuitos

De identificación visual: grúa de cátodos, máquina descortezadora de cátodos, formatos impresos para llenado de cantidad de cortocircuitos.

De identificación por diferencia de temperatura: pirómetro, formatos impresos, escáner, PC de escáner, grúa viajera.

CAPÍTULO IV

PROCESO PRODUCTIVO DE LA REFINERIA DE ZINC CAJAMARQUILLA

De acuerdo al “Manual del Proceso Productivo” de Votorantim Metais (2016, p. 20-60), se describen las etapas del proceso productivo del zinc en la Refinería de Cajamarquilla:

4.1 MANIPULEO DE CONCENTRADOS

La refinería trata alrededor de 18 diferentes concentrados de zinc procedentes de unidades/empresas mineras tales como Brocal, Paragsha, SIMSA, Milpo, Atacocha, Cerro Lindo, Quiruvilca entre otros, de los cuales aproximadamente el 60% se transporta por ferrocarril y la diferencia por camión. Todo el concentrado que se recibe es pesado y descargado formando pilas en el almacén que tiene una capacidad de 27500 t (11 pilas de 2500 t cada una). Dicha zona de almacenamiento y preparación se encuentra cerca al área de Tostación.

Utilizando cargadores frontales, se realizará la combinación y mezcla de los concentrados junto con óxido de zinc (dross) recirculante del horno de fusión de cátodos con el objetivo de alcanzar dos parámetros fundamentales: una humedad de 8 a 10% y una ley promedio de $Zn > 52\%$.

Las pilas son los lugares de almacenamiento de los concentrados. Se trabaja con equipos de carguío para el almacenamiento y traslado de este material sólido.

4.2 PLANTA DE TOSTACIÓN

La tostación es un proceso pirometalúrgico, mediante el cual se convierten los sulfuros del concentrado en sus respectivos óxidos. Este proceso aprovecha la autocombustión exotérmica de los sulfuros con el oxígeno del aire que se inyecta mediante un soplador, obteniéndose la calcina (óxidos) para la siguiente etapa.

Las reacciones químicas básicas se expresan por:



El desarrollo de las operaciones se inicia con la recepción de la mezcla de concentrado en las tolvas de almacenamiento que descargan el concentrado en forma secuencial por medio de una faja transportadora a una balanza para el control de operaciones, siguiendo a un plato giratorio que regula la alimentación a la faja alimentadora la cual envía el concentrado al interior del horno.

Se cuenta con dos reactores para una producción de 320 000 t de zinc refinado por año:

- 1 horno de lecho fluido de 100m² de área de parrilla, con inyección de aire enriquecido con oxígeno para un ritmo de alimentación de concentrado de 38 t/h.
- 1 horno de lecho fluido de 123 m² de área de parrilla, con inyección solo de aire para un ritmo de 48 t/h.

Al horno se insufla aire por su parte inferior a través de unos inyectores instalados en la parrilla del piso del horno. La característica principal de los hornos es que por la autocombustión entre los sulfuros y el oxígeno del aire se trabaja a temperaturas de la cama de horno entre los 900°C y 930°C, sólo necesitando calor externo con consumo de combustible para alcanzar esta temperatura en el arranque de planta inicial o después de una parada del horno.

La tostación de los concentrados de zinc en la actualidad, se lleva a cabo en dos hornos de capa turbulenta (TLR). El horno antiguo fabricado por Lurgi de 100 m², con una capacidad de tostación de 10.08 t/m²/d, el cual recibe aproximadamente 54 000 m³/h de aire por los inyectores de la parrilla del horno y oxígeno aproximadamente 900 m³/h, el horno nuevo fabricado por OUTOTEC de 123 m² con una capacidad de tostación de 10.56 t/m²/d, el cual recibe aproximadamente 72,000 m³/h de aire por los

inyectores de la parrilla del horno. El proceso de tostación se lleva a cabo a una temperatura de entre 900 y 930°C con alimentación de concentrados, escorias de zinc del proceso de fusión de cátodos.

En las condiciones adecuadas de calor y oxígeno tiene lugar la reacción exotérmica de oxidación de los sulfuros de zinc, así como la reacción del azufre contenido en los otros elementos presentes en los concentrados con el oxígeno del aire.

Ambos tostadores se encuentran en dos líneas de producción diferentes para atender la necesidad de producción de calcina (óxido de zinc) para la siguiente etapa. Cada línea cuenta con dos edificaciones independientes, en las cuales se tiene un panel de control para el seguimiento del proceso.

Los hornos en conjunto producen 158,725 m³/h normalizados de gases conteniendo 10,17% SO₂ que salen del horno a una temperatura de aproximadamente 950°C, y 1,600 t/d de calcina (óxido de zinc). La fracción más gruesa de calcina se obtiene por el rebose inferior de los hornos y consiste del 40% de la producción de calcina. Las fracciones de calcina más finas salen del horno, conjuntamente con los gases, por la parte superior de los tostadores y pasan por un circuito de enfriamiento y recuperación de finos, mediante un caldero que produce vapor, los ciclones y los precipitadores electrostáticos. La calcina gruesa procedente de los tostadores y calderas es enviada a un enfriador rotatorio para luego pasar a un molino de bolas, la calcina fría de los ciclones y precipitadores y la calcina proveniente del molino de bolas son distribuidas hacia los dos silos de almacenamiento para su posterior tratamiento en la Planta de Lixiviación.

Los gases conteniendo el dióxido de azufre (SO₂), limpios y enfriados en los sistemas mencionados líneas arriba, son enviados a las Plantas de Ácido Sulfúrico. El enfriamiento de los gases de 950 a 330°C produciéndose en los calderos 36 t de vapor a 38 bar y 42 t de vapor a 43 bar.

Durante el proceso de tostación, la presencia del hierro contenido en los concentrados juega un papel fundamental en la calidad de la calcina a obtenerse, debido a que, a partir de los 600°C y durante el calentamiento hasta 900°C en el lecho del horno de cama turbulenta, el hierro tiende a oxidarse y éste, a su vez, a unirse a los óxidos de zinc, cobre, cadmio, etc. formando ferritas.

Las plantas de tostación, están conformadas por los siguientes equipos principales:

- Un (01) horno de tostación
- Una (01) caldera de recuperación de calor
- Un (01) enfriador seccional de calcina
- Un (01) molino de bolas
- Dos (02) ciclones de gas caliente
- Dos (02) precipitadores electrostáticos
- Transportadores de calcina (elevadores de cangilones)

4.3 PLANTAS DE ÁCIDO SULFURICO

La producción de ácido sulfúrico, mediante el tratamiento del SO_2 de los gases residuales del proceso de tostación, se realizará en dos plantas de ácido de doble catálisis y doble absorción.

Las plantas de ácido operan en condiciones auto-térmicas, es decir son autógenas y no necesitan de una fuente de calor externo sobre una concentración de SO_2 de 6.8% en volumen (en base seca) y un flujo de gas de entrada al Convertidor de 85,000 Nm^3/h en la planta 1 y 114,000 Nm^3/h en la planta 2. Eventualmente, cuando la concentración de SO_2 es menor, se activa el sistema de precalentamiento para compensar la deficiencia de entalpía. Se obtiene un ácido con 98.5% de pureza.

El proceso catalítico de producción de ácido sulfúrico tiene las siguientes etapas básicas:

- Purificación y enfriamiento del SO_2 proveniente de los hornos de tostación para eliminar las trazas de polvo de calcina que arrastran los gases.
- Conversión catalítica del SO_2 a trióxido de azufre, en contacto con un catalizador pentaóxido de vanadio.
- Absorción del trióxido de azufre en ácido sulfúrico.

4.4 LIXIVIACIÓN

El proceso de lixiviación es el conjunto de varios subprocesos con el objetivo de extraer la mayor cantidad de zinc de la calcina y transformarlo en sulfato de zinc para su posterior purificación y electrodeposición. El proceso de lixiviación sirve a su vez para la eliminación del hierro del sistema, siendo su residuo goethita.

El proceso de separación de las pulpas, que son el producto de cada sub etapa, se lleva en los esperadores; aquí se logra separar las soluciones ricas en zinc y los lodos con restos de zinc que pueden continuar con la lixiviación. Las reacciones que ocurren en estas etapas se dan en los tanques que están ubicados en edificaciones especiales que permiten dar las condiciones de operación como:

- Temperaturas altas (de 60°C a 95°C)
- Acidez alta (hasta 140 g/L de H₂SO₄ libre)

Y además de ello se cuentan con sumideros en las partes inferiores que permiten almacenar dichas soluciones para la limpieza de tanques o espesadores.

El proceso de separación de las pulpas, que son el producto de cada sub-etapa, se lleva en los espesadores. Aquí se logra separar las soluciones ricas en zinc y los lodos con restos de zinc que pueden continuar con la lixiviación.

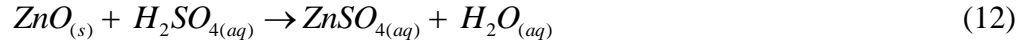
Los residuos de esta etapa son filtrados en una zona de filtros que permite recuperar el zinc líquido de dichos residuos antes de perderlos en las pozas.

Uno de los residuos, el rico en Pb y Ag es llevado a la etapa de flotación, y el relave de esta etapa se envía junto con el residuo de goetita a la poza.

Las sub-etapas de la lixiviación son:

4.4.1 Lixiviación neutra

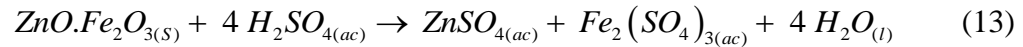
La calcina producida durante la tostación, se alimenta a los tanques de reacción de lixiviación neutra en donde se neutraliza una mezcla de soluciones provenientes del proceso de goethita con solución ácida de retorno de electrólisis. La finalidad de esta etapa es disolver el sulfato de zinc y la mayor parte del óxido de zinc desde las calcinas de tostación por acción de la solución ácida. El ZnO reacciona rápidamente con H₂SO₄ para formar una solución de sulfato de zinc.



4.4.2 Lixiviación ácida caliente

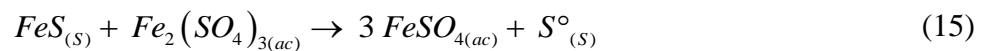
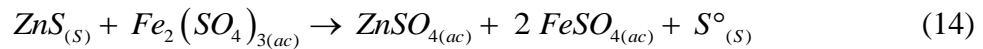
Se trabaja en un rango de temperatura de 85-90 °C. El objetivo principal es lixiviar las ferritas ($ZnO \cdot Fe_2O_3$) provenientes de la calcina, que no se disolvieron en la lixiviación neutra.

La reacción principal se muestra a continuación:



4.4.3 Etapa de Reducción Ácida

En esta etapa, el concentrado de zinc alimentado reduce el sulfato férrico a sulfato ferroso en un medio ácido y una temperatura de trabajo de 80 °C a 85 °C. Las reacciones que gobiernan esta etapa son:

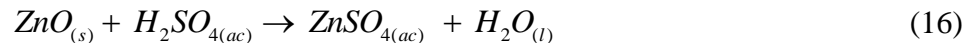


La solución líquida es enviada a la etapa de pre-neutralización mientras que el producto sólido es enviado a unos filtros.

4.4.4 Pre neutralización

En esta etapa se alimenta calcina para reducir la acidez del overflow (O/F) de la reducción ácida con el objetivo de minimizar la cantidad de calcina necesaria para la precipitación de indio o goethita y así disminuir las pérdidas de zinc sin lixiviar en el residuo de goethita.

La reacción predominante de esta etapa es:

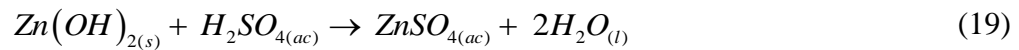
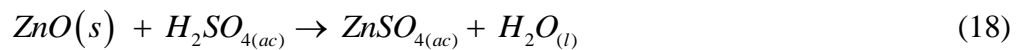


4.4.5 Precipitación y filtración de goethita

En esta etapa para la precipitación de la goethita, se agrega calcina a los tanques con el objetivo de controlar el pH y así mantener el medio requerido ya que en

la reacción de precipitación de goethita se forma ácido sulfúrico. Además se inyecta oxígeno en los tanques para oxidar el hierro ferroso (Fe^{2+}) proveniente de la solución alimentada a hierro férrico (Fe^{3+}), la oxidación del hierro ferroso en un ambiente de pH alto promueve la precipitación del hierro como goethita, una forma de residuo de hierro que se asienta, filtra fácilmente y es estable para la eliminación.

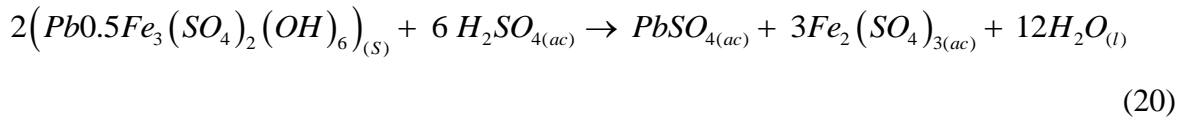
Las reacciones producidas en la precipitación de goethita son las siguientes:



4.4.6 Lixiviación súper ácida

Se trabaja con 95 °C mediante la inyección de vapor vivo y ácido sulfúrico al 98,5% de concentración. El objetivo principal es lograr la descomposición de las plumbojarositas a través de condiciones extremas.

La reacción principal se muestra a continuación:



La solución final se envía a la etapa de reducción ácida, mientras que el lodo principalmente conformado por $PbSO_4$ y $AgSO_4$ es enviado a la etapa de flotación de plata.

4.5 PURIFICACIÓN

Este proceso sirve para separar el cobre, cadmio, cobalto y níquel de la solución que viene de lixiviación a través del uso de polvo de zinc. Durante la separación es necesario el uso de filtros para poder retirar dichos elementos, así entonces se tiene dos sub-etapas:

4.5.1 Purificación fría

Los elementos precipitados por cementación en esta primera etapa son el Cu y el Cd al mismo tiempo que el As, Sb, Ge, Co y Ni (en parte). El tiempo de reacción se ha establecido en 30 minutos donde prácticamente todo el Cu y aproximadamente el 90% de Cd precipitan por cementación.

El tiempo de reacción es importante, ya que el Cd se disuelve transcurridas las 1.5 horas. El pH es de 4.5 a 4.7 y la temperatura varía de 60° a 70 °C.

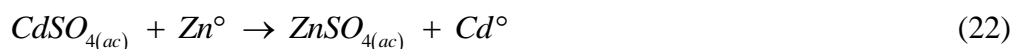
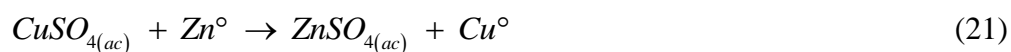
El polvo de zinc que se usa en esta etapa está a malla < 200 μ.

Es útil prever la posibilidad de adicionar polvo de Zn en el segundo reactor para eliminar eficientemente el Cd que podría pasar. La presencia de As y de Sb favorece la precipitación anticipada del Co y principalmente del Ni. Consecuentemente, contenidos de As y Sb en la solución neutra suficientemente altos hacen que el Co y el Ni se precipitan parcialmente durante la purificación fría y acompañan los lodos Cu-Cd al repulpado produciendo así un alto contenido indeseable de Co y de Ni en la solución de CdSO₄ que va a la planta de Cadmio.

La solución filtrada de la purificación fría se envía hacia la segunda etapa de purificación denominada caliente y las tortas de filtración se envían al tratamiento del residuo Cu-Cd para la recuperación del exceso de Zn y disolución de Cd.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en la etapa de Purificación Fría son:

- Precipitación de Impurezas por cementación:



4.5.2 Purificación caliente

El Co, Ni y otras impurezas tales como el Ge se eliminan en la purificación caliente operando a una temperatura de 90 °C y con la adición de polvo de zinc,

tartrato de antimonio y potasio ($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$) y sulfato de plomo ($PbSO_4$).

El polvo de zinc que se usa en esta etapa está a malla $< 75 \mu$ para tener una buena cinética de reacción y evitar un consumo excesivo. La velocidad de cementación es proporcional a la superficie del zinc. El polvo fino es más activo y el uso de polvo grueso obliga a compensar la pérdida de actividad por un exceso de polvo.

El tiempo de reacción tiene que ser de 1.5 horas a una temperatura de 90 – 95 °C.

4.5.3 Enfriamiento de la Solución Pura

Después de la purificación, la temperatura será de 90 °C aproximadamente. La solución que sale de purificación caliente va para la primera torre de enfriamiento y luego pasa a la copa de decantación de sólidos (copa de “champagne”) para luego ser enviado a la siguiente torre de enfriamiento (doble sistema de enfriamiento). Entonces, la solución purificada se enfría a más o menos 40°C para su envío a la sección de casa de celdas.

4.6 PLANTA DE ELECTRÓLISIS

La electrólisis se lleva a cabo en 3 casas de celdas denominadas sección 70, 73 y 75 las cuales son edificaciones que contienen respectivamente 232 celdas con 49 ánodos/celda y 48 cátodos/celda; 36 celdas con 57 ánodos/celda y 56 cátodos/celda y 94 celdas con 123 ánodos/celda y 122 cátodos/celda. Los cátodos miden 1600x 900x70 mm de espesor y pesan 35 kg cada una; los ánodos miden 1545x843x12 mm de espesor y pesan 178 kg cada una. El tiempo de deposición del zinc es de 48 horas.

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de la sala de electrólisis

Total Celdas	232
Filas	8 (del 1 al 8)
Celdas por Fila	29
Cátodos por Celda	48
Ánodos por Celda	49
Circuitos Eléctricos	2 (4 Filas c/u)
Área de Deposición	2.6 m ² (por cátodo) 29,000 m ² (Total)
Densidad de Corriente,	190 A/m ² (Hora Punta) 600 A/m ² (Fuera de Punta)
Voltaje de celdas	3.44 V
Capacidad	147,550 t/año (Cátodos)
Ciclo de Deposición,	48 horas
Torres de Enfriamiento	10
Material de Celdas	Concreto Reforzado

Fuente: Votorantim Metais

La electrolisis se efectúa dentro de las celdas electrolíticas en las que están suspendidas en forma alternada láminas aluminio puro como cátodos y planchas de aleación plomo-plata como ánodos. La imposición de una diferencia de potencial (voltaje de corriente continua) logra que zinc metálico se deposite electroquímicamente en los cátodos, mientras que en los ánodos se genera gas oxígeno simultáneamente.

La evolución del gas hidrógeno es una reacción catódica que compite con la deposición de zinc y es altamente sensible a la pureza de la solución de modo que la calidad del electrolito purificado suministrado al circuito de electrolisis y las condiciones operativas en las casas de celdas deben mantenerse en niveles óptimos para minimizar la producción de hidrogeno gaseoso y mantener una alta eficiencia de corriente en la deposición de zinc.

La reacción secundaria más importante en el ánodo es la oxidación del manganeso disuelto para formar dióxido de manganeso (MnO₂). El MnO₂ formado se adhiere a los ánodos parcialmente y el resto precipita y asienta en el fondo de la celda obligando a

una remoción periódica mediante el sistema de limpieza de celdas por succión. La producción de MnO_2 es directamente proporcional al contenido de sulfato de manganeso en solución y su adherencia al ánodo inversamente proporcional. El MnO_2 que cubre al ánodo impide la corrosión de la aleación de plomo-plata, minimizando así la contaminación con plomo del zinc electro-depositado. La capa de MnO_2 en el ánodo debe removerse periódicamente para evitar el contacto físico con la plancha de cátodo adyacente. El contacto físico entre los ánodos y cátodos produce cortocircuitos eléctricos, promoviendo la contaminación con plomo del depósito catódico de zinc y la reducción sustancial de la eficiencia de corriente.

Los iones involucrados en la electrolisis se encuentran en el electrolito como producto de la disociación del sulfato de zinc y del ácido sulfúrico contenidos en ella según:



La electrodeposición de zinc es un proceso complejo e incluye muchas reacciones electroquímicas. Sin embargo, las principales reacciones pueden resumirse como sigue:

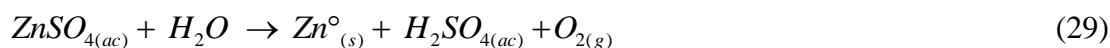
Reacciones catódicas de media celda:



Reacción anódica de media celda:



Reacción Global (Suma de las dos semi-reacciones anteriores más relevantes)



Siendo:

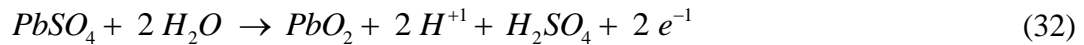
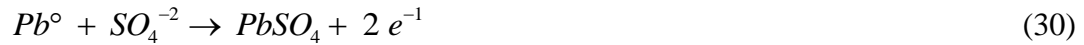
(ac): compuesto disuelto en agua disociado en sus iones (Zn^{+2} , SO_4^{-2} e H^{+1}).

(s) : componente en fase sólida (Zinc metálico).

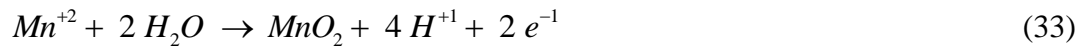
(g) : componente en fase gaseosa, (Hidrógeno y Oxígeno gaseosos).

e^{-1} : electrones cargados negativamente.

La reacción principal en el ánodo es la descomposición del agua con producción de oxígeno y reconstitución del ácido sulfúrico, sin embargo, esencialmente la superficie del ánodo de plomo se oxida y pasiva según las siguientes tres reacciones cubriéndose con dióxido de plomo:



Adicionalmente, el manganeso en solución se oxida a dióxido de manganeso de acuerdo con la reacción:



La disolución de plomo del ánodo se ve favorecida por el efecto del ion común, en este caso el SO_4^{-2} (en la práctica se da como alta densidad del electrolito o alta molaridad). Cuando la concentración de SO_4^{2-} aumenta, la siguiente ecuación muestra una desviación a la izquierda:



Así, una mayor concentración de HSO_4^{-1} en el electrolito favorece la corrosión del ánodo Pb-Ag según:



Asimismo, una mayor acidez del electrolito conlleva a mayor presencia de HSO_4^{-1} , con el consiguiente perjuicio del incremento de plomo en los cátodos de zinc por co-deposición electrolítica.



Figura 4.1: Planta de electrodeposición de zinc Refinería de Cajamarquilla
Fuente: Propia

El proceso de electrólisis de zinc comprende las siguientes etapas:

4.6.1 Almacenamiento de solución pura

La solución purificada fluye por canaletas desde las torres de enfriamiento de solución pura a los tanques de almacenamiento, de donde se usan bombas para alimentar solución pura a la canaleta común que recolecta electrolito gastado enfriado de las torres de enfriamiento y alimenta a la casa de celdas. La adición de solución pura a los sistemas de circulación de la casa de celdas se regula para mantener el contenido de zinc y ácido sulfúrico del “spent” (electrolito gastado) dentro de los límites de especificación.

4.6.2 Enfriamiento y circulación de electrolito

La temperatura objetivo para el electrolito de alimentación a celdas es de aproximadamente 32°C. La temperatura del electrolito a la salida de las celdas está entre 35- 39°C.

4.6.3 Adición de reactivos

Los objetivos principales del sistema de adición de reactivos son: agregar reactivo de gelatina para controlar la morfología del depósito de zinc en el cátodo; agregar una mezcla de reactivo de regaliz y silicato para minimizar la evolución de la niebla ácida de la celda; agregar una pulpa de carbonato de

estroncio para controlar la contaminación del cátodo de zinc con plomo de los ánodos precipitando cualquier plomo soluble como carbonato de plomo.

4.6.4 Manipuleo de electrodos

Cada fila de celdas es servida por una grúa de manipuleo de electrodos. Los tiempos de deposición de zinc son de 48 horas. La mitad de los cátodos se retiran de una celda y se transfieren a la máquina deslaminadora. La corriente eléctrica sigue fluyendo por la mitad restante de electrodos. Después de depositar los cátodos en el transportador de entrada de la máquina deslaminadora, la grúa levanta inmediatamente un juego de cátodos esperando en el transportador de salida y vuelve a colocarlos en la celda.

Cuando los electrodos son izados desde una celda, se activan rociadores de agua en la grúa a fin de lavar cualquier porción de electrolito ácido que cae a las barras entre celdas.

4.6.5 Deslaminado de cátodos

El deslaminado se lleva a cabo en dos pasos: pre-deslaminado y deslaminado. Durante el pre-deslaminado se hace la primera incisión entre lámina de zinc y el cátodo de aluminio mediante el movimiento vertical de los cuchillos de pre-deslaminado. Los cuchillos se mueven luego horizontalmente para separar la parte superior de las láminas de zinc. El deslaminado se completa con el movimiento vertical de los cuchillos principales para terminar la separación del zinc desde la hoja de aluminio. Las láminas de zinc removidas en la máquina caen por un chute y transportador a una mesa de apilado.



Figura 4.2: Grúa con carga de cátodos

Fuente: Propia

4.6.6 Limpieza de ánodos

El proceso de limpieza y planchado de ánodos se hace generalmente por ciclos de 18 a 20 días por celda. Un tercio de los ánodos de una celda se tratan como un lote. Los ánodos se colocan en el carro de transferencia de ánodos que mueve los ánodos hacia y desde la máquina limpiadora de ánodos. El primer paso es una estación de cepillado, cada ánodo es izado a la posición de inicio, se colocan los cepillos giratorios en la superficie del ánodo y éste es levantado cubriendo su altura total mientras se le cepilla. Un rociador de agua presurizada remueve cualquier depósito separado por los cepillos. El segundo paso es la estación de planchado, donde cada ánodo es izado mientras es rociado con agua presurizada de varias boquillas de chorro plano. Esto remueve cualquier residuo que quede en la superficie del ánodo. Una vez que el ánodo ha llegado al punto superior de movimiento, dos placas pesadas planchan la hoja de ánodo con dos impactos rápidos. El ánodo baja luego de regreso al carro de transferencia.

4.6.7 Limpieza y mantenimiento de celdas

El MnO_2 que precipita en las celdas, se asientan en el fondo de las mismas y debe ser removido periódicamente. El sistema de limpieza de celdas por succión permite remover el lodo de celdas mientras se mantienen las celdas en línea y sin interferir con la producción de zinc.

En el fondo de las celdas hay una tubería perforada instalada permanentemente para facilitar la remoción de lodo. Para limpiar las celdas, esta tubería se conecta con una manguera flexible a toma vertical de varios tubos situados a lo largo de las filas de celdas. El lodo de celdas se recolecta mediante vacío en los depósitos de limpieza de celdas y se descargan a un tanque.



Figura 4.3: Limpieza de celdas
Fuente: Propia

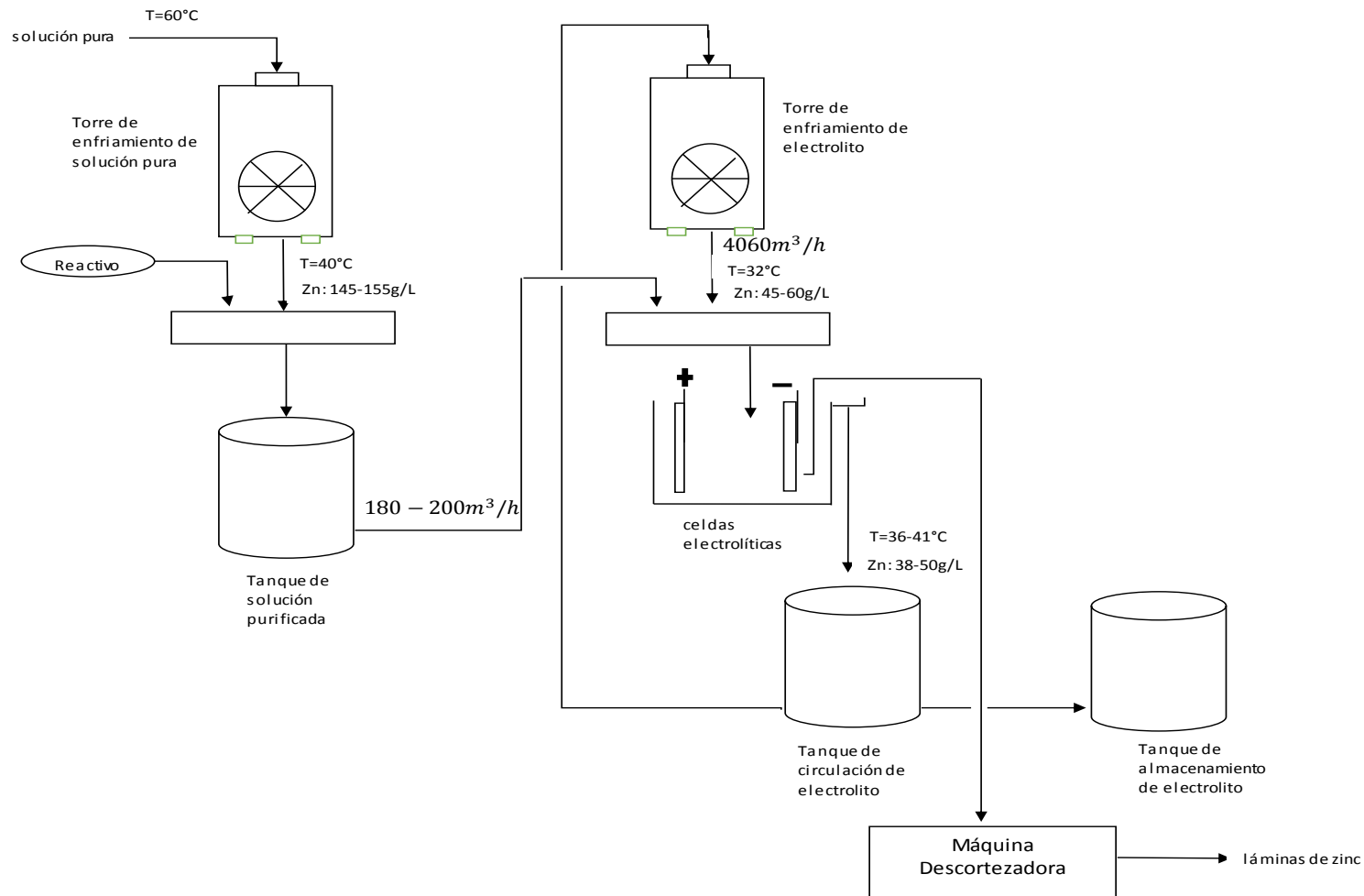


Figura 4.4: Proceso de electrodeposición del zinc en la Refinería Votorantim Metais
Fuente: propia

4.7 PLANTA DE FUSIÓN Y MOLDEO

La fusión de láminas de zinc se produce por efecto de la inducción electromagnética de un medio conductor (cátodo) en un crisol alrededor del cual se encuentran enrolladas bobinas magnéticas y se realiza en los Hornos de Inducción DEMAG, ABB y ABP, los mismos que operan manteniendo una temperatura de baño entre 490°C y 520°C, equipados con una red inductores de frecuencia, dos (Shepard) y tres (ABB/ABP) a cada lado del horno. Los inductores utilizan el principio del transformador, con un bucle de metal fundido que formando un espiral secundario cortocircuitado. Se usa NH_4Cl como fundente.

El zinc fundido se bombea normalmente desde el horno de fusión usando bombas centrifugas sumergidas. Las bombas se construyen normalmente con carburo de silicio para el cuerpo y se impregnan de grafito el impulsor. El vertido de metal fundido desde la línea de bombas al sistema de canales de colada abiertos, para su distribución a las instalaciones de aleación o alimentadores son canales de acero revestidos con refractarios, calentados con una llama de gas antes de la operación.

El zinc fundido es moldeado en las líneas Sheppard y Outotec, obteniéndose las barras de zinc listas para su envío a los mercados nacionales e internacionales.

En la figura 4.5 se observa el proceso de producción del zinc en la Planta Cajamarquilla. Las flechas rojas indican el flujo del proceso: recepción de concentrados, tostación, lixiviación, purificación, electrodeposición; fusión y moldeo del zinc. Las flechas turquesa indican a los subproductos tales como ácido sulfúrico (proveniente de la tostación); concentrado de plata (proveniente de la lixiviación), varillas de cadmio (proveniente de purificación), granalla de zinc y polvo de zinc (proveniente de fusión). Las flechas lila indican a los residuos tales como: jarositas (residuo de lixiviación), cemento de cobre y cobalto (residuo de purificación). Asimismo, en esta figura se muestra el proceso de tratamiento de efluentes metalúrgicos.

Proceso de refinación del zinc

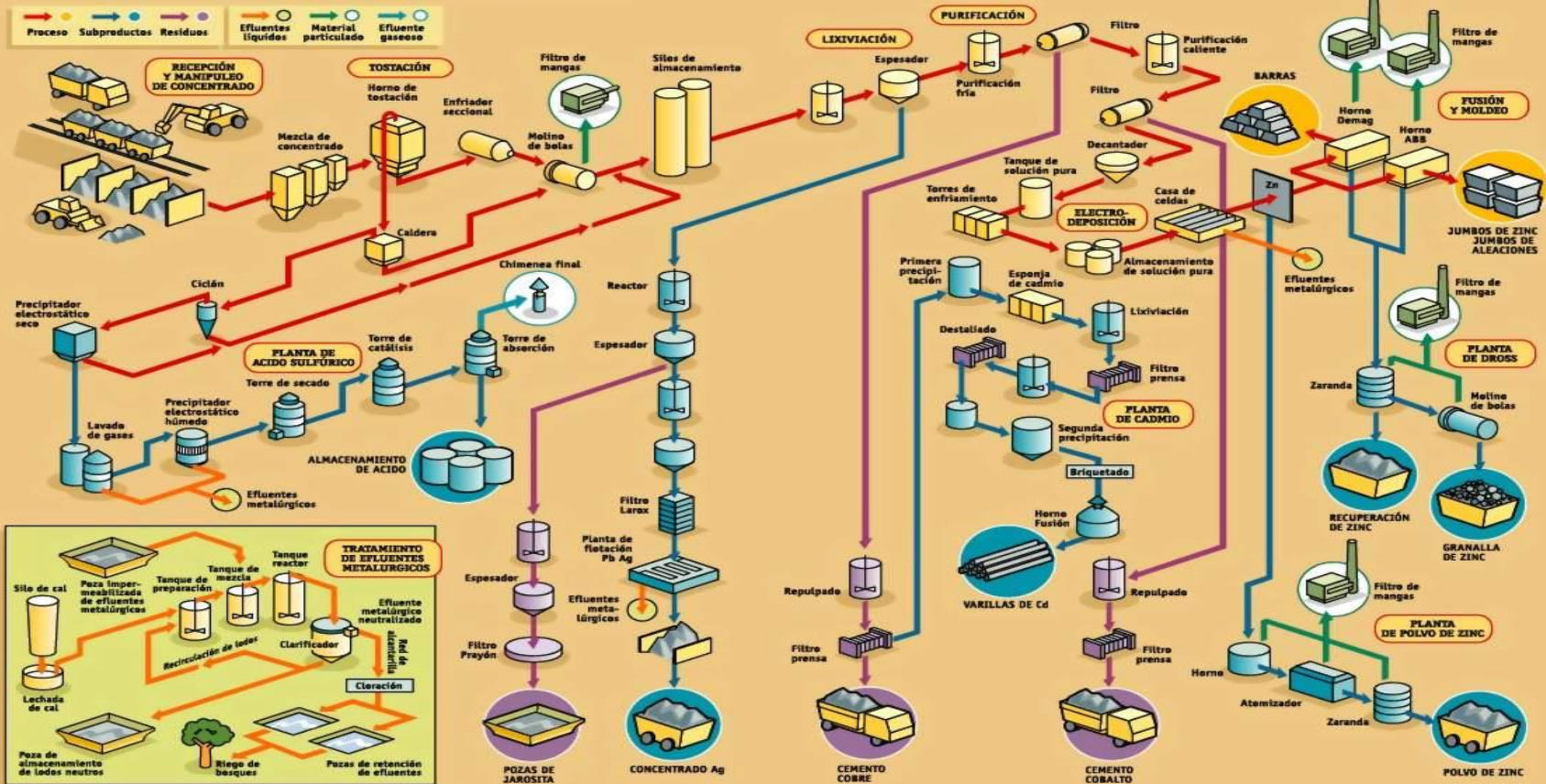


Figura 4.5: Proceso de refinación del zinc en la Refinería Cajamarquilla
Fuente: Votorantim Metais

CAPÍTULO V

VARIABLES DE IMPACTO EN LA EFICIENCIA DE CORRIENTE

5.1 ARBOL DE CAUSAS DE VARIABLES DE IMPACTO

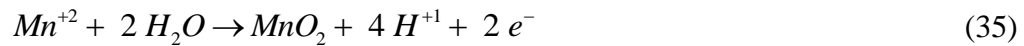
Las variables que se consideran que impactan en el resultado de eficiencia de corriente se describen a continuación:

- **Temperatura de electrolito de salida de celda (°C):** debido a la reacción ocurrida durante el proceso de electrodeposición se monitorea esta variable; siendo los valores de temperatura del electrolito de salida entre 36-40°C, este valor a la vez se ve influenciado por el mantenimiento de torres de enfriamiento, de tuberías de alimentación de electrolito. Una temperatura elevada (>40°C) baja la adherencia del zinc y provoca la estructura esponjosa del depósito y por ello la redisolución del zinc.
- **Calidad de solución pura:** se consideran como calidad al contenido de impurezas (Fe, Sb, Cu, Sb) y el contenido de zinc (g/L) que es alimentado a la casa de celdas.

Cobre y Hierro (mg/L): Se debe retirar previamente a la electrólisis. Si está presente en cierta cantidad es causa de la reducción de eficiencia de corriente ya que se oxida en el ánodo y se reduce en el cátodo. El Cu y Fe son impurezas con un potencial electroquímico más bajo que el potencial electroquímico del zinc, se depositan en el cátodo antes que el zinc.

Antimonio(mg/L): Es muy nocivo por lo que no se tolera en una concentración por encima de 0,0002 g/L. Disminuye la sobretensión de hidrógeno incrementando su producción que resulta en la adherencia insuficiente del zinc en el cátodo. Disminuye el rendimiento de corriente e impurifica el cátodo.

- **Ciclo de limpieza de celdas (día/celda):** se considera como limpieza a la actividad de succión de celdas que consiste en la remoción, del fondo de las celdas, del bióxido de manganeso generado en el proceso; y la actividad de planchado de ánodos donde también se remueve el bióxido de manganeso adherido a los ánodos, el cual es un subproducto (MnO_2) que será comercializado. Se considera un ciclo < 20 días/celda. La reacción de dicho subproducto se muestra a continuación:



- **Número de cortocircuitos (#/día):** se considera a los cortocircuitos detectados por los operadores después de ser cosechadas las láminas en un ciclo de 48 horas. El cortocircuito se reconoce por el crecimiento excesivo de una parte de la lámina que provoca que exista contacto entre cátodo y ánodo. Esta variable es nuestro tema de estudio.

5.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VARIABLES

Para la realización del análisis comparativo se usaron datos registrados en el periodo marzo-mayo de las siguientes variables: contenido de zinc en solución pura, contenido de impurezas (Fe, Sb, Cu) en solución pura, temperatura de electrolito, ciclo de succión y planchado, peso del depósito y número de cortocircuitos.

La Tabla 5.1 nos indica los valores permitidos para las variables que impactan en la eficiencia de corriente, esta información fue obtenida del manual de procesos de la Planta en evaluación.

Tabla 5.1 Rangos permitidos de variables que afectan la eficiencia de corriente

Variable	Rangos permitidos
Temperatura de electrolito	36°C- 41°C
Zn en solución pura	145 a 155 g/L
Fe en solución pura	< = 5.0 mg/L
Sb en solución pura	< = 0.03 mg/L
Cu en solución pura	< = 0.2 mg/L
Ciclo de planchado	< 20 días
Ciclo de succión	< 20 días
Nº de cortocircuitos	< 20/día
Peso del depósito	80 kg/cátodo
Eficiencia de corriente	91.85%
Consumo de corriente	3192 kW/TM

Fuente: Votorantim Metais

A continuación, se presenta tendencias del comportamiento de las variables con la finalidad de priorizar las causas de la baja eficiencia de corriente. Las gráficas presentan segmentación de la tendencia mes a mes y valores estadísticos como media y desviación estándar. También se muestra la tendencia del consumo de corriente de la Planta.

La Figura 5.1, muestra que el contenido de Zn en la solución pura en el periodo marzo - mayo tuvo una media de 146 g/L, siendo el rango permitido de 145-155g/L. La desviación estándar fue 3.24 g/L en el mes de mayo, mientras que en marzo, 5.05 g/L lo que nos muestra menor dispersión en el mes de mayo.

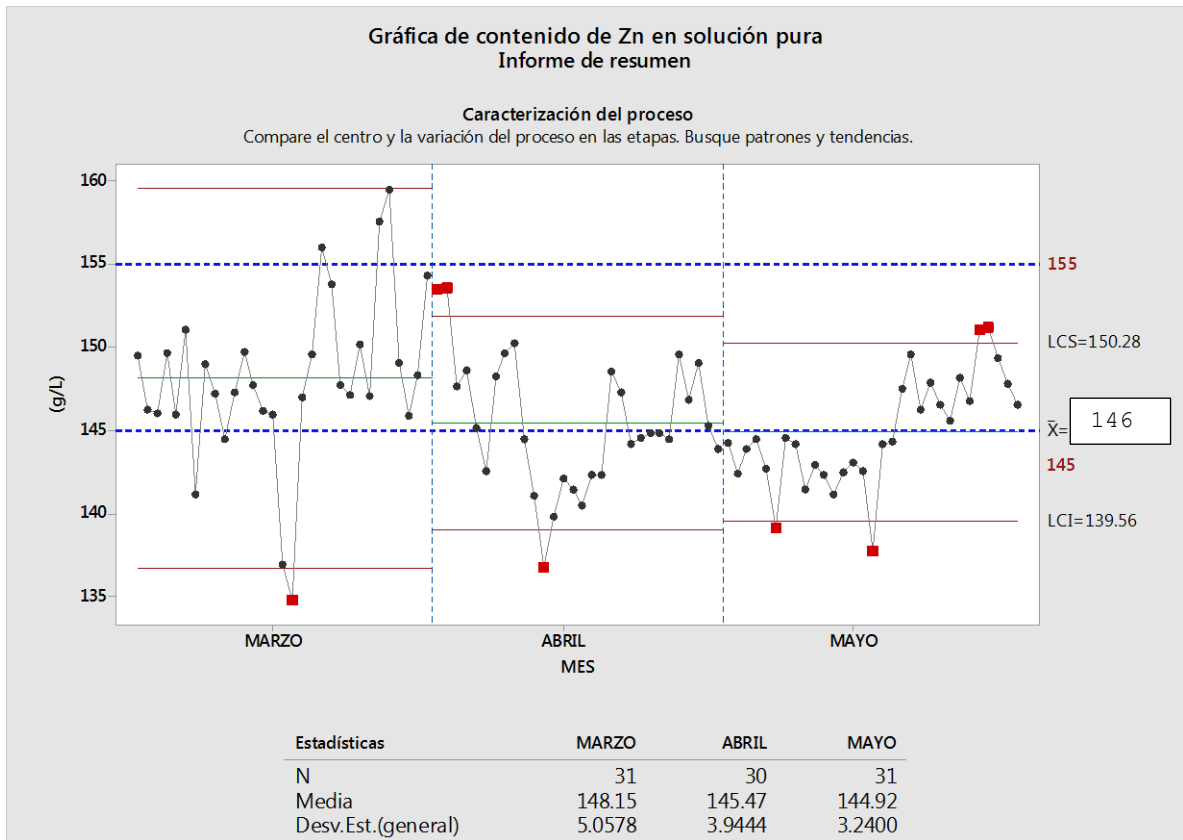


Figura 5.1 Tendencia de Contenido de Zinc en solución pura

Fuente: Propia

En la Figura 5.2, el contenido de Fe en la solución pura en el periodo de marzo- mayo tuvo una media de 2.31 mg/L; durante los tres meses mencionados se tuvo valores dentro del límite permitido.

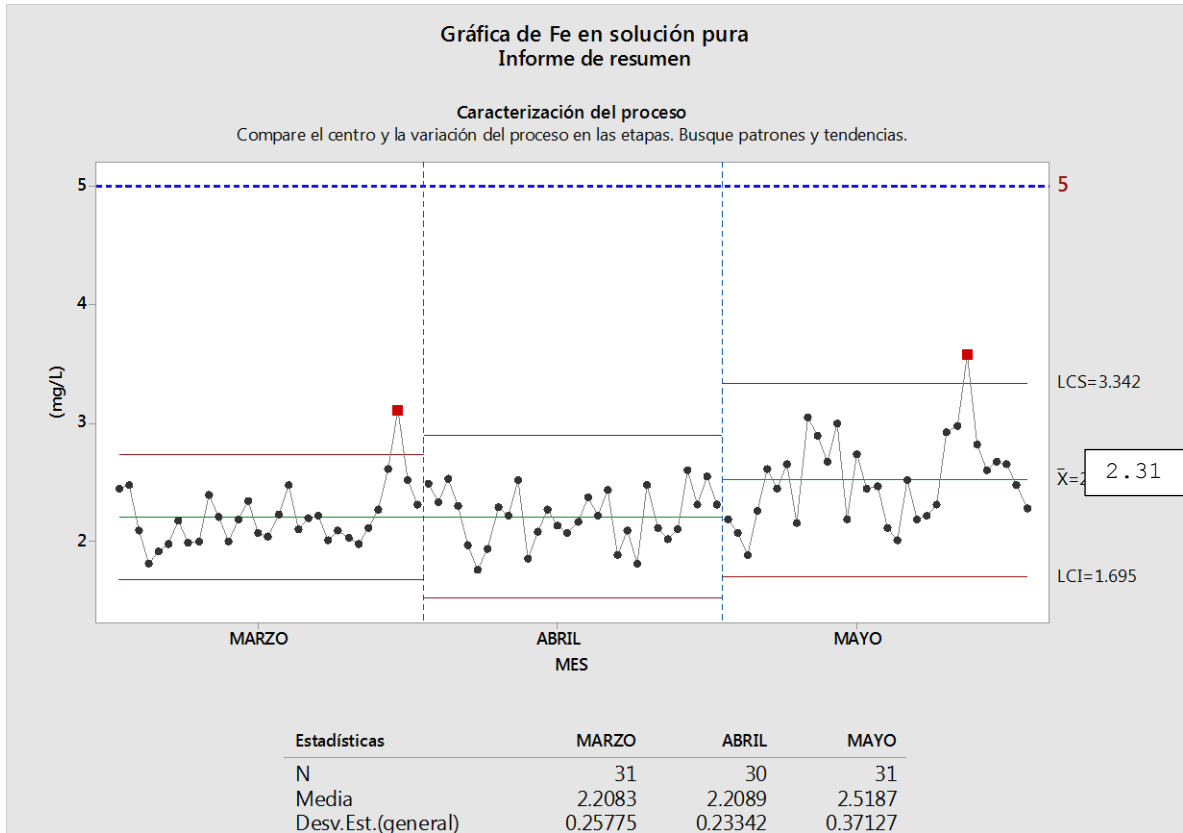


Figura 5.2 Tendencia de Contenido de Fe en solución pura
Fuente: Propia

El contenido de Sb en la solución pura en el periodo de marzo- mayo tuvo una media de 0.010 mg/L, los valores durante los tres meses se encontraron dentro del límite permisible que es 0.03 mg/L.

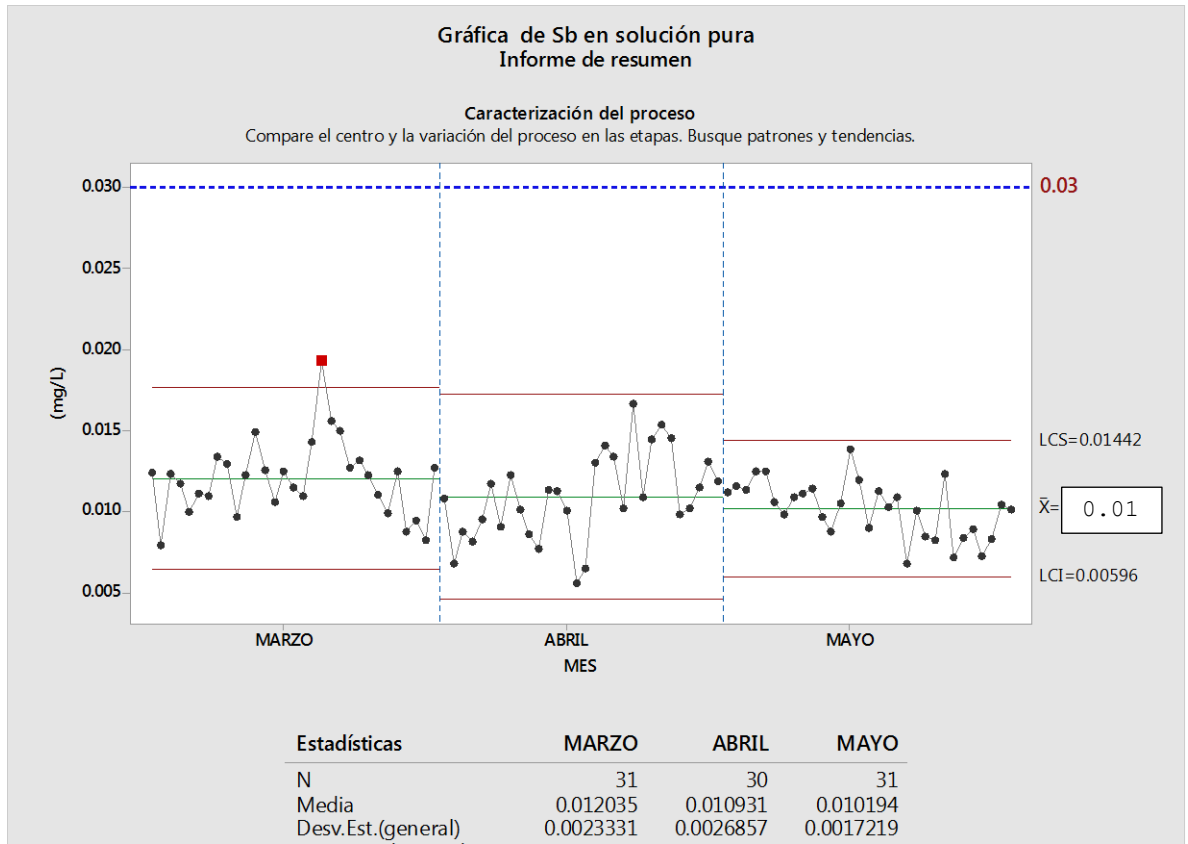


Figura 5.3 Tendencia de Contenido de Sb en solución pura
Fuente: Propia

El contenido de Cu en la solución pura en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 0.12 mg/L, los valores durante los tres meses se encontraron dentro del límite permisible que es 0.2 mg/L.

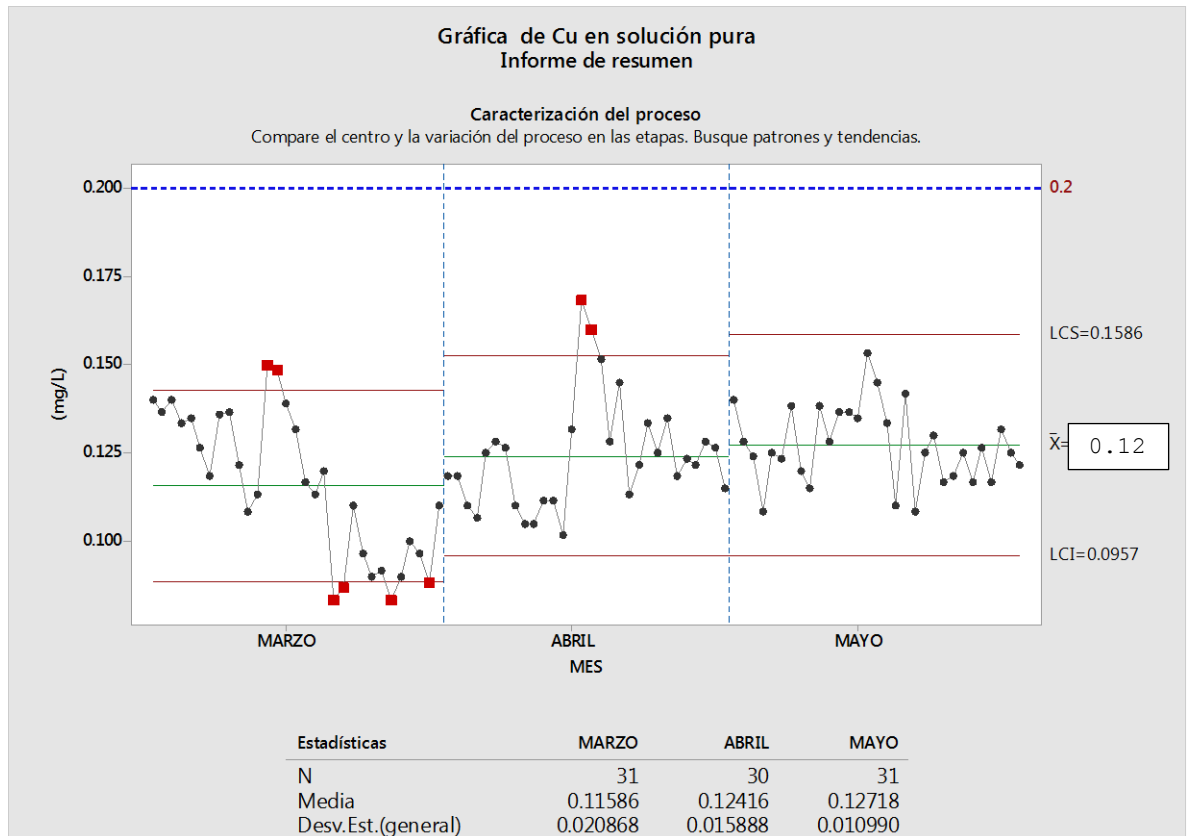


Figura 5.4 Tendencia de Contenido de Cu en solución pura
Fuente: Propia

La temperatura del electrolito en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 37.9°C, los valores en estos meses estuvo dentro del rango permisible de 36°C-41°C.

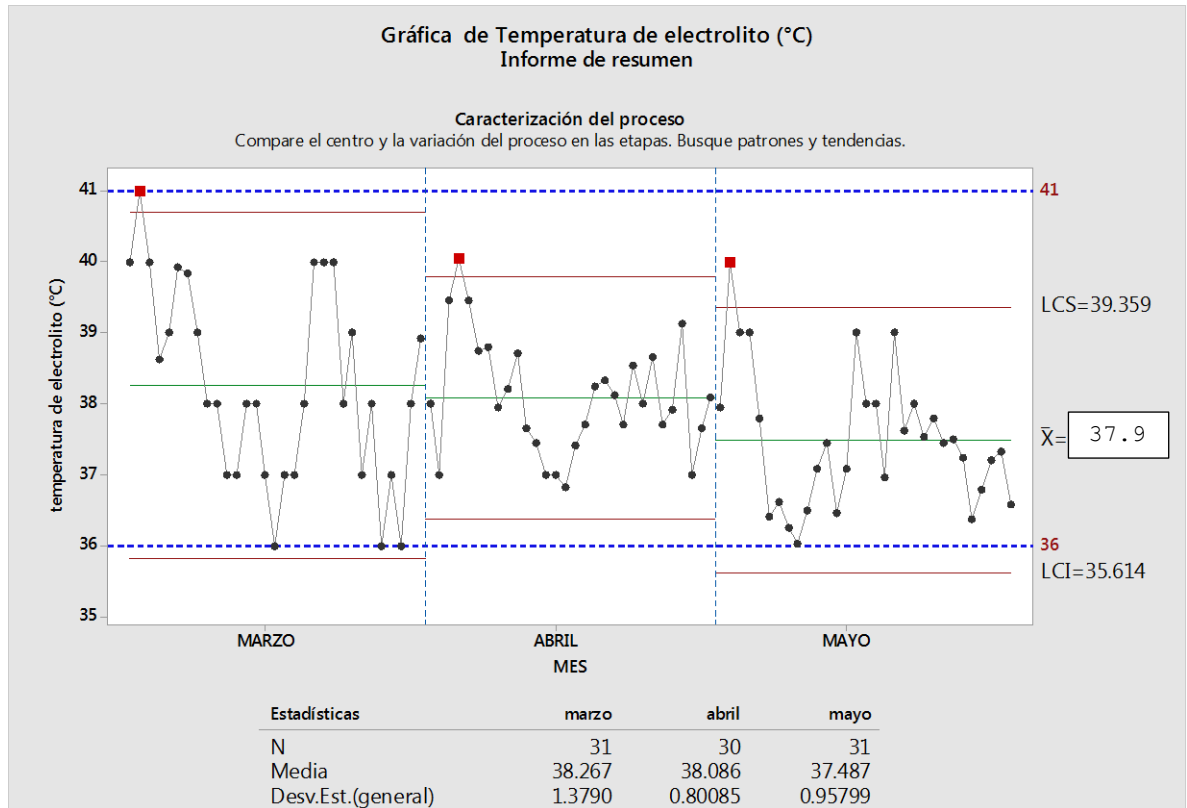


Figura 5.5 Tendencia de Temperatura del electrolito de salida en celda
Fuente: Propia

El ciclo de planchado en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 8.54 días, se tuvo valores 5 valores por encima del límite (10 días); el límite de control superior (LCS), de los datos fue de 9.3 días y el límite de control inferior (LCI), de 7.9 días.

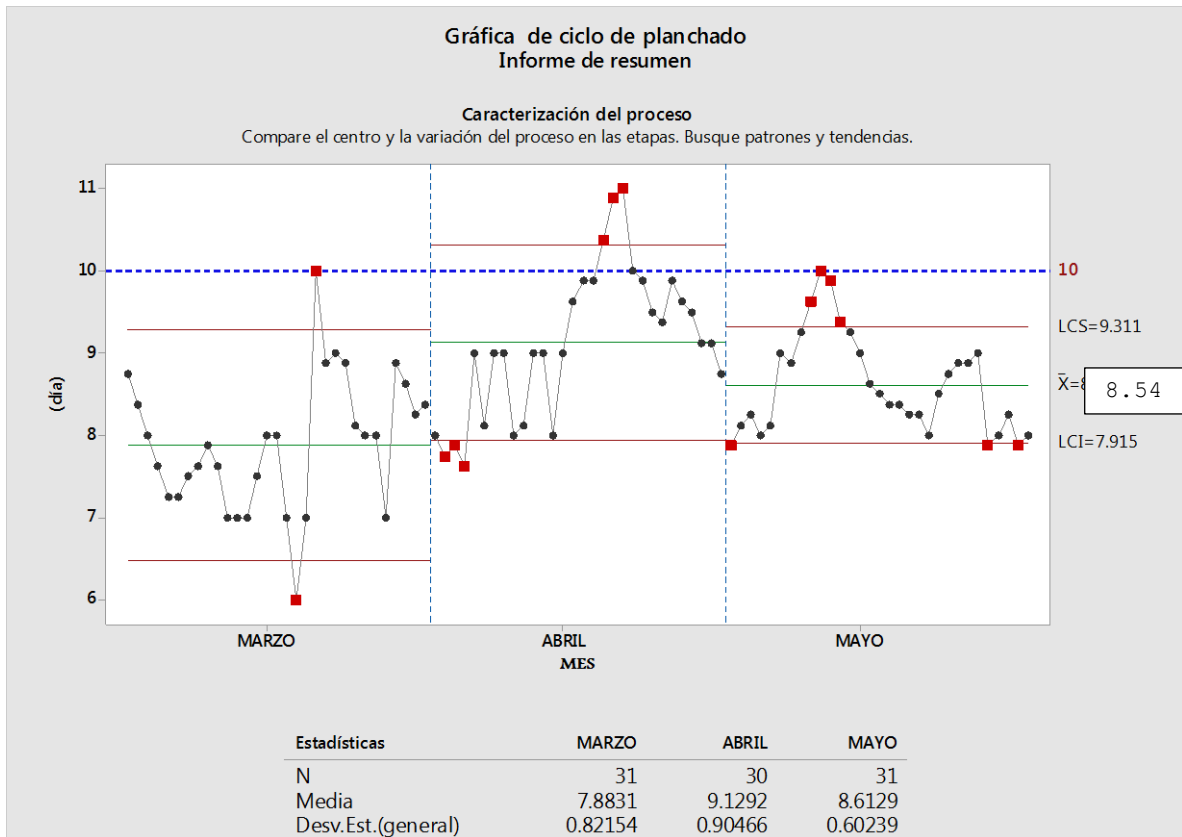


Figura 5.6 Tendencia de Ciclo de planchado
Fuente: Propia

El ciclo de succión de celdas en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 7.59 días; el mes de marzo se muestra como el periodo de mayor inestabilidad, ya que existió 3 valores fuera del límite permitido (10 días); respecto al mes de abril y mayo.

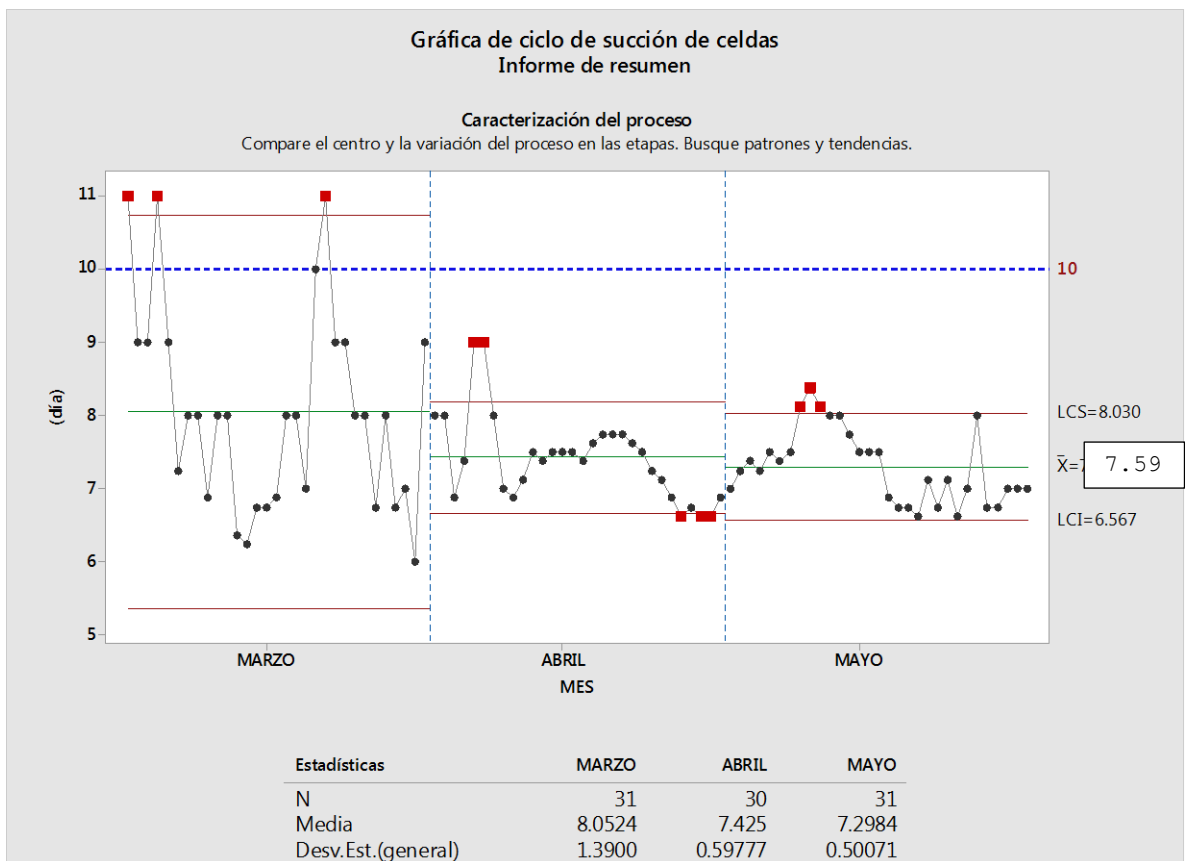


Figura 5.7 Tendencia de Ciclo de succión
Fuente: Propia

El peso del depósito en el periodo de marzo- mayo tuvo una media de 77.4 kg, siendo el límite permitido de 80 kg.

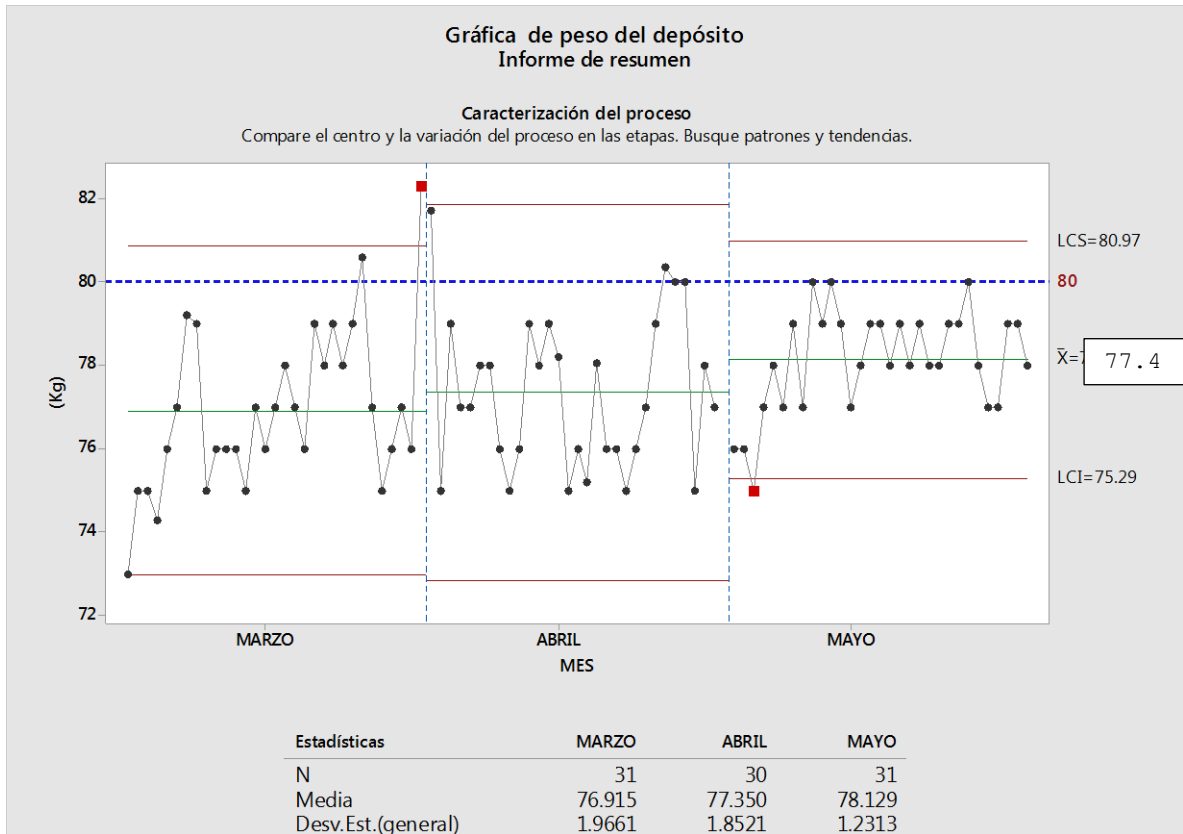


Figura 5.8 Tendencia de Peso del depósito de zinc
Fuente: Propia

De acuerdo a la Figura 5.9, el n° de cortocircuito en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 27.2 cortocircuitos/día, siendo 20 el valor máximo permitido. A la vez se observa mucha variabilidad.

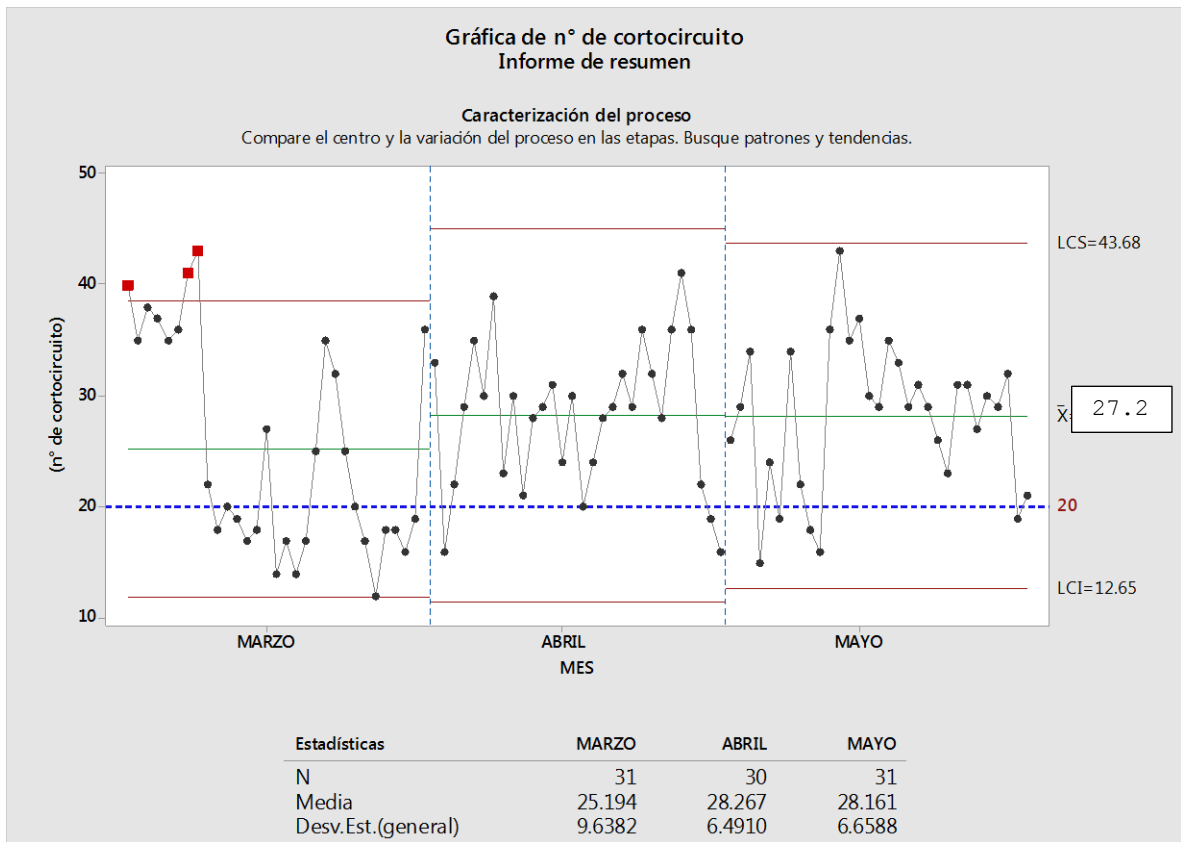


Figura 5.9 Tendencia de Cortocircuitos
Fuente: Propia

La eficiencia de corriente en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 88.28%, siendo 91.85% a más, el valor esperado. Según la figura 5.10, se evidenció tendencia al descenso de la eficiencia de corriente, donde marzo alcanzó una media de eficiencia de 89%, abril 88.1% y mayo de 87.5%.

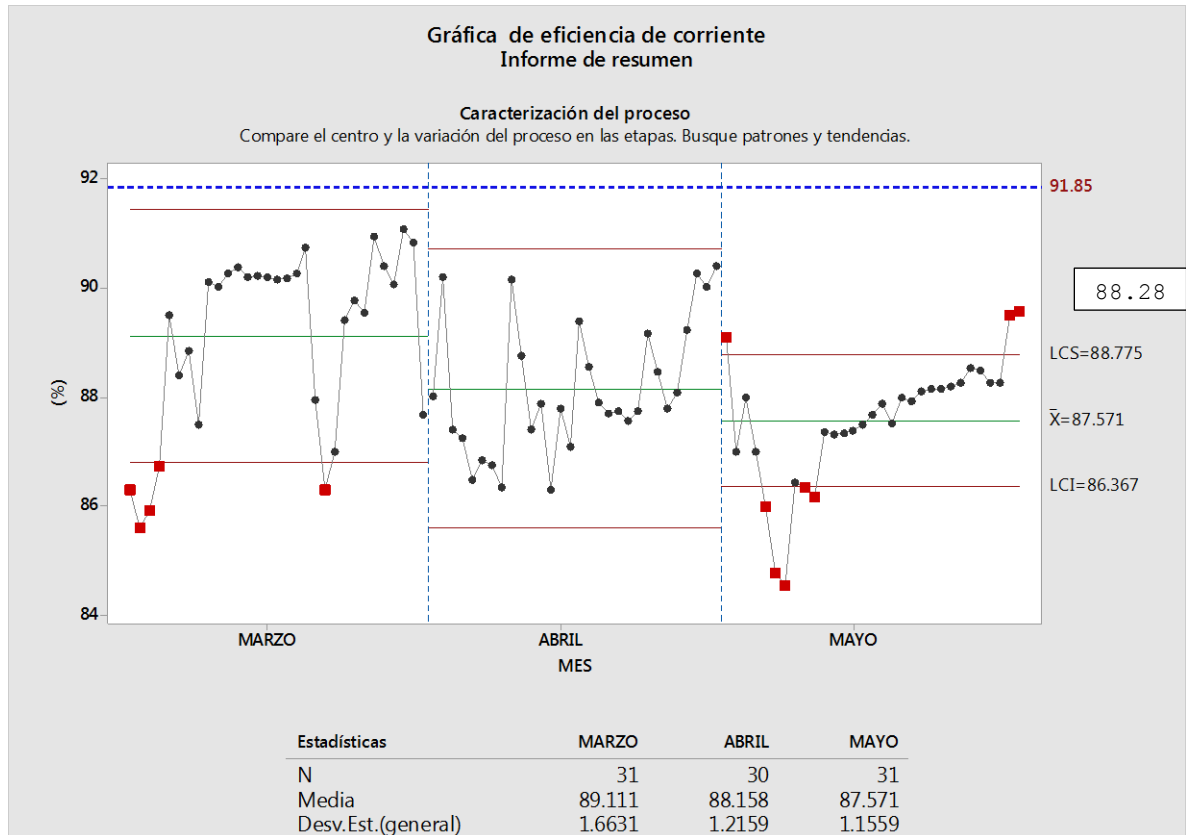


Figura 5.10 Tendencia de Eficiencia de corriente
Fuente: Propia

El consumo de corriente en el periodo de marzo - mayo tuvo una media de 3335 kW/TM, siendo menor a 3192 kW/TM el valor esperado. Según la figura 5.11, se evidenció tendencia ascendente del consumo de corriente, donde marzo alcanzó una media de eficiencia de 3307 kW/TM, abril 3342 kW/TM y mayo de 3356 kW/TM.

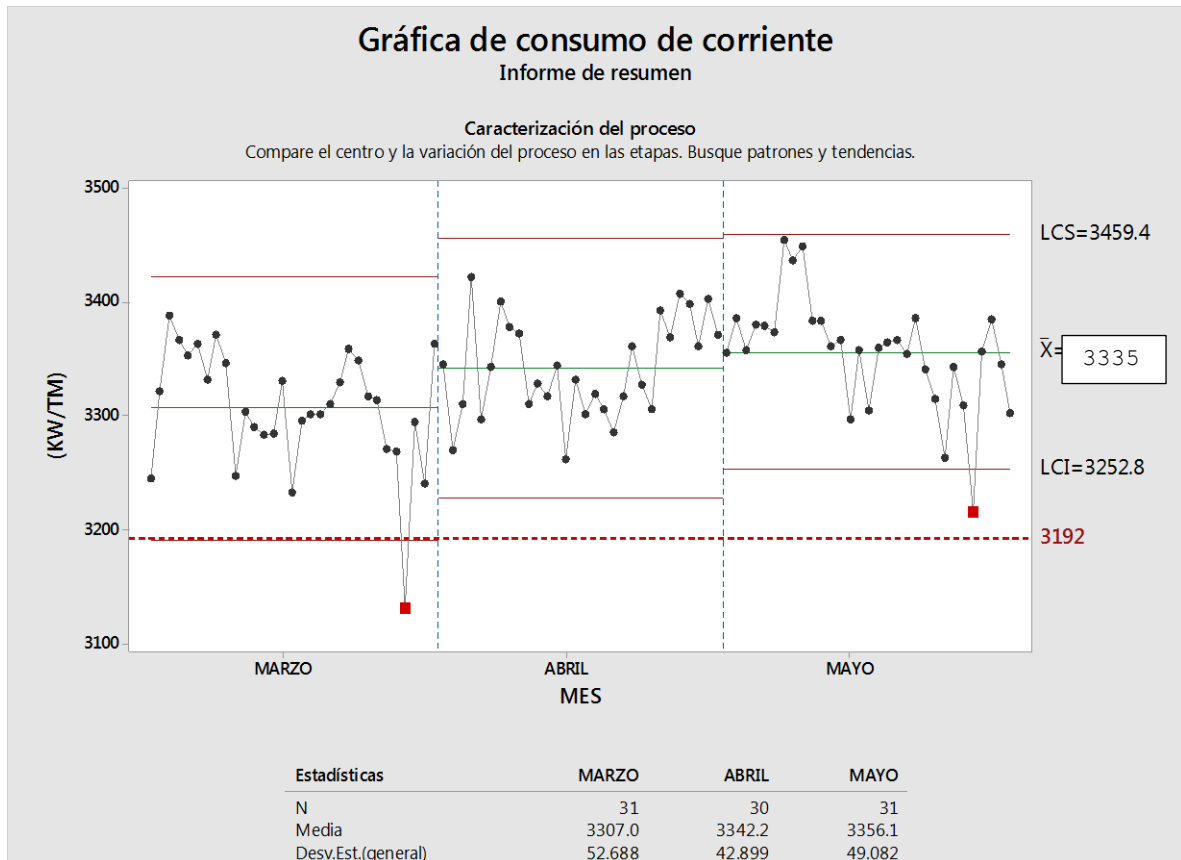


Figura 5.11 Tendencia de Consumo de corriente
Fuente: Propia

A continuación se presenta una tabla resumen de las variables y sus respectivos valores permitidos y la media obtenida durante el periodo marzo-mayo.

Tabla 5.2 Resumen Rangos y media de variables de impacto en eficiencia de corriente mes marzo-mayo

Variable	Rango	Media		
		Marzo	Abril	Mayo
Temperatura de electrolito	36°C- 41°C	38	38	37
Zn en solución pura	145 a 155 g/L	148.15	145.47	144.92
Fe en solución pura	< = 5.0 mg/L	2.2	2.2	2.5
Sb en solución pura	< = 0.03 mg/L	0.012	0.011	0.01
Cu en solución pura	< = 0.2 mg/L	0.12	0.12	0.13
Ciclo de planchado	< 10 días	7.8	9.1	8.6
Ciclo de succión	< 10 días	8.1	7.4	7.3
N° de cortocircuitos	< 20	25	28	28
Peso del depósito	80 Kg/cátodo	76.9	77.3	78.1
Eficiencia de corriente	> 91.85 %	89	88	87
Consumo de corriente	< 3192 kW/TM	3307	3342	3356

Fuente: Propia

5.3 APLICACIÓN DE MINITAB

Para el tratamiento de los datos mostrados en el Anexo 2, se empleó como herramienta estadística el minitab, usando la función análisis multivariable, esta es una técnica estadística que se usa para estudiar la relación entre variables para lo cual se expresará matemáticamente mediante una ecuación. Cuando se cree que algunas de las variables pueden causar (o al menos explicar) los cambios observados en otra, a éstas se les llama variables explicativas (X's), la que mide el resultado del estudio se le llama variable respuesta (Y). Se intentará establecer una ecuación de la forma $Y=f(x)$.

5.4 EVALUACIÓN DE VARIABLES

Se considera para esta evaluación, como variables independientes al número de cortocircuitos, ciclo de succión y planchado, calidad de solución pura (Zn, Cu, Fe, Sb), peso del depósito, temperatura del electrolito; y como variables dependiente a eficiencia de corriente

La tendencia de las variables de impacto en la eficiencia de corriente, en el periodo de evaluación marzo-mayo, mostradas en las figuras del ítem 5.2, evidencian a la cantidad de cortocircuitos como la variable que se encontró con muchos puntos fuera del límite permitido.

Para priorizar las variables que estuvieron impactando en el valor de eficiencia de corriente se realizó una regresión multivariable en minitab con los datos de estudio (anexo 1); se correlacionó cada 5 variables, escogiéndose como resultado la regresión donde se obtuvo el mayor valor de R-cuad.

Las variables relacionadas donde se obtuvo el mayor valor de R-cuad (50.01%) fueron: cortocircuito, contenido de Zn, ciclo de planchado, ciclo de succión y peso del depósito.

Dicha información brindó la base para enfocar los esfuerzos en priorizar las correcciones de cortocircuitos a la vez conocer las causas de su origen.

En la Figura 4.12 se puede apreciar el informe de regresión múltiple en Minitab, de las variables (cortocircuito, peso del depósito, Zn en solución pura, ciclo de planchado, ciclo de succión) con la eficiencia de corriente, los datos pueden explicar un 50.01% de la variación en la eficiencia de corriente. Se muestra también las gráficas de cada variable correlacionadas con la eficiencia de corriente.

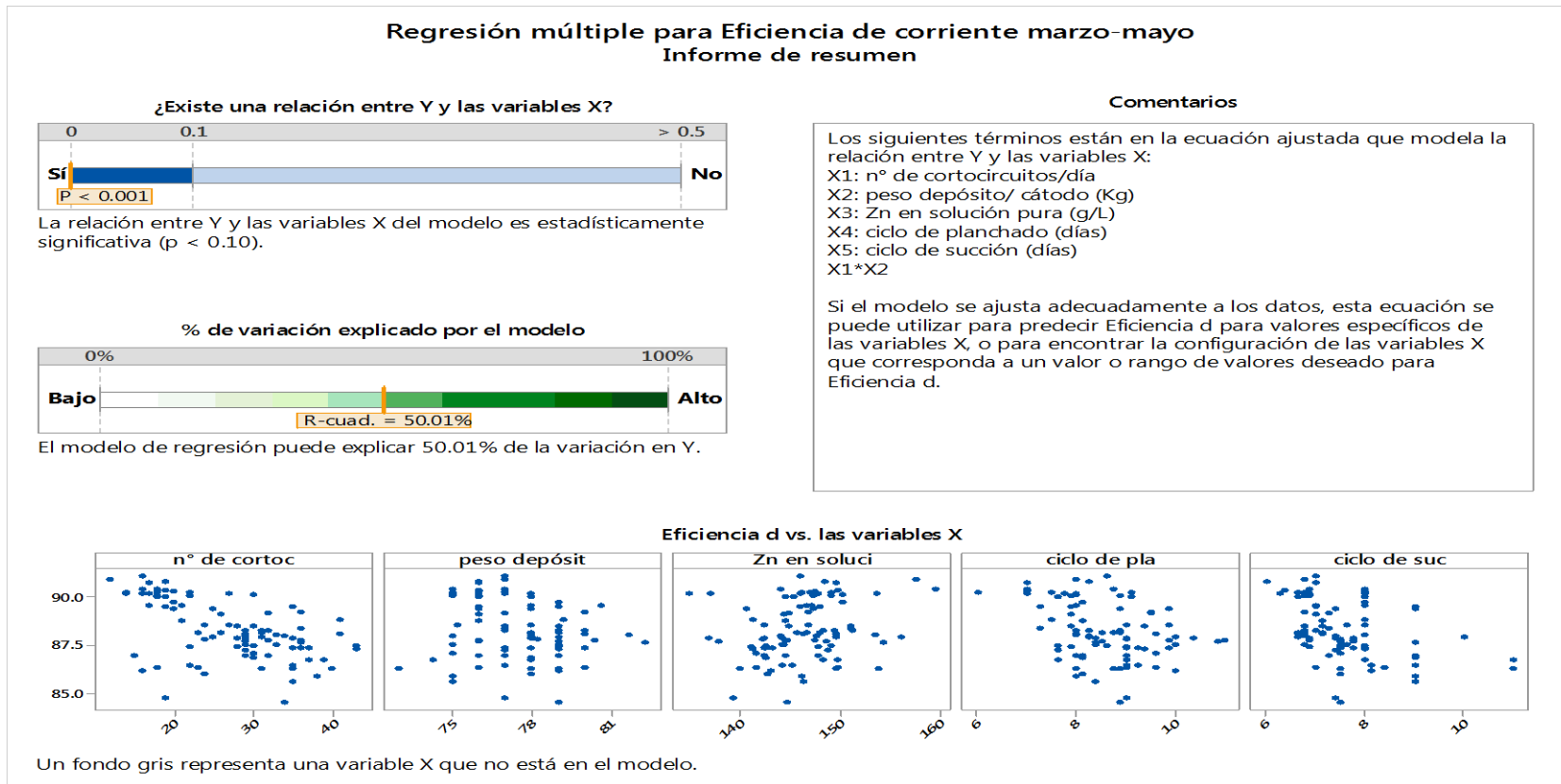


Figura 4.12 R-cuad para eficiencia de corriente diaria
Fuente: Propia

En la Figura 4.13 se puede apreciar la gráfica de efectos principales de las variables con la eficiencia de corriente. Para el número de cortocircuito indica que a mayor cortocircuito menor eficiencia de corriente, de igual forma para el peso del depósito ciclo de planchado y ciclo de succión. Para el contenido de Zn en la solución pura indica que a mayor Zn, mayor eficiencia de corriente. La figura 4.14 nos muestra el resultado de predicción de variables para una eficiencia de corriente de 91.85%, la interpretación de los resultados se rigen por el modelo matemático presentado en la figura 4.15.

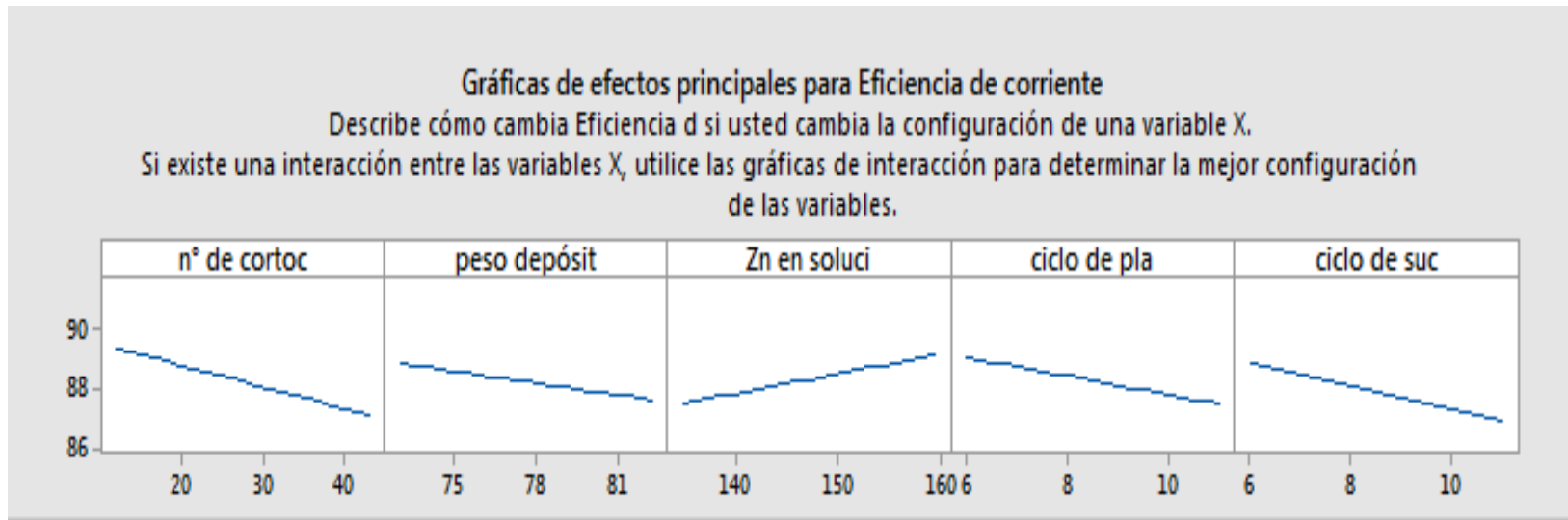


Figura 4.13 Regresión múltiple para eficiencia de corriente diaria
Fuente: Propia

Regresión múltiple para Eficiencia de corriente Informe de predicción y optimización

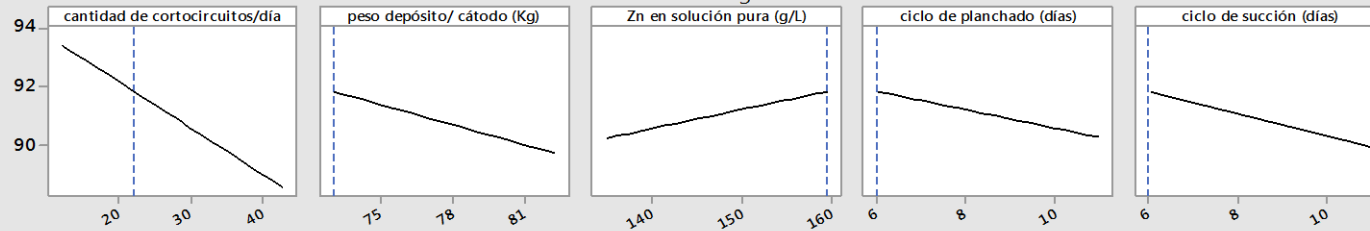
Meta: fijar objetivo de Eficiencia d en 91.85

Solución: configuración óptima

Y pronosticada	91.85	X1: cantidad de	22.0668	X4: ciclo de pla	6
IP de 95%	(89.400, 94.300)	X2: peso depósit	73	X5: ciclo de suc	6
		X3: Zn en soluci	159.5		

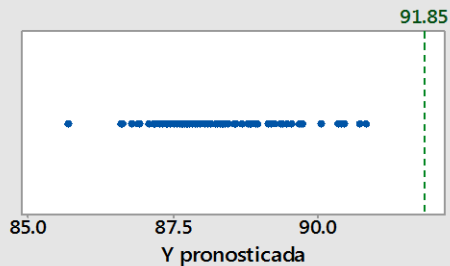
Configuración y sensibilidad para la solución óptima

Las líneas azules muestran la configuración óptima. Las líneas negras muestran el valor pronosticado de Y con diferentes configuraciones.



Y pronosticada para todos los puntos de la muestra

Utilice el destacado para ver los valores de X para cualquier valor pronosticado de Y.



Las cinco principales soluciones alternativas

Puntos de la muestra con los valores pronosticados de Y más cercanos a la solución óptima. Evalúe estos puntos y la solución óptima para determinar si alguno es adecuado.

	X1	X2	X3	X4	X5	Y pronosticada
17	75	147.75	7	6.25	90.8374	
18	75	159.5	7	8	90.8174	
12	77	157.583	8	6.75	90.7324	
16	75	153.583	7.75	8	90.4396	
19	76	149.75	7	6.375	90.4001	

Figura 4.14 Regresión múltiple de predicción de eficiencia de corriente
Fuente: Propia

Según la Figura 4.15, se observa la construcción del modelo matemático donde la cantidad de cortocircuito es la variable que más aporta al modelo, seguido de ciclo de succión, ciclo de planchado, Zn en solución pura y peso del depósito de acuerdo a el efecto incremental de las variables.

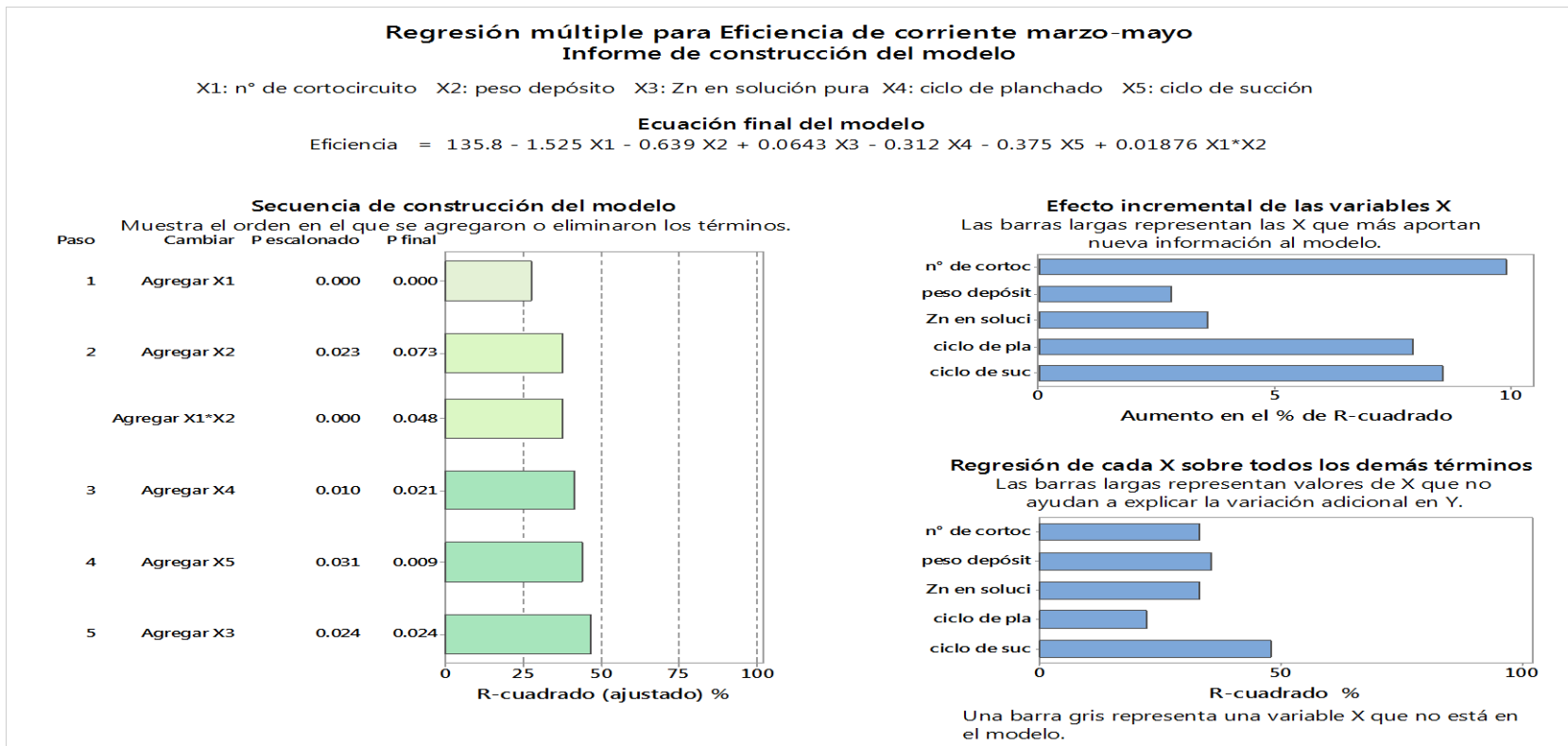


Figura 4.15 Regresión múltiple para eficiencia – informe de construcción del modelo

Fuente: Propia

CAPÍTULO VI

ESTUDIO TÉCNICO DE OCURRENCIA DE CORTOCIRCUITO EN ELECTRODEPOSICIÓN DE ZINC

6.1 IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO

Para la identificación de las posibles causas de aparición de cortocircuito en la Planta de Electrólisis en mención, se realizó seguimiento en campo de las cosechas de lámina de zinc, de donde se clasificó de la siguiente manera:

6.1.1 Causas de cortocircuito por cátodo

Se identificaron 4 causas de cortocircuito debido a las condiciones del cátodo, los cuales se detallan a continuación:

Depósito excesivo en lámina de zinc: El cortocircuito se evidencia por granulación excesiva en el borde del cátodo debido a falta de filete; o también crecimiento excesivo en un pedazo del cuerpo del cátodo debido a un incorrecto deslaminado.



Figura 6.1: Cortocircuito por depósito excesivo en lámina de zinc
Fuente: Propia

Desgaste de contacto de cátodo: El medio ácido de la celda provoca desgaste del contacto del cátodo; una inadecuada limpieza de los contactos, con agua a presión, contribuye al deterioro. El cortocircuito se evidencia por la aparición de un depósito irregular de espesor delgado el cual tiende a desprenderse fácilmente y por ende hacer contacto con el ánodo.



Figura 6.2: Cortocircuito por desgaste de contacto de cátodo
Fuente: Propia

Desalineamiento de cátodo: El cortocircuito se evidencia por crecimiento excesivo de lámina en un lado del cátodo debido a falta de alineación entre la barra y el contacto del cátodo.

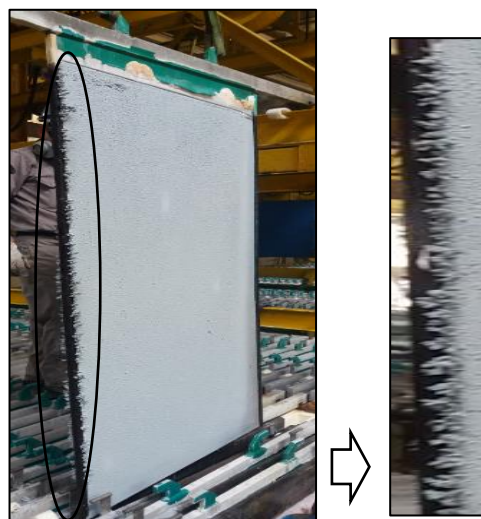


Figura 6.3: Cortocircuito por desalineamiento de cátodo
Fuente: Propia

Cátodo doblado: El cortocircuito se evidencia por la adherencia directa entre cátodo y ánodo, el cual dificulta el retiro del cátodo al ser cosechado.

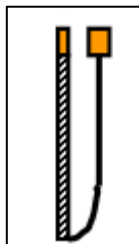


Figura 6.4: Cortocircuito por cátodo doblado
Fuente: Propia

6.1.2 Causas de cortocircuito por ánodo

Se identificaron 4 causas de cortocircuito debido a las condiciones del ánodo.

Ánodo doblado: El ánodo doblado puede ocasionarse por un mal planchado o corrosión del mismo. El cortocircuito se evidencia por la adherencia directa entre cátodo y ánodo, el cual dificulta el retiro del cátodo al ser cosechado.

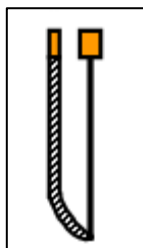


Figura 6.5: Cortocircuito por ánodo doblado
Fuente: Propia

Falta de separador de cuerpo de ánodo: Son 5 separadores que son colocados en el cuerpo del ánodo el cual ayuda a mantener la distancia entre ánodo y cátodo que debe existir al interior de la celda. El cortocircuito se evidencia como granulación en el cátodo a la altura donde se colocan los separadores en el ánodo.

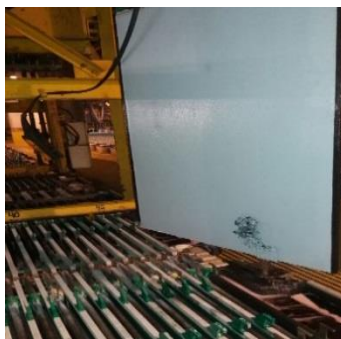


Figura 6.6: Cortocircuito por falta de separador de ánodo
Fuente: Propia

Crecimiento de bióxido en el ánodo: El crecimiento del bióxido de manganeso en el ánodo es propio de la reacción de la electrólisis. El cortocircuito se evidencia cuando el depósito de zinc tiene manchas de bióxido. Se observó que los ánodos nuevos tienden a formar costras de bióxido que provocan cortocircuitos.



Figura 6.7: Cortocircuito por crecimiento de bióxido en el ánodo
Fuente: Propia



Figura 6.8: Costras de bióxido en el ánodo

Fuente: Propia

Desalineamiento de ánodo: El cortocircuito se evidencia por crecimiento excesivo de lámina en un lado del cátodo debido a falta de alineación entre la barra y el contacto del ánodo. (Figura 6.3)

Cabe mencionar que también se identificó la presencia de cortocircuito por desalineamiento de bandeja de barra y electrodos, siendo éste también un motivo de causa de cortocircuito. La eliminación de dicha causa implicó modificar el diseño de las bandejas o alineamiento de las mismas (para alinear es necesario corte de corriente lo cual es pérdida de producción).

Cortocircuito por desalineamiento de bandeja

El cortocircuito se evidencia por crecimiento excesivo de lámina en un lado de los cátodos debido a desalineamiento vertical u horizontal de bandeja de soporte barra y electrodos. Esto ocasiona que la barra donde sientan los contactos de los electrodos se recaliente constantemente antes de cumplir con el ciclo de cosecha de los cátodos (48horas). El recalentamiento puede ocasionar explosiones.

En el desalineamiento, la bandeja se encuentra ladeada hacia la derecha o izquierda de los extremos de la celda.

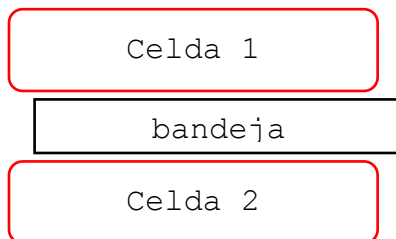


Figura 6.9: Representación desalineamiento de bandeja
Fuente: Propia



Figura 6.10: Cortocircuito por desalineamiento de bandeja
Fuente: Propia



Figura 6.11: Electrodo desalineados
Fuente: Propia



Figura 6.12: ubicación de bandeja entre celdas
Fuente: Propia

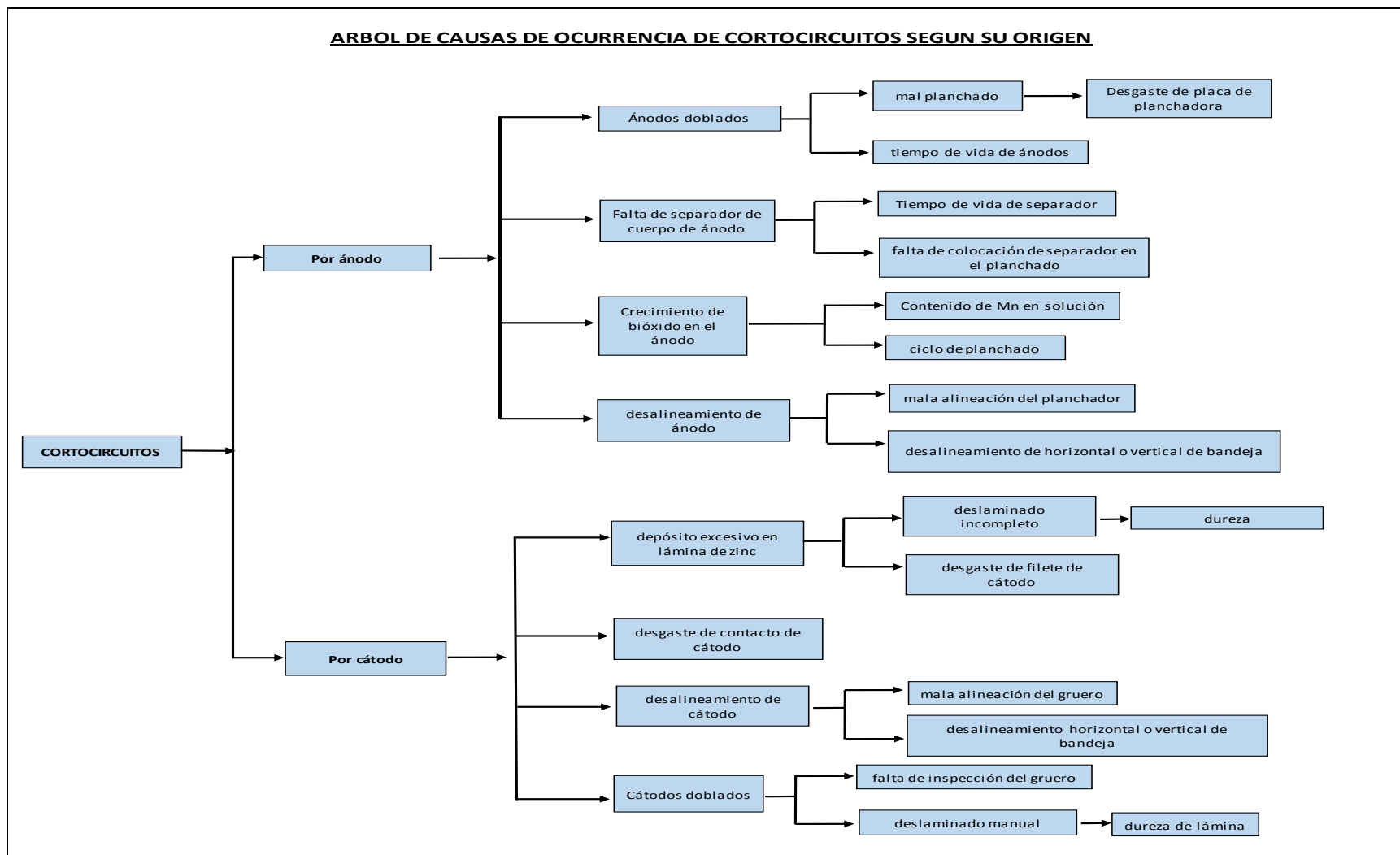


Figura 6.13: Árbol de causas de ocurrencia de cortocircuito

Fuente: Propia

6.2 PROCEDIMIENTO PARA CORRECCIÓN DE CORTOCIRCUITO

Luego de la identificación de los cortocircuitos, se procede a la corrección para lo cual es necesario el uso de las siguientes herramientas:

Maquinarias

- Grúa (grúa con scanner)
- Polipasto auxiliar de la grúa con la cual se trabaja.

Herramientas y materiales

- Cuchilla de acero inoxidable con mango protegido por jebe.
- Eslinga de 2 t
- Comba de madera chica para separadores tipo grapa.
- Comba de madera grande para cabezal de ánodos y cátodos.
- Bandeja de fibra de vidrio para recojo de lodo de plomo.
- Manguera con reducción para lavado de contactos.
- Separadores de cuerpo de ánodos (tipo grapa y cabezal).
- Hacha chica con mango de madera para cortar parte delgada.
- Balde para separadores deteriorados
- Pistola termográfica (pirómetro)
- Cepillo de acero metálico.
- Palos de madera para alinear ánodo y cátodo

Equipos de Protección personal

- Casco de seguridad.
- Lentes de protección lateral.
- Guantes de PVC.
- Respirador contra gases de neblina ácida (O₂, H₂).
- Protector auditivo tipo esponja.
- Zapatos de seguridad.

- Barbiquejo

Procedimiento

- Luego de la identificación de cortocircuitos mediante el pirómetro o escáner, el operador se dirige hacia la fila identificada e iniciará en forma ordenada la corrección de cortocircuitos para lo cual levantará con el polipasto auxiliar de la grúa, el ánodo y cátodo que se encuentran previamente marcados para su correspondiente inspección.
- Se realizará limpieza de la zona de contacto entre barra y electrodo.
- Luego se procede con la corrección de cortocircuito de acuerdo a lo mencionado en la Tabla 6.1.



Figura 6.14: Izamiento de ánodo
Fuente: Propia

- Después de la revisión y corrección se colocará los electrodos con bastante cuidado sobre las barras equipotenciales, para asegurar un buen contacto y queden alineados tanto lateral como verticalmente, para garantizar el buen paso de corriente.
- Al concluir la revisión y corrección de cortocircuitos, se lavará con agua a presión todos los contactos de los electrodos y finalmente la grúa deberá quedar en la fila donde el operador del siguiente turno tiene que escanear.



Figura 6.15: Corrección de cortocircuito
Fuente: Propia



Figura 6.16: Operador alineando electrodos
Fuente: Propia



Figura 6.17: Alineamiento de electrodos
Fuente: Propia

Tabla 6.1 Procedimiento de corrección de cortocircuito de acuerdo a las causas

Causa	Corrección	Tiempo (minuto)
Depósito excesivo en lámina de zinc	Se corta con el hacha de mango de madera, la dendrita causante de cortocircuito, de no ser posible la corrección, se procede a reemplazar el cátodo.	Corte: 3 Reemplazo: 5
Desgaste de contacto de cátodo	Se reemplaza el cátodo.	Reemplazo: 5
Desalineamiento de cátodo	Se limpia con el hacha con mango de madera la parte causante de cortocircuito. Se alinea el cátodo.	Limpieza: 3
Cátodo doblado	Se reemplaza el cátodo.	Reemplazo: 5
Ánodo doblado	Se reemplaza el ánodo. Se limpia cortocircuito del cátodo afectado.	Reemplazo: 7-10 Limpieza: 3
Falta de separador de cuerpo de ánodo	Verificar que los separadores de cuerpo estén completos y en posición correcta, en caso contrario, arreglará y/o cambiara con ayuda de la comba de madera, por otro nuevo; el ánodo ya revisado será colocado con bastante cuidado en su posición correcta tanto en el contacto como en el soporte.	Colocación de separadores: 2 min/separador
Crecimiento de bióxido en el ánodo	Se levanta el ánodo y se procede a raspar el exceso de bióxido causante de cortocircuito. Se levanta el cátodo y se limpia el cortocircuito del cátodo afectado.	Limpieza ánodo: 3 Limpieza cátodo: 3
Desalineamiento de ánodo	Se alinea el ánodo y se limpia el cortocircuito del cátodo afectado.	Alineación: 1 Limpieza cátodo: 3
Desalineamiento horizontal o vertical de bandeja	Si la cantidad de cortocircuitos en celda supera los 4 cortocircuitos en cátodos consecutivos, se procederá a levantar la carga completa de cátodos con la grúa, se llevará a la zona de stand by y se limpiará los gránulos. Luego se regresa la carga de cátodos a celda.	Levantar, y trasladar carga: 4 Limpieza: 3 min/cátodo

Fuente: Propia

6.3 MONITOREO DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO

Durante la etapa de monitoreo se registró la cantidad de cortocircuitos obtenidos en el deslaminado de cátodos; a la vez se registró los valores de eficiencia de corriente obtenidos durante la etapa de evaluación.

La tabla 6.2 se presenta datos de temperatura de barra y cantidad de cortocircuitos detectados en las 29 celdas de las 8 filas existentes. Dicho registro se realizó en 2 días buscando caracterizar la Sala de electrodeposición al inicio del trabajo de la Tesis. Se usará los datos para relacionar la temperatura con la cantidad de cortocircuito.

Los diagramas de Pareto mostrados en las figuras 6.18; 6.19 y 6.20 corresponden a identificaciones y correcciones de cortocircuitos para el mes de junio, julio y agosto respectivamente. Cabe mencionar que las correcciones se enfocaron en disminuir presencia de cortocircuitos por causas que pueden evitarse como son las relacionadas a la observación del operador (por ejemplo: desalineamiento de ánodo o cátodo; ánodo o cuerpo con cuerpo pandeado; depósito sobre pedazo de lámina).

Tabla 6.2 Datos de cortocircuito y temperatura de barra por fila

CELDA	Temperatura Barra (°C) y cantidad de cortocircuito															
	T° FILA 1	corto fila 1	T° FILA 2	corto fila 2	T° FILA 3	corto fila 3	T° FILA 4	corto fila 4	T° FILA 5	Corto fila 5	T° FILA 6	corto fila 6	T° FILA 7	Corto fila 7	T° FILA 8	corto fila 8
1	62	0	78	0	64	0	104	0	78	0	89	0	94	0	110	1
2	131	1	72	0	170	3	170	3	68	0	102	1	106	0	104	0
3	141	1	171	5	98	0	106	1	82	0	81	0	122	2	74	0
4	127	1	117	1	90	0	93	0	101	1	106	1	103	0	86	0
5	89	0	99	0	176	3	89	0	94	1	146	4	123	4	120	2
6	92	0	68	0	167	2	117	1	77	0	101	0	90	0	94	0
7	95	0	125	2	93	0	104	0	100	1	107	1	94	0	76	0
8	122	2	123	1	85	0	124	1	140	5	96	0	106	0	69	0
9	87	0	128	2	95	0	92	0	112	1	107	1	101	0	68	0
10	92	0	132	3	98	0	105	0	86	0	86	0	158	2	96	0
11	87	0	87	0	112	1	115	1	91	0	95	2	100	0	87	0
12	107	0	110	0	153	2	120	1	92	0	95	0	105	0	130	2
13	96	0	128	2	118	1	115	0	84	0	110	1	220	6	120	1

14	99	0	140	1	94	0	116	0	93	0	115	1	170	2	80	0
15	89	0	100	2	94	0	183	2	86	0	145	1	99	0	78	0
16	142	2	106	0	97	0	160	1	95	0	140	2	87	0	81	0
17	189	4	111	0	93	0	107	0	91	0	85	0	95	0	90	0
18	92	0	270	6	84	0	113	0	111	1	120	1	151	2	130	1
19	104	0	140	2	136	1	118	1	122	1	95	0	141	1	111	1
20	97	0	130	1	99	0	86	0	142	2	88	0	87	0	81	0
21	99	0	118	1	93	0	122	1	85	0	83	0	131	1	98	0
22	101	0	112	1	186	3	115	0	99	0	88	0	128	2	115	1
23	94	0	118	1	86	0	101	0	100	2	87	0	90	0	94	0
24	91	0	134	2	98	0	120	1	124	1	99	1	80	0	95	0
25	122	2	140	2	181	3	82	0	102	1	104	2	88	0	108	1
26	189	4	101	0	95	0	85	0	103	0	100	0	87	0	118	1
27	121	2	112	1	163	2	113	2	66	0	99	0	93	0	104	0
28	85	0	113	1	194	4	264	5	90	0	111	1	87	0	116	1
29	117	1	62	0	89	0	103	0	81	0	91	0	77	0	78	0

Fuente: Propia

Se registró las causas de ocurrencia de cortocircuito para el mes de junio; la figura resenta el 60% del total en el mes de junio, seguido de n° de ánodos sin separadores con 23%.

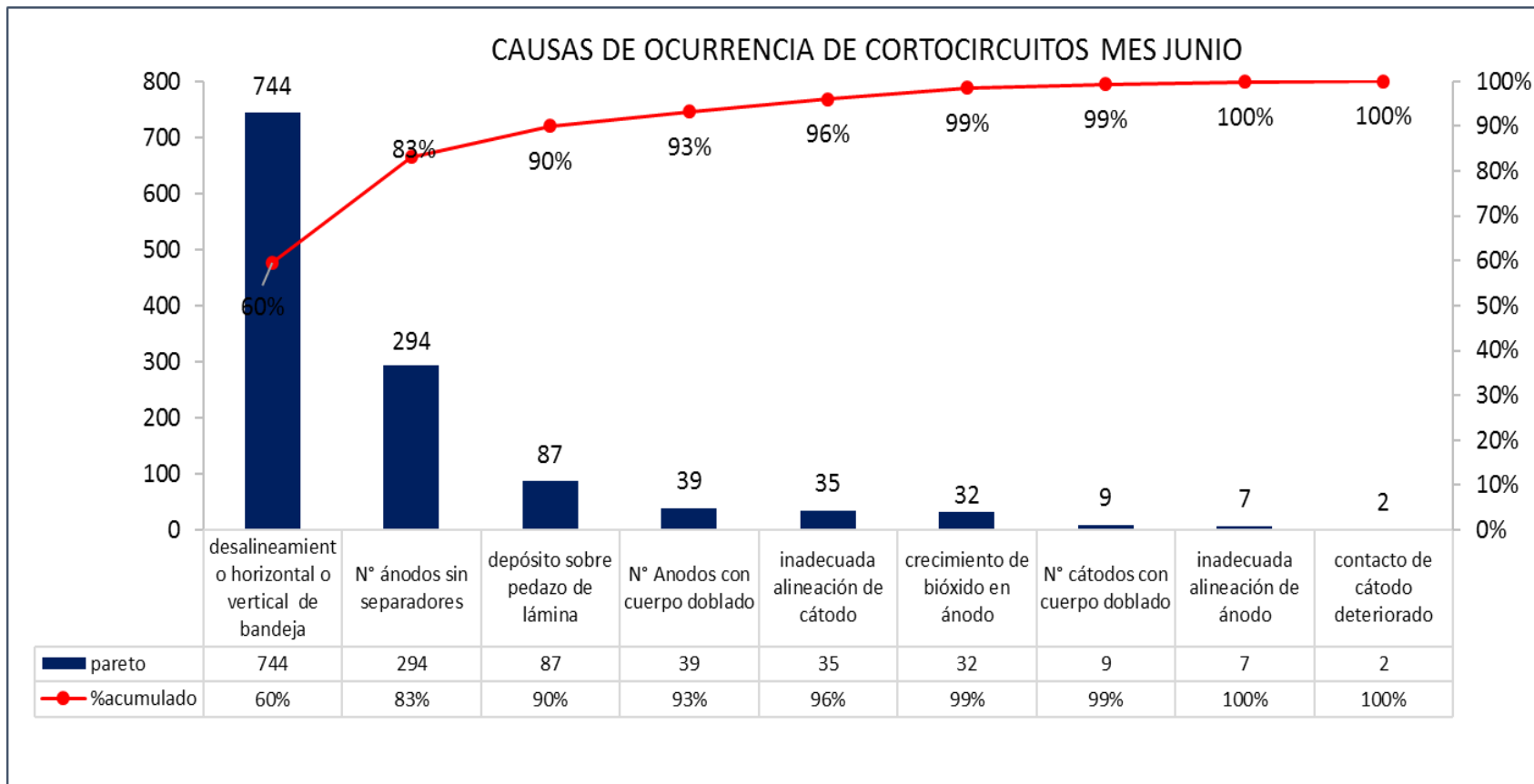


Figura 6.18: Pareto de causas de cortocircuitos –Junio

Fuente: Propia

El Pareto de causas de ocurrencia de cortocircuitos en el mes de julio, nos indica que la mayor incidencia es el desalineamiento horizontal

o vertical de bandeja teniendo 500 cortocircuitos que representa el 64% del total en el mes de julio, seguido de n° de ánodos sin separadores con 26%; muy similar al mes de junio. Sin embargo, se aprecia una disminución de los mismos y además la causa de depósito sobre pedazo de lámina tenía 87 cortocircuitos en el mes de junio, en julio se tuvo 22.

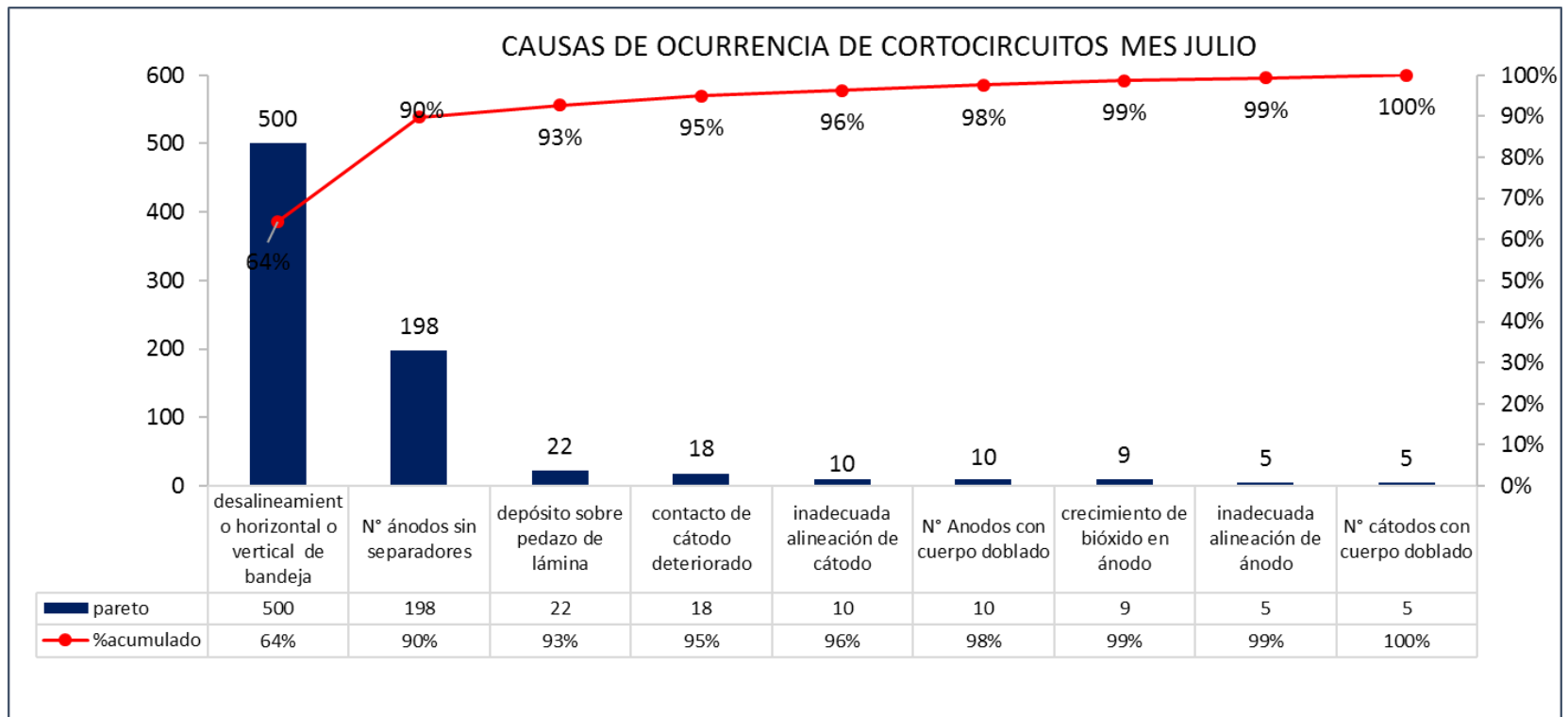


Figura 6.19: Pareto de causas de cortocircuitos –Julio

Fuente: Propia

El Pareto de causas de ocurrencia de cortocircuitos en el mes de agosto, nos indica que la mayor incidencia es el desalineamiento horizontal o vertical de bandeja teniendo 299 cortocircuitos que representa el 73% del total en el mes de agosto, seguido de n° de ánodos sin separadores con 13%; todas las causas de ocurrencia de cortocircuito han disminuido respecto al mes de junio.

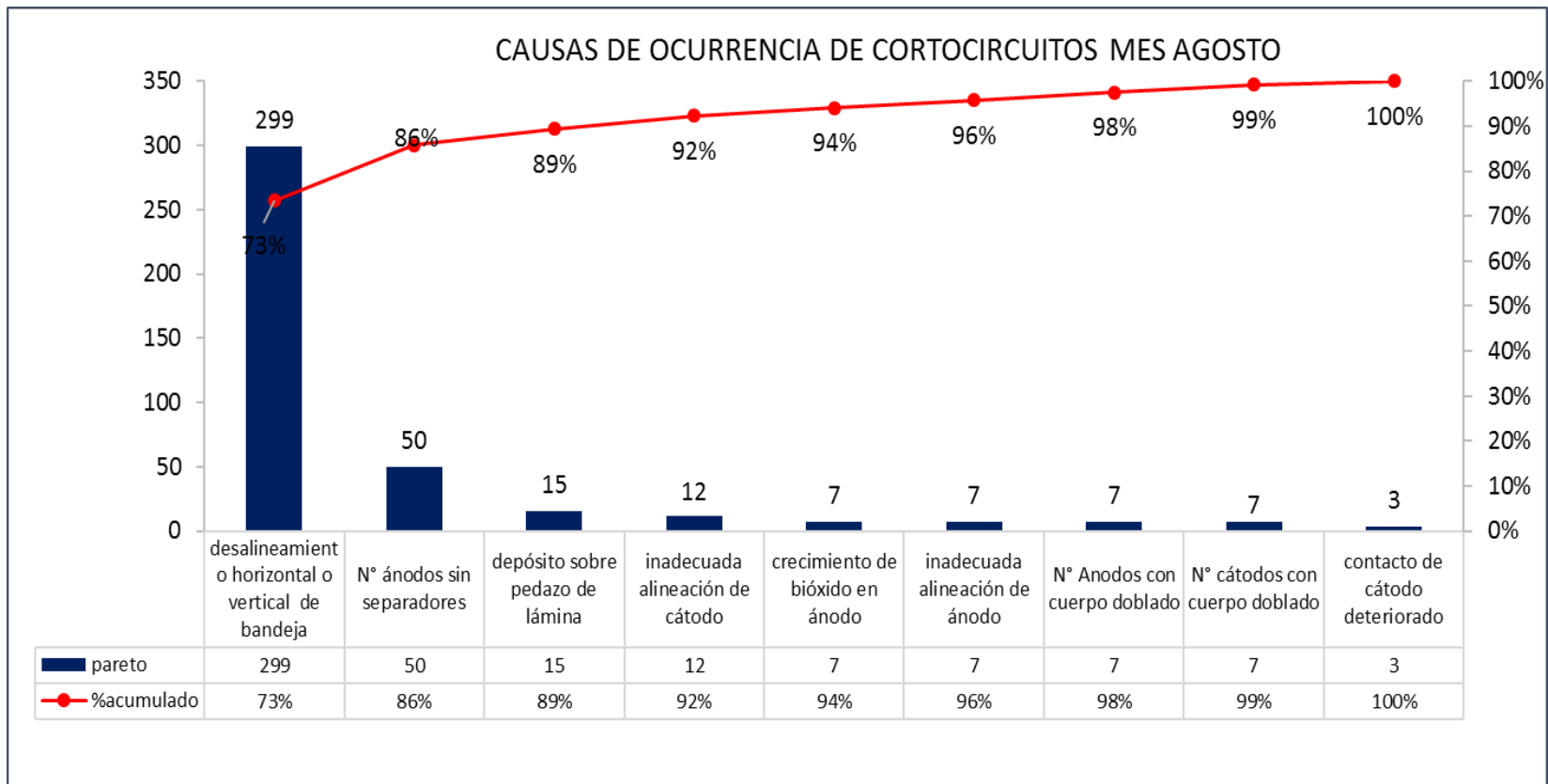


Figura 6.20: Pareto de causas de cortocircuitos – Agosto

Fuente: Propia

Desde el inicio de la evaluación hasta el término de éste se logró disminuir en un 70% los cortocircuitos presentados.

La figura 6.21 nos muestra la tendencia al descenso de la cantidad de cortocircuitos desde el mes de junio al mes de agosto de 1249 cortocircuitos en el mes de junio, que haría una media de 41 cortocircuitos/día, a 407 cortocircuitos con una media de 13 cortocircuitos/día en el mes de agosto.

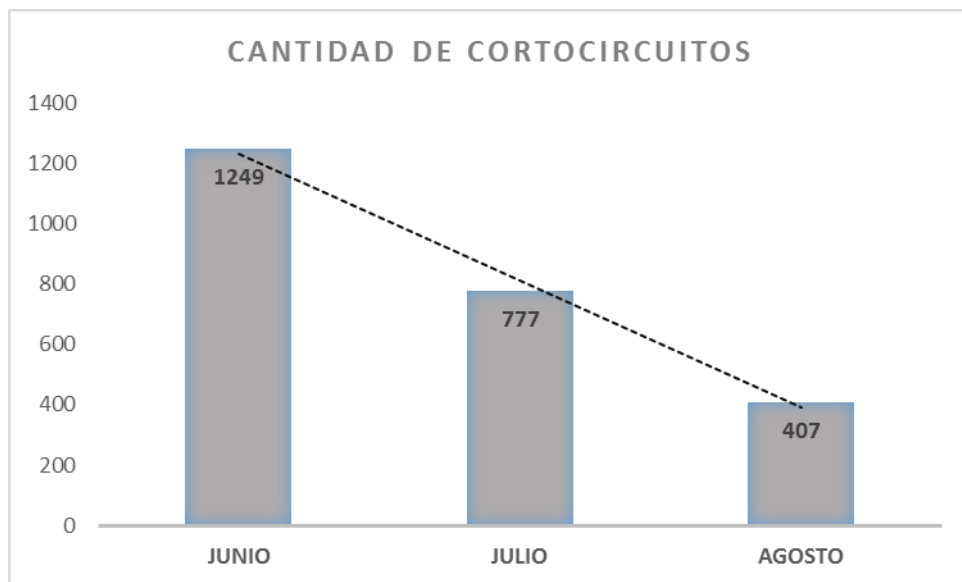


Figura 6.21: Cortocircuito acumulado mensual junio-agosto
Fuente: Propia

A continuación se presenta una tabla con el registro de temperaturas de barra para las causas de cortocircuito identificados. Estos datos fueron registrados en diferentes días, teniendo en cuenta la temperatura de la causa de cortocircuito, para identificar si existe alguna causa de cortocircuito que genere mayor o menor recalentamiento de barra.

Tabla 6.3 Temperaturas de barra de causa de cortocircuito

TEMPERATURAS DE BARRA CON CORTOCIRCUITO (°C)								
Depósito sobre pedazo de lámina	Desgaste de contacto de cátodo	Desalineamiento de cátodo	Cátodo doblado	Ánodo doblado	Falta de separador de cuerpo de ánodo	Crecimiento de bióxido en el ánodo	Desalineamiento de ánodo	Desalineamiento de bandeja
140	130	120	120	120	119	94	139	159
133	135	118	154	118	120	101	126	126
237	143	115	185	123	122	106	130	318
137	131	124	170	130	173	110	137	150
220	126	129	152	119	135	112	133	210
173	129	120	166	127	139	108	128	167
161	130	126	158	133	141	111	137	152
175	125	119	150	128	129	115	125	149

Fuente: Propia

6.4 EVALUACIÓN DE TIEMPO DE VIDA DE ÁNODOS

Debido a que la ocurrencia de cortocircuito daña los electrodos, se evaluó la relación de tiempo de vida de ánodos y las cantidades de cortocircuito. También se tiene en cuenta el impacto del planchado de ánodos.

El cuerpo de ánodo es de 99.42% de Pb y el resto Ag. La barra de cabeza está fabricada de cobre y tiene un bloque de contacto de cobre en un extremo. Los ánodos utilizados se describen según la siguiente tabla:

Tabla 6.4 Característica del ánodo

Descripción	Valor
Largo	1625 mm
Ancho	843mm
Espesor	12mm
Peso	178 kg
Superficie	Arenada (rugosa)
Contenido de Ag %	0,58
Separador de cuerpo	5 unidades

Fuente: Votorantim Metais

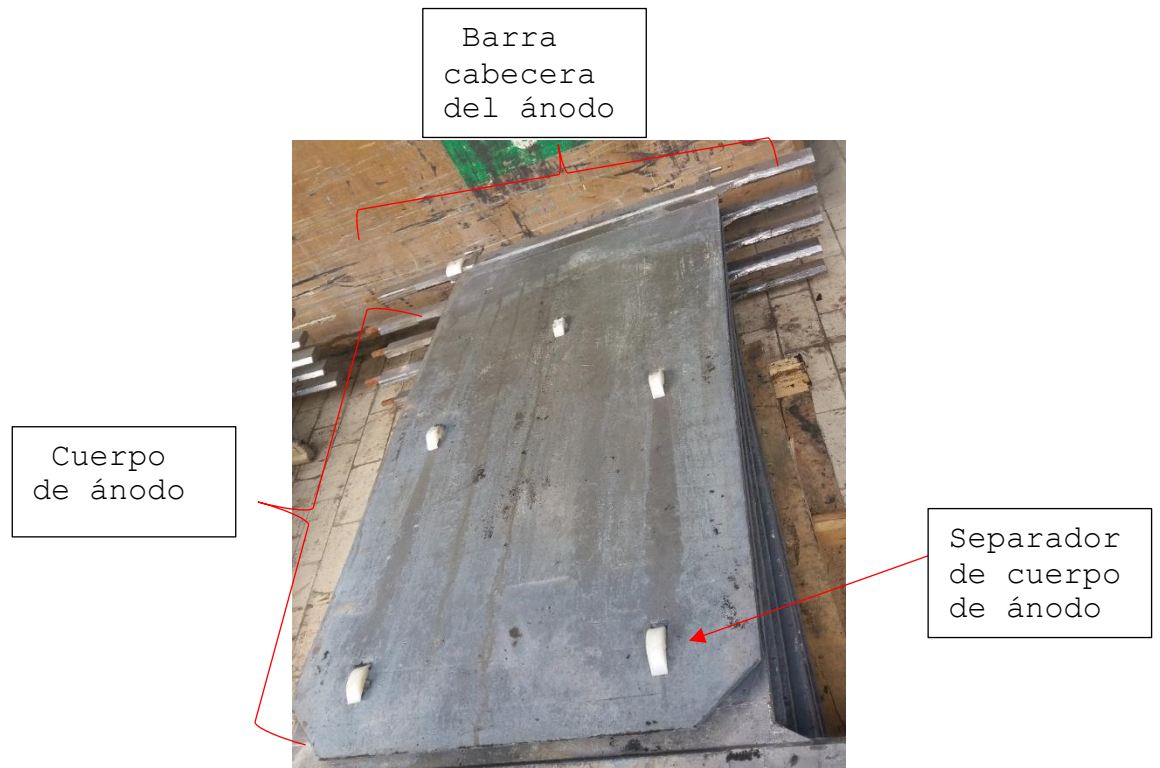


Figura 6.22: Ánodo
Fuente: Propia

Se realizó recolección de datos de espesor, largo y ancho de los ánodos con lo cual se evaluará deformidad del ánodo. A continuación se presenta la Tabla 6.5 con los datos obtenidos:

Tabla 6.5 Monitoreo tiempo de vida de ánodo

Tiempo de vida(mes)	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Cantidad de planchado
0	12	1625	843	1
3	12	1625	845	5
6	12	1627	846	10
9	11	1630	848	14
12	11	1630	850	19
15	10	1632	851	23
18	9.8	1635	852	28

Fuente: Propia

De acuerdo al registro de la Planta del tiempo de vida de ánodos en celda, se elaboró la Tabla 6.6 considerando la cantidad de cortocircuitos presentados por fila y el promedio de tiempo de vida de ánodos para determinar si existe alguna relación entre ellos.

Tabla 6.6 Tiempo promedio de vida de ánodo por fila y N° promedio de cortocircuito

	Cantidad de cortocircuito	Promedio tiempo de vida de ánodos (años)
FILA 1	20	2.6
FILA 2	37	3.4
FILA 3	25	2.5
FILA 4	21	2.2
FILA 5	17	1.5
FILA 6	20	2.6
FILA 7	22	2.5
FILA 8	12	1.1

Fuente: Propia

6.5 EVALUACIÓN DE DURABILIDAD DE MATERIALES AISLANTES

Para llevar a cabo la electrólisis se requieren materiales aislantes que sean resistentes al paso de corriente eléctrica, dentro de los cuales tenemos:

- **Bandeja:** aquí se coloca la barra equipotencial, los soportes. Compuesta por un Velo Sintético de Poliéster, rico en Resina de Epoxy Vinilester y una capa de MAT 450 que le confieren la resistencia química y mecánica a la superficie interna.



Figura 6.23: Bandeja
Fuente: Propia

- **Soporte de barra equipotencial:** compuesto de acrílico, se coloca entre la bandeja y la barra para proteger el deterioro de la bandeja.



Figura 6.24: Soporte de barra equipotencial
Fuente: Propia

- **Soporte de cabezal de ánodo:** compuesto de acrílico, se coloca a un lado de la bandeja para soportar cabezales de ánodo.



Figura 6.25: Soporte de cabezal de ánodo
Fuente: Propia

- **Soporte de cabezal de cátodo:** de material de acrílico, se coloca a un lado de la bandeja para soportar cabezales de cátodo.



Figura 6.26: Soporte de cabezal de cátodo
Fuente: Propia

- **Separador de cuerpo de ánodo:** elaborado con polipropileno, se colocan en el cuerpo del ánodo para evitar cortocircuito por acercamiento entre electrodos, garantizando así el espacio adecuado que debe haber de los mismos.



Figura 6.27: Separador de cuerpo de ánodo

Fuente: Propia

- **Separador de cabezal de ánodo:** elaborado con polipropileno, se colocan en el cabezal del ánodo para evitar cortocircuito por acercamiento entre electrodos, garantizando así el espacio adecuado que debe haber de los mismos.



Figura 6.28: Separador de cabezal de ánodo

Fuente: Propia

Usando materiales aislantes nuevos, se procedió a llevar el monitoreo de su durabilidad, teniendo como tiempo teórico de durabilidad los datos mostrados a continuación:

Tabla 6.7 Tiempo teórico de durabilidad de ánodo

Material	Tiempo de vida esperado
Bandeja de barra y electrodos	36 meses
Soporte de barra equipotencial	12 meses
Separador de cuerpo de ánodo	20 días
Separador de cabezal de ánodo	20 días
Soporte de cabezal de cátodo	18 meses
Soporte de cabezal de ánodo	18 meses

Fuente: Votorantim Metais

A continuación se presentan tablas con datos del monitoreo de durabilidad real de materiales aislantes:

En la tabla 6.8, se presentan datos de durabilidad real del soporte de barra equipotencial; se llevó registro de temperatura de barra como un promedio acumulado en el tiempo y los cortocircuitos que se presentaron en dicho periodo. El reemplazo de este material implica corte de corriente aproximado de 45 minutos, lo cual se ve reflejado en pérdida de producción.

Tabla 6.8 Monitoreo de durabilidad de soporte de barra equipotencial

Tiempo real de durabilidad (mes)	Temperatura de barra promedio acumulado	Cantidad cortocircuito detectado acumulado	Observación
0	131	1	Conservado
3	117	74	Conservado
4	125	102	Se pone de color oscuro la parte centro donde sienta la barra.
5	109	139	Se observa que las esquinas del soporte se rompen.
6	129	158	Se observan rajaduras. Se cambia.

Fuente: Propia

En la tabla 6.9, se presentan datos de durabilidad real de bandeja de barra y electrodos; la duración del monitoreo fue de 18 meses, ya que se cambió por

presentar rajaduras. El reemplazo de este material implica corte de corriente por 2 horas aproximadamente.

Tabla 6.9 Monitoreo de durabilidad de bandeja de barra y electrodos

Tiempo real de durabilidad (mes)	Temperatura de barra promedio acumulado	Cantidad cortocircuito detectado acumulado	Observación
0	131	1	Conservado
3	117	74	Conservado
6	129	158	Conservado
9	127	171	Se observa que la parte central de la bandeja se oscurece
12	120	183	Se observa que la parte central de la bandeja se oscurece
15	123	190	Aparecen pequeñas rajaduras en los interiores
18	117	220	Se cambia.

Fuente: Propia



Figura 6.29: Bandeja deteriorada

Fuente: Propia



Figura 6.30: Reemplazo de bandeja
Fuente: Propia

En la tabla 6.10, se presentan datos de durabilidad real del soporte de cabezal de ánodo; se llevó registro de temperatura de barra como un promedio acumulado en el tiempo y los cortocircuitos que se presentaron en un periodo de 12 meses, cuando se tuvo que cambiar.

Tabla 6.10 Monitoreo de durabilidad de soporte de cabezal de ánodo

Tiempo real de durabilidad (mes)	Temperatura de barra promedio acumulado	Cantidad cortocircuito detectado acumulado	Observación
0	131	1	Conservado
3	117	74	Conservado
6	129	158	Conservado
9	127	171	Conservado
12	120	183	Presenta rajaduras y se reemplaza

Fuente: Propia

En la tabla 6.11, se presentan datos de durabilidad real del soporte de cabezal de cátodo durante 12 meses, periodo en el que se reemplaza por desgastamiento.

Tabla 6.11 Monitoreo de durabilidad de soporte de cabezal de cátodo

Tiempo real de durabilidad (mes)	Temperatura de barra promedio acumulado	Cantidad cortocircuito detectado acumulado	Observación
0	131	1	Conservado
3	117	74	Conservado
6	129	158	Conservado
9	127	171	conservado
12	120	183	Presenta rotura y se reemplaza

Fuente: Propia

En la tabla 6.12, se presentan datos de durabilidad real del separador de cabezal de ánodo durante 15 días, donde se cambió por deterioro.

Tabla 6.12 Monitoreo de durabilidad de separador de cabezal de ánodo

Tiempo real de durabilidad (días)	Temperatura de barra	Cantidad cortocircuito detectado acumulado	Cantidad de planchado	observación
0	131	1	1	Conservado
3	150	2	1	Conservado
6	155	3	1	Conservado
9	149	5	1	Se oscurece
12	156	6	1	Oscuro
15	153	8	1	Deteriorado, se cambia

Fuente: Propia

En la tabla 6.13, se presentan datos de durabilidad real del separador de cuerpo de ánodo, debido a que estos separadores van sumergidos en la celda electrolítica, se llevó registro de acidez del electrolito al que estuvo expuesto el material. El monitoreo duró 20 días, periodo en el cual se reemplazó.

Tabla 6.13 Monitoreo de durabilidad de separador de cuerpo de ánodo

Tiempo real de durabilidad (días)	Temperatura de electrolito (°C)	Acidez de electrolito(g/L)	Cantidad de planchado	Observación
0	39	196	1	Ingreso de 5 unidades al ánodo planchado
3	38	194	1	Conservado los 5 separadores
6	40	185	1	Conservado los 5 separadores
9	39	180	1	Conservado los 5 separadores
12	39	186	1	Conservado los 5 separadores
15	40	191	1	Ligera rajadura en 2 separadores parte inferior del ánodo
18	37	189	1	Separadores rajados de la parte inferior del ánodo
20	38	182	2	2 separadores desprendidos del ánodo parte inferior

Fuente: Propia

6.6 RELACIÓN DE CONTAMINACIÓN DE LÁMINAS DE ZINC CON Pb POR CORTOCIRCUITO

Debido a los problemas de contaminación de láminas de zinc con Pb, se realizó seguimiento de la cosecha de láminas y se realizó análisis de composición con Pb, a la vez se registró la cantidad de cortocircuitos ocurridos por cosecha.

El Pb en láminas debe ser como máximo 30ppm por lo que de existir cosechas con alto contenido de Pb, éstas tienen que mezclarse con otras de menor contenido de Pb en láminas para la fundición.

Al tener el ánodo Pb en su composición, y que haya cortocircuito con el cátodo, es probable un valor alto de Pb en las láminas.

La Tabla 6.14 indica valores de cortocircuito y % de Pb en lámina para la cosecha de una misma celda, el monitoreo duró 1 mes, aunque el % de Pb no estuvo por encima del límite permisible (30ppm), los datos nos servirán para realizar tendencia.

Tabla 6.14 Monitoreo de cortocircuito y contenido de % Pb en lámina de zinc

% Pb	N° de corto circuito presentado por cosecha	% Pb	N° de corto circuito presentado por cosecha
22	2	22	1
20	1	22	1
21	1	19	0
25	3	18	0
28	3	21	1
24	2	23	2
20	1	22	1
24	2	23	2
23	2	28	3
21	0	24	3
21	1	22	2
22	0	23	2
18	0	22	1
16	0	20	1
19	0	17	0

Fuente: Propia



Figura 6.31: Muestreo de láminas de zinc
Fuente: Propia

6.7 REPORTE DE CONTROL DE CORTOCIRCUITO

A continuación, se muestra los formatos que fueron elaborados para el reporte de inspección de cortocircuitos, dicha información será llenada por el personal de inspección y de manejo de grúa.

	VM-ZINC-CJM		Código	DD-VM-Zinc-CJM-ELE-146
	Documento de Datos		Revisión	1.0 (24/04/2016)
	Seguimiento de Deslaminado - Cortos y Cátodos sin depósito		Área	ELE
			Páginas	1/1

FECHA Y TURNO:
OPERADOR:

FILA N°:

		CORTO S/D	C S	POSICIÓN DEL CATODO																								cant. Cátodos con DUREZA	total de cátodos cambiados
int / ext	CELDA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				

Esta hoja debe ser llenada indicando los cátodos que presentan cortocircuitos, y cátodos sin depósito.

Elaborado por:
Vilma Leguia

Aprobado por:
Herbert Yuto

Figura 6.32: Documento de datos para monitoreo de cortocircuito
Fuente: Propia


	VM-ZINC-CJM											Código		DD-VM-Zinc-CJM-ELEC-011		
	Documento de Datos											Revisión		1.1 (3/06/2017)		
	Reporte de Inspección											Área		ELE		
												Páginas		1/1		
Fecha y Turno			GRUA USADA:								Se usó scanner: SI () , NO ()					
Nombre de Inspector			FILA N°.....													
Celda	CAUSAS DE CORTOCIRCUITOS													Cantidad de cátodo retirado	cantidad de ánodo retirado	Observación
	Temperatura inicial	N° Cortos Identificado	N° Cortos Corregido	depósito sobre pedazo de lámina	desgaste de contacto de cátodo	desalineamiento de cátodo	cátodo doblado	ánodo doblado	falta de separador de cuerpo de ánodo	crecimiento de bióxido en el ánodo	desalineamiento de ánodo	desalineamiento de bandeja				
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
Elaborado por: Vilma Leguía				Uso: Uso Interno del Negocio				Aprobado por: Cinthya Lozano								

Figura 6.33: Documento de datos para monitoreo de causas de cortocircuito
Fuente: Propia

6.8 PLAN DE ACCIÓN PARA CONTROL DE CORTOCIRCUITO

El plan de acción surge de los problemas encontrados en el estudio de cortocircuitos. La ejecución de dichas acciones ayudará a llevar un mejor control de la ocurrencia de cortocircuitos en la electrodeposición de zinc de la Planta. El jefe de planta direccionará la gestión para el cumplimiento de las acciones.

Tabla 6.15 Plan de acción para control de cortocircuito

N°	CAUSA	ACCIÓN	RESPONSABLE	PLAZO
1	Cortocircuito por desalineamiento de bandeja	Modificar diseño de las bandejas de barra, considerando mayor estabilidad de la misma.	Jefe de planta	1 semana
2	Cortocircuito por desalineamiento de bandeja	Realizar programación de cambio de bandejas.	Jefe de planta	2 semanas
3	Temperatura de barras	Adquisición de una bomba exclusiva para lavado de barras.	Jefe de planta	Mediano plazo(6 meses)
4	Tiempo de vida de ánodos	Programar y cambiar ánodos de acuerdo a tiempo de vida de los mismos.	Jefe de planta	Largo plazo (1 año)
5	Cortocircuitos	Adquirir un polipasto exclusivo para corrección de cortocircuitos e instalar en el escaner.	Jefe de planta	Largo plazo (1 año)

Fuente: Propia

6.9 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica se realiza de acuerdo al valor de eficiencia que se ve reflejado en el consumo de corriente (kW/t) y por ende en la ganancia de producción. La ganancia en producción se calculará dependiendo del valor del LME (Precio del Zn) en el mercado y del cash cost.

El consumo de corriente en la Casa de Celdas es el 85% del total de energía que se usa en la Refinería, representando el mayor costo en el proceso de conversión, por lo que es necesario mejorar el rendimiento de la energía en el proceso electrolítico. La ganancia por reducción de consumo de energía se realizará en función de la producción, el precio de energía.

$$\text{ganancia reducción de consumo de energía} = \text{producción catódica} * \left(\frac{\text{reducción de consumo de energía}}{1000} \right) * \text{precio de energía} \quad (36)$$

$$\text{Incremento de producción por mejor eficiencia} = \text{producción catódica} * \text{incremento de eficiencia de corriente} / 100 \quad (37)$$

$$\text{ganancia por incremento de producción} = \text{incremento de producción por mejor eficiencia} * \text{eficiencia de conversión refinado} / 100 (\text{LME} - \text{cash cost}) \quad (38)$$

A continuación se presenta la tabla 6.16 que muestra el resumen de ganancia por consumo de energía y por eficiencia de corriente.

De acuerdo a dicha información, se evidenció reducción en 37 kW/t de marzo-mayo a junio-agosto; el cálculo se realiza en función al precio de la energía.

Tabla 6.16 Ganancia por incremento de eficiencia de corriente

Consumo de Energía Marzo - Mayo	3,335.00	kW/t
Consumo de Energía Junio - Agosto	3,298.00	kW/t
Reducción de Consumo de Energía	37.00	kW/t
Producción Catódica Junio - Agosto	37,955.00	t
Precio de Energía Promedio	40.00	US\$/MW
Ahorro por Reducción de consumo de energía	56,173.40	US\$
Eficiencia de corriente Marzo - Mayo	88.28	%
Eficiencia de corriente Junio- Agosto	89.21	%
Incremento de Eficiencia de Corriente	0.93	%
Incremento de producción por mejor eficiencia	352.98	TM
Eficiencia de Conversión Refinado	93.00	%
LME Zinc Promedio Junio- Agosto	3,131.00	US\$/t
Cash Cost Promedio Junio- Agosto	2,277.00	US\$/t
Ganancia por incremento de producción	280,344.97	US\$
Ganancia Total	336,518.37	US\$

Fuente: Propia

CAPÍTULO VII

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO

De acuerdo a lo descrito en el capítulo VI, se identificó las causas de cortocircuitos a los cuales se le clasificó por su origen de anomalías en el ánodo o cátodo.

Se identificó nueve causas de ocurrencia de cortocircuito, de las cuales se priorizó en función de aquellos que se pueden evitar por un buen manejo operacional, como los cortocircuitos por pedazo de lámina, desalineamiento de ánodo o cátodo, etc.

Se presenta el Pareto de causas de ocurrencia de cortocircuitos en el mes de junio-agosto, presentándose un total de 2433 cortocircuitos, de los cuales el 63% fue por desalineamiento horizontal o vertical de bandeja, seguido del n° de ánodos sin separadores; por lo que se priorizó los trabajos en estas causas.

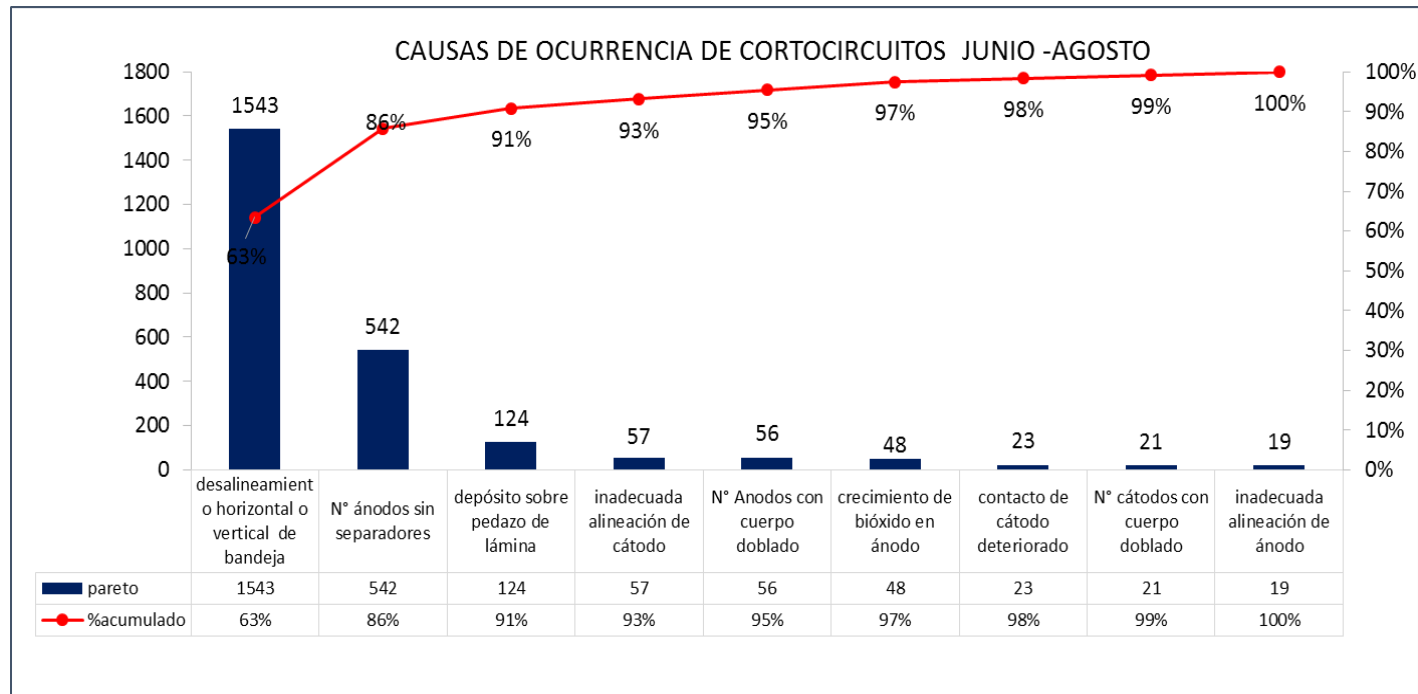


Figura 7.1: Pareto de causas de ocurrencia de cortocircuito periodo junio-Agosto

Fuente: Propia

La figura 7.2 muestra la representatividad de las causas de ocurrencia de cortocircuito en el mes de junio-agosto; indicando que se tuvo mayor incidencia de cortocircuitos por desalineamiento horizontal o vertical de bandeja con el 63.4%, seguido del n° de ánodos sin separadores con el 22.3%, depósito sobre pedazo de lámina con el 5.1% y el resto suma el 9.2%.

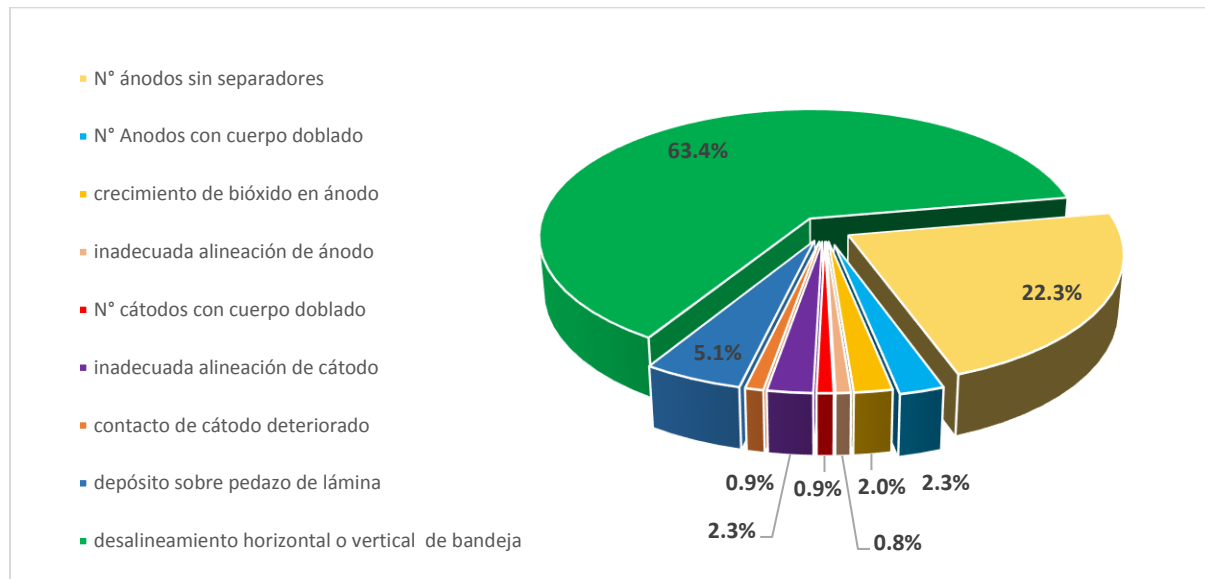


Figura 7.2: Representatividad de causas de cortocircuitos
Fuente: Propia

La gráfica 7.3 nos muestra los intervalos de temperatura de barra para las diferentes causas de cortocircuito siendo el crecimiento de bióxido en el ánodo el tipo de cortocircuito con menor temperatura (107°C); desalineamiento de bandeja y depósito sobre pedazo de lámina fueron las causas con mayor variabilidad de temperatura de barra teniendo una media de 178°C y 172 °C respectivamente.

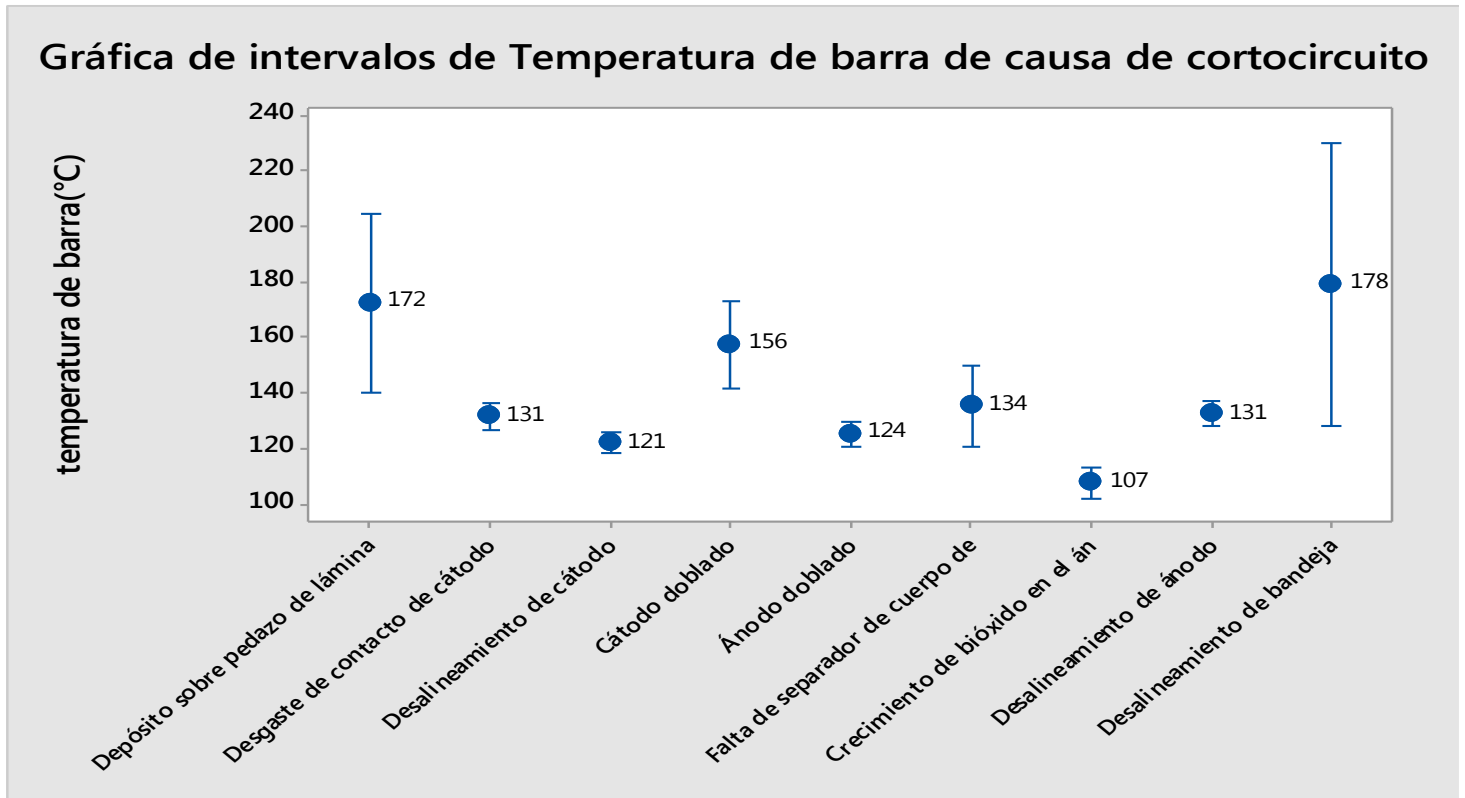


Figura 7.3: Intervalos de temperatura de barra de causas de cortocircuito
Fuente: Propia

7.2 MONITOREO DE CAUSAS DE CORTOCIRCUITO

De los datos obtenidos en la Tabla 6.2, se representa gráficamente la relación de cortocircuito y temperatura de barra.

La figura 7.4 nos permite establecer una temperatura de barra límite que nos permita evidenciar presencia de cortocircuito, siendo ésta, según la evaluación, de 94°C el cual fue la temperatura mínima donde se encontró el cortocircuito.

No hubo presencia de cortocircuito en un rango de 62°C-116°C, sin embargo a una temperatura de barra mayor a 100°C se pudo observar que la barra se encontraba sulfatada lo cual ocasionaba el recalentamiento del mismo.

En la figura 7.4 se aprecia los valores medios de temperatura de barra para 0,1,2,3,4 cortocircuitos. Nos indica que un aumento de temperatura de barra coincide con mayor presencia de cortocircuitos.

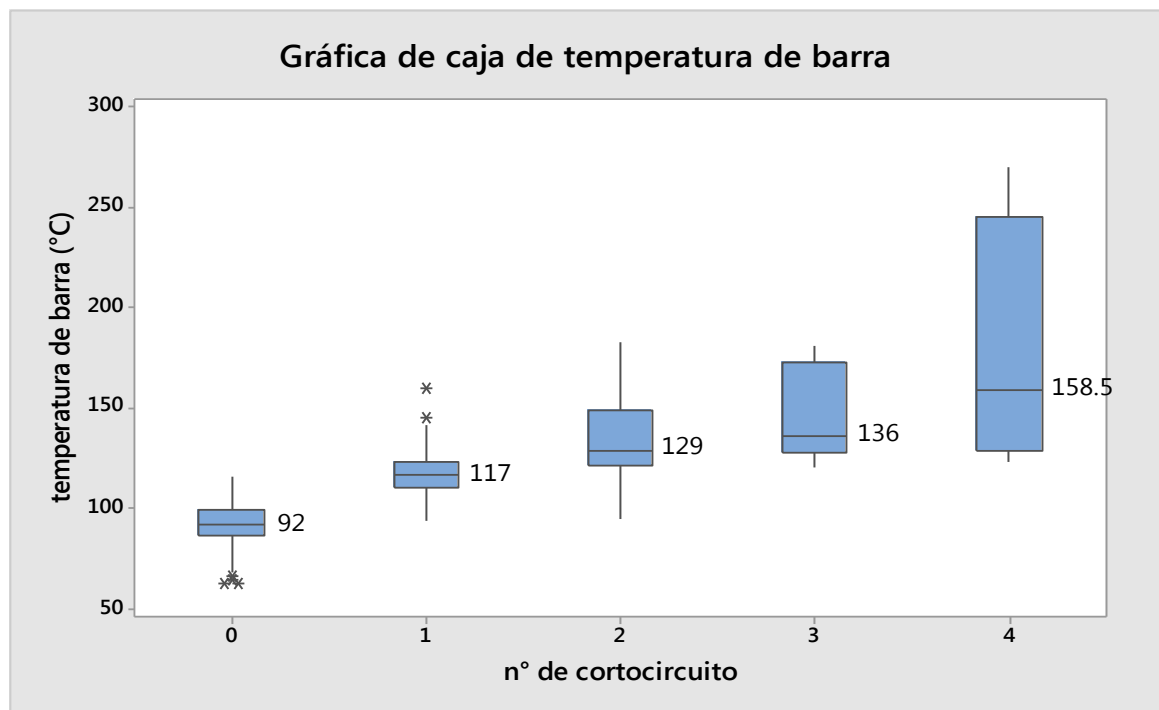


Figura 7.4: Cortocircuito vs. Temperatura de barra
Fuente: Propia

La figura 7.5 presenta una regresión de n° de cortocircuito y temperatura de barra, donde el valor de R-cuad es de 47.26% y el modelo matemático indica que a mayor temperatura de barra mayor n° de cortocircuito.

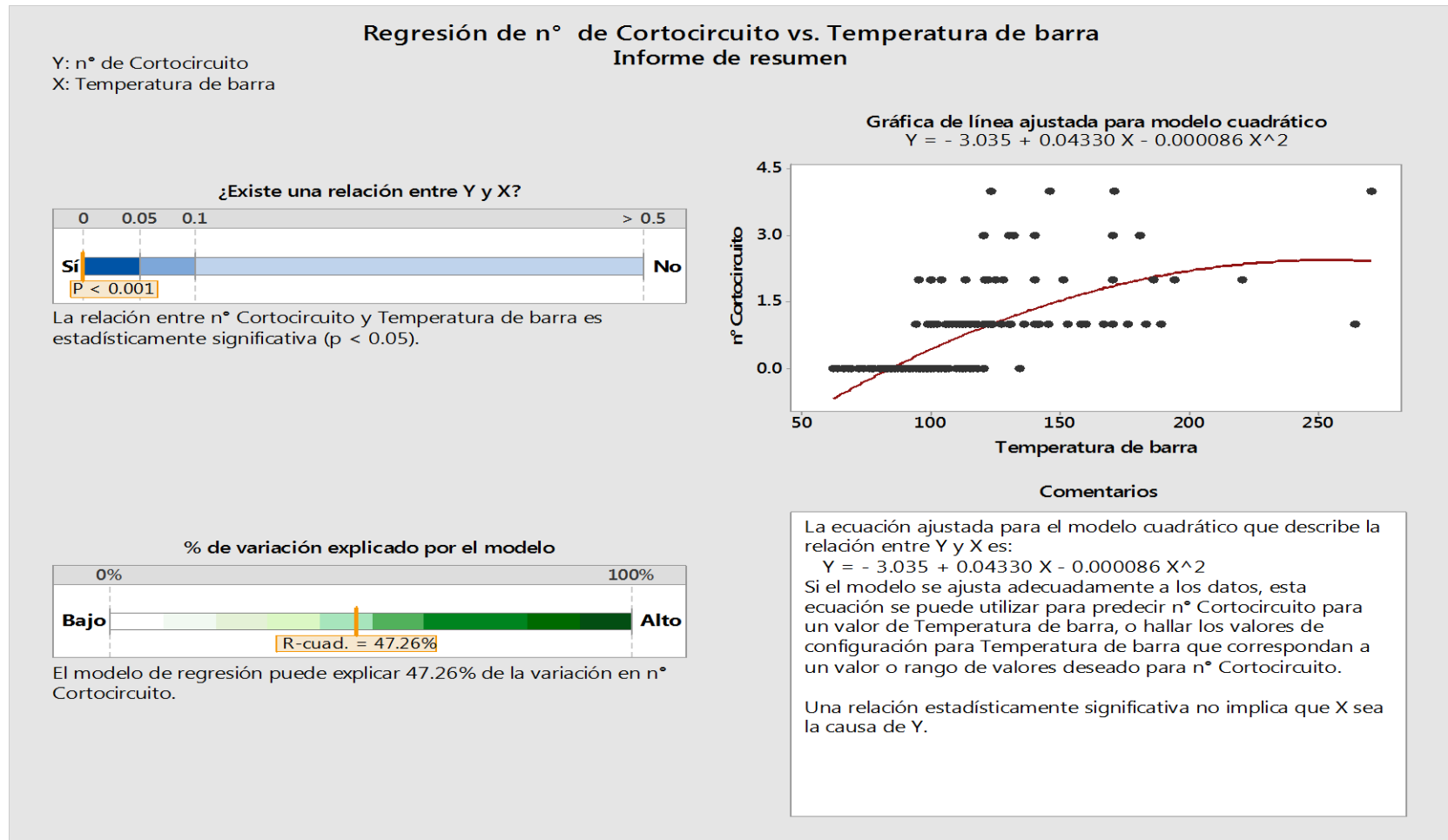


Figura 7.5: Regresión para cortocircuito vs. Temperatura

Fuente: Propi

La figura 7.6 muestra los valores de temperatura de barra donde no se encontró cortocircuito, teniendo como mínima temperatura de barra de 62°C y un máximo de 116°C donde se encontró barras sulfatadas.

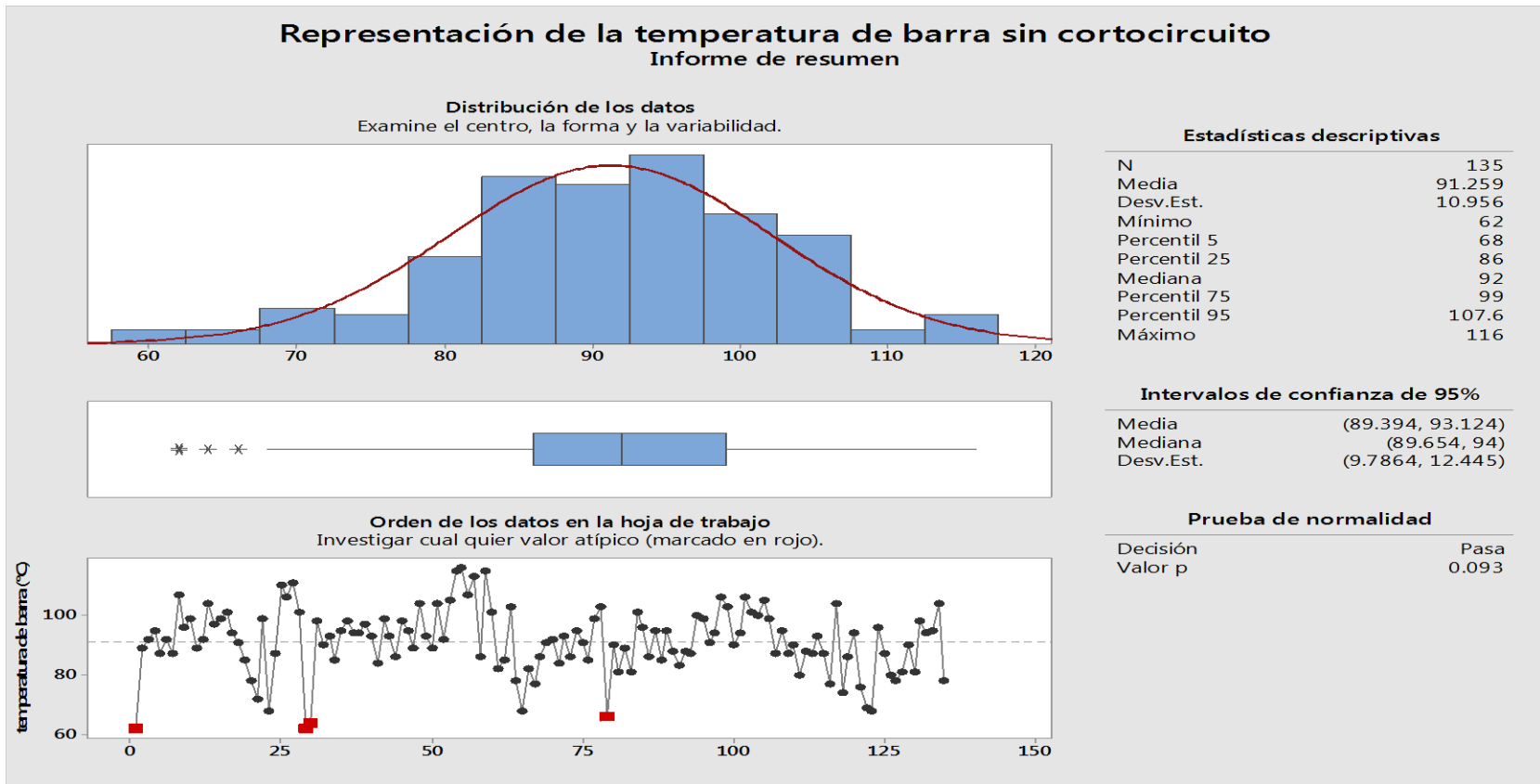


Figura 7.6: Representación de temperatura de barra sin cortocircuito

Fuente: Propia

La figura 7.7 muestra los valores de temperatura de barra donde se encontró 1 cortocircuito, teniendo como mínima temperatura de 94°C y un máximo de 160°C. Esto contradice la información en la figura 7.6, donde indica que el rango de temperatura donde no se encontró cortocircuito fue de 62°C-116°C; se comprobó que esto es debido a la sulfatación de la barra por falta de buen lavado.

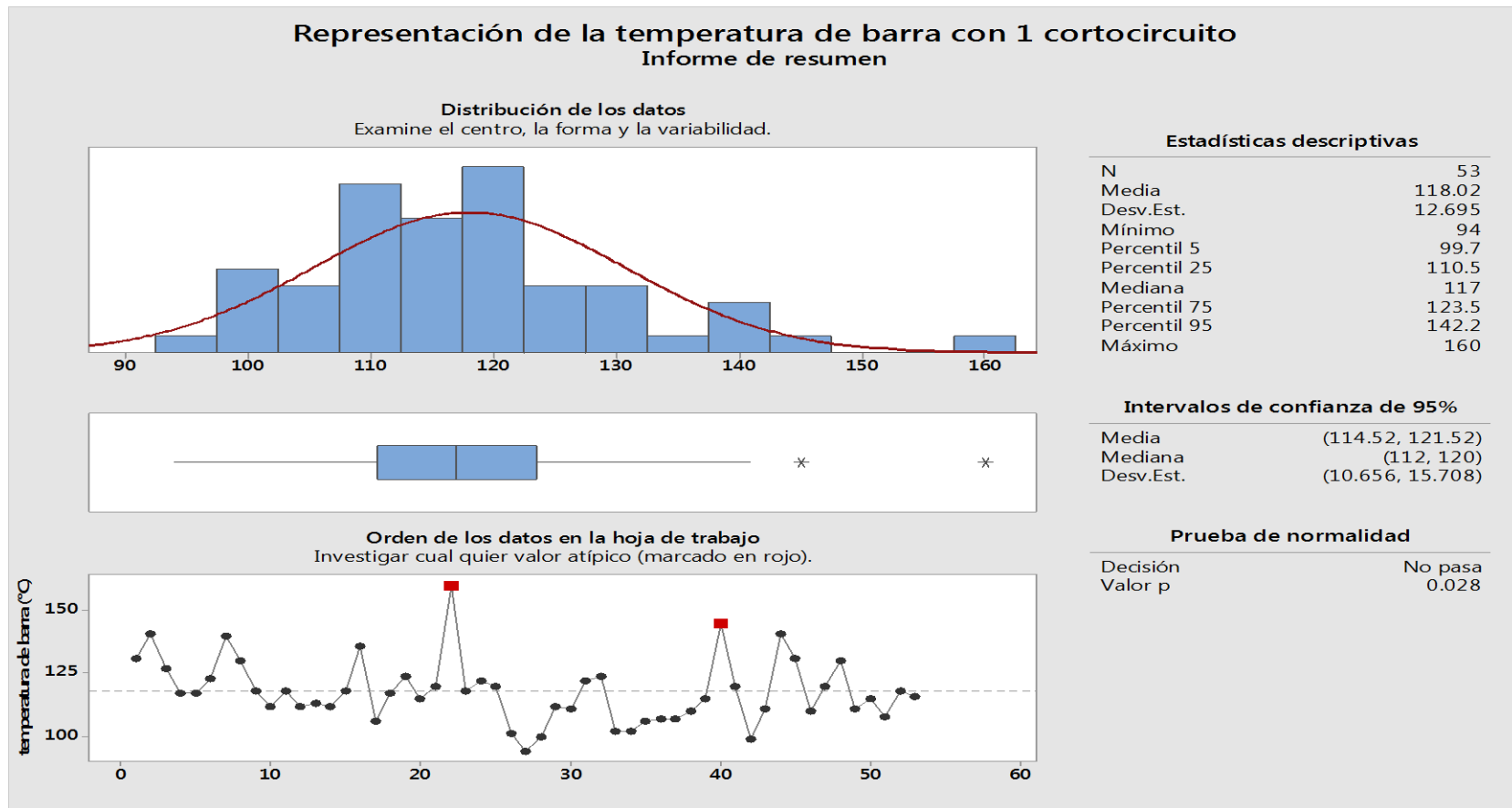


Figura 7.7: Representación de temperatura de barra con 1 cortocircuito
Fuente: Propia

La figura 7.8 muestra los valores de temperatura de barra donde se encontró 2 cortocircuito, teniendo como mínima temperatura de 95°C y un máximo de 183°C. La media para presencia de 2 cortocircuito en barra es de 133°C, en cambio para 1 cortocircuito es 118°C; indicándonos que mayor presencia de cortocircuito genera mayor recalentamiento de barra.

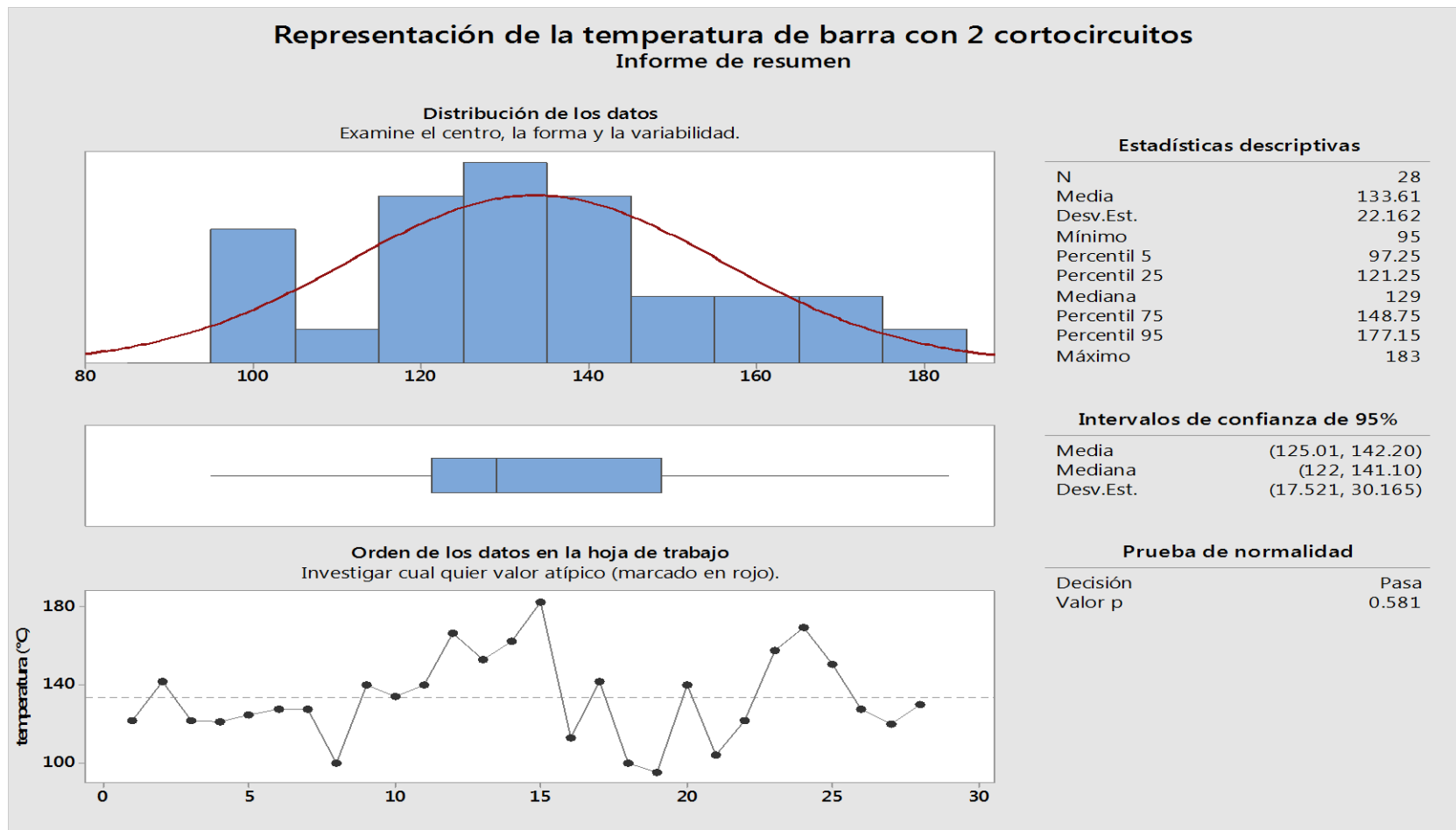


Figura 7.8: Representación de temperatura de barra con dos cortocircuito

Fuente: Propia

7.3 RESULTADO EVALUACIÓN DE TIEMPO DE VIDA DE ÁNODOS

A continuación se grafican los datos obtenidos de espesor, largo y ancho del ánodo con el tiempo de vida evaluado.

Según la figura 7.9, el espesor del ánodo disminuye a mayor tiempo de vida por lo que el ánodo tiende a volverse frágil y facilitar la aparición de corrosión por presencia de cortocircuito.

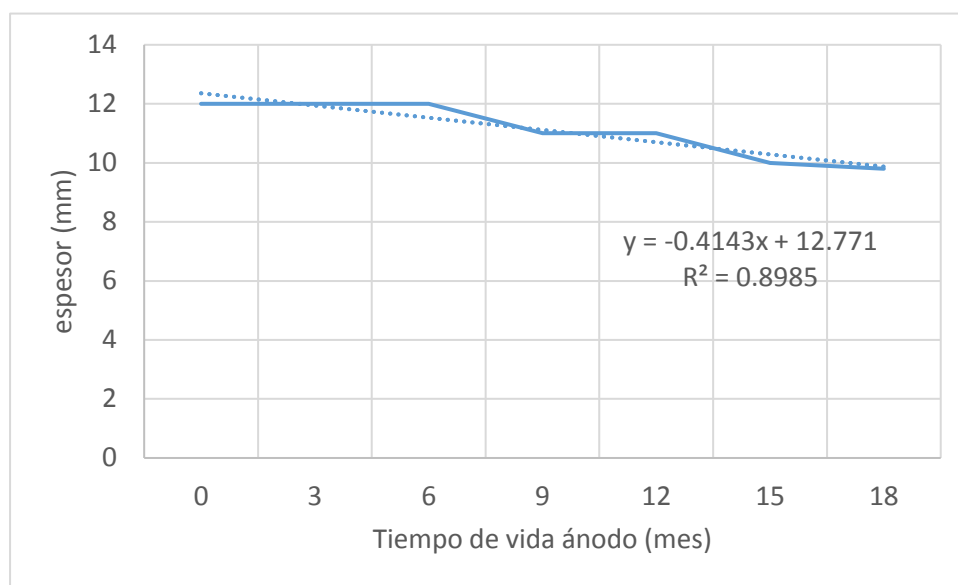


Figura 7.9: Espesor de ánodo vs. Tiempo de vida

Fuente: Propia

Según la figura 7.10 y 7.11, el largo y ancho del ánodo aumenta a mayor tiempo de vida; se debe considerar que los ánodos son sometidos a planchado en un ciclo de 20 días aproximadamente.

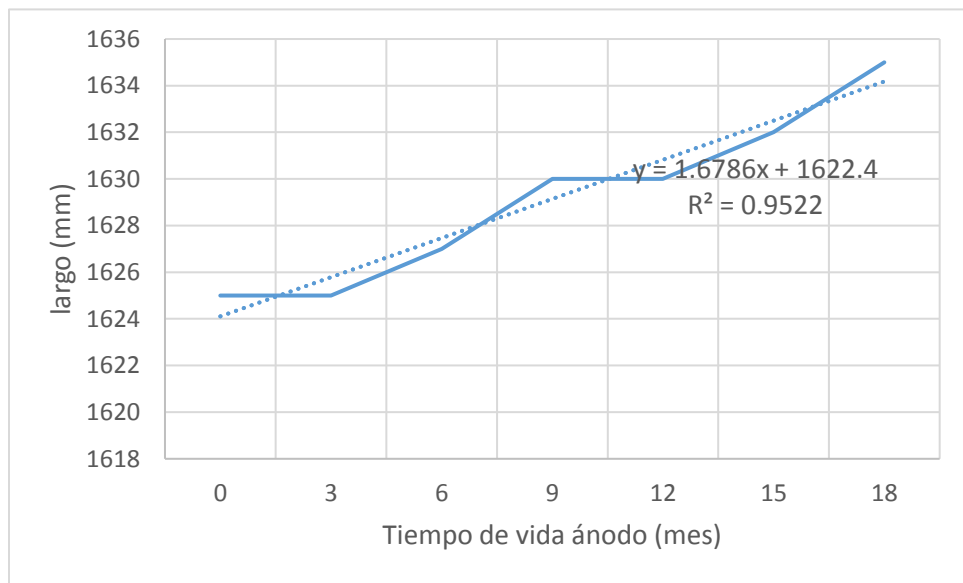


Figura 7.10: Largo de ánodo vs. Tiempo de vida
Fuente: Propia

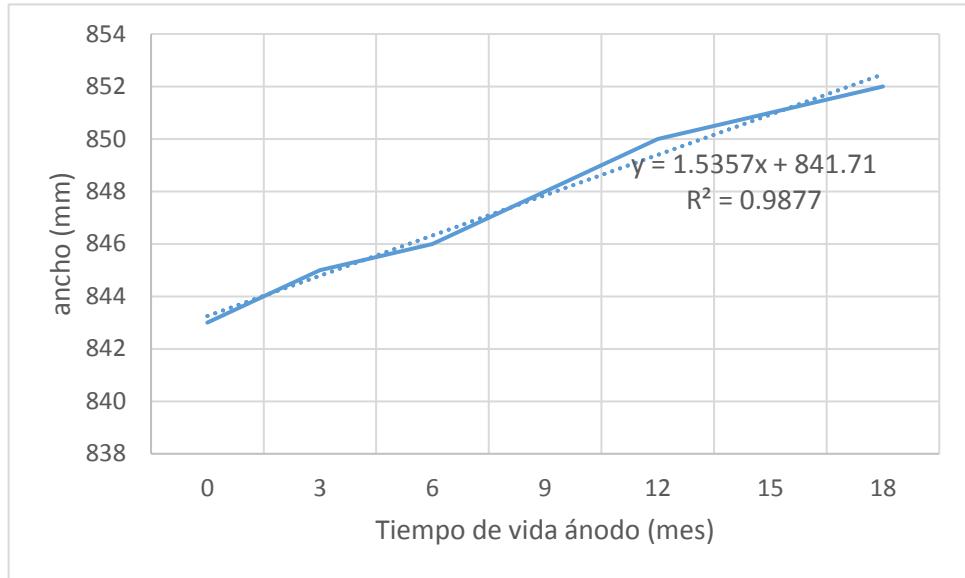


Figura 7.11: Ancho de ánodo vs. Tiempo de vida
Fuente: Propia

De los datos obtenidos en la Tabla 6.6, se realiza la regresión mostrada en la figura 7.12 en donde se evidencia que a mayor tiempo de vida de ánodos existe posibilidad de mayor presencia de cortocircuito.

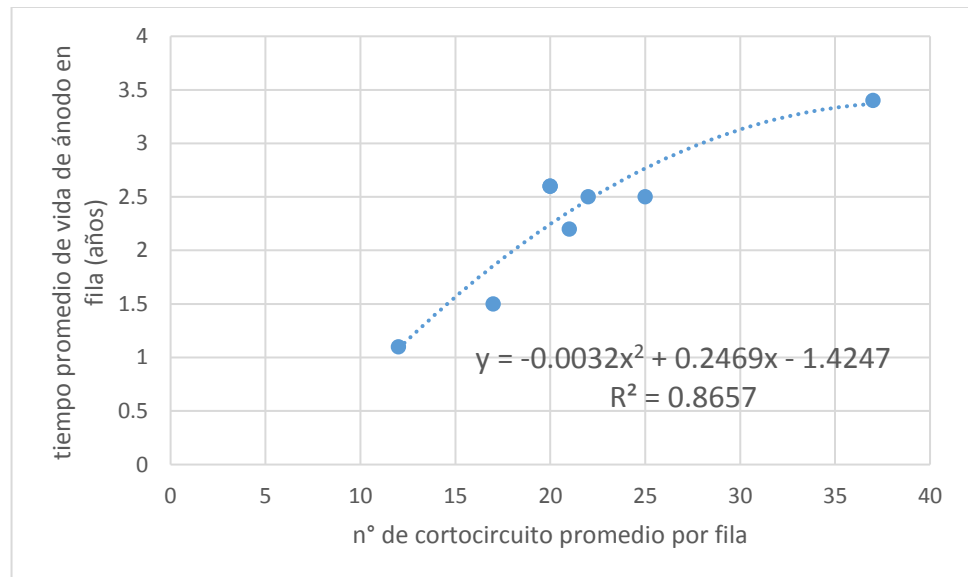


Figura 7.12: Tiempo de vida de ánodo vs. Cantidad de cortocircuito
Fuente: Propia

7.4 DURABILIDAD DE MATERIALES AISLANTES

Los materiales aislantes usados en el proceso de electrodeposición tienen que ser cambiados constantemente esto debido a la presencia de altas temperaturas en barra originadas en su mayor parte por presencia de cortocircuito.

De los materiales aislantes se considera crítico a la bandeja de barra y soporte de barra, ya que éstos requieren un corte de corriente para ser reemplazados. A continuación se presenta una tabla resumen de las evaluaciones realizadas.

Tabla 7.1 Tiempos aproximados de vida útil de material aislante

Material	Tiempo de vida evaluado	Tiempo de vida esperado	Cantidad de cortocircuitos presentados	Promedio soportado de temperatura de barra (°C)
Bandeja de barra y electrodos	18 meses	36 meses	220	117
Soporte de barra equipotencial	6 meses	12 meses	158	129
Separador de cuerpo de ánodo	15 días	20 días	---	--
Separador de cabezal de ánodo	15 días	20 días	8	153
Soporte de cabezal de cátodo	12 meses	18 meses	183	120
Soporte de cabezal de ánodo	12 meses	18 meses	183	120

Fuente: Propia

7.5 RELACIÓN DE CONTAMINACIÓN DE LÁMINAS CON Pb POR CORTOCIRCUITO

De acuerdo a los datos obtenidos en el capítulo VI, se realiza la regresión, la cual nos indica que, a mayor cantidad de cortocircuito, mayor %Pb contaminado en lámina. Mediante esta evaluación se comprueba que el efecto de los cortocircuitos en la contaminación por Pb de las láminas es directamente proporcional, por lo que un control adecuado y disciplinado en la eliminación de cortocircuitos beneficiará a la calidad de las láminas.

La figura 7.13 nos indica que la regresión multivariable de cortocircuitos vs. Pb en láminas es directamente proporcional, con un r-cuad de 76.7%

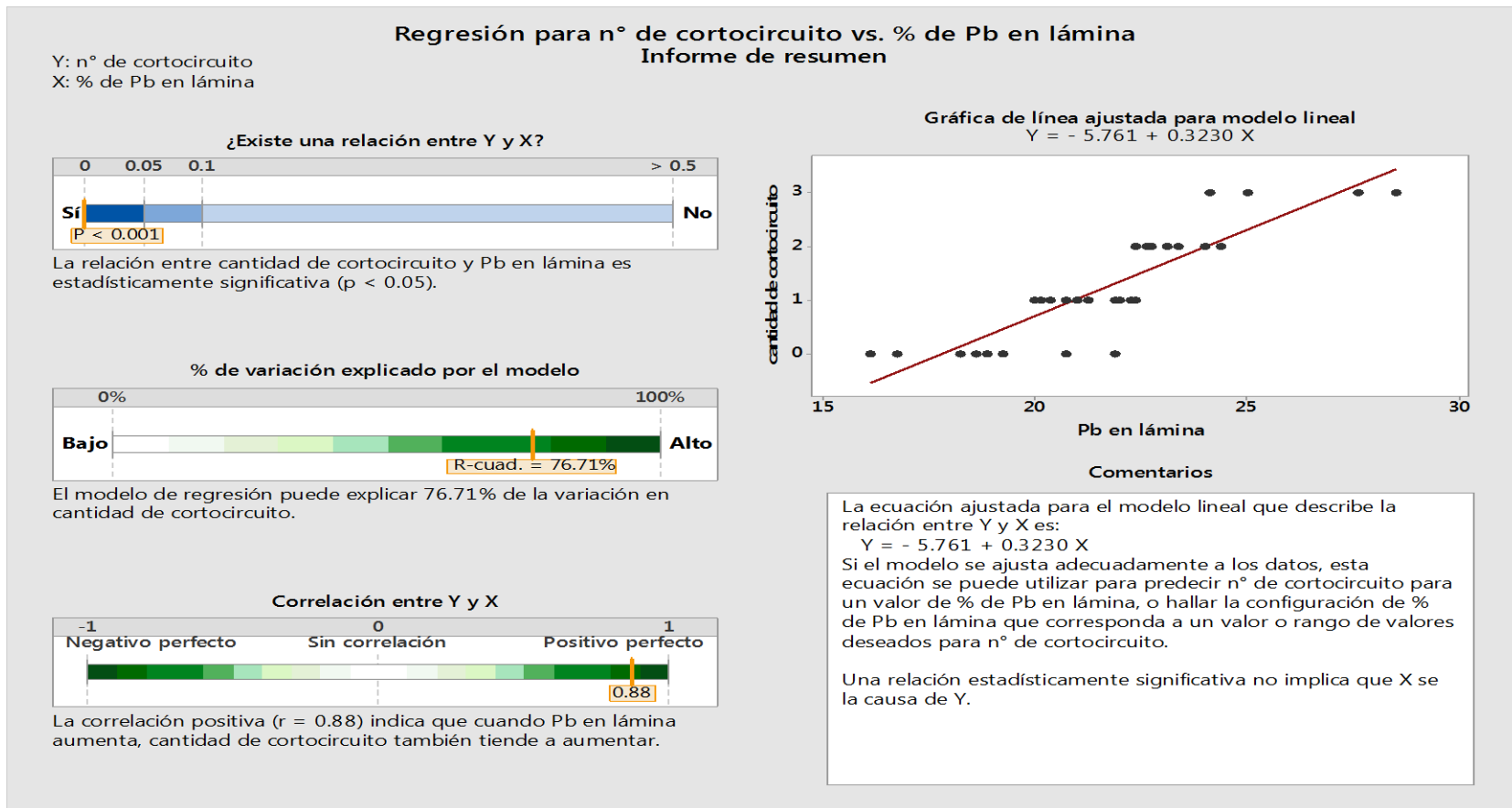


Figura 7.13: Regresión para cortocircuito vs. % Pb en lámina

Fuente: Propia

A continuación se presenta la tendencia de eficiencia de corriente en el periodo junio- agosto, el cual muestra la mejora del mismo. La eficiencia de corriente llegó a tener una media de 90.5 durante este periodo. Cabe mencionar que uno de las variables que impactan en eficiencia es el cortocircuito, ya que hay otras variables como ciclo de succión, ciclo de planchado, temperatura de electrolito, densidad de corriente, etc.

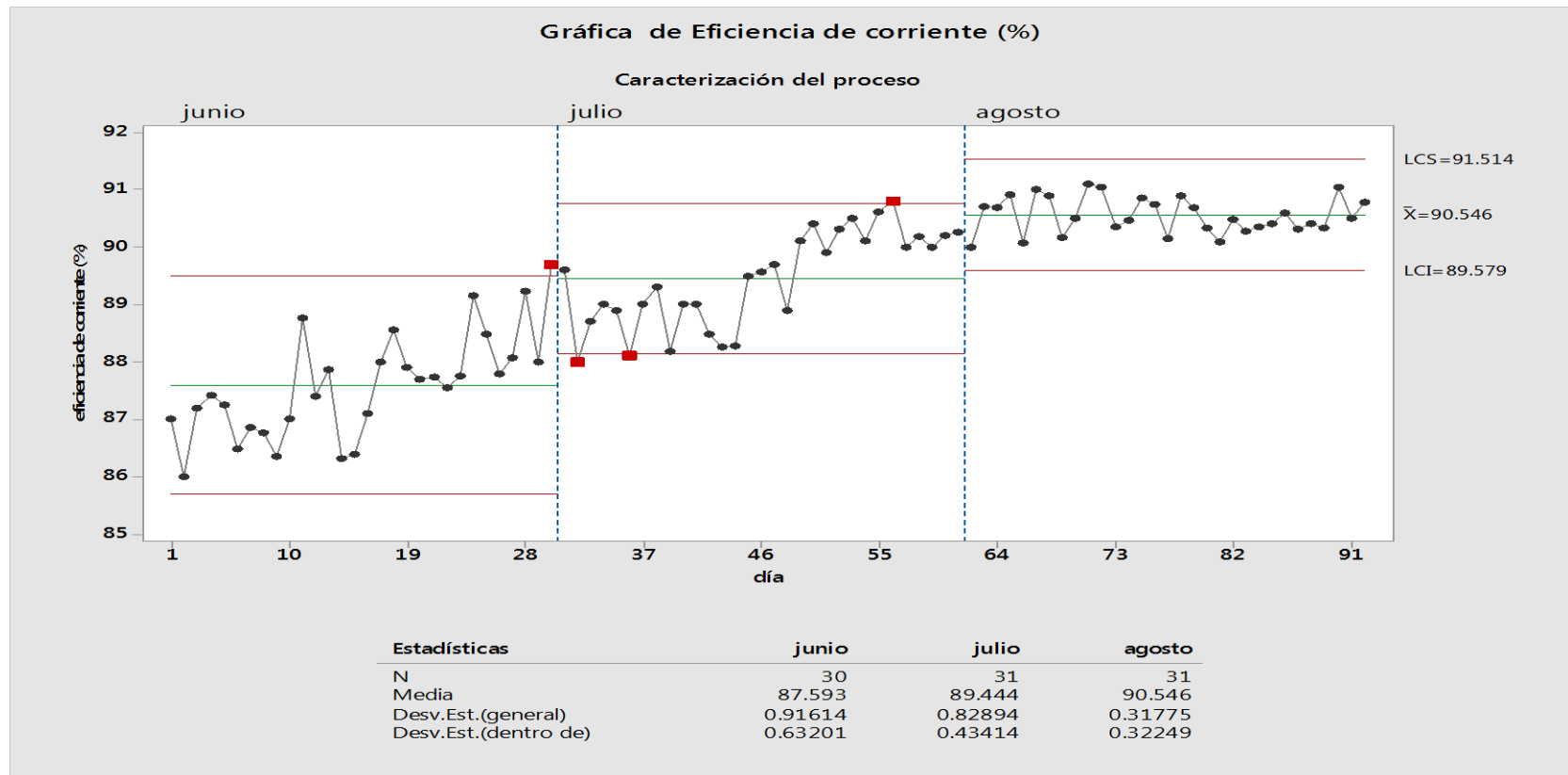


Figura 7.14: Tendencia de eficiencia de corriente mes junio-agosto
Fuente: Propia

A continuación se presenta la gráfica de caja de cantidad de cortocircuitos en el periodo junio- agosto, el cual nos muestra la tendencia al descenso de los cortocircuitos en dicho periodo. Para el mes de junio se tuvo una media de 41 cortocircuitos/día; en julio, 23 y en agosto, 14.

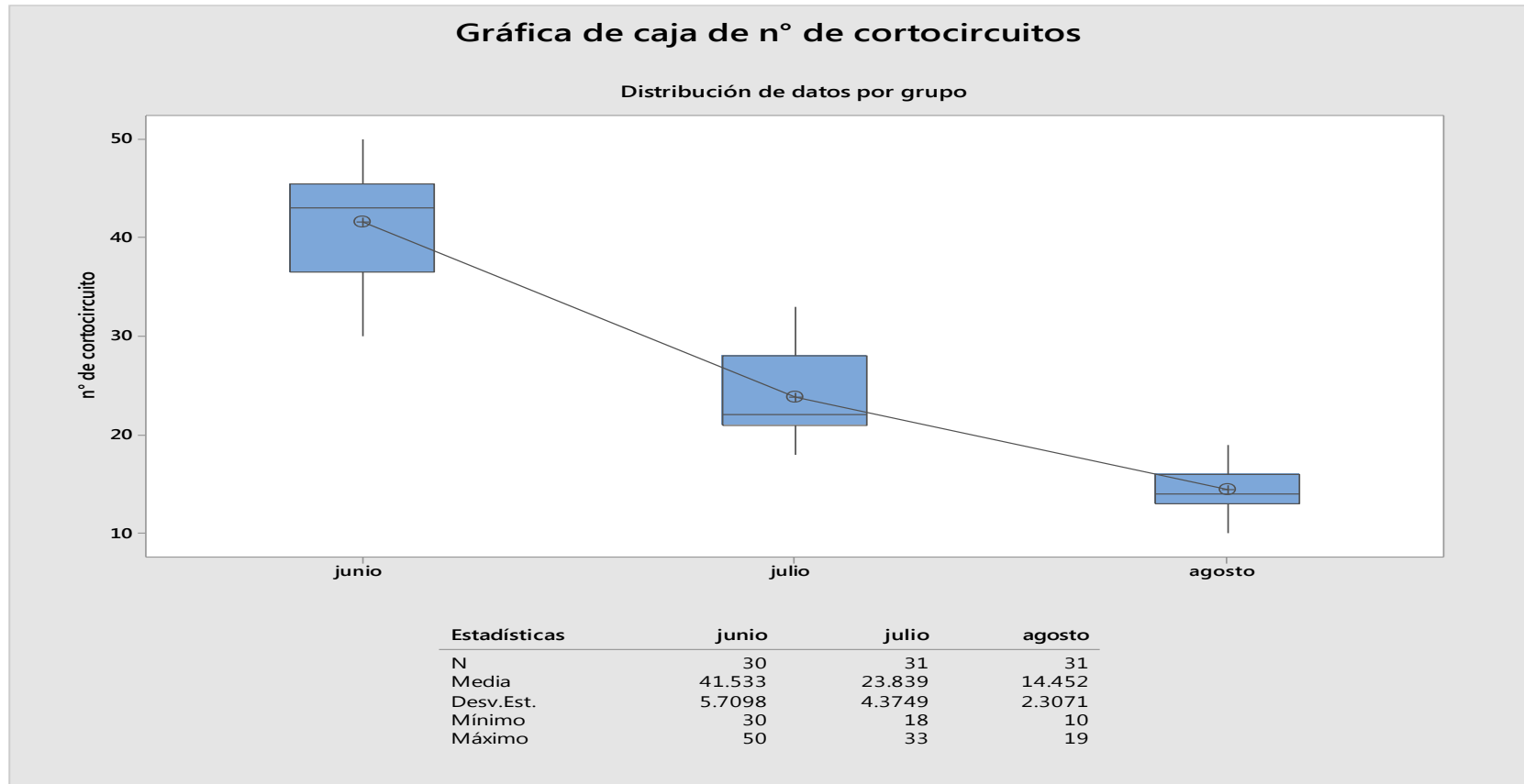


Figura 7.15: Gráfica de caja de cortocircuitos junio-agosto
Fuente: Propia

La figura 7.16 de acuerdo a los datos recopilados, nos indica que a mayor cortocircuito menor eficiencia de corriente, con un r-cuad de 81.5%.

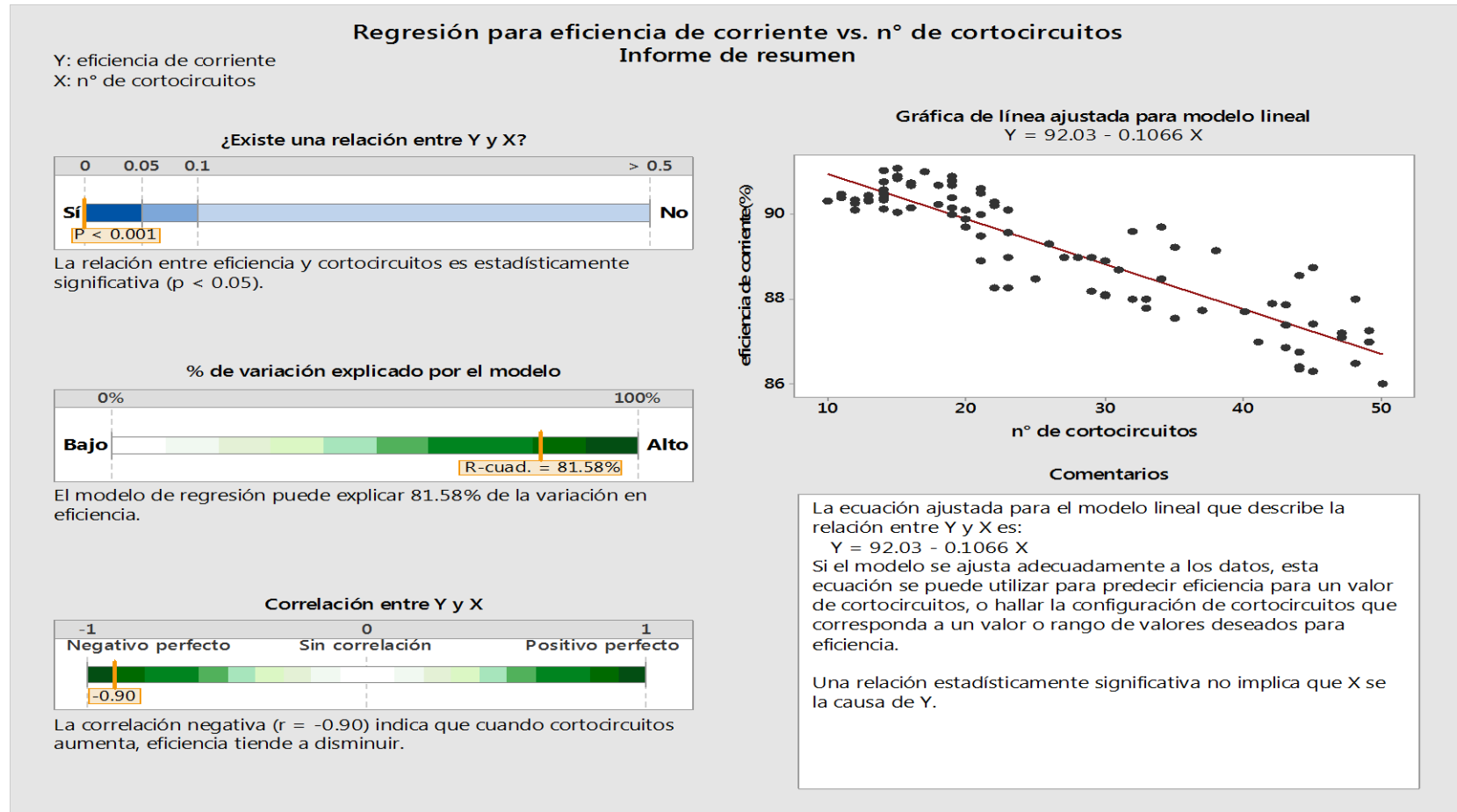


Figura 7.16: Regresión para eficiencia de corriente vs. cortocircuitos

Fuente: Propia

La figura 7.17 es un informe de predicción de acuerdo a los datos obtenidos, de eficiencia de corriente y cortocircuito. Para el caso del objetivo de eficiencia de corriente en la Planta de estudio que es de 91.85%, si se reemplaza en la ecuación de la figura 7.16, corresponde a 2 cortocircuitos. Cabe mencionar que existen otras variables de impacto en eficiencia de corriente a como lo son calidad de la solución pura, temperatura de electrolito, ciclo de succión y planchado, etc.

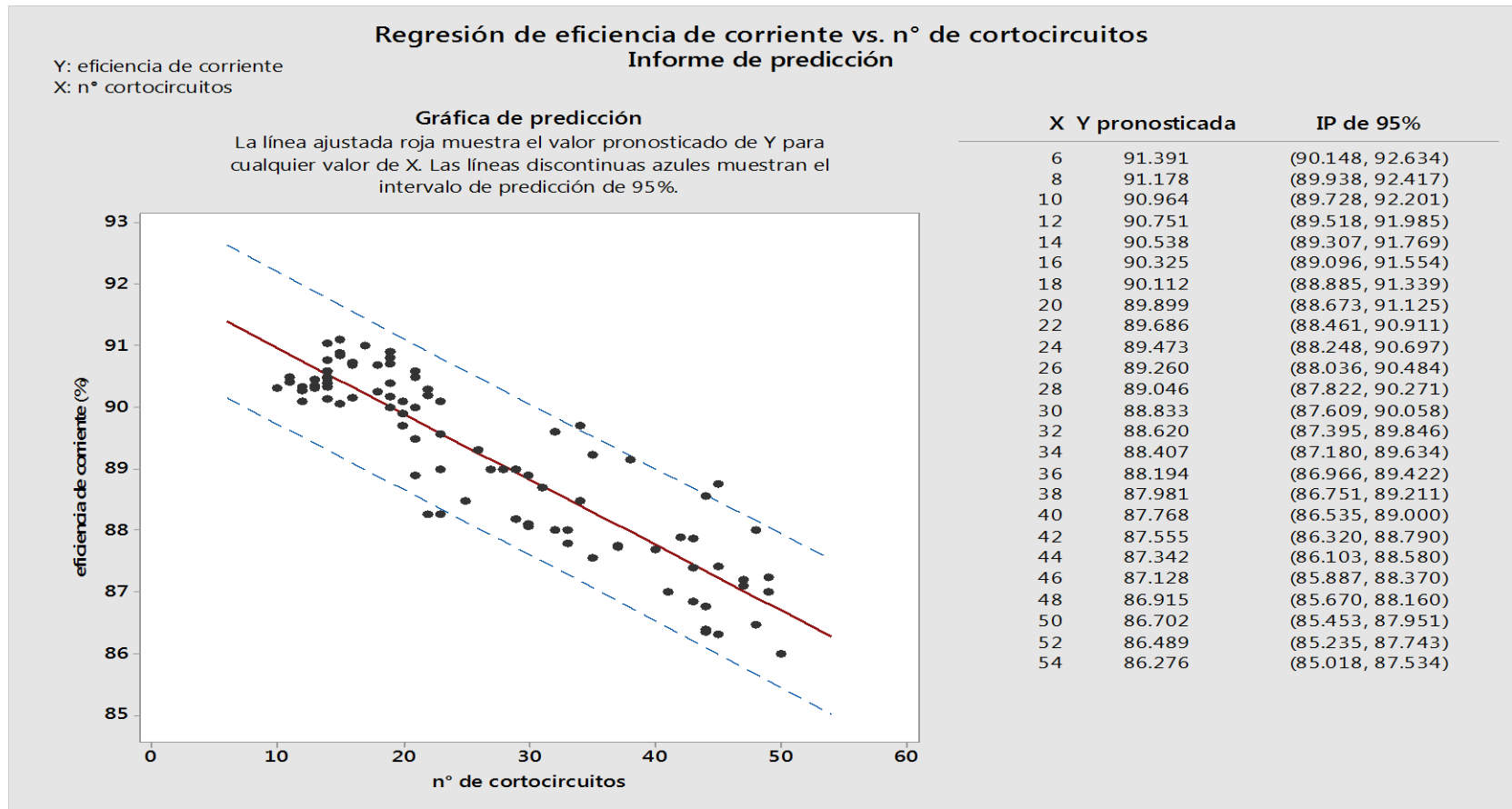


Figura 7.17: Gráfica de predicción para eficiencia de corriente y cortocircuito

Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- Se identificó las causas de ocurrencia de cortocircuitos en la electrodeposición de zinc en el periodo junio-agosto donde se clasificó en 2 grupos principales, los cortocircuitos por su origen en el ánodo y por su origen en el cátodo, cada uno con 4 causas de manifestación de cortocircuito. También se detectó presencia de cortocircuito por mal diseño de bandejas de soporte de barra el cual representó el 63% de causas de acuerdo a la evaluación. Se realizó el procedimiento de corrección de las causas de cortocircuitos (pág. 96) y se elaboró un plan de acción (pág. 118) para minimizar su aparición.
- El tiempo de vida de materiales aislantes, en contacto con electrodos cortocircuitados, disminuye; ya que requieren ser reemplazados en un menor tiempo de lo previsto y algunos requieren corte de corriente para ser cambiados lo que provoca pérdida de producción, esto nos indica la importancia de la corrección de cortocircuitos
- De la correlación de cantidad de ocurrencias de cortocircuito y cantidad de plomo en láminas de zinc contaminadas se obtiene una relación directamente proporcional (figura 6.14), a mayor cantidad de cortocircuitos, mayor % Pb contaminante en láminas de zinc.

- De acuerdo al estudio, el ánodo en un periodo de 18 meses, tiene deformación del cuerpo en el largo, ancho y espeso, teniendo en cuenta la cantidad de planchado. A la vez se relacionó que a mayor tiempo de vida de ánodos, mayor cantidad de cortocircuito.(fig. 6.13)
- En un rango de 62°C-116°C no hubo presencia de cortocircuito según los datos mostrados; sin embargo la temperatura mínima de presencia de al menos un cortocircuito fue de 94°C que está dentro del rango de temperatura donde no se encontró cortocircuito esto se explica debido al recalentamiento de barra por sulfatación por la falta de limpieza con agua a presión de las barras; ya que no se quiere tener presencia de cortocircuitos, se establece 94°C como temperatura de barra mínima para inspeccionarlos.
- Las causas de cortocircuito presentaron temperaturas en su mayoría por encima de 100°C, siendo el desalineamiento de bandeja con 178°C en promedio el que tuvo picos por encima de 200°C; depósito sobre pedazo de lámina 172°C como promedio de temperatura de barra; crecimiento de bióxido en el ánodo tuvo las temperaturas más bajas siendo ésta de 94°C.
- El estudio técnico de ocurrencia de cortocircuitos en electrodeposición de zinc, es para mejorar la eficiencia de corriente, lo cual implicó disminuir costos en consumo de energía siendo en el periodo marzo-mayo de 3335 kW/t y para agosto de 3298kW/t, donde se ahorró por reducción del consumo de energía 56 173.4 US\$. A la vez se tuvo un incremento en eficiencia de corriente de 88.28% en el periodo marzo-mayo a 89.21% en el periodo junio-agosto; por lo que la ganancia por incremento de producción ascendió a 280 344.97 US\$.

RECOMENDACIONES

- Continuar con las inspecciones de cortocircuitos en la Refinería de Votorantim Metais, para evitar minimizar su aparición.
- Realizar cambios de bandejas con nuevo diseño de acuerdo a programación en la Refinería de Votorantim Metais.
- Se recomienda evaluar otro tipo de material plástico para la fabricación de separador de cuerpo de ánodo, soporte de barra, soporte de cabezal de cátodo y ánodo, separador de cabezal de ánodo.
- Se recomienda la adquisición de un nuevo polipasto de uso exclusivo del escáner.
- Se recomienda evaluar mejorar el sistema de lavado de barras con manguera a presión.
- Se sugiere mejorar el programa de detección de cortocircuitos con escáner, introduciendo en su función la ubicación exacta

del cortocircuito y su respectiva temperatura.

- Se sugiere evaluar detección de cortocircuitos mediante otras técnicas como gausiómetro, y medición de voltajes.
- Para estudios posteriores, se sugiere realizar estudios de influencia de dosificación de reactivos en aparición de cortocircuitos.

BIBLIOGRAFÍA

- a) Ascuña, V. & Bolaños, S., (2005), Electrometalurgia, Universidad Nacional San Agustín. Arequipa.
- b) Mantell, C., (1980), Ingeniería Electroquímica, Edit. Reverté, España- Barcelona.
- c) Ballester, A., Verdeja, L. & Sancho, J., (2010), Metalurgia Extractiva, Edit. Síntesis, España
- d) Empresa Outotec, (2010), Manual de servicio - Planta de Electrólisis Votorantim Metais Planta Cajamarquilla 320K, Perú- Lima.
- e) Votorantim Metais, (2016), Manual del Proceso Productivo, Perú-Lima.

- f) Votorantim Metais, (2015), Memoria descriptiva del Proceso. Perú- Lima.
- g) Neely, J., (2000), Metalurgia y Materiales Industriales, Edit. Limusa, México.
- h) Morales, A., (2000), Electrometalurgia, Universidad Católica del Norte, Antofagasta-Chile.
- i) Henríquez, J., (2011), Tesis de Estudio de eficiencia energética utilizando Tecnología Optibar, Universidad de Concepción, Chile
- j) Fernández, E., (2015), Tesis de Propuesta para Mejorar la Calidad Catódica en el Proceso de Descubrizado en Codelco División Ventanas, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- k) Gonzales, J., (1982), Informe de prácticas pre-profesionales realizada en la Refinería de Zinc de Cajamarquilla de la empresa minera del Perú, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho- Perú.
- l) Free, M., & Houlachi, G., (2012), Electrometallurgy, Edit. Willey, Florida- USA.
- m) Chang, R., (2005), Mejora continua de procesos, Edit. Granica, Buenos Aires- Argentina.
- n) Walpole, R. & Myers, R., (2008), Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Edit. Pearson, México.
- o) Henríquez, J., (2016), Mitigación y Detección de Anomalías en Sistemas de Distribución de Corrientes en Hidrometalurgia de Cobre, Universidad de Concepción, Chile.
- p) Gonzales, A., (2002), A review of the zinc electrowinning process, Teckcominco, Canadá.
- q) Nicol, M., (2010), The electrowinning of metal, USA.

Referencia Electrónica

- a) Felipe Díaz del Castillo. (2008). Principios de electrólisis. Recuperado de http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/principios%20de%20electrolisis.pdf

- b) Carla Aguilera Rojas. (2008) Curso electroobtención. Recuperado de http://www.academia.edu/9823593/Presentacion_Electro_obtencion
- c) Codelco. (1999). Procesos de electroobtención. Recuperado de https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_electroobtencion_celdaselectroliticas.asp
- d) Electrometalurgia II. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/232512179/Electrometalurgia-II>
- e) Formación de cortocircuitos EW. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/331107272/Formacion-de-Cortos-Circuitos-EW>
- f) Teoría EW. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/71476571/Teoria-EW>
- g) Pablo E. Aqueveque. & Eduardo P. Wiechmann. (2010). System for the Measurement of Cathodic Currentsin Electrorefining Processes That EmployMulticircuital Technology. Recuperado de http://www.academia.edu/21554340/System_for_the_Measurement_of_Cathodic_Currents_in_Electrorefining_Processes_That_Employ_Multicircuital_Technology

ANEXOS

ANEXO N°1: DATOS PARA ANÁLISIS COMPARATIVO DE VARIABLES PERIODO MARZO-MAYO

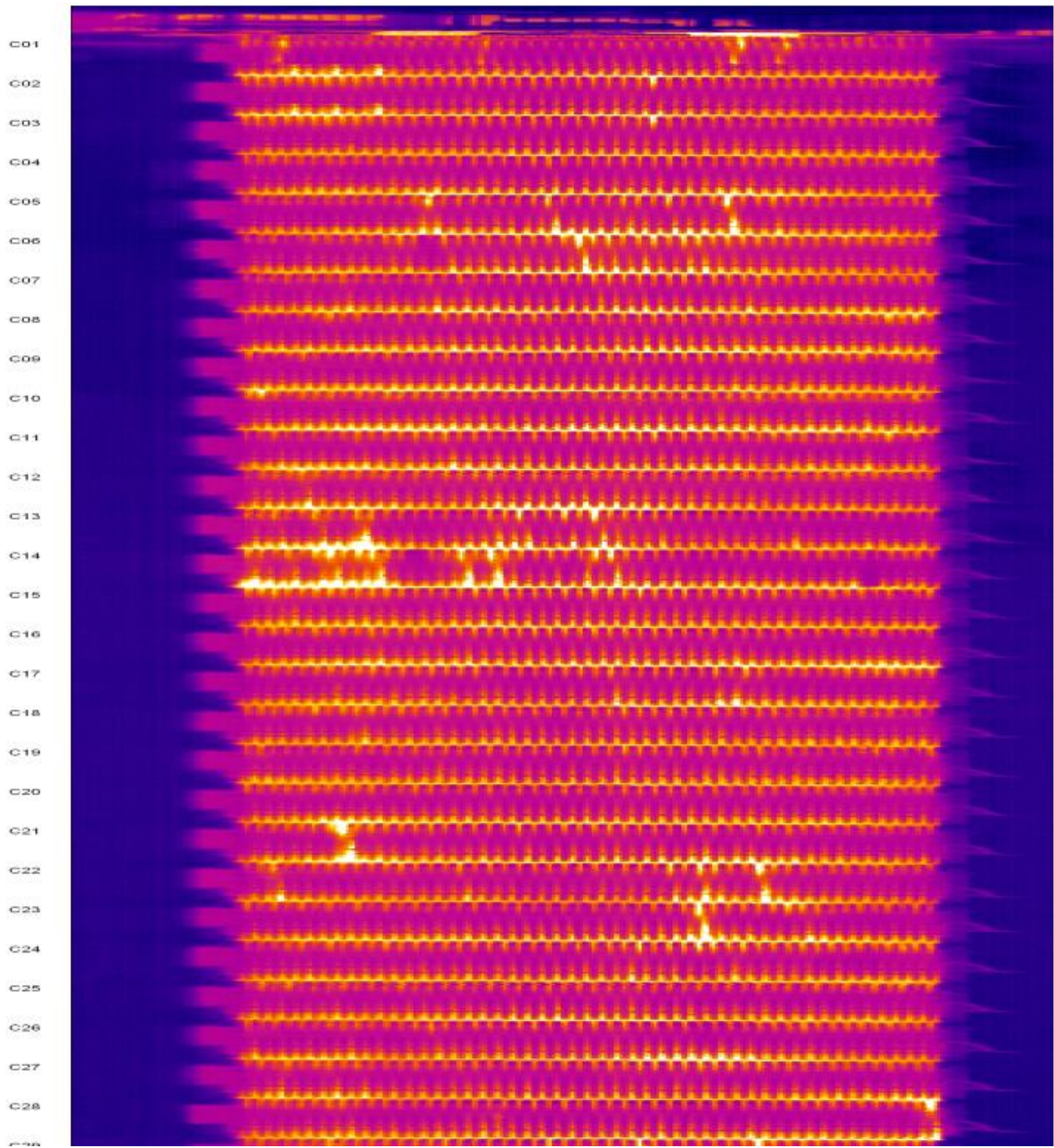
FECHA	Temperatura de electrolito (°C)	Sb en solución pura(mg/L)	Cu en solución pura(mg/L)	Fe en solución pura(mg/L)	Zn en solución pura (g/L)	peso depósito/ cátodo (Kg)	ciclo de planchado (días)	ciclo de succión (días)	Eficiencia de corriente diaria (%)	cantidad de cortocircuito/ día	consumo de corriente (KW/TM)
01-mar	40	0.012	0.140	2.5	149.5	73	9	11	86.30	40	3245.50
02-mar	41	0.008	0.137	2.5	146.3	75	8	9	85.62	35	3322.37
03-mar	40	0.012	0.140	2.1	146.1	75	8	9	85.92	38	3388.45
04-mar	39	0.012	0.133	1.8	149.7	74	8	11	86.73	37	3367.13
05-mar	39	0.010	0.135	1.9	146.0	76	7	9	89.50	35	3352.92
06-mar	40	0.011	0.127	2.0	151.1	77	7	7	88.40	36	3363.67
07-mar	40	0.011	0.118	2.2	141.2	79	8	8	88.85	41	3332.41
08-mar	39	0.013	0.136	2.0	149.0	79	8	8	87.49	43	3371.12
09-mar	38	0.013	0.137	2.0	147.3	75	8	7	90.10	22	3347.07
10-mar	38	0.010	0.122	2.4	144.5	76	8	8	90.02	18	3247.21
11-mar	37	0.012	0.108	2.2	147.3	76	7	8	90.27	20	3303.93
12-mar	37	0.015	0.113	2.0	149.8	76	7	6	90.37	19	3290.76
13-mar	38	0.013	0.150	2.2	147.8	75	7	6	90.19	17	3284.18
14-mar	38	0.011	0.148	2.3	146.2	77	8	7	90.22	18	3284.87
15-mar	37	0.013	0.139	2.1	146.0	76	8	7	90.19	27	3331.35
16-mar	36	0.012	0.132	2.0	137.0	77	8	7	90.16	14	3232.59
17-mar	37	0.011	0.117	2.2	134.8	78	7	8	90.17	17	3295.87
18-mar	37	0.014	0.113	2.5	147.0	77	6	8	90.26	14	3301.78
19-mar	38	0.019	0.120	2.1	149.6	76	7	7	90.73	17	3301.47
20-mar	40	0.016	0.083	2.2	156.0	79	10	10	87.95	25	3310.86
21-mar	40	0.015	0.087	2.2	153.8	78	9	11	86.30	35	3329.60

22-mar	40	0.013	0.110	2.0	147.8	79	9	9	87.00	32	3358.73
23-mar	38	0.013	0.097	2.1	147.2	78	9	9	89.40	25	3349.06
24-mar	39	0.012	0.090	2.0	150.2	79	8	8	89.76	20	3317.25
25-mar	37	0.011	0.092	2.0	147.1	81	8	8	89.54	17	3313.63
26-mar	38	0.010	0.083	2.1	157.6	77	8	7	90.93	12	3270.82
27-mar	36	0.013	0.090	2.3	159.5	75	7	8	90.40	18	3269.45
28-mar	37	0.009	0.100	2.6	149.1	76	9	7	90.07	18	3131.87
29-mar	36	0.010	0.097	3.1	145.9	77	9	7	91.08	16	3295.42
30-mar	38	0.008	0.088	2.5	148.3	76	8	6	90.84	19	3241.40
31-mar	39	0.013	0.110	2.3	154.3	82	8	9	87.67	36	3363.64
01-abr	38	0.011	0.118	2.5	153.5	82	8	8	88.02	33	3345.68
02-abr	37	0.007	0.118	2.3	153.6	75	8	8	90.20	16	3269.67
03-abr	39	0.009	0.110	2.5	147.7	79	8	7	87.42	22	3311.02
04-abr	40	0.008	0.107	2.3	148.7	77	8	7	87.25	29	3421.88
05-abr	39	0.010	0.125	2.0	145.2	77	9	9	86.48	35	3296.67
06-abr	39	0.012	0.128	1.8	142.6	78	8	9	86.85	30	3343.85
07-abr	39	0.009	0.127	1.9	148.3	78	9	8	86.77	39	3400.88
08-abr	38	0.012	0.110	2.3	149.7	76	9	7	86.36	23	3378.55
09-abr	38	0.010	0.105	2.2	150.3	75	8	7	90.15	30	3373.01
10-abr	39	0.009	0.105	2.5	144.5	76	8	7	88.75	21	3310.75
11-abr	38	0.008	0.112	1.9	141.1	79	9	8	87.41	28	3328.78
12-abr	37	0.011	0.112	2.1	136.8	78	9	7	87.87	29	3317.08
13-abr	37	0.011	0.102	2.3	139.8	79	8	8	86.31	31	3344.92
14-abr	37	0.010	0.132	2.1	142.2	78	9	8	87.80	24	3262.37
15-abr	37	0.006	0.168	2.1	141.5	75	10	8	87.10	30	3332.50
16-abr	37	0.007	0.160	2.2	140.5	76	10	7	89.39	20	3301.91
17-abr	38	0.013	0.152	2.4	142.3	75	10	8	88.56	24	3319.17
18-abr	38	0.014	0.128	2.2	142.3	78	10	8	87.90	28	3306.26

19-abr	38	0.013	0.145	2.4	148.6	76	11	8	87.70	29	3286.05
20-abr	38	0.010	0.113	1.9	147.3	76	11	8	87.74	32	3317.16
21-abr	38	0.017	0.122	2.1	144.2	75	10	8	87.56	29	3361.00
22-abr	39	0.011	0.133	1.8	144.6	76	10	8	87.75	36	3327.63
23-abr	38	0.014	0.125	2.5	144.8	77	10	7	89.16	32	3306.31
24-abr	39	0.015	0.135	2.1	144.9	79	9	7	88.47	28	3393.11
25-abr	38	0.015	0.118	2.0	144.5	80	10	7	87.79	36	3368.97
26-abr	38	0.010	0.123	2.1	149.6	80	10	7	88.08	41	3407.17
27-abr	39	0.010	0.122	2.6	146.8	80	10	7	89.23	36	3398.91
28-abr	37	0.012	0.128	2.3	149.1	75	9	7	90.26	22	3361.29
29-abr	38	0.013	0.127	2.5	145.3	78	9	7	90.02	19	3402.92
30-abr	38	0.012	0.115	2.3	143.9	77	9	7	90.40	16	3371.10
01-may	38	0.011	0.140	2.2	144.3	76	8	7	89.10	26	3355.28
02-may	40	0.012	0.128	2.1	142.4	76	8	7	87.00	29	3386.57
03-may	39	0.011	0.124	1.9	143.9	75	8	7	88.00	34	3357.64
04-may	39	0.013	0.108	2.3	144.5	77	8	7	87.00	15	3380.73
05-may	38	0.013	0.125	2.6	142.8	78	8	8	86.00	24	3379.18
06-may	36	0.011	0.123	2.4	139.2	77	9	7	84.79	19	3373.23
07-may	37	0.010	0.138	2.6	144.6	79	9	8	84.54	34	3454.92
08-may	36	0.011	0.120	2.2	144.2	77	9	8	86.45	22	3436.51
09-may	36	0.011	0.115	3.0	141.5	80	10	8	86.34	18	3449.25
10-may	37	0.011	0.138	2.9	142.9	79	10	8	86.16	16	3383.64
11-may	37	0.010	0.128	2.7	142.3	80	10	8	87.36	36	3383.79
12-may	37	0.009	0.137	3.0	141.2	79	9	8	87.33	43	3361.68
13-may	36	0.011	0.137	2.2	142.5	77	9	8	87.35	35	3366.92
14-may	37	0.014	0.135	2.7	143.1	78	9	8	87.38	37	3297.12
15-may	39	0.012	0.153	2.5	142.6	79	9	8	87.50	30	3357.98
16-may	38	0.009	0.145	2.5	137.8	79	9	8	87.68	29	3305.33

17-may	38	0.011	0.133	2.1	144.2	78	8	7	87.87	35	3359.80
18-may	37	0.010	0.110	2.0	144.3	79	8	7	87.52	33	3364.86
19-may	39	0.011	0.142	2.5	147.5	78	8	7	87.99	29	3366.59
20-may	38	0.007	0.108	2.2	149.6	79	8	7	87.92	31	3354.38
21-may	38	0.010	0.125	2.2	146.3	78	8	7	88.10	29	3385.82
22-may	38	0.008	0.130	2.3	147.9	78	9	7	88.14	26	3341.57
23-may	38	0.008	0.117	2.9	146.6	79	9	7	88.15	23	3315.48
24-may	37	0.012	0.118	3.0	145.6	79	9	7	88.18	31	3263.32
25-may	38	0.007	0.125	3.6	148.2	80	9	7	88.25	31	3343.23
26-may	37	0.008	0.117	2.8	146.8	78	9	8	88.53	27	3309.04
27-may	36	0.009	0.127	2.6	151.1	77	8	7	88.48	30	3216.32
28-may	37	0.007	0.117	2.7	151.3	77	8	7	88.26	29	3356.71
29-may	37	0.008	0.132	2.7	149.3	79	8	7	88.27	32	3385.06
30-may	37	0.010	0.125	2.5	147.8	79	8	7	89.49	19	3345.43
31-may	37	0.010	0.122	2.3	146.6	78	8	7	89.57	21	3302.81

ANEXO N°2: REPORTE DE MÉTODO TERMOGRÁFICO- CON CORTOCIRCUITO



ANEXO N°3: REPORTE DE MÉTODO TERMOGRÁFICO- SIN CORTOCIRCUITO

