

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“EVALUACIÓN DEL CIRCUITO DE ELECTRODEPOSICIÓN EN LA
PLANTA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA MINERA DE COBRE
UBICADA EN LA REGIÓN DE AREQUIPA”**

Tesis presentada por los Bachilleres:

MICHAEL STEVEN COAQUIRA PINTO

MIGUEL YANA DIAZ

Para optar el Título Profesional de

INGENIEROS QUÍMICOS

Arequipa – Perú
2021

DEDICATORIA:

A nuestros padres que han sido parte de nuestra formación profesional, inculcándonos con buenos sentimientos, hábitos y valores, que nos siguen acompañándonos a cada paso por el camino de la vida.

Presentación

Señor. Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos
Señor. Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Química
Señores Ingenieros miembros del Jurado

En cumplimiento con lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de Procesos de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, es que pongo a disposición de ustedes la tesis titulada **“EVALUACIÓN DEL CIRCUITO DE ELECTRODEPOSICIÓN EN LA PLANTA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA MINERA DE COBRE UBICADA EN LA REGIÓN DE AREQUIPA”** a fin de que sea evaluada de acuerdo al reglamento y se me permita obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico. La presente tesis se desarrolla para la mejora del sistema de producción de la planta desde la evaluación de las muestras de los electrolitos hasta su electrodeposición; para ello se esquematiza el desarrollo en los capítulos siguientes:

En el **capítulo primero** se describe los aspectos generales del trabajo con sus antecedentes, justificaciones, objetivos, e hipótesis.

En el **capítulo segundo** se detalla el fundamento teórico del proceso de extracción de cobre utilizado en la empresa minera.

En el **capítulo tercero** hace referencia a la planificación del desarrollo experimental y de evaluación realizado en el área de electrodeposición.

En el **capítulo cuarto** se presenta la presentación y análisis de resultados.

En el **capítulo quinto**; se presenta la valorización de los costos operativos para las muestras evaluadas para la obtención de los resultados.

Finalmente se presenta las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y los anexos; para definir mejor y ampliar el entender el presente estudio.

Resumen

En la minería cuprífera son bien conocidos los procesos de flotación e hidrometalurgia del cobre. En la hidrometalurgia del cobre para la recuperación del cobre de la solución se utiliza el proceso de electrodeposición conocido industrialmente como “Electrowinning”. Este proceso operacionalmente trabaja con corriente eléctrica como fuente de energía principal. En este contexto, se debe tener en cuenta que los valores de eficiencia de corriente son bajos cuando indican altos consumos de energía y bajas velocidades de producción.

En consecuencia, las eficiencias de corriente bajas son resultado de las altas concentraciones de Fe en el electrolito debido a que consume parte de la corriente catódica, consecuentemente los iones resultantes pueden ser reoxidados por el oxígeno disuelto o por el oxígeno que evoluciona en el ánodo.

En tal sentido, con la adecuada realización de la evaluación del circuito de electrodeposición en la planta industrial de una empresa minera de minerales de cobre a gran escala, ajustando sus variables operativas, es posible mejorar la eficiencia de recuperación de cobre; siendo necesario determinar las eficiencias de las corrientes y voltajes utilizados en el circuito de celdas de electrodeposición.

En el trabajo se lograron reconocer las causas más importantes de la baja de eficiencia de corriente, como así algunas de ellas también son causa de baja calidad del cátodo, las que son principalmente la formación de nódulos.

Además, la operación con celdas de electrodeposición con altas densidades de corriente permite el ahorro en capital de inversión y en el capital de operación ya que implica usar una menor cantidad de celdas por unidad de cobre electrodepositado; en consecuencia, al aumentar la

eficiencia nos ayudaría a obtener una mejor electrodeposición con un porcentaje menor de concentración de hierro, para que no afecte a nuestro cátodo final.

Palabras claves – electrodeposición, minera, cortocircuito, eficiencia, corriente.

Abstract

In copper mining, the copper flotation and hydrometallurgy processes are well known. In copper hydrometallurgy, the electrodeposition process known industrially as "Electrowinning" is used to recover copper from the solution. Operationally, this process works with electric current as the main source of energy. In this connection, it must be taken into account that the current efficiency values are low when they indicate high energy consumption and low production rates.

Consequently, low current efficiencies are the result of high Fe concentrations in the electrolyte because it consumes part of the cathodic current, consequently the resulting ions can be reoxidized by the dissolved oxygen or by the oxygen that evolves in the anode.

In this sense, with the proper evaluation of the electrowinning circuit in the industrial plant of a large-scale copper ore mining company, adjusting its operating variables, it is possible to improve the copper recovery efficiency; being necessary to determine the efficiencies of the currents and voltages used in the electrowinning cells circuit.

In the work, the most important causes of the low current efficiency were recognized, as well as some of them are also the cause of low cathode quality, which are mainly the formation of nodules.

In addition, the operation with electroplating cells with high current densities allows savings in investment capital and operating capital since it implies using a smaller amount of cells per unit of electrodeposited copper; consequently, increasing the efficiency would help us to obtain a better electroplating with a lower percentage of iron concentration, so that it does not affect our final cathode.

Key words - electrowinning, mining, short-circuit, efficiency current.

Introducción

Conceptuar la electrodeposición del cobre (EW) es la etapa final del proceso hidrometalúrgico, consiste en la obtención de cátodos de alta pureza, los que se producen sumergiendo dos electrodos (ánodo y cátodo) en una solución electrolítica de sulfato de cobre procedente de la planta de SX (extracción por solventes) y a través del paso de la corriente eléctrica.

Resultados del proceso electrolítico:

- Deposición del cobre en el cátodo
- Evolución de oxígeno en el ánodo
- El electrolito se enriquece en ácido y se empobrece en cobre

Todo ello se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto CuSO_4 y H_2SO_4 y que proviene de la planta SX (extracción por solventes). En la celda ocurren reacciones electroquímicas de Red-Ox provocadas por la energía eléctrica. En el cátodo el ion cúprico es reducido a cobre por los electrones suplidos por la corriente y que vuelven dicho electrodo de polaridad negativa.

En el electrodo positivo hay un déficit de electrones, y se descompone agua generándose oxígeno gaseoso que burbujea en la superficie del ánodo y además ácido sulfúrico. Los aditivos agregados al proceso de electrodeposición son: cobalto (protege los ánodos), galactasol (para una buena deposición), FC-1100 (depresor de neblina) y ácido (para una concentración adecuada).

Se determinó hasta cuanto podría disminuir el consumo de corriente si se aumentaría nuestra eficiencia; en el trabajo realizado y se logró identificar algunas soluciones para lograr

mejorar la eficiencia.

Tabla de Contenidos

<i>Presentación</i>	<i>iii</i>
<i>Resumen</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>vi</i>
<i>Introducción</i>	<i>vii</i>
Capítulo I Generalidades	12
1.1. Aspectos generales	12
1.2. Descripción del problema.....	12
1.3. Fundamentos de la investigación.....	13
1.4. Objetivos de la tesis.....	14
1.4.1. Objetivo General.....	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
1.5. Hipótesis.....	14
1.6. Justificación.....	15
1.6.1. Justificación Tecnológica	15
1.6.2. Justificación Económica	15
1.6.3. Justificación Ambiental	15
1.6.4. Justificación Social	15
1.7. Variables.....	16
1.8. Alcances y limitaciones.....	16
1.9. Implementación.....	17
1.9.1. Diagrama de la investigación.....	17
1.9.2. Cronograma de actividades.....	17
1.9.3. Duración total de la investigación	19
Capítulo II Marco Teórico	20
2.1. Descripción del proceso de extracción de cobre	20
2.1.1. Configuración Actual De Los Trenes Antiguos En Planta:.....	21
2.2. Electrodeposición	26
2.2.1. Definición	26
2.2.2. Descripción del proceso de electrodeposición.....	27
2.2.3. Variables en dicho proceso.....	27
2.3. Cortocircuitos	29

2.4. Falsos contactos.....	29
2.5. Fugas de corriente.....	30
2.6. Descripción de la planta de electrodeposición	30
2.6.1. Láminas de arranque.....	30
2.6.1.1. Definición.....	30
2.6.1.2. Partes de la lámina de arranque.....	31
2.6.2. Celdas comerciales	31
2.6.2.1. Definición.....	32
2.6.2.2. Partes de celdas comerciales	32
2.6.3. Descripción de tanques	32
2.6.4. Rectificadores y accesorios.....	33
Capítulo III Planificación experimental.....	35
3.1. Metodología de la experimentación	35
3.2. Celdas de muestreo y frecuencias.....	36
3.3. Desarrollo del diagrama de experimentación	39
3.4. Materiales y equipos.....	41
3.5. Definiciones del modelo estadístico:.....	42
3.6. Recopilación de información.....	42
3.7. Tratamiento estadístico.....	44
3.7.1. Tablas.....	44
3.7.2. Construcción de diagramas.....	53
Capítulo IV Presentación y análisis de resultados	57
4.1. Análisis de resultados	57
4.1.1. Comportamiento	57
4.1.2. Eficiencia disminuyendo la corriente eléctrica.....	59
4.2. Interpretación de los diagramas.....	60
4.2.1. Análisis de resultados	63
Capítulo V Evaluación económica	65
5.1. Investigación realizada en planta.....	65
5.2. Interpretación económica de la eficiencia optima	65
5.3. Interpretación económica de la eficiencia optima	66
<i>Conclusiones</i>	68
<i>Recomendaciones</i>	69
<i>Referencias Bibliográficas</i>	70
	ix

Contenido de Figuras

Figura 1.Secuencia de la investigación.....	Pág 17
Figura 2.Sistema de conexión de trenes como parte de la electrodeposición.	Pág 22
Figura 3.Conexión de trenes como parte de la electrodeposición	Pág 24
Figura 4.Diagrama de concentración de hierro en función del tiempo.....	Pág 53
Figura 5.Diagrama de temperatura en función de la eficiencia de corriente	Pág 54
Figura 6.Diagrama de amperaje en función de la eficiencia de corriente.....	Pág 54
Figura 7.Diagrama de la eficiencia de corriente en los diversos experimentos	Pág 55
Figura 8.Diagrama de la eficiencia de corriente eléctrica en diversos experimentos	Pág 56
Figura 9.Diagrama de variación de temperatura en función de la eficiencia de corriente	Pág 60
Figura 10.Diagrama de eficiencia de corriente (Y_{cal}) en función de las experimentaciones	Pág 61
Figura 11.Diagrama de eficiencia de corriente ($Y_{exp.}$) en función de experimentaciones	Pág 62
Figura 12.Diagrama de eficiencia de corriente experimental y la eficiencia de corriente calculada en función de experimentaciones.....	Pág 63

Contenido de Tablas

Tabla 1.	16
Variables independientes y dependientes de la investigación	16
Tabla 2.	18
Cronograma de actividades.....	18
Tabla 3.	18
Desarrollo de tareas.....	18
Tabla 4.	23
Revolución de los trenes de mezclado	23
Tabla 5.	25
Trenes de extracción	25
Tabla 6.	38
Celdas con fugas de corriente en las diferentes filas	38
Tabla 7.	42
Variables de diseño.....	42
Tabla 8.	44
Niveles de variables para diseño factorial con replicas en el centro.....	44
Tabla 9.	45
Cuadro experimental del diseño factorial	45
Tabla 10.	46
Cuadro Experimental de diseño	46
Tabla 11.	47
Matriz codificada para el cálculo de efectos.....	47
Tabla 12.	48
Cálculo de coeficientes del modelo matemático.....	48
Tabla 13.	50
Análisis de varianza para diseño con replica en punto central	50
Tabla 14.	51
Análisis de residuos	51

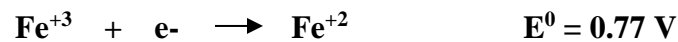
Capítulo I

Generalidades

1.1. Aspectos generales

La eficiencia de corriente (EC) es definida como la razón entre la cantidad de cobre depositada y la que se debería haber depositado teóricamente según la ley de Faraday (indicado como la fracción de corriente que es efectivamente utilizada en la reacción de deposición del cobre) (Domic, 2021).

Las bajas eficiencia de corriente llega a ser el resultado de las altas concentraciones de Fe en el electrolito según:



Así, por ejemplo, si la EC es de 0.8 (80%), significa que solamente el 80% de la corriente está siendo útilmente utilizado y el 20% restante está siendo empleado en fugas, falsos contactos y cortocircuitos.

A diferencia de lo que ocurre en la celda electrodeposición (EW), las eficiencias de corriente efectivas, pueden ser muy altas, entre 95 y 98%, ya que se trata de un proceso con muy pocas reacciones secundarias que puedan hacer mal uso de dicha energía (Domic, 2021).

En la EW, hay muchas reacciones posibles tanto catódicas como anódicas, potencialmente competitivas a la reacción principal, de modo que la desviación del 100% de uso teórico de la corriente es explicable por varias razones.

1.2. Descripción del problema

Tener en cuenta que los valores de eficiencia de corriente son bajos cuando indican altos consumos de energía y bajas velocidades de producción.

Por ello las eficiencias de corriente bajas son resultado de las altas concentraciones de Fe en el electrolito debido a que consume parte de la corriente catódica, siendo así los iones resultantes pueden ser reoxidados por el oxígeno disuelto o por el oxígeno que evoluciona en el ánodo.

Por otro lado la presencia de los cortocircuitos, entre ánodo y cátodo, así como entre celda y celda, o por fugas de corriente a través de las estructuras de la nave electrolítica o de las propias celdas, o fugas de corriente suelen ser las causas de pérdida de corriente; dicha investigación se realizara para lograr disminuir las fugas de corriente, controlar los falsos contactos y los cortocircuitos colocando aisladores, cambiando las barras corroídas y arreglando correctamente el manifold para disminuir los cortocircuitos, manteniendo limpieza en todas las tareas.

1.3. Fundamentos de la investigación

La investigación realizada esta fundamentada en:

- Las eficiencias de corrientes efectivas entre 95 y 98% deben ser consideradas en planta industrial, debido a que se trata de un proceso con muy pocas reacciones secundarias.
- Los bajos valores de eficiencia en las celdas de electrodeposición, nos indican altos consumos de energía (por toneladas de cátodo) y también indican las bajas velocidades de producción.
- La eficiencia de corriente conceptualmente corresponde a la relación que se establece entre la deposición del metal real y la deposición teórica, de acuerdo con la cantidad de corriente eléctrica aplicada.
- Los cortocircuitos originados por la evolución de los nódulos en la superficie de los cátodos, al desarrollarse descontroladamente llega a hacer contacto con el ánodo, atenuaremos dicho problema nivelando el manifold de la celda.

- Existen también los falsos contactos, originándose estos por la utilización de las barras de contacto con alma de fierro que al llegar a un estado de conductividad deja libre al fierro ocasionado el gran calentamiento de la barra, solucionaremos este problema cambiando las barras de contacto corroídas.
- Al conversar con el personal de mantenimiento se detectaron algunas fugas de corriente causadas por pequeñas descargas de corriente logrando disminuirse colocando aisladores en diversas partes.
- Siempre hay que recordar que el metal sólo puede depositarse con la corriente que efectivamente pasa por el electrolito.

1.4. Objetivos de la tesis

1.4.1. Objetivo General

Llevar a cabo la evaluación del circuito de electrodeposición en la planta industrial de una empresa minera de cobre a gran escala en la región de Arequipa.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar la identificación de las formas de control de la eficiencia de corriente en las celdas de electrodeposición.
- Definir las razones de probables pérdidas de corriente en las celdas de electrodeposición.
- Definir las acciones a realizar para poder mejorar la eficiencia de corriente.

1.5. Hipótesis

Es posible que, con la adecuada evaluación del circuito de electrodeposición en la planta industrial de la empresa minera de cobre a gran escala, considerando el ajuste de sus variables operativas, es posible mejorar la eficiencia de recuperación de cobre.

Visto lo anterior, es necesario determinar las eficiencias de las corrientes y voltajes utilizados en el circuito de celdas de electrodeposición.

1.6. Justificación

1.6.1. Justificación Tecnológica

Debido a que en las celdas de electrodeposición no existe una eficiencia alta para el procesamiento de minerales de sulfuros secundarios de cobre debemos de buscar por medios técnicos la eficiencia óptima para mejorar dicho proceso.

La solución para el problema de investigación se basa en establecer una mejora para la eficiencia de corriente en las celdas de electrodeposición.

1.6.2. Justificación Económica

Cualquier mejora en la recuperación de cobre representa un beneficio económico para la empresa minera, esto se traduce en mayores utilidades para sus colaboradores.

Se puede lograr incrementar los beneficios económicos en la planta industrial al conseguir cátodos de mejora calidad o pureza.

1.6.3. Justificación Ambiental

Las adecuadas operaciones y manejo de variables en el proceso de electrodeposición permiten mejorar las condiciones ambientales en la planta industrial y en las zonas de influencia. El gasto de menor corriente eléctrica en el área de electrodeposición representa el ahorro energético presentado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y en los objetivos de la Agenda 2030.

1.6.4. Justificación Social

Las comunidades aledañas de una empresa minera de minerales de cobre a gran escala serán beneficiadas económicamente por medio del incremento del canon minero, consecuencia de

la mayor extracción de cobre y metales de interés en sus procesos. Así mismo, los trabajadores de la empresa serán beneficiados en el incremento de sus utilidades.

1.7. Variables

Las variables de la presente investigación se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 1.

Variables independientes y dependientes de la investigación

Variable Independiente	Variable Dependiente
Temperatura	Eficiencia de corriente eléctrica
Concentración	
Amperaje	

Nota. Fuente: Elaboración propia

1.8. Alcances y limitaciones

Los alcances de la investigación son los siguientes:

- Información adicional conseguida por medio de texto
- Apoyo de los operarios y personal eléctrico
- Disposición de la planta industrial.
- Apoyo de los ingenieros del área de planta industrial

Las limitaciones de la investigación son los siguientes:

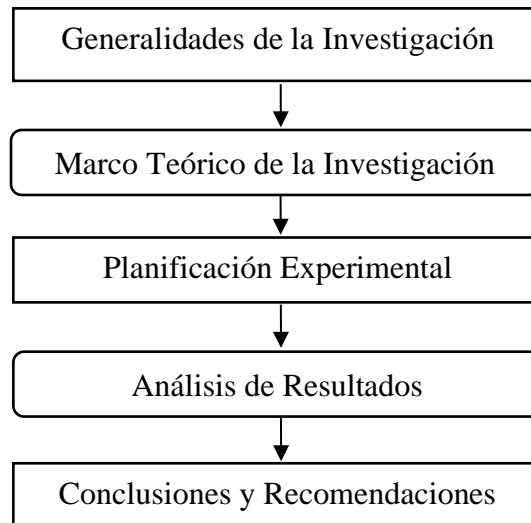
- La niebla acida encontrada en el área de electrodeposición.
- El peligro del área de electrodeposición por el alto amperaje.

1.9. Implementación

1.9.1. Diagrama de la investigación

Para ello se considera el siguiente diagrama.

Figura 1. Secuencia de la investigación



Nota. Fuente: Elaboración propia

1.9.2. Cronograma de actividades

Para ello se tiene en cuenta la siguiente tabla.

Tabla 2.

Cronograma de actividades

Actividad	Tiempo
Investigación Bibliográfica	1 semana
Análisis del problema	1 semana (se sincronizo la actividad de investigación bibliográfica)
Desarrollo de tareas (*)	8 semanas
Realización de la experimentación	2 semanas
Análisis de resultados	1 semana
Desarrollo de las conclusiones	3 días
Desarrollo de las recomendaciones	2 días

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 3.**

Desarrollo de tareas

Tareas	Duración	Objetivo
Cálculo de la eficiencia de corriente en la celda de electrodeposición	2 semanas	Determinación de la eficiencia de corriente real
Búsqueda de fugas de corriente	1 semana	Determinación de las fugas de corriente
Búsqueda de falsos contactos	1 semanas	Determinación de los falsos contactos
Búsqueda de corto circuitos	1 semana	Determinación de corto circuitos

Búsqueda de la mejora para los falsos contactos, los cortos circuitos y fugas de corriente	1 semana	Determinación de información para arreglar las fugas de corriente, los falsos contactos y los cortocircuitos.
Control de las celdas de electrodeposición	1 semana	Seguimiento a las celdas de electrodeposición.
Cálculo de la nueva eficiencia de corriente en la celda de electrodeposición	1 semana	Determinación de la eficiencia óptima en la celda de electrodeposición.

Fuente: Elaboración propia.

1.9.3. Duración total de la investigación

El tiempo de total de la investigación fue de 14 semanas cronológicas.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Descripción del proceso de extracción de cobre

La empresa minera produce diariamente 248 TM aproximadamente de cobre cátodico Grado A de 99.99% de pureza en la planta industrial de extracción por solventes y deposición electrolítica (SX-EW) de la mina ubicada en el distrito de Uchumayo- Arequipa, cuyo proceso es descrito a continuación.

El mineral porfirítico extraído de los tajos es enviado al sistema de chancado que consta de tres etapas: chancado primario, pila de almacenamiento, chancado secundario con sus respectivas zarandas tipo “banana” y chancado terciario. El producto triturado con un tamaño de 80%, -3/8” (-9mm), es enviado para alimentar el circuito de aglomeración. La aglomeración se lleva a cabo en 4 aglomeradores de tambor en paralelo.

A continuación, una faja sobre la superficie de aproximadamente 3,2 km de largo, transporta el mineral aglomerado hacia la plataforma de lixiviación Pad 4. Todo el mineral chancado y aglomerado es colocado en el Pad 4 y lixiviado por 230 días. La solución de lixiviación consiste de una mezcla de raffinate de la planta SX y la solución de avance de los otros Pads.

La extracción por solventes es un método por el cual grandes volúmenes de soluciones ácidas de lixiviación impuras y diluidas que contienen pequeñas cantidades de cobre (cosecha o PLS) se contactan con un producto orgánico (extractante + diluyente) que ocasiona la extracción del cobre de la solución ácida. La transferencia de cobre se realiza en un mezclador; el solvente orgánico ahora cargado contiene casi todo el cobre de la solución ácida de lixiviación, se separa por diferencia de densidades de ésta última en un decantador. La solución ácida resultante (refino

o raff), ahora desprovista de gran parte de cobre, es devuelta a las pilas de lixiviación (Douglas, 1996).

Después de separarse del refino, el orgánico cargado con cobre es tratado con una solución de alta concentración de ácido (electrolito pobre o strip) y el cobre es transferido desde el orgánico al electrolito. Esta solución con alto contenido de cobre (electrolito rico o LS) es enviada a la nave de deposición electrolítica donde el cobre es depositado en láminas de arranque de cobre, producidas en planchas madre de acero inoxidable, desde la solución a través del paso de la corriente eléctrica; luego estas láminas de arranque sirven para el depósito final de los cátodos de cobre comerciales. El orgánico al cual se le ha separado del cobre (orgánico descargado), es retornado a las etapas iniciales del proceso de extracción por solventes para extraer cobre adicional de la cosecha.

En la extracción la cosecha se mezcla con solvente orgánico (LIX 984NC diluido en kerosene), el orgánico extrae selectivamente el cobre disuelto en la cosecha, la extracción global de cobre ocurre en las etapas conectadas una en paralelo y dos en serie (trenes antiguos) y en dos etapas conectadas en serie (tren nuevo).

En la reextracción, el orgánico cargado es mezclado con electrolito pobre proveniente de la nave de electrodeposición electrolítica y el cobre transferido al electrolito de alta acidez, la reextracción global se produce en dos etapas conectadas en serie (trenes antiguos y nuevo).

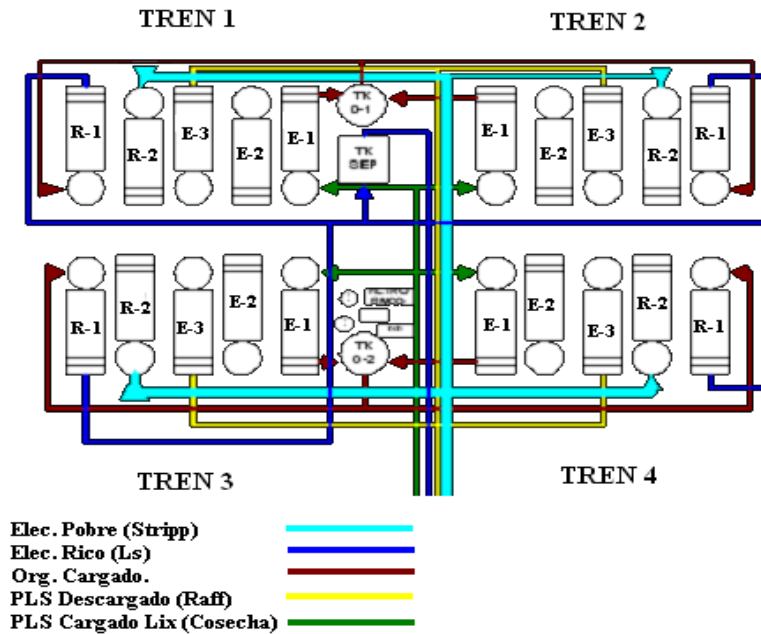
2.1.1. Configuración Actual De Los Trenes Antiguos En Planta:

Actualmente se cuenta con 5 trenes los cuales se diferencian en:

Trenes antiguos:

Estos trenes se diferencian del tren 5 por la capacidad y la configuración que presentan, cuentan con tres etapas de Extracción (de los cuales 2 están en serie y 1 en paralelo) y con 2 etapas de Re - extracción en serie. Como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Sistema de conexión de trenes como parte de la electrodeposición.



Fuente: Elaboración propia

Características operativas

Estos trenes operan con flujos constantes de acuoso (cosecha) que por lo general van desde 1350 gpm en el tren 1 hasta los 1450 gpm en los trenes 2, 3 y 4 en serie (E-1 y E-2), en paralelo (E3) están operando con 1750 gpm, y todas operan en un rango de 2150 gpm de Orgánico.

Tabla 4.

Revolución de los trenes de mezclado

Revoluciones De Los Mixer En Trenes Antiguos				
Trenes	1	2	3	4
E1	48	48	47	85
E2	47	47	46	85
E3	47	47	47	85
R2	46	47	46	85
R1	47	48	47	85

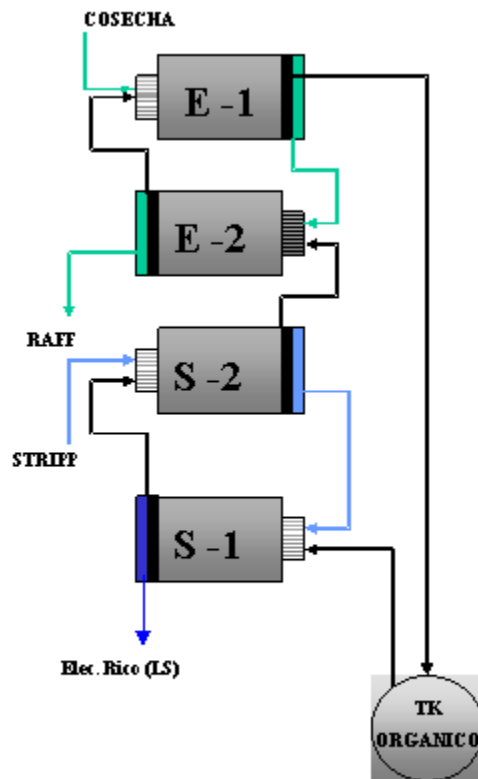
Fuente: elaboración propia

Las revoluciones en estos trenes oscilan y ello se observa en la tabla 4 observada anteriormente.

Tren 5

Este tren es relativamente nuevo presenta dos etapas de Extracción y 2 de Re-Extracción como se muestra en la figura este tren opera con un flujo de Cosecha de 7550 gpm y 5750 gpm de Orgánico aproximadamente.

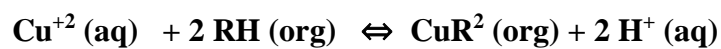
Figura 3. Conexión de trenes como parte de la electrodeposición



Fuente: Elaboración propia

Tren 5

En los 5 trenes se lleva a cabo el proceso de extracción por solventes en sus diferentes etapas como se pueden apreciar en los diagramas de flujo, este proceso se sintetiza con la siguiente reacción:



En donde este proceso ocurre dando las variables operativas adecuadas para llevar a cabo cualquiera de las etapas:

1. Para llevar a cabo la etapa de extracción se trabaja con una acidez de 3.80 proveniente de la cosecha de lixiviación y con una concentración de cobre (g/l) de 2.91 (para el Cosecha directa de Lix) y con 3.05 (Cosecha de SX), la cual se encuentra con un Orgánico Descargado en las etapas de E1, E2 y E3 (paralelo en trenes antiguos), dando como resultado una solución denominada Raff con una concentración de cobre de 0.31 g/l.
2. Para que se realice la etapa de Re-Extracción se debe tener una solución altamente ácida (Stripp) la cual contiene una acidez de 171.11 y con una concentración de cobre de 41.57 (g/l) la cual interactúa con un orgánico cargado en las etapas de R-1 y R-2 (en el caso del tren 5 se da en S-1 y S-2) dando como resultado una solución rica denominada LS con una acidez de 150 y una concentración de cobre de 57 g/l, estos datos son extraídos del inventario del mes de enero del 2007.

Tabla 5.

Trenes de extracción

TREN	Extracción			Reextracción	
	1	2	3	1	2
T-1 (A)	E1	E2	E3	R1	R2
T-2 (A)	E1	E2	E3	R1	R2
T-3 (A)	E1	E2	E3	R1	R2
T-4 (A)	E1	E2	E3	R1	R2
T-5	E1	E2	-----	S1	S2

Fuente: Elaboración propia

Filtro de placas

El filtro de placas se encarga de regenerar el orgánico, aquí el orgánico ingresa de cualquiera de los 3 tanques de orgánico juntándose con la arcilla la cual lo ayuda a regenerarse para poder recuperar todas sus propiedades de activación ingresando al filtro de placas.

Filtro de vacío

El filtro de vacío se encarga de recuperar el orgánico que viene mezclado con el lodo del tanque de lodos va al tanque blanco, se desecha el lodo por medio de un tambor y una capa de diatomita.

Tanque separador

En el tanque separador ingresa el LS para separarlo del orgánico, dirigiéndose luego la solución de LS a los filtros de electrolito rico.

De los filtros de electrolito rico la solución se dirige hacia el tanque de láminas de arranque, luego pasando por los intercambiadores de calor seguidamente llega a las láminas de arranque.

2.2. Electrodeposición

La electrodeposición es un proceso ciertamente riesgoso, pero también importante para poder obtener al cobre elemental, por lo cual es necesario unas precisiones.

2.2.1. Definición

El proceso de electrodeposición de cobre consiste básicamente en la transformación electroquímica del cobre disuelto en un electrolito en cobre metálico depositado en un cátodo, mediante la utilización de energía eléctrica proveniente de un rectificador (Charles, 1995).

2.2.2. Descripción del proceso de electrodeposición

La electrodeposición del cobre (EW) es la etapa final del proceso hidrometalúrgico, consiste en la obtención de cátodos de alta pureza, los que se producen sumergiendo dos electrodos (ánodo y cátodo) en una solución electrolítica de sulfato de cobre procedente de la planta de SX y a través del paso de la corriente eléctrica.

Resultados del proceso electrolítico:

- Deposición del cobre en el cátodo
- Evolución de oxígeno en el ánodo
- El electrolito se enriquece en ácido y se empobrece en cobre

Se lleva a cabo en una celda electrolítica, donde circula continuamente el electrolito acuoso que contiene disuelto CuSO_4 y H_2SO_4 y que proviene de la planta SX. En la celda ocurren reacciones electroquímicas de Red-Ox provocadas por la energía eléctrica. En el cátodo el ion cúprico es reducido a cobre por los electrones suplidos por la corriente y que vuelven dicho electrodo de polaridad negativa.

En el electrodo positivo hay un déficit de electrones, y se descompone agua generándose oxígeno gaseoso que burbujea en la superficie del ánodo y además ácido sulfúrico. Los aditivos agregados al proceso de electrodeposición son: cobalto (protege los ánodos), galactasol (para una buena deposición), FC-1100 (depresor de neblina) y ácido (para una concentración adecuada).

2.2.3. Variables en dicho proceso

En el proceso tenemos las siguientes variables:

Concentración del ion férrico: La concentración de ion férrico normalmente fluctúan entre 0.3 y 3.0 g/lit y es en este rango donde la acción del hierro es eficaz. La mayor impureza disuelta en el electrolito es el hierro.

Una pequeña cantidad de hierro férrico es extraído por el extractante LIX-984NC y otra es transferida por el acuoso arrastrado en la fase orgánica. En concentraciones altas el hierro puede disolver el depósito catódico de cobre. Otro problema adicional causado por los iones férricos es que ellos tienden a causar corrosión en el cátodo.

Temperatura del electrolito en EW: Es importante mantener la temperatura tan constante como sea posible para minimizar el desprendimiento de óxido de plomo del ánodo ($41 \pm 2^\circ\text{C}$) ($47 \pm 2^\circ\text{C}$). Una temperatura menor de 30°C puede dar como resultado un grano más grueso y por consiguiente cobre catódico de menor calidad.

Una temperatura de más de 50°C puede degradar el orgánico en la planta de extracción por solventes.

En general si la temperatura del electrolito es muy alta. La velocidad de corrosión del ánodo se incrementa, conduciendo a un contenido de plomo más alto en el cátodo, y una vida del ánodo más corta.

El depósito y la calidad del cátodo varían con la temperatura lo que implica que se debe de mantener en un nivel óptimo. La resistencia del electrolito causa calor en la celda. El calor es también generado en el contacto eléctrico y otras resistencias que ofrecen los electrodos.

Amperaje: El amperaje en las celdas de electrodeposición, está relacionado con la densidad de corriente.

Para la elección de la densidad de corriente se debe de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para las densidades de corriente bajas el depósito catódico es adherente y de grano fino.

- Para las densidades de corriente altas el cobre catódico obtenido es de mala calidad por cuanto es de grano grueso y el depósito no es adherente. No obstante, al trabajar con altas densidades de corriente, crece el consumo de energía eléctrica.

A baja densidad de corriente (110 a 200 Amp/m²), se producen otros efectos en la calidad del cátodo (por ejemplo: baja temperatura, bajo contenido de cobre, etc.).

2.3. Cortocircuitos

El cortocircuito es la condición física que causa que la corriente fluya entre los electrodos sin tomar parte en la reacción electrolítica.

Los cortocircuitos pueden producir:

- Disminución de voltajes en las celdas.
- Disminución de la producción de cobre debido a una reducción en la eficiencia de corriente.
- Calentamiento de las barras de suspensión de los electrodos debido a las altas corrientes que circulan, originadas por la baja resistencia del cortocircuito. El calentamiento aumenta la corrosión.

2.4. Falsos contactos

El falso contacto ocurre porque no se realiza la limpieza adecuada y porque los procedimientos de operación que se usan son incorrectos, el enchapado de cobre de la barra de suspensión se corroe.

Los falsos contactos pueden producir:

- La formación de una capa de óxido de acero no conductora.
- Una corriente circulante será de bajo nivel, por lo tanto, los depósitos de cobre serán más delgados.

- Una barra de suspensión (busbar) sin prolongar su vida.

2.5. Fugas de corriente

La fuga de corriente es causada por pérdidas de corriente que son originadas por malas conexiones de ciertas válvulas de ingreso de solución a las celdas de cada block que al chocar con las tuberías de ingreso de agua de refrigeración del busbar forman esta pérdida de corriente, la cual es una tubería de metal, dicha tubería posiblemente sea la que está ocasionando la fuga de corriente mencionada.

Las fugas de corriente pueden producir:

- Elevados consumos de corriente por pérdidas de esta.
- Daños al personal que reciba las fugas de corriente.
- Deterioro de la barra de refrigeración y problema de deposición.

2.6. Descripción de la planta de electrodeposición

La planta de electrodeposición de la empresa minera objeto de estudio consta de las siguientes partes, indicadas a continuación:

2.6.1. Láminas de arranque

2.6.1.1. Definición

La solución LS proveniente de los intercambiadores de calor ingresa a láminas de arranque trabajando con un amperaje de 20500 amperios, cosechándolas y retirándolas ya como laminas en el deslaminado. La solución de LS tiene una concentración de 56 a 58 gr/lit proveniente de intercambio iónico y una temperatura de 42°C.

Deslaminado: Al deslaminar las láminas son puestas en un caballete y son prensadas, las láminas que salgan deterioradas son apartadas para la confección de orejas.

Ensambladora de láminas: En esta zona se coloca la lámina, la varilla y las orejas obteniendo cátodos para cosechar.

2.6.1.2. *Partes de la lámina de arranque*

Consta actualmente de 22 celdas que están agrupadas en dos filas de 11 celdas en cada una. Cada celda consta a su vez de 48 cátodos y 49 ánodos. Los cátodos (planchas madre) son de acero inoxidable mientras que los ánodos son de aleación Pb-Ca-Sn.

El tiempo de deposición es de 24 horas y se trabaja con una intensidad de corriente de 20000 Amperios.

2.6.2. *Celdas comerciales*

Para ello es necesario considerar la caracterización hidrodinámica. Incluye el estudio del comportamiento del electrolito en el interior de la celda, esto ayuda en gran medida a evaluar el diseño de la misma, para prevenir posibles problemas posteriores en lo que respecta a la acumulación de gases electrogenerados en su interior, ya que este problema es común en estos procesos. De esta forma se determinan algunos parámetros de operación, principalmente el caudal volumétrico al cual el reactor tiene el mejor comportamiento, es decir al cual presenta un comportamiento cercano al flujo pistón.

Por otra parte, la caracterización electroquímica. En la que se incluye el estudio del consumo energético y la determinación de la eficiencia de la celda. Estos son dos parámetros muy importantes para evaluar la rentabilidad del proceso y de esta forma poder calcular la inversión necesaria para su desarrollo, así mismo el tiempo en el cual es posible recuperar dicha inversión.

Además, esta caracterización ayuda a establecer otros parámetros de operación principalmente la densidad de corriente óptima para aprovechar al máximo las materias primas y consumir la menor cantidad de energía posible.

2.6.2.1. Definición

Después de que los cátodos son colocados en las celdas pasan 6 días de cosecha haciendo un control necesario en estos 6 días. Al cosecharlos se les lava en tres tinas, se realiza la limpieza de nódulos, luego se les pesa y se les etiqueta, como última etapa tenemos el enflejado de cátodos para terminar con el carguío de cátodos.

2.6.2.2. Partes de celdas comerciales

El área de celdas comerciales consta de 2 bloques cada uno de los cuales cuenta con 2 filas de 112 celdas en el bloque A y 118 celdas en el bloque B. Cada celda contiene 49 cátodos y 50 ánodos, los ánodos son aleación de Pb-Ca-Sn. El tiempo de cosecha en las celdas comerciales es de 6 días.

2.6.3. Descripción de tanques

En la parte inferior de celdas comerciales existe la zona de tanques estos tanques se dividen en tres que son descritos a continuación:

Tanque de Celdas Comerciales: Se encuentra ubicado a varios metros de profundidad y se encarga de llevar la solución por medio de tuberías a la zona de celdas comerciales y también sirve para recepcionar la solución cuando se debe de limpiar las celdas y no se puede perder la solución de dicha celda ni tampoco se puede enviar al tanque de strip por la concentración de la solución. Este tanque debe de mantener una altura promedio de 3 metros y medio. Este tanque alimenta a los blocks A y B y a las filas 1,2,3 y 4.

Tanque de Strip (electrolito pobre): Este se encuentra en el medio de los tanques de celda comerciales y el de láminas de arranque, aquí se encuentra la solución que va a ser enviada a los intercambiadores de calor y luego a los trenes correspondientes para convertirse en electrolito rico.

La capacidad de estos tanques se calcula de modo que si las bombas repentinamente se detuvieran ellos mantendrían todo el electrolito que fluye desde el tanque de distribución, las celdas y las tuberías.

Tanque de láminas de arranque: Dicho tanque así como los dos anteriores en casi todas las plantas se hacen ahora de acero inoxidable. El volumen de estos tanques varía de acuerdo a las diferentes plantas. En dicho tanque se encuentra el electrolito rico que es el que tiene una concentración alta de cobre y que luego de pasar por los intercambiadores de calor será enviada a láminas de arranque por medio de dos tuberías y luego dicha solución descargada ira al siguiente tanque que es de celdas comerciales.

2.6.4. Rectificadores y accesorios

Rectificador de corriente eléctrica: Este sistema es para reducir el voltaje y convertir el voltaje de la corriente eléctrica alterna a corriente eléctrica continua. El rectificador está alojado en una caja hecha de una combinación de acero y aluminio para trabajar dentro de un ambiente cubierto. La caja contiene dos puentes del rectificador, tres bombas de enfriamiento líquido, arrancadores de motor y controladores para operar las bombas y ventilador auxiliar de enfriamiento.

Sistema de calentamiento: Los mejores calentadores son los intercambiadores de calor tubular, toman la forma de un grupo de tubos incluidos en una caja cilíndrica. El electrolito pasa a través de los tubos y el vapor pasa a través de la caja. Son usados en diferentes plantas dependiendo del volumen de electrolito en la circulación.

Barras conductoras: Las barras conductoras que suministran la corriente eléctrica a los baños electrolíticos se eligen de modo que las pérdidas de potencia y el consumo de metal no ferroso sean bajas. Teniendo constante la longitud de las barras y seleccionando el material de

fabricación, las pérdidas de energía dependen solo de la sección de las mismas. Para disminuir las perdidas es necesario elegir las barras de sección máxima

Celdas de lavado de cátodos: Los cátodos recocidos y de una masa de cobre específica, una vez sacados de las celdas, se procede al lavado para quitarles las posibles oclusiones de sulfatos; así como también de una pequeña cantidad de hidrogeno absorbido. Un lavado eficiente se logrará cuando se haya logrado una deposición uniforme.

Capítulo III

Planificación experimental

3.1. Metodología de la experimentación

Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada en el sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en el trabajo de optimización.

El diseño experimental es un acercamiento científico que permite al investigador entender mejor un proceso y a determinar la manera en las que las variables de ingreso afectan una respuesta o variables de salida. La manera como se llevan los experimentos es de la forma pasiva donde los experimentos son llevados a cabo variando una variable a la vez y de la forma activa conocida como los diseños experimentales, donde los experimentos son llevados a cabo mediante un diseño predeterminado. En cualquier problema experimental se establecen dos aspectos: El diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos.

En el ámbito de la evaluación experimental cada vez es más notorio el empleo de métodos más eficientes, racionales y económicos, para lograr el cumplimiento de los objetivos trazados.

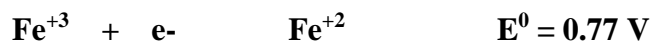
Diseño factorial 2k: Los experimentos realizados ya sean en el laboratorio o planta están encaminados en general para determinar los efectos de uno o más factores sobre el rendimiento o calidad de un producto, la eficiencia de una máquina, la resistencia de un material al ataque químico, etc.

Los diseños factoriales permiten obtener los efectos de todas las combinaciones de una variable, tomando cada una de ellas en dos niveles distintos y donde $2^k = N$ indica el número de experiencias que deben hacerse para distintos valores de las variables. Si cada variable continúa los dos niveles son el superior y el inferior.

3.2. Celdas de muestreo y frecuencias

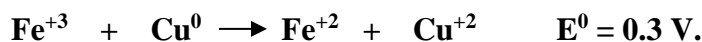
Causas de la baja de eficiencia de corriente en EW:

Las eficiencias de corriente bajas son resultado de las altas concentraciones de Fe en el electrolito debido a que consume parte de la corriente catódica según:



Mas aun, los iones Fe^{+2} resultantes pueden ser reoxidados por el oxígeno disuelto o del oxígeno que evoluciona en el ánodo.

Aparte de la disminución de la eficiencia de corriente puede también ocurrir la disolución de los cátodos mientras que al mismo tiempo se reduce a hierro bivalente según:



Otras de las impurezas que ocasionan grandes molestias en la solución es el contenido de iones cloruro que ocasiona la prematura corrosión del ánodo.

Realizando los cálculos necesarios se llegó a establecer la ecuación cinética de rapidez la cual es:

$$-r = 0.00441 [\text{Fe}^{+3}] - 1.085 \cdot 10^{-15} [\text{Fe}^{+2}]$$

Lo cual significa que tiene cierta influencia en el proceso de electro deposición por ser un valor relativamente pequeño. Por esto se realizará la experimentación y se obtendrá un modelo matemático para comprobar su porcentaje de involucramiento dentro de las causas.

Perdidas de corriente por cortos circuitos

Según el estudio realizado esta también es otra de las causas de la baja de la eficiencia de corriente, en cuanto parte de la corriente se está perdiendo por los cortos circuitos. Que es originada principalmente por la evolución de los nódulos en la superficie de los cátodos, que al crecer desmesuradamente estos llegan a hacer contacto con el ánodo originando dichos cortos.

Perdidas de corriente por falso contacto

Esta es otra de las causas de la baja de la eficiencia. Está siendo originada principalmente por la utilización de las barras de contacto con alma de fierro que al haber llegado a un estado de corrosión del cobre deja libre al fierro que al tener baja conductividad eléctrica está ocasionando el gran calentamiento de la barra, confundiendo así con un corto circuito y originando pérdidas de corriente.

El falso contacto es un problema eléctrico muy común en las instalaciones eléctricas que están expuestas mucho a la intemperie, a los cambios de temperatura, a la humedad, a las vibraciones mecánicas, al polvo, a la falta de mantenimiento, a la inapropiada conexión o ajuste entre otros.

Fugas de corriente

Una fuga de corriente, también conocida como fuga eléctrica, se refiere a un fallo en la instalación de la luz mediante el que la corriente sale del circuito eléctrico.

La causa principal de la baja eficiencia de corriente se observa por algunos indicios que avisan que existen fugas de corriente principalmente en el block A, por las cuales es en esta área que el personal mecánico está sufriendo descargas de corriente las cuales son evidencia de esta fuga de corriente; al analizar las conexiones y tuberías se observó que algunas válvulas de entrada de solución a las celdas de dicho block están chocando con las tuberías de ingreso de agua de refrigeración del busbar, la cual es una tubería de metal, que posiblemente sea por donde se está dando la fuga de corriente, la cual está originando bajas eficiencias de corriente en dicho block.

Tabla 6.

Celdas con fugas de corriente en las diferentes filas

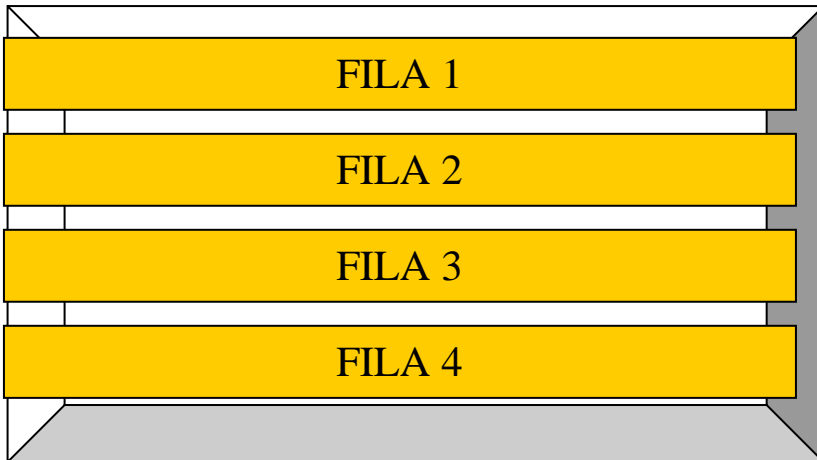
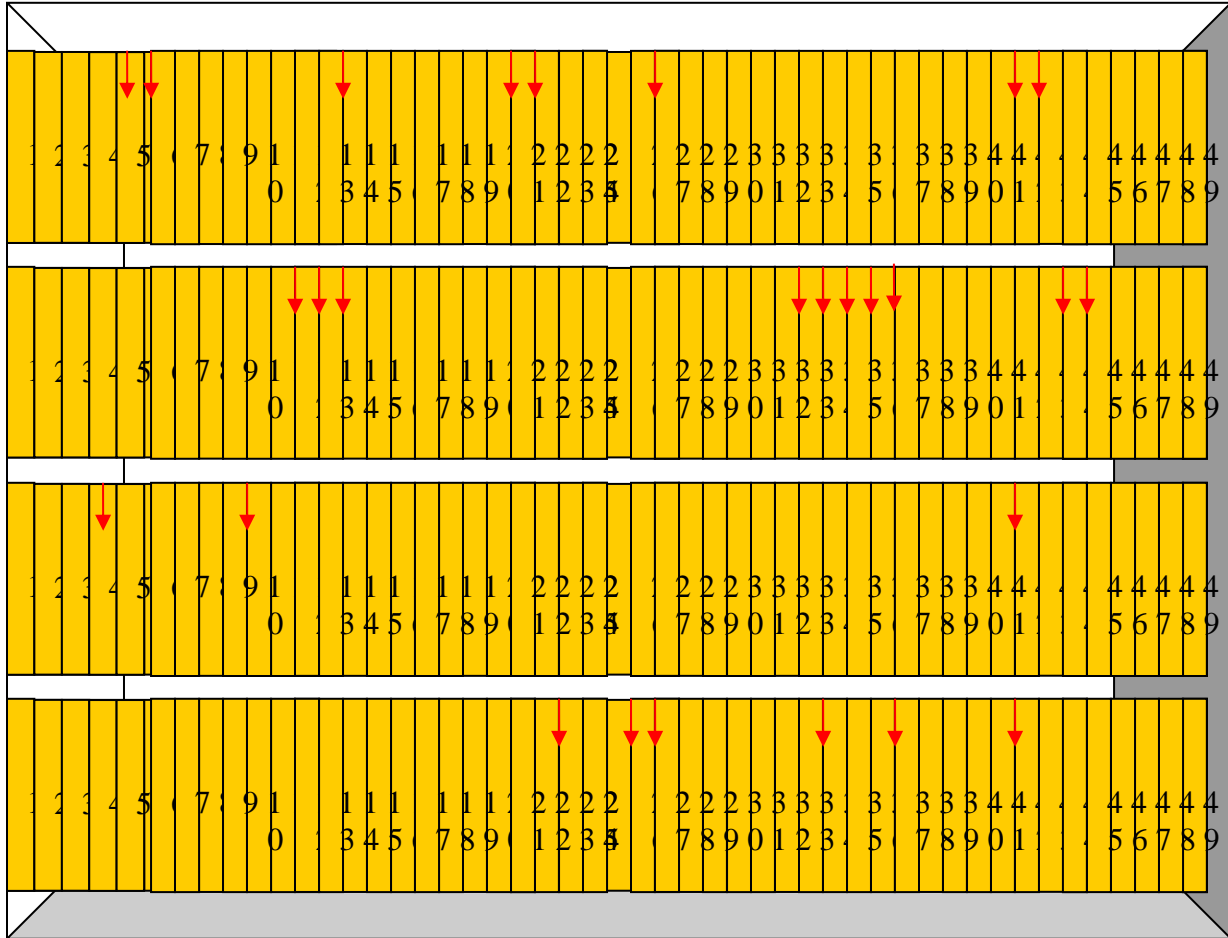
FILA	CELDA
1	3
1	4
1	11
1	18
1	19
1	24
1	39
1	40
2	9
2	10
2	11
2	33
2	34
2	41
2	42
2	30
2	31
2	32

2	33
3	2
3	7
3	39
4	20
4	23
4	24
4	31
4	34
4	39

Fuente: elaboración propia.

3.3. Desarrollo del diagrama de experimentación

A continuación, en la siguiente figura se observa el diagrama de experimentación.



NAVE
ELECTROLITICA

→ Presencia de fugas en diferentes celdas.

Nota: representación esquemática de las fugas en diferentes celdas electrolíticas. Fuente: Propia.

3.4. Materiales y equipos

A. MATERIALES

- ❖ Instrumentos de medición:
 - Conductímetro
 - Voltímetro
 - Termómetro
- ❖ Manifold
- ❖ Barras de fierro (busbar)
- ❖ Aisladores
- ❖ Guantes
- ❖ Mascara
- ❖ Casco
- ❖ Lapicero
- ❖ Cuaderno de apuntes

B. RECURSOS HUMANOS

- ❖ Graduanda
- ❖ Personal de mantenimiento
- ❖ Personal de equipo eléctrico
- ❖ Personal de planta
- ❖ Instrumentista

3.5. Definiciones del modelo estadístico:

Diseño experimental 2³: El análisis del diseño 2³ nos permitirá obtener información sobre los efectos de interacción de las variables.

El diseño experimental a realizarse se ubicará en la 1ra. etapa de la optimización, el cual será de primer orden siendo el diseño factorial 2^k el que investigará todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. El presente diseño seleccionado es un diseño factorial a dos niveles con réplica en el punto central del diseño, cuyo modelo matemático general para tres variables (2³) es:

$$Y = B_0 + B_1(X_1) + B_2(X_2) + B_3(X_3)$$

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_3X_3 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3$$

Tabla 7.

Variables de diseño

Variables	Nivel (+)	Nivel (-)
Y=Eficiencia de corriente		
Z1= Amperaje (A)	920	450
Z2= Concentración (g/ L) de Fe	3.0	0.3
Z3= Temperatura (°C)	43	39

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recopilación de información

La recopilación de información se dio por los datos que se obtuvieron de las pruebas realizadas y los problemas detectados en el área de electrowinning (electrodeposición) y su problema de eficiencia de corriente, esta recopilación se dio en un tiempo de 11 semanas en las cuales se desarrolló el análisis del problema, la determinación de la eficiencia de corriente existente

en la nave electrolítica, determinación de las fugas de corriente, determinación de los falsos contactos, determinación de los cortocircuitos; soluciones para los falsos contactos, las fugas de corriente y los cortocircuitos encontrados.

Las causas de baja eficiencia de corriente son:

Contenidos de Hierro y otras impurezas: Las bajas eficiencias de corriente llegan a ser resultados de altas concentraciones de Fe que se encuentran en el esto se debe a que se llega a consumir una parte de la corriente catódica.

También existe la disminución de eficiencia de corriente que es presentada debido a la disolución de los cátodos.

Otras de las impurezas que ocasionan grandes molestias en la solución es el contenido de iones cloruro que ocasión la prematura corrosión del ánodo.

Por la primera determinación de fugas de corriente que corresponde al contenido de Hierro y otras impurezas observo que no dicho factor no tiene mucha influencia.

Perdida de corriente por cortocircuitos: Por el estudio determinado nos indica que esta tampoco es una de las causas principales, pero tiene cierto margen de importancia, por la pérdida de corriente por cortocircuitos existentes, originados principalmente por la evolución de nódulos en la superficie de los cátodos que, al crecer en una forma desmesurada, llegan a hacer contacto con el ánodo originando dichos cortos.

Perdida de corriente por falsos contactos: En la determinación de falsos contactos se llegó a la conclusión que esta tampoco era la razón principal por la que existía baja eficiencia de corriente en las celdas de electrodeposición, siendo originada principalmente por la utilización de las barras de contacto con alma de hierro que al haber llegado a un estado de corrosión del cobre deja libre al hierro debido a que la baja conductividad eléctrica está ocasionando el gran

calentamiento de la barra, llegando a confundirse como un cortocircuito y originando así pérdidas de corriente.

3.7. Tratamiento estadístico

3.7.1. Tablas

Tabla 8.

Niveles de variables para diseño factorial con replicas en el centro

VARIABLES	NIVEL (+)	NIVEL (-)	Z _c	Z _r	Z _{cr}
Z1 = Amperaje	920	450	685	235	2.91
Z2= Concentración	3.0	0.3	1.65	1.35	1.22
Z3= Temperatura	43	39	41	2	20.50

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Nivel (+) = Nivel superior

Nivel (-) = Nivel inferior

Z_c = Valor nominal del diseño

Z_r = Valor del radio del diseño

Z_{cr} = Relación entre el nominal y el radio

Tabla 9.

Cuadro experimental del diseño factorial

N	X ₁	X ₂	X ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Eficiencia
				Amperaje	Concentración	Temperatura	de corriente (%) Y
1	-1	-1	-1	450	0.3	39	Y ₁
2	+1	-1	-1	920	0.3	39	Y ₂
3	-1	+1	+1	450	3.0	39	Y ₃
4	+1	+1	-1	920	3.0	39	Y ₄
5	-1	-1	+1	450	0.3	43	Y ₅
6	+1	-1	+1	920	0.3	43	Y ₆
7	-1	+1	+1	450	3.0	43	Y ₇
8	+1	+1	+1	920	3.0	43	Y ₈
9	0	0	0	685	1.65	41	Y ₉
9	0	0	0	685	1.65	41	Y ₁₀
9	0	0	0	685	1.65	41	Y ₁₁

Fuente; elaboración propia

Tabla 10.

Cuadro Experimental de diseño

N	X ₁	X ₂	X ₃	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Eficiencia
				Amperaje	Concentración	Temperatura	de corriente (%) Y
1	-1	-1	-1	450	0.3	39	88.5
2	+1	-1	-1	920	0.3	39	90.1
3	-1	+1	+1	450	3.0	39	91.4
4	+1	+1	-1	920	3.0	39	92.9
5	-1	-1	+1	450	0.3	43	93.1
6	+1	-1	+1	920	0.3	43	92.8
7	-1	+1	+1	450	3.0	43	89.4
8	+1	+1	+1	920	3.0	43	90.5
9	0	0	0	685	1.65	41	90.8
9	0	0	0	685	1.65	41	90.7
9	0	0	0	685	1.65	41	90.5

Fuente: elaboración propia

El objetivo principal de esta etapa de utilizar el diseño estadístico realizado es identificar aquellas variables que son significativas para el proceso.

Es decir, identificar aquellas variables, que, al hacerlas variar de un nivel bajo a un nivel alto, afectan sensiblemente las respuestas del proceso.

Tabla 11.

Matriz codificada para el cálculo de efectos

N	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	88.5
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	90.1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	91.4
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	92.9
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	93.1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	92.8
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	89.4
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	90.5

Fuente: elaboración propia

Cálculo de los efectos

El significado físico del cálculo de los efectos es ver como varía la respuesta al cambiar una variable o factor desde su nivel inferior hasta el nivel superior.

Para la determinación de los efectos se emplea la siguiente fórmula:

$$\sum X_i = \frac{[X^T][Y]}{\left(\frac{N}{2}\right)^r}$$

Donde:

[X^T] = Matriz transpuesta codificada

Y = Respuesta experimental

N = N° de réplicas experimentales

r = N° de réplicas en el diseño

Tabla 12.

Cálculo de coeficientes del modelo matemático

	X₀	X₁	X₂	X₃	X₁ X₂	X₁ X₃	X₂ X₃	X₁ X₂ X₃
Resultados	728.30	3.90	-0.30	2.90	1.30	-2.30	-11.70	1.50
Efectos de interacciones	91.48	0.97	-0.07	0.73	0.32	-0.58	-2.90	0.38
Coefficientes	45.74	0.49	-0.04	0.36	0.16	-0.29	-1.45	0.19

Fuente: Elaboración propia**Análisis de varianza**

El análisis de la varianza es realizado para probar la significancia de los efectos. Se emplea las siguientes fórmulas estadísticas:

Suma de cuadrados de los efectos

$$SS_{efectos} = \frac{([X^T] * [Y])^2}{N * [Y]}$$

Donde:

SS_{efectos} = Suma de cuadrados debidos a los efectos[X^T] [Y] = Producto matriz transpuesta y respuesta

N = N° de pruebas experimentales

Suma de cuadrados debido al error

$$SS_{error} = \sum_{i=1}^N (\bar{y}_0 - y_0)^2$$

Donde:

SS_{error} = Suma de cuadrados debido al error

\bar{y}_0 = Promedio de réplicas experimentales

y_0 = Réplicas en el punto central

Suma de cuadrados debido a la curvatura

$$SS_{curvatura} = \frac{N * n_0 (\bar{y} - \bar{y}_0)}{N + n_0}$$

n_0 = N°. de réplicas en el punto central

\bar{y} = Promedio de pruebas experimentales

Cálculo del F_0

$$F_0 = \frac{MS_{efectos}}{MS_{error}}$$

Además:

$$MS_{efectos} = \frac{MS_{efectos}}{glt}$$

$$MS_{error} = \frac{MS_{error}}{gle}$$

Donde:

glt = Grados de libertad de los efectos e interacciones, generalmente igual a 1.

gle = Grados de libertad de la suma de cuadrados debido al error, igual a 2.

Tabla 13.

Análisis de varianza para diseño con replica en punto central

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados Libertad	Media de Cuadrados	F _o	Significancia
X ₀	---	---	---	---	---
X ₁	1.901	1	1.901	288.663	si
X ₂	0.011	1	0.011	1.708	si
X ₃	1.051	1	1.051	159.609	si
X ₁ X ₂	0.211	1	0.211	32.074	si
X ₁ X ₃	0.661	1	0.661	100.39	si
X ₂ X ₃	17.111	1	17.111	2597.971	si
X ₁ X ₂ X ₃	0.281	1	0.281	42.702	no
Curvatura	0.0057212	1	0.0057212		
Error	0.006586389	2	0.00329319	0.869	no
Total		10			

Fuente: elaboración propiaEl modelo matemático lineal de primer orden para un diseño factorial 2³ es:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_3X_3 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 + B_{123}X_1X_2X_3$$

Tomando los coeficientes calculados en la tabla N° 13 y reemplazando se tiene el siguiente modelo solo considerando las variables e interacciones significativas:

$$Y = 45.74 + 0.49 X_1 - 0.04 X_2 + 0.36 X_3 + 0.16 X_1X_2 - 0.29 X_1X_3 - 1.45 X_2X_3 + 0.19 X_1X_2X_3$$

Donde:

Y = Eficiencia de corriente

X₁ = Amperaje

X₂ = Concentración

X₃ = Temperatura

ANÁLISIS DE RESIDUOS: Este análisis se efectúa para determinar la magnitud de la distancia entre los valores que se producen entre los valores respuestas experimentales y las respuestas calculadas:

Tabla 14.

Análisis de residuos

N	Y _{exp.}	Y _{calc.}	(Ye - Yc)	(Ye - Yc) ²
1	88.5	88.72	-0.22	0.0484
2	90.1	90.24	-0.14	0.0196
3	91.4	91.63	-0.23	0.0529
4	92.9	92.40	0.50	0.2500
5	93.1	93.02	0.08	0.0064
6	92.8	92.77	0.03	0.0009
7	89.4	89.21	0.19	0.0361
8	90.5	90.70	-0.20	0.0400
Total	728.7	728.69	0.01	0.4543

Fuente: elaboración propia

Para determinar estadísticamente si el modelo matemático hallado representa adecuadamente los datos experimentales, se realiza la prueba de cálculo del Fo, el cual deberá ser menor al F de tablas.

Cálculo del F_0

$$F_0 = \frac{SSM_R}{MS_{error}}$$

$$SSM_R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_e - y_c^2)}{N - 1}$$

Donde:

Y_e = respuesta experimental

Y_c = respuesta calculada

MS_{error} = Media de cuadrados debido al error

N = N° de experimentos

I = N° de factores del diseño

Reemplazando se tiene:

$$SSM_R = \frac{0.4543}{8.3} = 0.09086$$

$$F_0 = \frac{0.09086}{0.006586} = 13.80$$

F de tablas

glr: $8 - 3 = 5$

gle: 2

Confianza, α : 95% (0.05)

Para $F(0.05, 5, 2) = 19.90$

$F_0 < F$

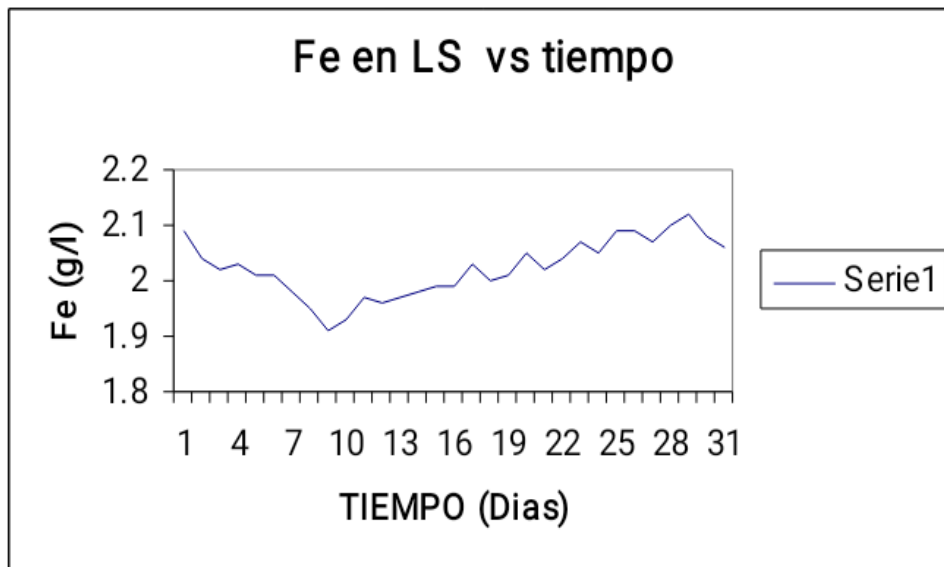
$13.80 < 19.90$

Por lo tanto, el modelo matemático se ajusta y representa adecuadamente a los datos experimentales de las variables seleccionadas, considerándose válido el modelo.

3.7.2. Construcción de diagramas

A continuación, se exhibe un gráfico de la concentración de Fe fierro en el LS en el mes de enero del 2007.

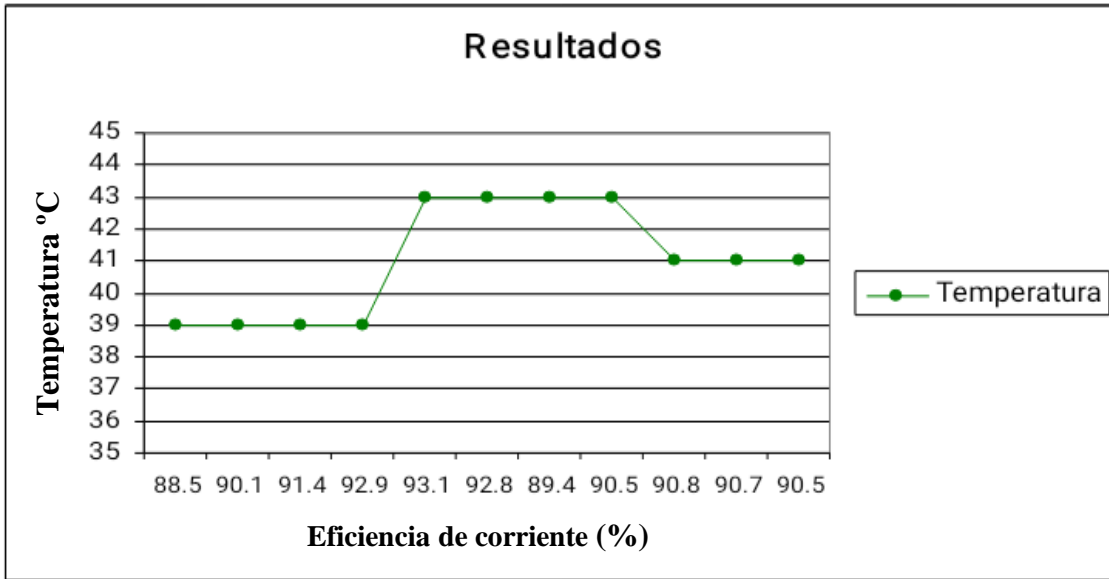
Figura 4. Diagrama de concentración de hierro en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia

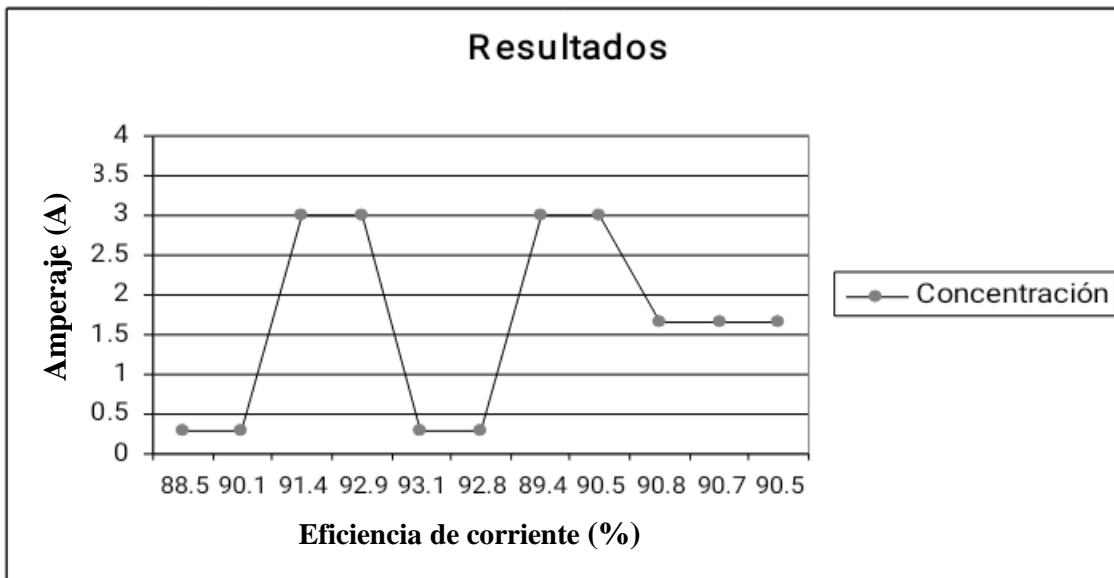
A continuación, siguen las gráficas que expresan amperaje, concentración y temperatura, que son las variables independientes, con respecto de la temperatura:

Figura 5. Diagrama de temperatura en función de la eficiencia de corriente



Fuente: elaboración propia

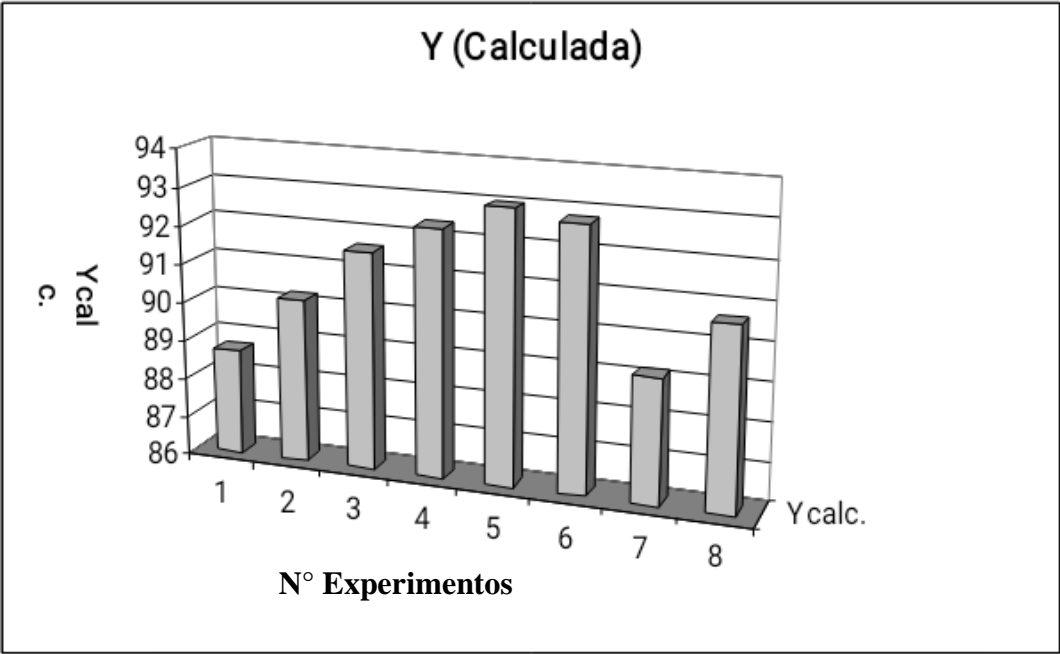
Figura 6. Diagrama de amperaje en función de la eficiencia de corriente



Fuente: elaboración propia

Podemos ver los resultados de la eficiencia de corriente eléctrica calculada en cada uno de los experimentos (figura 7).

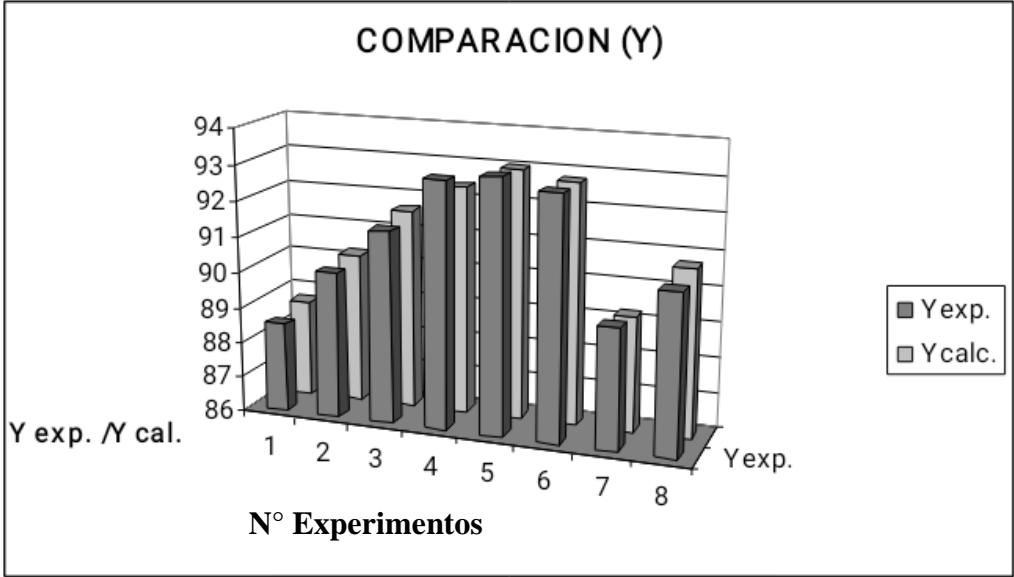
Figura 7. Diagrama de la eficiencia de corriente en los diversos experimentos



Fuente: elaboración propia

Podemos ver los resultados de la eficiencia de corriente eléctrica experimental en cada uno de los experimentos, ver figura 8.

Figura 8. Diagrama de la eficiencia de corriente eléctrica en diversos experimentos



Fuente: elaboración propia

Capítulo IV

Presentación y análisis de resultados

4.1. Análisis de resultados

Realizar el análisis de datos estadístico consiste en un procedimiento para realizar diversas operaciones estadísticas. Lo cual se trata de un tipo de investigación cuantitativa que busca cuantificar los datos de las variables propuestas y, por lo general, es factible aplicar alguna forma de análisis estadístico.

4.1.1. Comportamiento

Para determinar el comportamiento estadístico de la DECODIFICACION DEL MODELO MATEMATICO; es necesario utilizar las siguientes relaciones propuestas considerando para ello el promedio y el nivel inferior para las tres variables independientes utilizadas.

Reemplazando en el modelo matemático codificado se tiene:

$$X_1 = \frac{\text{Amperaje}-685}{235} \quad ; \text{ Amplitud (A)}$$

$$X_2 = \frac{\text{Concentración}-1.65}{1.35} \quad ; \text{ Concentración (C)}$$

$$X_3 = \frac{\text{Temperatura}-41}{2} \quad ; \text{ Temperatura (T)}$$

De lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$Y = 45.74 + 0.49 X_1 - 0.04 X_2 + 0.36 X_3 + 0.16 X_1 X_2 - 0.29 X_1 X_3 - 1.45 X_2 X_3 + 0.19 X_1 X_2 X_3$$

$$Y = 45.74 + 0.49 \frac{\text{Amperaje}-685}{235} - 0.04 \frac{\text{Concentración}-1.65}{1.35} + 0.36 \frac{\text{Temperatura}-41}{2} + 0.16 \frac{\text{Amperaje}-685}{235} * \frac{\text{Concentración}-1.65}{1.35} - 0.29 \frac{\text{Amperaje}-685}{235} * \frac{\text{Temperatura}-41}{2} - 1.45 \frac{\text{Concentración}-1.65}{1.35} * \frac{\text{Temperatura}-41}{2} + 0.19 \frac{\text{Amperaje}-685}{235} * \frac{\text{Concentración}-1.65}{1.35} * \frac{\text{Temperatura}-41}{2}$$

Por otro lado, el EFECTO CURVATURA E INTERVALO DE CONFIANZA; queda determinado por la determinación del efecto de curvatura se comprueba la linealidad de la ecuación matemática, esto hallando los intervalos de confianza. El intervalo de confianza describe la variabilidad entre la medida obtenida en un estudio y la medida real de la población (el valor real). Corresponde a un rango de valores, cuya distribución es normal y en el cual se encuentra, con alta probabilidad, el valor real de una determinada variable.

Para lo cual se emplea las siguientes fórmulas:

$$E_c = (\bar{y}_0 - \bar{y}) = 91.09 - 90.67 = + 0.42$$

Donde:

\bar{y} = Promedio de las pruebas experimentales

\bar{y}_0 = Promedio de todas las réplicas

Intervalo de confianza

$$I = \pm t * S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{c}}$$

$$S_e^2 = \frac{SS_{error}}{c - 1}$$

$$S_e = \frac{0.0057212}{3 - 1} = 0.05348$$

Donde:

Se = Media de cuadrados o varianza estimada

t = T de student estadístico (0.05, 2 = 2.92)

N = N° de pruebas experimentales

c = N° de repeticiones en el punto central

Reemplazando se obtiene $I = \pm 0.0850$

El intervalo es:

$$E_c \pm I$$

$$(0.42 - 0.0920; 0.42 + 0.0850)$$

$$(0.336; 0.506)$$

En el intervalo de confianza que se obtuvo no está comprendido el cero, asimismo la significancia del efecto curvatura no es considerada al ser su valor ($F_{o \text{ curvatura}}: 0.869$) menor al F de tablas (Análisis de Varianza). Concluyéndose que el efecto de curvatura no es significativo.

4.1.2. Eficiencia disminuyendo la corriente eléctrica

Se realizó cálculos de cuanto disminuiría el consumo de corriente si aumentamos nuestra eficiencia de corriente, se mantienen constantes los datos de Amperaje y se varían los datos de eficiencia obteniéndose:

Para un Amperaje manteniendo constante de 45000 A, y con eficiencia promedio del mes de 91.98 % se obtiene:

$$\mathbf{CE = 508456.782 \text{ kW} - \text{hr/día}}$$

Pero si se subiera la eficiencia promedio a 93 % es decir un punto porcentual adicional, entonces se obtendría:

$$\mathbf{CE = 502224.086 \text{ kW} - \text{hr/día}}$$

Pero si se subiera la eficiencia promedio hacia 94 % es decir dos puntos porcentuales adicionales, entonces se obtendría:

$$\mathbf{CE = 4968810277 \text{ kW} - \text{hr/día}}$$

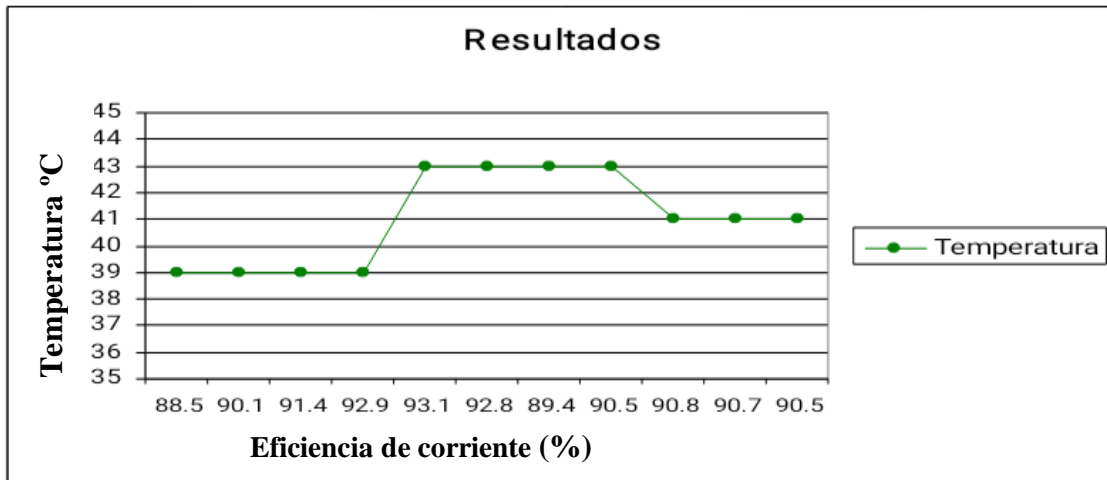
Es decir que al subir la eficiencia de corriente dos puntos, entonces se lograrían aumentar la producción hasta **11037.892 KW-hr /día** de lo que está actualmente operando. Es por tal razón que se puede hacer todas las correcciones necesarias para lograrlo y mejorar la producción.

4.2. Interpretación de los diagramas

De los gráficos anteriores podemos observar cómo varía la concentración del Fe con respecto al tiempo que esta expresado en días, este un factor que debe de controlarse constantemente para así evitar esta variación como la que tenemos en el gráfico.

En la figura 9, que está compuesto se puede observar cómo varia la eficiencia de corriente versus la temperatura; cuando tomamos los valores de amperaje, concentración y temperatura que son las tres variables independientes que han sido tomadas para desarrollar el modelo matemático.

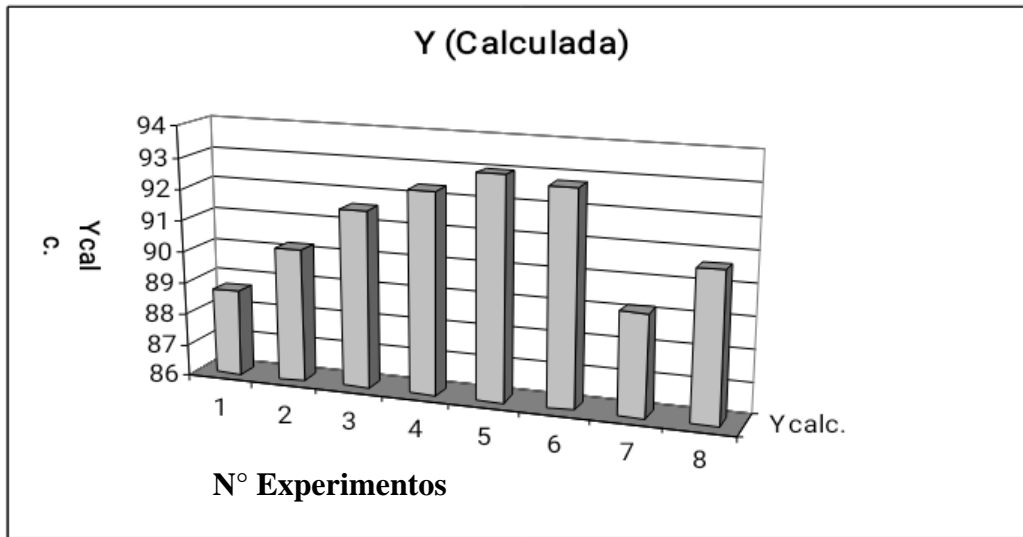
Figura 9. Diagrama de variación de temperatura en función de la eficiencia de corriente



Fuente: elaboración propia

En la figura 10 se representa la eficiencia de corriente eléctrica calculada con respecto a las corridas que se realizaron en la cual encontramos bastante variación y oscilación, dicha eficiencia de corriente (Y_{cal}) fue obtenida con el modelo matemático planteado y hallado a través de análisis estadísticos.

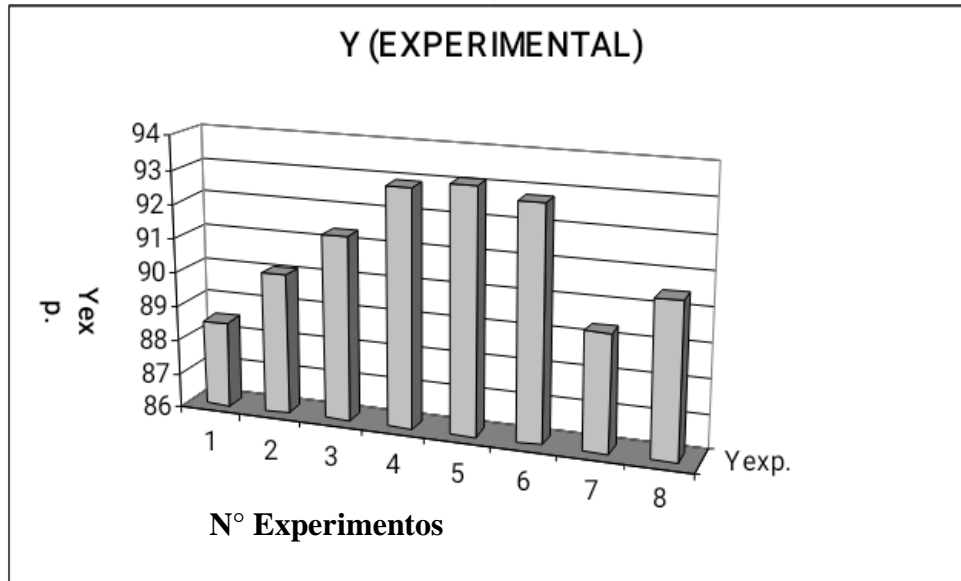
Figura 10. Diagrama de eficiencia de corriente (Y_{cal}) en función de las experimentaciones



Fuente: elaboración propia

En la figura 11 está representada la eficiencia de corriente eléctrica experimental versus las experimentaciones realizadas en la cual también encontramos bastante variación y oscilación como lo vimos en el diagrama anterior, dicha eficiencia de corriente ($Y_{exp.}$) fue obtenida de las pruebas que se realizaron a diferentes niveles mayores y menores de amperaje, concentración y temperatura.

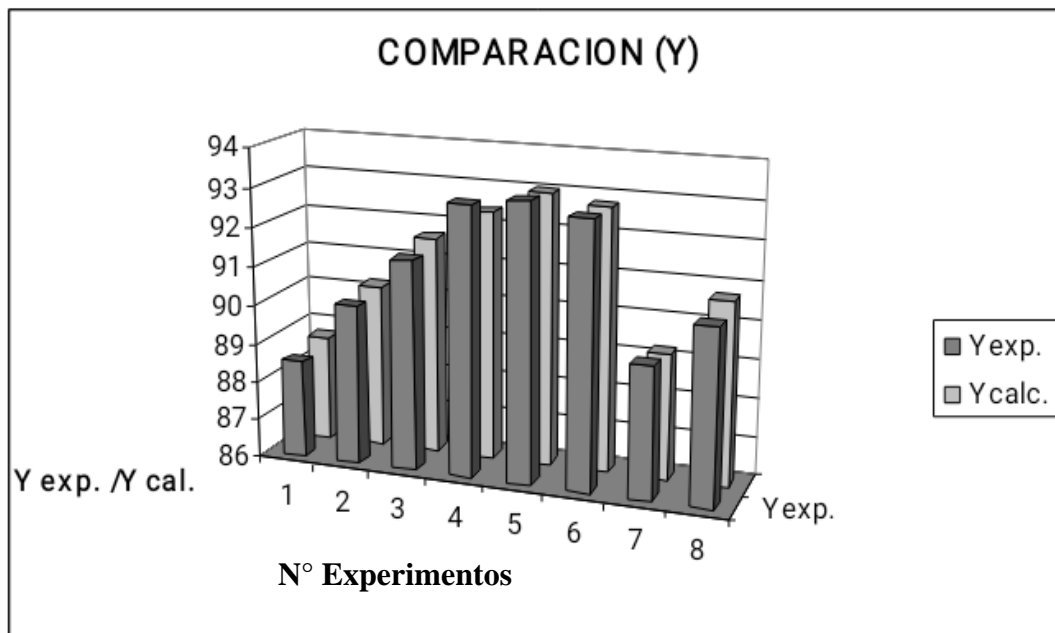
Figura 11. Diagrama de eficiencia de corriente ($Y_{exp.}$) en función de experimentaciones



Fuente: elaboración propia

En la figura 12 podemos ver la comparación entre la eficiencia de corriente experimental y la eficiencia de corriente calculada que se ajusta mejor, aunque la cantidad de variación y oscilación es parecida, podemos darnos cuenta de que la concentración de Fe, la temperatura y el amperaje no son las únicas variables que debemos de controlar debemos de buscar si existe algunas fallas o alguna otra anomalía.

Figura 12. Diagrama de eficiencia de corriente experimental y la eficiencia de corriente calculada en función de experimentaciones



Fuente: elaboración propia

4.2.1. Análisis de resultados

El análisis de datos estadísticos es el proceso que nos permite interpretar los datos numéricos que disponemos, con el objetivo de tomar las decisiones de negocio más eficaces. De hecho, las empresas pueden tomar decisiones 5 veces más rápido que su competencia si las basan en el análisis de datos (Bain & Company).

En el análisis de resultados podemos mencionar que donde $F_0 = 13.80$ y la condición es que $F_0 < F$, esta es la condición que se debe de cumplir para que un modelo matemático sea apropiado donde se cumple que $F_0 = 13.80$ y $F = 19.90$ siendo así $F_0 < F$ entonces se concluye que el modelo es válido, luego hallando el efecto de curvatura en el intervalo de confianza podemos obtener que el efecto de curvatura $F_0 = 0.869$ menor al F de tablas concluyéndose que no tiene ningún efecto de curvatura por ende no es la causa de la baja eficiencia de corriente en las celdas

de electrodeposición; además en los diagramas mostrados podemos analizar que al graficar las variables de amperaje , concentración y temperatura versus eficiencia de corriente podemos obtener valores promedios como son: de amperaje entre 6.5 y 7 amperios , de la concentración entre 1.5 y 2 g / L de Fe y por último de la temperatura el único valor es el de 41°C.

También en la figura 12 se aprecia que las gráficas que nos representan las eficiencias de corriente calculada y experimental, coincidiendo ambas en que en los puntos 5 y 6 la eficiencia de corriente es de mayor porcentaje entre 92 y 94%

Capítulo V

Evaluación económica

5.1. Investigación realizada en planta

La investigación efectuada en la planta industrial de la empresa minera cupriferá duró 14 semanas y fue desarrollada en la misma área, se contó con el apoyo de los ingenieros y operarios de área, también se contó con el apoyo del personal de mantenimiento que apoyo a la investigación con sus equipos, con sus comentarios acerca de las fugas de corriente, con la disposición del personal para apoyar un 100% dicho trabajo; se contó con datos obtenidos de la nave electrolítica y de cada bloque, fila y celda de electrodeposición.

También la graduanda tuvo que participar para la detección de las fugas de corriente, pero como se realizó dicha investigación en el tiempo de prácticas en la empresa minera el costo económico no tuvo valor, solo hubo gasto de tiempo por las labores realizadas para determinar la eficiencia real existente, las causas de las anomalías existentes y la mejor eficiencia de corriente en las celdas de electrodeposición.

5.2. Interpretación económica de la eficiencia optima

Costos de la investigación de mejoramiento:

Para la determinación del costo de la investigación debemos de considerar la existencia de dos tipos de servicios principalmente:

El de las empresas vendedoras o suministradoras de equipos y accesorios, que se detectaron para el mejoramiento de la eficiencia de corriente, así también como el mantenimiento de los mismos completamente gratis a cambio de que se elijan el tipo de equipo que ellos poseen.

La investigación para la detección de las causas que ocasionaban fugas de corriente y impedían el mejoramiento del proceso para la obtención de cobre, así como su versatilidad, proporcionados por autores e ingenieros de prestigio.

Los costos asociados con dicha investigación se pueden dividir en dos grupos:

- ❖ Costo de capital
- ❖ Costo de operación

Costo de capital:

Son aquellos que se consideran previos a la determinación para encontrar las mejores condiciones en las que pueden mejorarse las anomalías, y son:

- ❖ Equipos de instrumentación
- ❖ Desarrollo de graficas
- ❖ Software
- ❖ Hardware
- ❖ Capacitación al personal

Costos de operación:

Son los costos para llevar a cabo las acciones que aseguren el mejor rendimiento de la corriente en las celdas de electrodeposición.

- ❖ Soporte técnico (personal y contratos)
- ❖ Mantenimiento (instrumentación, hardware y software)
- ❖ Capacitación

5.3. Interpretación económica de la eficiencia optima

El estudio económico contiene una evaluación del proyecto que se realiza con la información del flujo de fondos y con el estudio financiero; por lo cual el estudio económico

presenta la viabilidad económica y el impacto que tendrá el proyecto de mejora productiva en los aspectos empresariales. para ello se consideró en la investigación los siguientes:

1) Para el costo de capital:

Equipos de instrumentación.....	Costo S/. 0.00
Desarrollo de graficas	Costo S/. 0.00
Software	Costo S/. 0.00
Hardware.....	Costo S/. 0.00
Capacitación al personal	Costo S/. 0.00

2) Para el costo de capital:

Soporte técnico (personal y contratos).....	Costo S/. 0.00
Mantenimiento (instrumentación, hardware y software)	Costo S/. 0.00
Capacitación.....	Costo S/. 0.00
Cálculo del resultado de la eficiencia	Costo S/. 0.00
Hallar las fugas de corriente	Costo S/. 0.00
Hallar los cortocircuitos	Costo S/. 0.00
Hallar los falsos contactos	Costo S/. 0.00

Nota: Para todos los rubros el costo fue de S/.0.00, ya que toda la investigación se realizó por medio de la empresa minera cuprífera, en el tiempo de prácticas.

Conclusiones

- Se identificaron las causas más importantes de la baja de eficiencia de corriente, como así algunas de ellas también son causa da baja calidad del cátodo, las que son principalmente la formación de nódulos.
- Se pudo determinar hasta cuanto podría disminuir el consumo de corriente si se aumentaría nuestra eficiencia; adicionalmente proponiéndose algunas soluciones para lograr mejorar la eficiencia.
- La operación con celdas de electrodeposición con altas densidades de corriente permite el ahorro en capital de inversión y en el capital de operación ya que implica usar una menor cantidad de celdas por unidad de cobre electrodepositado.
- El aumentar la eficiencia nos ayudaría a obtener una mejor electrodeposición con un porcentaje menor de concentración de fierro, para que no afecte la calidad del cátodo final.
- Para un Amperaje manteniendo constante de 45000 A, y con eficiencia promedio del mes de 91.98 % se obtiene: $CE= 508456.782 \text{ KW-hr. /día}$. Pero si se subiera la eficiencia promedio a 93 % es decir un punto porcentual adicional, entonces se obtendría: $CE= 502224.086 \text{ KW-hr. /día}$. Pero si se subiera la eficiencia promedio hacia 94 % es decir dos puntos porcentuales adicionales, entonces se obtendría: $CE= 496881.277 \text{ KW-hr/día}$
- Es decir que al subir la eficiencia de corriente dos puntos, entonces se lograrían aumentar la producción hasta 11037.892 KW-hr /día de lo que está actualmente operando. Es por tal razón que se puede hacer todas las correcciones necesarias para lograrlo y mejorar la producción.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar seguimientos y controles constantes para verificar que la eficiencia de corriente se mantenga y no varíe demasiado de un tiempo a otro.
- Se recomienda mantener controlado el tiempo de vida del “busbar” para evitar la corrosión y de esta manera no tener falsos contactos, para que no afecten la eficiencia de corriente en las celdas de electrodeposición.
- También se recomienda un control más minucioso de la nave de EW ya que se observa que en algunos días baja mucho la eficiencia principalmente por un mal control de los cortos circuitos.
- Se recomienda revisar la ubicación de las válvulas de ingreso de la solución a las celdas de cada block para así evitar el choque de estas válvulas con las tuberías de ingreso de agua de refrigeración debido a que estas fallas hacen que eficiencia de corriente disminuya.

Referencias Bibliográficas

1. Cáceres Arenas, Germán. Hidrometalurgia y Electrometalurgia. (La red) <http://www.exalumnos.uda.cl/metalurgia/402/Hidrometalurgia/hidrometalurgia.pdf>.
2. Caiceo A. Fernando, Optimización por Diseños Experimentales con aplicaciones a la Metalurgia Extractiva, 1995. Centro de Investigación, Gestión y Desarrollo Ambiental p 126.
3. Domic Mihovilovic, Esteban. M. Lixiviación de Metales. En: Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago de Chile: Null; 2001. P. 187- 222
4. Montgomery, Douglas C. Diseño y Análisis de Experimentos, Editorial Iberoamericana, 1992.
5. Dr. Douglas Robinson. (1996). Electrometallurgy: A collection of Notes and Drawings on the Theory and Practice of Aqueous Metal Electrolisis, Missouri, USA. The Extractive Metallurgy Institute
6. Dr. T.J. O'Keefe. Dr. D.J. Robinson,. Dr. L.D. Twidwell. (1982). Unit Processes in Metallurgy Extractive; Modular Tutorial Course, Missouri, USA
7. W. CHARLES COOPER. (1985, 7, January). "Advances and Future Prospects in Copper Electrowinning". Journal of Applied Electrochemistry, 15, 789-805 reviews of applied electrochemistry. Ontario, K7L 3N6, Canada
8. A.K. Biswas; W.G. Davenport. (1994). Extractive Metallurgy of Copper, Great Britain, BCP Wheatons Ltd, Exeter.
9. D.H.H. Haung; D:L:G: Twidwel; D:J:D: Miller. (1988). Hidrometalurgia, tomo I y II, Traducción de Luis M. Chia Aquije; Juan F. Chia Aquije. Impreso en Lima, Perú. Editorial San Marcos.

10. Dr. D. Dreisinger; Dr. J.D. Vásquez. (1995). Copper Hydrometallurgy, , Santiago, Chile.
Instituto de Ingenieros de Minas de Chile
11. John E. Dutrizac; Chantal G. Clement. (2003). Copper Electrorefining and Electrowinning;
Copper 2003; International Conference Organized by the Chilean Institute of Mining
Engineers and The Metallurgical. Society of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy
and Petroleum. Santiago, Chile.