

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MERRILL-CROWE MEDIANTE
EL CONTROL DEL CIANURO LIBRE PARA
MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE
ORO, CAYLLOMA - 2024**

TESIS

Presentada por:

Bach. JULIA ANTONIETA VELARDE BEGAZO

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2025

Hoja de jurados



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO

PROFESIONAL DE INGENIERO METALURGISTA.

Siendo las 11:00 horas del día 04 de Julio del 2025 y de acuerdo con la Resolución de Facultad N° 9743-2025-FAIN/UNJBG y ante el Jurado Calificador integrado por:

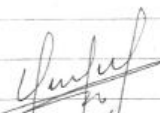
Dr. Nataniel Mario Jimenez Gutiérrez - Presidente

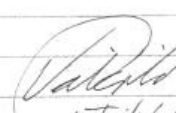
Mtro. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo - Secretario

Msc. Daniel Jesús Ferrallos Ramos - Vocal


Dr. Freddy Felipe Cori Nina - Asesor

La recurrente, Bach. Julia Antonieta Velarde Begazo, dio inicio a la sustentación de su tesis titulada: "Optimización del Proceso Merrill-Crowe mediante el control del cianuro libre para maximizar la Recuperación de oro, Cay Loma-2024", al final de la sustentación, la recurrente procedió a la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado Calificador y de acuerdo al artículo 30 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería se aprobó la tesis por unanimidad con la calificación de (16) dieciséis, siendo las 12:00 horas del mismo día, se invitó a la recurrente para darle a conocer el veredicto final con el cual se dio por finalizado el presente acto.


Dr. Nataniel Mario Jimenez Gutiérrez
Presidente


Msc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo
Secretario




Msc. Daniel Jesús Ferrallos Ramos
Vocal

Fe de erratas en el título de la tesis dice Merrill debe decir Merrill.



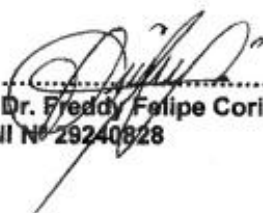
Certificado de similitud

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Freddy Felipe Cori Nina**, en mi condición de asesor acreditado por la RESOLUCIÓN DE FACULTAD RESOLUCIÓN DE FACULTAD N° 8357-2024-FAIN/UNJBG del 12 de enero del 2024, de la Tesis titulado: "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MERRILL-CROWE MEDIANTE EL CONTROL DEL CIANURO LIBRE PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE ORO, CAYLLOMA - 2024"; Presentado por la Srta. Bachiller: **JULIA ANTONIETA VELARDE BEGAZO**. Para optar el Título Profesional de **INGENIERO METALURGISTA**.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual Turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido, cuyo porcentaje es del 8% expresado en el reporte de similitud `trn:oid:::23228:503592817`. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la Tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedito para continuar con los trámites para la obtención del **Título Profesional de Ingeniero Metalurgista**, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 26 de setiembre del 2025.


.....
Asesor: **Dr. Freddy Felipe Cori Nina**
DNI N° 29240828




.....
Tesisista: **Julia Antonieta Velarde Begazo**
DNI N° 70379866



Dedicatoria

Con gran respeto, mi dedicatoria va dirigido a mamá, por su ánimo a no rendirse. También lo dedico a mis hermanos, Paola y Paul, que me sirven de motivación para no rendirme nunca.

Agradecimiento

Quisiera expresar mi gratitud a mis profesores por su ayuda y su constante intercambio de información, que nos ha permitido rendir bien y avanzar profesionalmente.

Quisiera ser grata con mi familia y amigos por su inquebrantable ayuda y motivación para seguir creciendo tanto personal como profesionalmente.

Índice de contenidos

	Pág.
PÁGINAS DEL JURADO.....	¡Error! Marcador no definido.
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice de tablas.....	ix
Índice de figuras	xi
Índice de anexos.....	xii
Resumen.....	xiii
Introducción	xv
Capítulo I.....	1
Planteamiento del Problema.....	1
1.1. Descripción del Problema	1
1.1.1. Antecedentes del problema	1
1.1.2. Problemática de la investigación.....	2
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema Principal	3
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Justificación e importancia.....	4
1.3.1. Justificación teórica.....	4
1.3.2. Justificación Académica.....	4
1.3.3. Justificación Tecnológica.....	5
1.3.4. Justificación Económica.....	5
1.3.5. Importancia de la Ejecución de la Tesis.....	5
1.4. Alcances y limitaciones.....	6
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo General	6
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6

1.6. Hipótesis.....	7
1.7. Variables	7
1.8. Operacionalización de las variables	8
Capítulo II	9
Marco Teórico.....	9
2.1. Antecedentes del estudio.....	9
2.2. Bases teóricas	15
2.2.1. Reactivos	15
2.2.1.1. Cianuro y cianuro de sodio	15
2.2.1.2. Polvo de zinc	21
2.2.1.3. Diatomita.....	22
2.2.2. Tipos de procesos de cianuración	22
2.2.2.1. Lixiviación estática	23
2.2.2.2. Fundamentos de la cementación con Zn	26
2.2.3. Procesos Merrill-Crowe para la recuperación de oro.....	31
2.2.4. Interferencias en la cementación	32
2.2.5. Procesos Químicos-Cinética	37
2.3. Definición de Términos.....	38
Capítulo III.....	40
Marco Metodológico	40
3.1. Tipo y Diseño de la investigación.....	40
3.2. Población y muestra	43
3.3. Operacionalización de variables	43
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección d e datos.....	43
3.5. Procesamiento y análisis de datos	44
3.5.1. Material y reactivos.....	44
3.5.2. Procesamiento	44
3.5.3. Equipos para la recuperación de oro	49

Capítulo IV.....	76
Resultados y Discusión	76
4.1. Resultados	76
4.2. Discusión.....	85
Conclusiones	86
Recomendaciones.....	87
Referencias Bibliográficas	88
Anexos	90

Índice de tablas

Tabla 1 Datos de reactivo de polvo de zinc Datos de zinc.....	21
Tabla 2 Datos de reactivo de polvo de zinc	21
Tabla 3 Datos de reactivo de diatomita.....	22
Tabla 4 Datos de reactivo de diatomita.....	22
Tabla 5 Serie electromotriz de metales	25
Tabla 6 Serie electromotriz de cationes a 25 oC y a=1 mol/L.....	28
Tabla 7 Datos Generales de la bomba de solución rica	50
Tabla N° 8 Leyenda Bomba de solución rica.....	51
Tabla N° 9. Datos Generales Filtro Clarificador	52
Tabla N° 10 Leyenda Filtro Clarificador.....	53
Tabla N° 11. Leyenda Tanque del Filtro Clarificador.....	55
Tabla N° 12. Datos Generales Torre de Vacío	56
Tabla N° 13 Leyenda.....	57
Tabla N° 14. Datos Generales Bomba de Vacío	59
Tabla N° 15. Leyenda Bomba de vacío.....	60
Tabla N° 16 Datos Generales	61
Tabla N° 17 Bomba de Precoat	62
Tabla 18 Datos Generales	64
Tabla N° 19 Bomba de Body Feat.....	65
Tabla N° 20. Datos Generales Bomba Vertical.....	66

Tabla N° 21. Leyenda Bomba Vertical	67
Tabla N° 22. Datos Generales Dosificador de Zinc	69
Tabla N° 23. Leyenda Dosificador de Zinc.....	70
Tabla N° 24. Datos Generales Filtro Prensa.....	72
Tabla N° 25. Leyenda Filtro prensa	73
Tabla N° 26. Leyenda Placas de filtrado	75
Tabla 27 Parámetros fijos.....	76
Tabla 28 Leyes de solución barren.....	77
Tabla 29 Leyes de fuerza de cianuro.....	78
Tabla 30 Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica	
Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica.....	84
Tabla 31 Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica	
Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica.....	84

Índice de figuras

Figura 1 Cianuro	15
Figura 2 Lixiviacion en pilas	18
Figura 3 Lixiviacion en cuba.....	19
Figura 4 Cimentacion con zinc	27
Figura 5 Fotografía del cono donde se produce la mezcla de polvo de zinc con la solución rica	36
Figura 6 Diagrama de Flujo del proceso de precipitación Merrill-Crowe	42
Figura 7 Diagrama de flujo de la Planta de Merrill Crowe.....	46
Figura 8 Cono de recepción del zinc.....	48
Figura 9 Filtro clarificador de solución rica.....	49
Figura 10 Bomba de solución rica	51
Figura 11 Filtro Clarificador	53
Figura 12 Tanque del Filtro Clarificador	55
Figura N° 13 Torre de vacío	57
Figura N° 14 Principio de funcionamiento de la Torre de Vacío	58
Figura N° 15 Bomba de vacío.....	60
Figura N° 16 Bomba de Precoat	62
Figura N° 17 Leyenda.....	64
Figura N° 18 Bomba vertical	67
Figura N° 19 Dosificador de zinc	70

Figura N° 20 Funcionamiento del Dosificador de zinc.....	71
Figura N° 21 Filtro prensa	73
Figura N° 22 Placas de filtrado	75
Figura 23 Resultados Abril	79
Figura 24 Resultados Mayo	79
Figura 25 Resultados Junio	80
Figura 26 Resultados Julio	81
Figura 27 Resultados Agosto	81
Figura 28 Resultados Setiembre	82
Figura 29 Demostración de relación de datos	83

Índice de anexos

Anexo 1 Diagrama de flujo de una planta de precipitación Merrill-Crowe	90
Anexo 2	92
Anexo 3	93
Anexo 4 Determinación del Cianuro Libre, Titulación con AgNO_3	94

Resumen

En este estudio, examinamos la obtención de oro utilizando un ítem particular: el número de cianuro libre en la solución rica que se recupera tras la lixiviación en tanque por el método Merrill Crowe.

Dicho material que tratamos contiene sílice y mineral sulfurado con una ley superior a 3g/t de oro. Para recoger la solución lixiviada, el mineral se tritura, se muele a 80% malla 200 y luego se espesa.

Debido al contenido de cianuro y sulfuro del mineral, se producen interferencias durante el proceso de precipitación del Au.

Tanto el Au y la Ag están en solución, se utilizó el método Merrill Crowe que incrementa la efectividad.

El cianuro libre en la solución fue el único parámetro que se modificó durante el proceso de evaluación y resolución de problemas, que se llevó a cabo en tiempo real dentro de la operación. La turbidez de la solución, la cantidad de O₂ en disolución y la proporción de Zn se mantuvieron constantes.

La producción de oro aumenta significativamente en un 10% adicional.

Abstract

In this study, we examined gold recovery using a particular parameter: the amount of free cyanide in the pregnant solution recovered after tank leaching via the Merrill-Crowe process.

The material being treated contains silica and sulfide ore with a grade higher than 3 g/t of gold. To collect the leached solution, the ore is crushed, ground to 80% passing 200 mesh, and then thickened.

Due to the cyanide and sulfide content of the ore, interferences occur during the gold precipitation process.

Since both Au and Ag are in solution, the Merrill-Crowe process was used to enhance recovery efficiency.

Free cyanide in the solution was the only parameter modified during the troubleshooting and evaluation process, which was carried out in real time during operation. Solution turbidity, dissolved O₂ levels, and Zn dosage were kept constant.

Gold production increased significantly by an additional 10%.

Introducción

En las instalaciones de la Planta se procesan diariamente 1 500 toneladas de mineral sulfurado rico en oro, plata, plomo y zinc. El proceso Merrill-Crowe se emplea para recuperar oro y plata a partir de la solución de cianuro obtenida tras la trituración, molienda y lixiviación del mineral. La eficiencia de este proceso depende crucialmente de la pureza de la solución, la cual debe presentar una turbidez inferior a 1 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez) para optimizar la unión entre el zinc y los metales preciosos.

Con el objetivo de aumentar la recuperación de oro y plata, se han implementado dos estrategias para optimizar el proceso Merrill-Crowe:

- 1) Control de la turbidez de la solución:** Se ha implementado un sistema de filtración mejorado que combina filtros clarificadores, dosificación precisa de diatomita (ayuda filtrante), desarrollo adecuado de la precapa y alimentación continua del cuerpo del filtro.
- 2) Optimización del contenido de cianuro libre:** Se ha evaluado el impacto de modificar la cantidad de cianuro libre en la solución sobre la precipitación de oro.

La implementación del sistema de filtración mejorado ha permitido reducir significativamente la turbidez de la solución, alcanzando valores consistentemente inferiores a 1 NTU. Esto ha contribuido a una mejor precipitación de oro y plata, aumentando la recuperación global de metales preciosos.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia de un control estricto de la turbidez de la solución en el proceso Merrill-Crowe. La implementación de un sistema de filtración eficiente es fundamental para garantizar la óptima unión entre el zinc y los metales preciosos, maximizando así la recuperación de oro y plata.

Se están realizando estudios para determinar la cantidad óptima de cianuro libre en la solución, buscando un equilibrio entre la eficiencia de precipitación y los aspectos medioambientales relacionados con el uso de cianuro.

Las estrategias implementadas para optimizar el proceso Merrill-Crowe en Caylloma han demostrado ser efectivas para aumentar la recuperación de oro y plata. Se espera que la investigación en curso sobre el contenido de cianuro libre permita refinar aún más el proceso y alcanzar niveles aún mayores de eficiencia.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del Problema

1.1.1. Antecedentes del problema

En 2017, el modelo de lixiviación de la planta preveía una concentración de cianuro libre de 1 g/L en el tanque de lixiviación. Sin embargo, la solución rica que ingresó a las instalaciones de Merrill-Crowe presentaba una concentración de cianuro libre que oscilaba entre 0,1 g/L y 0,5 g/L. Esta discrepancia entre las predicciones del modelo y la realidad operativa motivó la realización de experimentos con el objetivo de optimizar la recuperación de finos en la etapa Merrill-Crowe.

Los experimentos se enfocaron en modificar la concentración de cianuro libre en la solución de lixiviación. Se evaluaron diferentes niveles de cianuro libre y se analizaron los resultados en términos de la recuperación de oro y plata en la etapa Merrill-Crowe.

Los resultados de los experimentos demostraron que la concentración óptima de cianuro libre para la lixiviación era de alrededor de 0,5 g/L. A este nivel, se observó una mejora significativa en la recuperación de finos de oro y plata en la etapa Merrill-Crowe, lo que se tradujo en un aumento general de la eficiencia del proceso.

La optimización de la concentración de cianuro libre en la planta Caylloma ha permitido mejorar la eficiencia del proceso de recuperación de oro y plata, lo que se traduce en un aumento de la producción y la rentabilidad de la operación. Además, la reducción del consumo de cianuro contribuye a minimizar el impacto ambiental del proceso, sin incremento del costo de producción.

Es importante continuar con la investigación y el monitoreo de la concentración de cianuro libre en la solución de lixiviación. Se sugiere implementar un sistema de control automático para ajustar la concentración de cianuro libre en tiempo real en función de las condiciones operativas.

1.1.2. Problemática de la investigación

En cuanto a la problemática del estudio, el proceso utilizado en la extracción de oro disuelto en cianuro se denomina procedimiento Merrill-Crowe. La Merrill Company comenzó a construir un tipo particular de instalación en 1932, marcando el inicio de este proceso. Esta instalación lleva a cabo simultáneamente la desoxigenación de la solución limpia, la precipitación en la disolución procedente del proceso y la clarificación de ésta.

Nos preguntamos entonces si podemos mejorar la recuperación en la zona de Merrill-Crowe cambiando la cantidad de cianuro libre en la

solución rica. Aunque los ítems ideales para precipitar oro y plata están mayoritariamente dentro de los límites para una precipitación eficiente, hay una dificultad con la precipitación de oro utilizando polvo de zinc en la Planta durante el proceso Merrill-Crowe.

La plata se recupera con eficiencia; sin embargo, en el caso del oro, se produce una solución estéril con concentraciones superiores a 0,3 mg/L, cuando lo ideal sería alcanzar una concentración estéril de 0,03 mg/L. El dilema surge debido a la complejidad de nuestro entorno operativo, ya que la lixiviación también disuelve otros cianicidas, añadiendo muchos interferentes a la solución y disminuyendo la cantidad de oro presente, lo que reduce la eficacia de la precipitación.

Como resultado, al evaluar los parámetros, observamos que la cantidad de CN^- en la solución era baja, ya que había suficientes cianicidas presentes. Por esta razón, es necesario monitorear este parámetro para determinar si está influyendo en la eficiencia de la precipitación y, en última instancia, en la recuperación del oro.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema Principal

¿Cómo optimizar el proceso Merrill-Crowe en la Minera Caylloma mediante el control del cianuro libre para maximizar la recuperación de oro?

1.2.2. Problemas específicos

- 1) ¿Cuál es el efecto del cianuro libre en la eficiencia de la precipitación de oro en el proceso Merrill-Crowe de la Minera Caylloma?
- 2) ¿Cuál es la concentración óptima de cianuro libre para maximizar la recuperación de oro en el proceso Merrill-Crowe de la Minera Caylloma?
- 3) ¿Qué estrategias de control del cianuro libre son efectivas para optimizar el proceso Merrill-Crowe en la Minera Caylloma?

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación teórica

La presente tesis se fundamenta en los principios de la química inorgánica y la fisicoquímica, específicamente en las reacciones de precipitación y los equilibrios químicos que involucran al ion cianuro y al oro en soluciones acuosas. Se profundizó en el estudio del proceso Merrill-Crowe, analizando los factores que afectan la eficiencia de la precipitación de oro, con especial énfasis en el papel del cianuro libre.

1.3.2. Justificación Académica

La investigación desarrollada contribuye al conocimiento científico en el campo de la metalurgia extractiva, particularmente en el área de la recuperación de oro y plata. Los resultados obtenidos permiten ampliar la comprensión del efecto del cianuro libre en el proceso Merrill-

Crowe y proporcionarán información valiosa para la optimización de este proceso en la industria metalúrgica.

1.3.3. Justificación Tecnológica

La optimización del proceso Merrill-Crowe mediante el control del cianuro libre tiene un impacto significativo en la eficiencia de la recuperación de oro. La implementación de las estrategias de control propuesta en esta tesis permitió mejorar el rendimiento del proceso, reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental asociado a la lixiviación con cianuro.

1.3.4. Justificación Económica

La optimización del proceso Merrill-Crowe se traduce en un aumento de la recuperación de oro, lo que representa un beneficio económico considerable para la empresa.

1.3.5. Importancia de la Ejecución de la Tesis

La ejecución de esta tesis es de gran importancia por las siguientes razones:

- ✓ Contribuye al avance del conocimiento científico en el área de la recuperación de oro.
- ✓ Proporciona información valiosa para la optimización del proceso Merrill-Crowe en la industria metalúrgica.
- ✓ Permite mejorar la eficiencia de la recuperación de oro.

- ✓ Reduce costos operativos y aumenta la rentabilidad de la operación metalúrgica.

En definitiva, la investigación desarrollada en esta tesis tiene un alto potencial para generar un impacto positivo en el ámbito académico, tecnológico y económico, contribuyendo al desarrollo sostenible de la industria metalúrgica.

1.4. Alcances y limitaciones

La indagación se centra en los procedimientos involucrados en la producción de oro, específicamente en el ajuste de la concentración de cianuro libre en las soluciones obtenidas al lavar la pulpa lixiviada en sedimentadores que contienen de 0,069 a 0,083 m³/s de solución rica que se bombean a la Planta Merrill-Crowe.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Optimizar el proceso Merrill-Crowe mediante el control del cianuro libre para maximizar la recuperación de oro.

1.5.2. Objetivos Específicos

- 1) Determinar el efecto del cianuro libre en la eficiencia de la precipitación de oro en el proceso Merrill-Crowe.
- 2) Identificar la concentración óptima de cianuro libre para maximizar la recuperación de oro en el proceso Merrill-Crowe.

- 3) Evaluar y recomendar estrategias de control del cianuro libre para optimizar el proceso Merrill-Crowe.

1.6. Hipótesis

El control del cianuro libre en el proceso Merrill-Crowe tiene un impacto significativo en la recuperación de oro, y la optimización de este parámetro puede mejorar considerablemente la eficiencia del proceso.

1.7. Variables

Variable Independiente

Concentración de Cianuro Libre (CN⁻)

Variable Dependiente

Recuperación de Oro (%)

1.8. Operacionalización de las variables

La operacionalización de las variables se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI Concentración de Cianuro Libre	• Concentración inicial de CN ⁻ en la solución rica	ppm
	• Concentración final de CN ⁻ en la solución estéril	ppm
	• Perfil de concentración de CN ⁻ durante el proceso Merrill-Crowe	ppm
VD Recuperación de oro	• Porcentaje de oro recuperado en la etapa del proceso Merrill-Crowe	%
	• Eficiencia global de recuperación de oro	%
	• Niveles de oro en la solución estéril final	ppm

(*) Las variables de pH, tiempo de residencia, ppm de oxígeno, ratio de dosificación de Zn, se mantienen constantes.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes del estudio

Figuerola et al. (2012) en su artículo “Kinetic Aspects of Gold and Silver Recovery in Cementation with Zinc Powder and Electrocoagulation Iron Process” indican que, el proceso Merrill-Crowe o de Cementación se utiliza para la concentración y purificación de oro y plata a partir de soluciones de cianuro. Entre otras opciones disponibles para la recuperación de metales preciosos, la electrocoagulación (EC) es una técnica electroquímica muy prometedora para la recuperación de estos metales preciosos. En este trabajo se presenta, en primer lugar, una introducción a los fundamentos de los procesos Merrill-Crowe y EC, a continuación, se exponen las condiciones y resultados cinéticos de ambos procesos para la eliminación de oro y plata a partir de soluciones cianuradas y, por último, se muestra la caracterización de los productos sólidos formados durante el proceso EC mediante difracción de rayos X y SEM. Los resultados sugieren que la cementación del oro y la plata por partículas de zinc en suspensión se ajusta bien a una cinética de primer orden y para el proceso EC los resultados muestran que es una excelente opción para eliminar Au y Ag de la solución de cianuro mediante el uso de electrodos de hierro. Finalmente, en el reactor EC experimental se eliminó el 99,5 % del oro y la plata, y se consiguió en 5 minutos o menos.

Chi et al. (1997) en su artículo “Study of Merrill-Crowe processing. Part I: Solubility of zinc in alkaline cyanide solution” realizaron un estudio exhaustivo de la solubilidad del zinc en soluciones alcalinas de cianuro desaireadas. Los parámetros investigados fueron: oxígeno disuelto, concentraciones de cianuro y nitrato de plomo y pH. La solubilidad del zinc aumenta significativamente con el incremento de las concentraciones de oxígeno disuelto y cianuro. Se han desarrollado y utilizado diagramas Eh-pH para predecir las regiones de estabilidad del hidróxido de zinc, que puede inhibir la precipitación del oro. Se presenta la interacción entre las actividades del cianuro y del ion hidroxilo para prevenir la formación de hidróxido de zinc. Con adiciones de nitrato de plomo, la solubilidad máxima del zinc se produce en el intervalo de 10-15 mg/l de nitrato de plomo. Se presentan fotomicrografías SEM de partículas de zinc en presencia de nitrato de plomo.

Vásquez et al. (2014) en su artículo “Recovery of Silver from Cyanide Solutions Using Electrochemical Process Like Alternative for Merrill-Crowe Process” encontraron que, los procesos convencionales para la recuperación de plata a partir de soluciones de lixiviación de cianuro son la adsorción en carbón activado, la cementación de polvo de zinc Merrill-Crowe, el intercambio iónico y los procesos de extracción con disolventes; entre otras opciones disponibles para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de cianuro, la electrocoagulación (EC) es un proceso electroquímico muy prometedor que no

requiere altas concentraciones de plata en las soluciones de cianuro para producir excelentes resultados y tampoco un tratamiento previo de las soluciones de cianuro como el proceso Merrill-Crowe (desoxigenación y clarificación). El presente estudio se ha realizado para la recuperación de la plata contenida en la solución preñada del proceso de cianuración utilizando la tecnología de electrocoagulación con electrodos de hierro, y por tanto desarrolla una tecnología alternativa al proceso Merrill-Crowe. El contenido promedio de plata en la solución preñada fue de 52 ppm, se obtuvo una recuperación del 99% de plata, con estos parámetros óptimos de operación, pH = 8, tiempo de residencia = 20 minutos y conductividad por adición de cloruro de sodio = 4 g/L. Finalmente, se realizó la caracterización de los productos sólidos formados durante el proceso de CE con Difracción de Rayos X y Microscopio Electrónico de Barrido, los resultados sugieren la presencia de partículas de magnetita y oxihidróxidos de hierro amorfos (Lepidocrocita).

Viramontes et al. (2005) en su artículo “The effect of cyanide and lead ions on the cementation rate, stoichiometry and morphology of silver in cementation from cyanide solutions with zinc powder” manifiestan que han investigado la cementación de plata sobre polvo de zinc a partir de soluciones con una amplia gama de concentraciones de cianuro en ausencia y presencia de iones de plomo mediante ensayos por lotes en reactor agitado y estudios de microscopía electrónica de barrido sobre el producto de cementación. La

concentración de iones cianuro afectó a la morfología del producto, a la naturaleza de la reacción de cementación y a la cinética de cementación. Se han identificado tres regímenes de concentración dependientes del cianuro un régimen de baja concentración de cianuro en el que la cementación de la plata seguía una reacción de tipo intercambio iónico que tenía lugar en la interfase zinc/solución acuosa, y la plata se depositaba alrededor de la partícula de zinc en un crecimiento uniforme; un régimen de alta concentración de cianuro, como en las prácticas de las plantas, en el que la cementación de la plata seguía una reacción química global que implicaba la evolución de hidrógeno y una estequiometría molar de plata a zinc de uno a uno (en este régimen, tanto la oxidación anódica como las reacciones de reducción catódica se producían en interfaces distintas y la plata se depositaba en una morfología de ramificación densa.), y un régimen intermedio de concentración de cianuro que es una transición entre los dos regímenes anteriores. En los regímenes bajo e intermedio, los iones de plomo y cianuro no afectaron a la morfología de la plata cementada, pero aumentaron la cinética de cementación de la plata debido a la inestabilidad del hidróxido de cinc ($Zn(OH)_2$). En el régimen de alta concentración de cianuro, los iones de plomo no modificaron apreciablemente la cinética de cementación. Modificaron el patrón del depósito de plata de una morfología densa-ramificada a una morfología dendrítica.

Oo y Tran (1991) en su artículo “The effect of lead on the cementation of gold by zinc” indican que, utilizaron electrodos de disco giratorio para evaluar el efecto del plomo en las dos semiceldas que intervienen en el proceso de cementación: la reducción del oro y la disolución del zinc. Los diagramas de Evans contruidos a partir de las curvas corriente-potencial muestran que el proceso de cementación está controlado por la difusión de iones de cianuro de oro a la superficie de zinc (energía de activación de 2,55 kcal/mol). Las velocidades iniciales de cementación predichas a partir de los diagramas de Evans no se vieron afectadas por la adición de plomo. Estas velocidades también se confirmaron a partir de experimentos en los que se utilizaron discos de zinc para cementar el oro de diferentes soluciones. A 283 °K (10°C), la adición de plomo (a 3 ppm) mejoraría el proceso de cementación al ampliar la zona de difusión para la reacción. A 313 °K (40°C) y en presencia de plomo aumentó el sobrepotencial de hidrógeno, lo que provocó una disminución de la corrosión del zinc. La morfología del depósito también cambió como consecuencia de la adición de plomo, lo que en algunos casos afectó a la cinética de cementación. El estudio abarca las características cinéticas de la cementación de oro a partir de soluciones de cianuro utilizando dos polvos de zinc de distintos orígenes. El primero se obtuvo por destilación y se aplica actualmente en la cementación de oro a partir de soluciones de cianuro (polvo tradicional). El segundo se obtuvo por reducción electroquímica a partir de la

solución alcalina (polvo electrolítico experimental). La principal característica distintiva de estos polvos de cementación es su superficie específica. Esta para el polvo electrolítico es 2,6 veces mayor que para el tradicional ($3,02 \text{ m}^2/\text{g}$ y $1,16 \text{ m}^2/\text{g}$, respectivamente) debido a su forma dendrítica. En los estudios se utilizó una solución con un contenido de oro de $50,8 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ y se tomó un contenido de cianuro de sodio de $0,04 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaCN}$. La cementación reveló un periodo de despasivación del polvo asociado a la disolución de la película de óxido y a la superación de las dificultades de difusión. El periodo de despasivación del polvo tradicional (10-15 seg) supera al del polvo electrolítico (5-8 seg). Se determinaron constantes de velocidad experimentales de la reacción de cementación para el proceso en el que intervienen los dos polvos objeto de estudio a diferentes proporciones de masas de zinc y oro en la solución. Las constantes experimentales de velocidad de reacción para el polvo electrolítico en las condiciones estudiadas fueron 1,3- 1,6 veces superiores a las del polvo tradicional. Se comprobó que las velocidades de oxidación de los polvos de zinc comparados a diferentes proporciones de masas de zinc y oro son prácticamente las mismas. Al mismo tiempo, las tasas absolutas de disolución del polvo electrolítico en el periodo inicial son casi 2 veces superiores. A medida que el polvo reacciona con la solución alcalina, las tasas absolutas de disolución de los polvos electrolíticos y tradicionales se igualan.

2.2. Bases teóricas

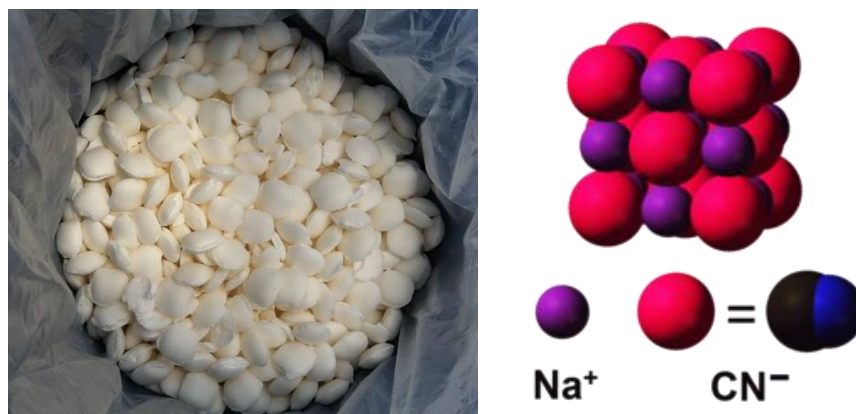
2.2.1. Reactivos

2.2.1.1. Cianuro y cianuro de sodio

El cianuro es una sustancia química de acción rápida y potencialmente mortal. Se entiende cualquiera de los diversos compuestos que contienen el grupo químico CN: un átomo de carbono (C) y un átomo de nitrógeno (N). Al ser orgánico, reacciona fácilmente con los organismos vivos.

Figura 1

Cianuro

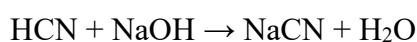


Nota: <https://es.ahsanji.com>

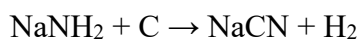
Según Andreas (2006) el cianuro de sodio es un compuesto venenoso cuya fórmula es NaCN. Es un sólido blanco soluble en agua. El cianuro tiene una gran afinidad por los metales, lo que provoca la

elevada toxicidad de esta sal. Su principal aplicación, en la extracción de oro, también aprovecha su alta reactividad hacia los metales. Es una base moderadamente fuerte.

El cianuro de sodio se produce tratando el cianuro de hidrógeno con hidróxido de sodio (Andreas, 2006).

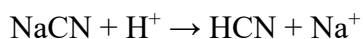


La producción mundial se estimó en 500 000 toneladas en el año 2006. Antiguamente se preparaba mediante el proceso Castner, que implicaba la reacción de la amida de sodio con carbono a temperaturas elevadas.



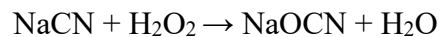
La estructura del NaCN sólido está relacionada con la del cloruro sódico (Wells, 1984). Los aniones y cationes son cada uno de seis coordenadas. El cianuro de potasio (KCN) adopta una estructura similar (Stokes et al.).

Cuando se trata con ácido, forma el gas tóxico cianuro de hidrógeno:



Al tratarse de una sal derivada de un ácido débil, el cianuro sódico se convierte fácilmente en HCN por hidrólisis; el sólido húmedo emite pequeñas cantidades de cianuro de hidrógeno, que se cree que

huele a almendras amargas (no todo el mundo puede olerlo; su capacidad se debe a un rasgo genético (Allison, 1953). El cianuro de sodio reacciona rápidamente con ácidos fuertes para liberar cianuro de hidrógeno. Este peligroso proceso representa un riesgo importante asociado a las sales de cianuro. Se desintoxica de forma más eficiente con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para producir cianato de sodio (NaOCN) y agua (Andreas, 2006).

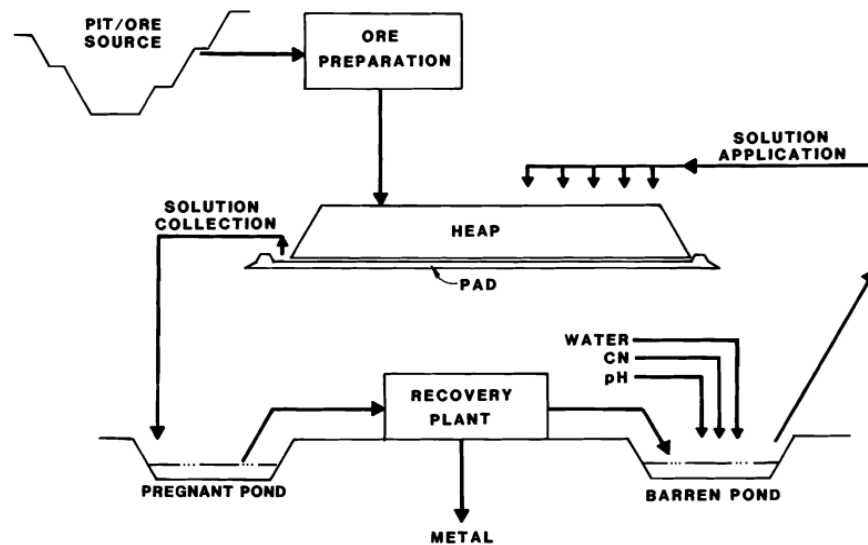


El cianuro se combina fácilmente con muchos metales, por lo que resulta útil para separar metales como el oro de su mineral. Se suele utilizar una solución de cianuro sódico para lixiviar el oro de la mena. Existen dos tipos de lixiviación:

Lixiviación en pilas: a cielo abierto, la solución de cianuro se pulveriza sobre enormes pilas de mineral triturado esparcidas sobre gigantescas plataformas de recogida. El cianuro disuelve el oro del mineral en la solución a medida que ésta se desliza por la pila. La plataforma recoge la solución impregnada de oro, a la que se le quita el oro y se vuelve a rociar sobre la pila hasta que se agota el mineral.

Figura 2

Lixiviación en pilas



Nota: <https://www.researchgate.net/>

Lixiviación en cuba (o tanque): El mineral se combina con la solución de cianuro en grandes tanques. Aunque las posibilidades de que se produzcan vertidos son menores porque el proceso de lixiviación está más controlado, los residuos resultantes, conocidos como estériles, se almacenan en grandes presas (embalses de estériles).

Figura 3

Lixiviación en cuba



Nota: Manual de operaciones

Transporte y almacenaje

El cianuro sódico sólo debe transportarse en el mismo vehículo con compuestos que sean compatibles. El cianuro de sodio sólido puede recuperarse fácil y rápidamente para reintroducirlo en los contenedores en caso de derrame. Sin embargo, es mucho más difícil controlar los vertidos de solución líquida de cianuro sódico. El cianuro no debe verterse en ríos o canales debido a su extrema toxicidad para la vida acuática. Además, no debe manipularse ni almacenarse junto a ácidos débiles o álcalis, ya que esta combinación produce el gas cianuro de hidrógeno (HCN), extremadamente peligroso. Dado que el

cianuro sódico húmedo es más difícil de manipular y regular, los bidones de cianuro deben mantenerse siempre firmemente tapados para evitar la absorción de humedad.

Detección del HCN

Olor	Almendras amargas, dulce
Gusto/Sabor	A metal
Sensación	Deshidratación.

Los equipos manuales pueden identificar y medir el HCN.

Medidas protectivas

- Evite inhalar polvo, solución o nieblas de cianuro sódico.
- Cuando exista la posibilidad de inhalar polvo o niebla, utilice un equipo de protección respiratoria que haya sido certificado.
- Mantenga el cianuro alejado de la piel, especialmente si tiene heridas abiertas. Si ha entrado en contacto con la piel, lávela inmediatamente. Póngase guantes de seguridad para evitar que entre en contacto con los ojos.
- Cuando manipule soluciones de cianuro o en situaciones en las que puedan producirse salpicaduras, utilice mascarillas de seguridad.

2.2.1.2. Polvo de zinc

Tabla 1

Datos

DATOS	%
Zinc	96 – 97
Óxido de zinc	0 – 3
Plomo	0 - 0,3

Nota: Manual de operación 2016

Tabla 2

Datos de reactivo de polvo de zinc

Apariencia y color	Polvo gris o gris azulado
Olor	Sin olor
Punto de ebullición	907 °C
Punto de fusión	419 °C
Presión de vapor	1mmHg @ 487°C
Gravedad específica	7.12 (Agua=1)
Solubilidad en agua	Insoluble en agua
% de volátiles por volumen (21°C)	0
Peso molecular	65.37

Nota: Manual de operación 2016

2.2.1.3. Diatomita

Tabla 3

Datos

COMPUESTO	%
Tierra diatomea, flux - calcined	100
Este producto contiene aproximadamente 72.5% de sílice cristalina	
Cristobalita	<70
Cuarzo	<2.5

Nota: Manual de operación 2016

Tabla 4

Datos de reactivo

Apariencia y color	Fino polvo blanco
Olor	Sin olor
pH	9 - 10.5
Solubilidad en agua	Leve (0.1 - 1%)

Nota: Manual de operación 2016

2.2.2. Tipos de procesos de cianuración

Cuando estos elementos se lixivian utilizando soluciones de NaCN, se produce un proceso de dilución electroquímica:

La reacción anódica es:

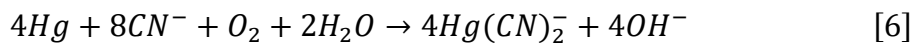
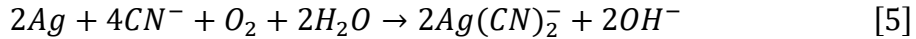
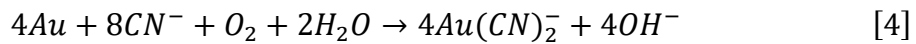


La reacción catódica es:



Su representación esquemática tiene este aspecto.

Durante la lixiviación con soluciones de cianuro, se producen las siguientes reacciones químicas generales con las concentraciones de oro, plata, cobre, zinc, plomo y hierro (componentes principales):



En algunos casos, se introduce oxígeno puro en el tanque de lixiviación, lo que resulta cinéticamente muy ventajoso para la lixiviación de oro y plata.

2.2.2.1. Lixiviación estática

a) Proceso Merrill Crowe

Se basa en:

- Filtrado
- Desoxigenación.
- Polvo de zinc

El producto final del desarrollo Merrill Crowe es precipitar Au y Ag que se transfiere al precipitado y la disolución de cianuro de Zn estéril deficiente en Au. Para un lavado a contracorriente adicional, esta combinación también se introduce en el molino y se recircula.

De este modo, se completa un circuito cerrado en el que la solución se vuelve a utilizar continuamente en lugar de verterse al medio ambiente.

b) Fundición

Los lingotes de oro son el resultado final después de fundir el producto a aproximadamente mil grados centígrados.

Volatilización. Los metales de bajo punto de fusión que están presentes con el oro como impurezas se eliminan por volatilización calentándolo en hornos de retorta a 650° C.

Precipitación de oro y plata con Zn y sus características

Precipitar los metales de una solución cianurada de un metal por otro, llamada así porque se coloca encima del metal extra. Este procedimiento es posible gracias a la diferencia electroquímica entre el elemento que se va a cementar y el agente cementante. Esta diferencia permite determinar el medio de cementación ideal.

El metal que se reduce a menudo parece estar relacionado con el reactivo que se introduce durante la cementación.

Es posible determinar la propensión de un metal a transformarse en su forma iónica en disolución y generar la serie electromotriz gracias a la teoría de Nernst, que él mismo ideó y que clasifica los metales en función de su presión de disolución.

Tabla 5

Serie electromotriz de metales

298 °K (25°C) 1 atm

Elemento	E° V
Li	-3.05
K	-2.39
Na	-2.71
Ca	-2.76
Mg	-2.37
Al	-1.66
Mn	-1.18
Zn	-0.76
Cr	-0.74
Fe	-0.44
Cd	-0.40
Ni	-0.25
Sn	-0.14
Pb	-0.13
H	0
Cu	+0.34
I	+0.53
Hg	+0.78
Ag	+0.79
Pt	+1.36
Br	+1.08
Au	+1.43

Nota: *Burns Ratch, 2003*

El metal con un potencial de oxidación positivo mayor ingresará y avanzará al material con un potencial menos positivo, como puede esperarse de los potenciales de electrodo. Debido a que el metal precipitado está pegado al metal adicional, los metales precipitan la disolución aguada en sal por otro (Habashi Fathi, 1999).

La precipitación, que tiene una inversión y unos gastos operativos mínimos, consiste en la precipitación de un metal muy impuro, lo que da lugar a un material cementoso que requiere un tratamiento de purificación posterior. En la cementación, hay que tener en cuenta dos factores cruciales: fuerza de cianuro y dosificación de zinc.

La reacción es más preferida si es amplia la distinción de potencial entre los dos metales (ΔG es menor).

2.2.2.2. Fundamentos de la cementación con Zn

Se necesita una reacción de desplazamiento para cementar metales M_1 según la disolución. El dinámico, M_2 , disminuye los iónicos del metal precipitado a un estado aleatorio. El metal precipitado nace entonces de la solución y es sustituido por los mismos. El más activo, como ion, permanece en la fase acuosa mientras que el metal precipitado, en su forma elemental, se vuelve insoluble y precipita. El

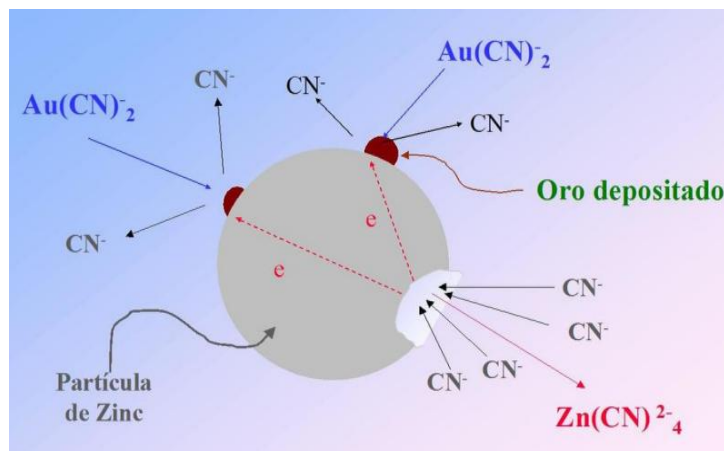
metal se elige mediante un procedimiento denominado serie electromotriz. El potencial de electrodo del metal que se emplea como agente cementante tiene que ser inferior en la serie electromotriz al del metal que precipitaría. Normalmente, el procedimiento de cementación es el siguiente:



El metal cementante es donde se produce la reacción en su superficie.

Figura 4

Cementación con Zinc



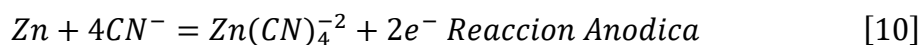
Nota:

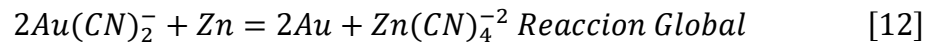
Tabla 6*Serie electromotriz de cationes a 25 °C y a=1 mol/L*

Elemento	E° V	Elemento	E° V	Elemento	E° V
Li/Li ⁻	-3.01	Cr/Cr ²⁺	-0.86	Cu/Cu ²⁺	+0.34
Rb/Rb ⁺	-2.98	Zn/Zn ²⁺	-0.73	Co/Co ³⁺	+0.40
Cs/Cs ⁺	-2.92	Cr/Cr ³⁺	-0.71	Ru/Ru ²⁺	+0.45
K/K ⁺	-2.92	Ga/Ga ³⁺	-0.52	Cu/Cu ⁻	+0.52
Ba/Ba ²⁺	-2.92	Ga/Ga ²⁺	-0.45	Te/Te ⁴⁺	+0.56
Sr/Sr ²⁺	-2.89	Fe/Fe ²⁺	-0.41	Po/Po ³⁺	+0.56
Ca/Ca ²⁺	-2.84	Cd/Cd ²⁺	-0.402	Rh/Rh ²⁺	+0.60
Na/Na ⁻	-2.713	In/In ³⁺	-0.34	Po/Po ²⁺	+0.65
La/La ³⁺	-2.40	Ti/Ti ⁺	-0.335	Os/Os ²⁺	+0.7
Mg/Mg ²⁺	-2.38	Co/Co ²⁺	-0.27	Rh/Rh ³⁺	+0.7
Y/Y ³⁺	-2.10	In/In ³⁺	-0.25	Ti/Ti ³⁺	+0.71
Th/Th ⁴⁺	-2.06	Ni/Ni ²⁺	-0.23	Hg ₂ /Hg ₂ ²⁺	+0.798
Sc/Sc ³⁺	-2.00	Mo/Mo ³⁺	-2.00	Ag/Ag ⁻	+0.799
Ti/Ti ²⁺	-1.75	Sn/Sn ²⁺	-0.14	Pb/Pb ⁴⁺	+0.80
Be/Be ²⁺	-1.70	Pb/Pb ²⁺	-0.126	Pd/Pd ²⁺	+0.83
U/U ³⁺	-1.70	Fe/Fe ³⁺	-0.036	Hg/Hg ²⁺	+0.854
Al/Al ³⁺	-1.66	D ₂ /2D ⁺	-0.003	Ir/Ir ³⁺	+1.00
V/V ²⁺	-1.50	H ₂ /2H ⁺	0.00	Pt/Pt ²⁺	+1.20
U/U ⁴⁺	-1.40	Bi/Bi ³⁺	+0.20	Au/Au ³⁺	+1.42
Nb/Nb ³⁺	-1.10	Sb/Sb ³⁺	+0.24	Ce/Ce ³⁺	+1.68
Mn/Mn ³⁺	-1.05	As/As ³⁺	+0.30	Au/Au ⁻	+1.70

Nota: Habashi, 1999**Electroquímica**

El proceso de cementar el Zn es eléctrico según las reacciones químicas. Los aniones complejos en los sitios catódicos se reducen por los electrones producidos cuando es disuelto en espacios insípidos.

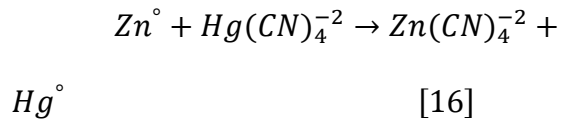
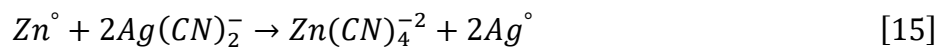
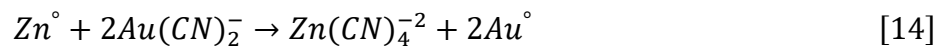




A menudo se trata de devolver un metal catiónico a su estado elemental.



A continuación, se exponen las principales respuestas directamente relacionadas con el proceso de Merrill-Crowe:



Las sales de plomo deben añadirse con precaución porque en exceso disminuirán la eficacia. Permiten que la cementación produzca espontáneamente regiones catódicas.

La ecuación de Nernst proporciona una expresión cualitativa de la fuerza inductiva necesaria para que el metal presente en una solución precipite:

$$E = E^0 - \frac{RT}{n} \times \ln \frac{M^0}{M^+} \quad [17]$$

Donde:

R = cte de los gases = 8.314 joules / °K * mol

T = Temperatura absoluta °K

E° = Potencial estándar de reducción (referido al hidrogeno).

La ecuación de Nernst sería la siguiente si adoptáramos:

La convención de que la actividad del Mo sólido es igual a la unidad y que la actividad del Mo es igual a la concentración en las condiciones encontradas:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{n} \times \ln(M^{+}) \quad [18]$$

Esta ecuación permite deducir fácilmente que el potencial de los cationes M⁺ determina la probabilidad de que se reduzcan a Mo; cuanto mayor es el potencial, mayor es la probabilidad de que precipite el metal.

Por otra parte, la propensión de los cationes M⁺ a ser detectados en solución aumenta con la disminución del potencial E.

Potenciales estándar primarios para los componentes causantes de la precipitación.

$$E^{\circ} Au = 1,730 \text{ volts.} \quad [19]$$

$$E^{\circ} Ag = 0,792 \text{ volts.} \quad [20]$$

$$E^{\circ} Hg = 0,798 \text{ volts.} \quad [21]$$

$$E^{\circ} Cu = 0,347 \text{ Volts} \quad [22]$$

$$E^{\circ} Zn = -0,762 \text{ volts.} \quad [23]$$

Esto nos lleva fácilmente a la conclusión de que los siguientes emparejamientos, conocidos como pares galvánicos con zinc, tendrán la mayor propensión a formarse:

Au-Zn; Ag-Zn; Hg-Zn; Cu-Zn; Fe-Zn; y Pb-Zn.

Éstos dependerán lógicamente de los complejos y de las concentraciones de cada uno en la solución.

2.2.3. Procesos Merrill-Crowe para la recuperación de oro

Debido a su sencillo funcionamiento, éste es el más popular para recuperar oro y plata. En la actualidad se utiliza polvo de zinc; al principio se utilizaba limadura, pero el uso de polvo fue posible gracias a su gran contacto y movimiento al reaccionar. La desoxigenación de la solución de lixiviación, que redujo la cantidad de cemento necesaria, fue otra mejora importante del proceso. La técnica Merrill-Crowe está preparada para extraer el 90% de los valores metálicos del precipitado que se origina a partir de la solución rica gracias a diversos ajustes realizados a lo largo del tiempo.

Cualesquiera con más similitud por el cianuro que el oro o la plata puede utilizarse en lugar de estos dos metales, dejando el cemento soluble metálico de cianuro que precipita los preciosos.

Esta secuencia de elementos hará que se disuelvan en la solución de cianuro más rápidamente que los metales situados a su derecha, que desplazarán y cementarán a dichos metales. En las soluciones de cianuro, las determinaciones del orden electroquímico muestran la secuencia de positivo a negativo:

Mg, Al, Zn, Cu, Au, Ag, Hg, Pb, Fe, Pt.

El cobre, por ejemplo, precipitará a Au, Ag, Hg, y así sucesivamente.

Entre el metal precipitado más rápidamente, el Au y la Ag se encuentran el magnesio y el aluminio, pero el zinc es mayoritariamente ventajoso en términos económicos y tecnológicos, por lo que es el modo popular para cementar el oro y la plata (Torres Rudyard, 2010).

La planta Merrill-Crowe procesa la disolución (pregnant, preñadas) obtenidas de disolución que contiene Au y Ag.

2.2.4. Interferencias en la cementación

Algunas cosas van a dificultar que se desarrolle correctamente y reducir su eficacia, como, por ejemplo:

La presencia de oxígeno (O₂), que debe eliminarse de la solución en la medida de lo posible debido a su mayor potencial de reducción que la mayoría de los metales (+1,2 V).

A excepción del Au y la Ag, en los que existe una interferencia real, los iones pueden reducirse para generar nivel de energía. Minimizar el concentrado de protones, o aumentar el pH, impide que se produzca este fenómeno, aunque al hacerlo se ralentiza la velocidad de reducción, ya que como resultado se producen hidróxidos.

La superficie anódica activa del zinc sufre procesos de pasivación, que reducen la velocidad de reacción y, en el peor de los casos, detienen por completo la precipitación o, más exactamente, impiden que la reacción de oxidación progrese en su superficie (Ballester Antonio, 2000). El revestimiento de zinc provoca el aislamiento de la superficie de zinc, lo que conduce a la pasivación:

- ✓ Capa densa y compacta de metales precipitados.
- ✓ Capa de $Zn(OH)_2$.
- ✓ Recubrimiento con ZnS
- ✓ Recubrimientos con lamas, geles y durezas.

Dado que el $Zn(OH)_2$ es casi insoluble, la cementación se ralentiza. El equilibrio del $Zn(OH)_2$ depende del contenido de CN^- , del pH y el concentrado de Zn disuelto.

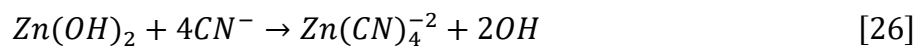
La formación del hidróxido pasivante, se describe por la reacción:



Los complejos de iones de zinc para crear complejos solubles a mayores concentraciones de cianuro, según:



El hidróxido de zinc se disuelve en presencia de cianuro según:



Las características del proceso eran las siguientes

- Utilizar virutas de zinc, planchas, etc.
- Hacer contacto en cajones o cubetas.
- Elevado uso de Zn (diez kilogramos/1 kilogramo de oro).
- Es difícil extraer y sacar el Au que se pega al Zn.
- Producción moderada.
- Neutralizar Zn(OH)₂ (sales, etc.).

Particularidades

1. Tiempo de respuesta rápido.
2. Fácil uso y gestión.
3. Bajo inventario y equilibrado.
4. Elevadas recuperaciones.

Defectos

1. Sensible (contaminantes, O₂, CN⁻, sólidos en suspensión).
2. Capacidad limitada para distinguir soluciones contaminadas.
3. Necesita soluciones cristalinas y desoxigenadas.

4. Baja eficacia cuando se utilizan interferencia pasiva (como As, Pb, Cu, Fe, Zn, etc.) en las soluciones.
5. Coloides

A continuación, repasaremos sus niveles:

1. Clarificación de la solución rica.

Para generar soluciones cristalinas con bajo contenido de partículas en suspensión a partir de la solución rica, que causan problemas con la pasivación del zinc, el funcionamiento del filtro prensa y la colada de precipitados, es necesario filtrar.

2. Desoxigenación de la solución rica clarificada

Los contenidos aclarados se desairean para conseguir precipitación fructífera. El método Crowe, que utiliza el vacío, muy eficaz al reducir el O₂ disuelto a menos de 1 ppm.

3. Ajuste de la Concentración de Cianuro

Las concentraciones correctas de CN⁻ deben ajustarse para obtener la mejor precipitación antes de añadir Zn a la solución. Para modificar las concentraciones, puede introducirse en el clarificador una solución que contenga CN.

4. Precipitación

Para iniciar la precipitación, se suministra una cantidad adecuada de zinc al cono de mezcla donde se crea la pulpa en

forma de polvo sólido. Si se va a utilizar sal de plomo, a menudo se dosifica en este momento junto con cianuro para alcanzar el rango de 0,2 a 1 g/L.

Figura 5

Cono de mezcla de polvo de zinc con la solución rica.



Nota: <https://metalurgia.911metallurgist.com/>

5. Filtración o colección del precipitado

La precipitación se mantiene y finaliza para la recolección mediante campanas durante el proceso en filtros de presión (marcos y placas).

2.2.5. Procesos Químicos-Cinética

Con respecto a la concentración del metal disuelto, la rapidez va primero y directamente proporcional al área del precipitante (polvo de zinc). El control de difusión de la capa límite es la fase de control del sistema.

Estos se crean en la superficie del zinc después de que el metal se sumerja o se añada a la solución que contiene los iones que deben reducirse, lo que inicia una reacción electroquímica.

Además, se inicia en el punto de ionización de los átomos metálicos, que es también el final de la reacción catódica. El proceso de cementación consta de dos etapas:

- a) La transferencia de iones de la superficie anódica a la extensión catódica.
- b) Propagación de capa duplicada y cambio electroquímico.

2.3. Definición de Términos

Clarificación de la solución rica

Dicha filtración es necesaria al crear cristalizaciones mínimas de partículas en suspensión (menos de 1 NTU), que son problemáticas para el funcionamiento del filtro prensa, la pasivación del zinc y la colada de precipitados.

Desoxigenación

La desoxigenación de las soluciones aclaradas produce una precipitación eficaz. El vacío se utiliza en el método Crowe, muy eficiente para la reducción del O₂.

Adición de polvo de zinc

Para iniciar la precipitación, se suministra una cantidad adecuada de zinc al cono de mezcla, donde se crea la pulpa en forma de polvo sólido. Normalmente, en esta fase se dosifica cianuro (make up) y sal de plomo si es necesario.

El oro en solución se precipita en forma de complejo cianuro-oro utilizando polvo de zinc. El cono emulsionador recibe este polvo.

Se realiza en filtros a presión (marcos y placas), que retienen la precipitación hasta que está lista para las misiones de recogida.

Filtración o colección del precipitado

Para ello se utiliza este tipo de filtro, que separa los líquidos de los sólidos. La filtración se produce entre las placas filtrantes individuales, que están suspendidas en las barras laterales del marco de filtrado.

Medición de vacío

Se puede determinar el nivel de descarga, con la comparación de presiones de la extensión y de la atmósfera. La fuerza que el peso de los gases de la atmósfera ejerce sobre un cuerpo se conoce como presión atmosférica. La presión negativa se utiliza para cuantificar el vacío.

El nitrato de plomo

Debido a la alta capacidad platúrgica de la solución, puede mejorarse la recuperación de plata. Es un potente oxidante para minimizar el producto de estos materiales en la solución eliminando otros elementos.

Capítulo III

Marco Metodológico

3. Marco Metodológico del Estudio

3.1. Tipo y Diseño de la investigación

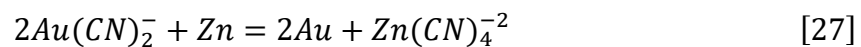
Esta investigación es aplicativa para generar nuevo conocimiento y es evaluativa por permitir una evaluación sistemática del proceso buscando optimizarlo

Se trata de una perspectiva de investigación bastante novedosa. Aunque puede considerarse un tipo especial de investigación aplicada, la investigación evaluativa se ha generalizado tanto que puede considerarse una categoría independiente de investigación.

La investigación evaluativa se ocupa principalmente de la evaluación sistemática de instituciones, proyectos e intervenciones (por ejemplo, el rendimiento de las instituciones de investigación, la vacunación contra la gripe, el uso del cinturón de seguridad por los pasajeros de los asientos traseros de los coches, la capacidad de los modelos climáticos globales para proyectar el cambio climático futuro). Este tipo de investigación suele clasificarse en tres tipos de estudios: Descriptivos (describen, por ejemplo, los objetivos, los procesos de aplicación y los resultados previstos de un programa). (describe, por ejemplo, los objetivos, los procesos de aplicación o los resultados previstos de un programa).

(evalúa, por ejemplo, los objetivos de un programa en función de una serie de criterios), e Impacto (evalúa, por ejemplo, un programa en términos de sus efectos en la sociedad). Un programa en términos de sus efectos en la sociedad y la naturaleza, sus costes y beneficios.

El principal determinante de la química de la precipitación de zinc es la relativa nobleza del oro y la plata en relación con el zinc. Esto indica que son más adecuados para la reducción desde la solución de cianuro a sus formas naturales, que son Au y Ag. Así es como puede expresarse una reacción de cementación generalizada:



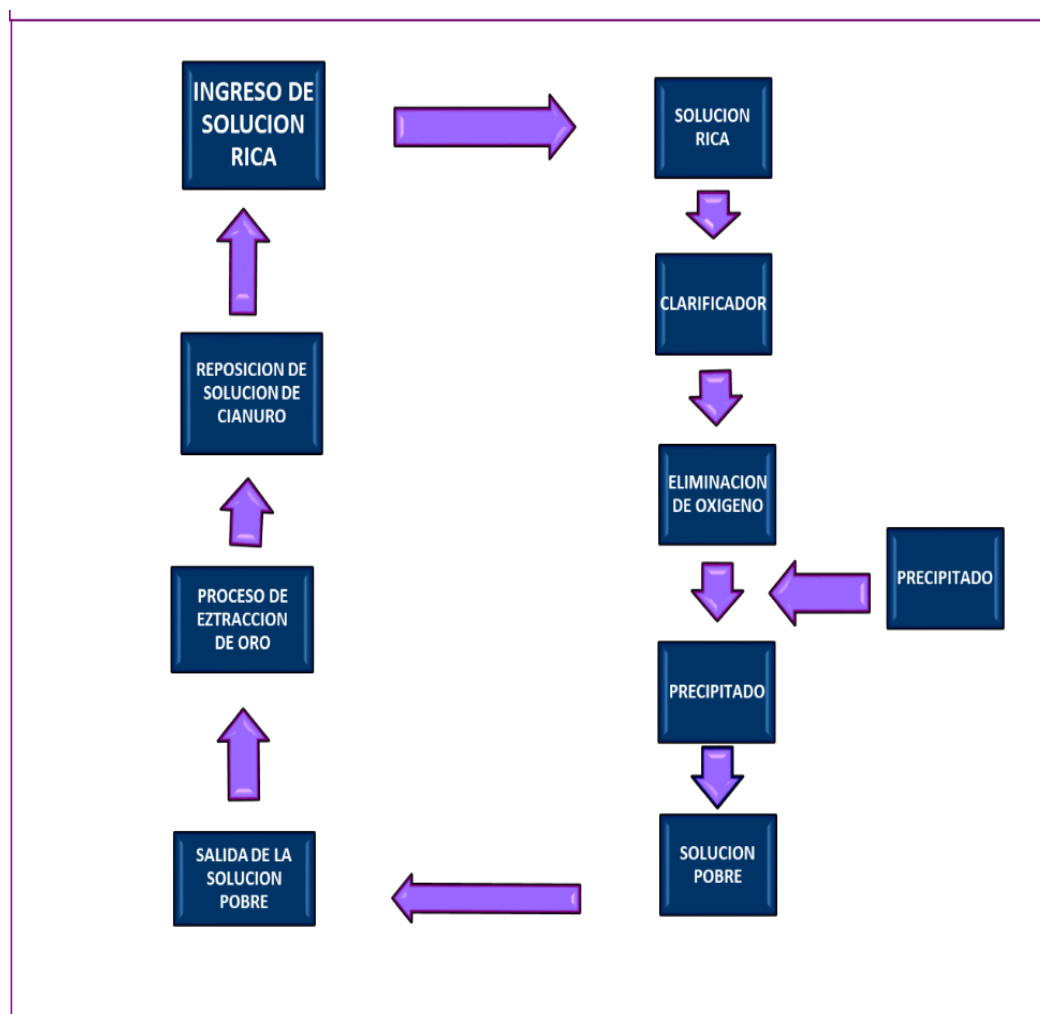
Durante el método, el zinc y el cianuro se combinan para formar un complejo de cianuro de zinc. A un pH elevado de 10, los metales preciosos precipitarán sin duda, mientras que es menos probable que lo hagan otros elementos que podrían estar presentes en la solución, como el cobre.

La precipitación con zinc, que consta de cuatro fases, es la técnica más utilizada para recuperar el oro. La fase del presente trabajo se enmarca en la mezcla de moler de cianuro libre y zinc en polvo.

- I. Clarificación de la solución
- II. Eliminación del oxígeno de la solución
- III. Adición de zinc
- IV. Recuperación del precipitado de oro

Figura 6

Diagrama de flujo del proceso de Precipitación Merrill-Crowe



Nota:

3.2. Población y muestra

La filtración de la solución rica es necesaria para producir soluciones cristalinas con una concentración mínima de partículas en suspensión, evitando problemas de pasivación del zinc, de funcionamiento del filtro prensa y de precipitado.

Para conseguir una precipitación eficaz, la población del estudio actual son soluciones desaireadas y despejadas (O_2 disuelto a menos de 1 ppm). El caudal que entra en la instalación de Merrill-Crowe oscila entre 0,069 a 0,083 m^3/s .

3.3. Operacionalización de variables

- Dosis de cianuro
- Dosis de cinc
- O_2 en disolución
- Resolución sombría

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

A medida que se realizan las pruebas metalúrgicas, se recogen datos de los mismos parámetros que se recogieron en la fábrica.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Material y reactivos

Materiales

- Matraz Erlenmeyer
- Bureta - Soporte universal
- Piseta
- Balanza
- Botellas para soluciones.

Reactivos

- Cianuro de sodio
- Polo de zinc
- Diatomita
- Nitrato de plata
- Yoduro de potasio

3.5.2. Procesamiento

Seguidamente, detallamos las fases generales de la empresa Caylloma Merrill Crowe, objeto de este estudio, centrándonos en el área de la precipitación. Existen las siguientes subdivisiones en esta descripción:

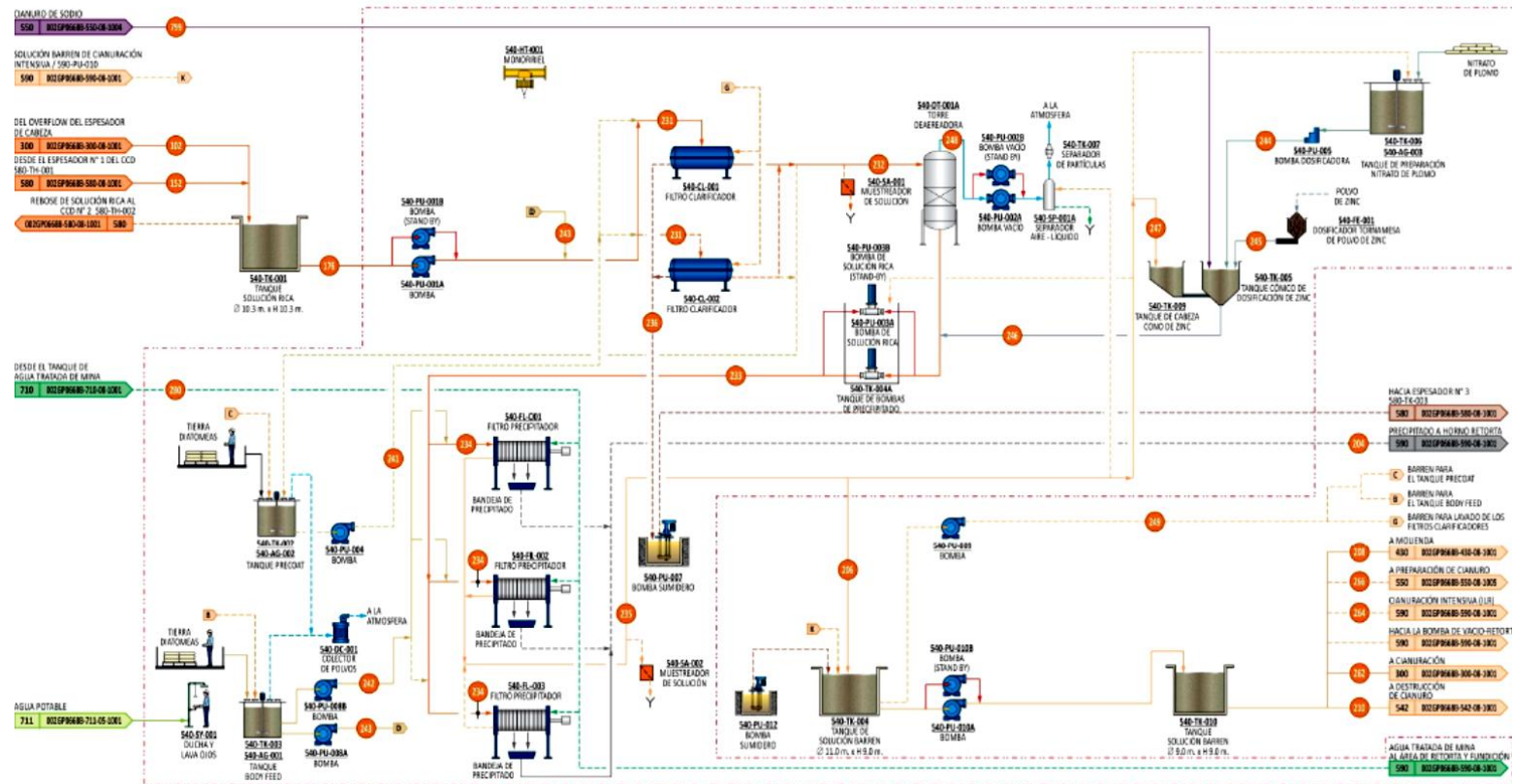
Descripción del proceso

Tras ser transportada al tanque de solución rica para ser limpiada en los filtradores de puridad hasta conseguir una solución

cristalina de menos de 1 NTU de sólidos, el fruto de los contenedores al disolver se envía a lavar en sentido opuesto para obtener la solución rica.

Figura 7

Diagrama de flujo de la Planta de Merrill Crowe



Nota: <https://miningpress.com/>

Tras el filtrado, se utiliza una torre de vacío (también conocida como Crowe) llena de empaquetaduras de plástico para desoxigenar la solución rica distribuyendo el flujo de solución en capas extremadamente finas.

Para asegurarse de que no se filtra aire en la solución desoxigenada, se utiliza una bomba de fluido sellada para drenar la solución desoxigenada de la torre de vacío.

Para crear una solución de barrido y emplear las cantidades adecuadas de zinc, la solución rica, que tiene un contenido de oxígeno que oscila entre 5 y 8 mg/l, se reduce a 0,5 a 1,0 mg/l. En general, una bomba de vacío totalmente sellada puede disminuir significativamente los problemas de precipitación.

Tras la adición del polvo de zinc, el oro se disuelve y se separa en un sólido fino en una solución desoxigenada de cianuro de oro y plata. Para eliminar el oro, estas partículas se filtran de la solución, normalmente utilizando un filtro de placas.

Para recuperar el oro, los sólidos se sacan regularmente de la prensa y se funden. Para determinar la cantidad de oro presente y asegurarse de que precipita correctamente, se examina periódicamente el efluente Barren del filtro prensa. Normalmente, debe haber menos de 0,03 ppm de esta solución Barren.

Para evitar la agitación superficial o remolinos que puedan introducir oxígeno en la solución, el polvo de zinc se introduce en un cono.

Figura 8

Cono de recepción del zinc



Nota: <https://es.kdmfab.com/>

Los filtros prensa recubiertos con tierra de diatomeas se utilizan para filtrar partículas finas que contienen oro y plata. La mayor vida útil del filtro prensa y la mayor facilidad con la que se eliminan los precipitados de la tela filtrante son el resultado de la capacidad de este medio filtrante para evitar que las diminutas partes obstruyan el filtrante.

3.5.3. Equipos para la recuperación de oro

Clarificación

Con la disolución, la sedimentación de la etapa de retrolavado también contiene partículas sólidas. Incluso cuando algunas de estas partículas se depositan en el estanque, todavía puede haber 200 NTU o menos de sólidos en suspensión en la solución rica.

Figura 9

Filtro clarificador de solución rica



Nota: <https://es.made-in-china.com/>

Esta suma debe reducirse a valores inferiores a 1 NTU mediante el proceso de clarificación de la solución.

Equipos:

- Bomba de solución rica

Estas bombas centrífugas estacionarias 8x6 de la marca SULZER tienen un impulsor semi abierto y están diseñadas para

aspiración radial. Tienen un conducto de aspiración de 0,204 m y un conducto de vacío de 0,152 m. Un motor eléctrico trifásico de 149 kW acciona la bomba directamente, transfiriendo su fuerza de rotación a la botella de cojinetes de la bomba a través de un acoplamiento flexible.

Tabla 7

Datos Generales

Elaborado en	SULZER
L.	98
An.	26
Al.	32.5
D. succión	8
D. descarga	6
D. impulsor (pulgada/m m)	15/381
Al. descarga (m.)	60
Posición de descarga	Vertical
Cap. diseño	600
V. bomba	1770
Eficiencia	82.44
Presión de trabajo max. (bar/PSI)	100.6/69.36
Tipo de sello	Sello dinámico
Material	Hierro

SISTEMA DE ACCIONAMIENTO

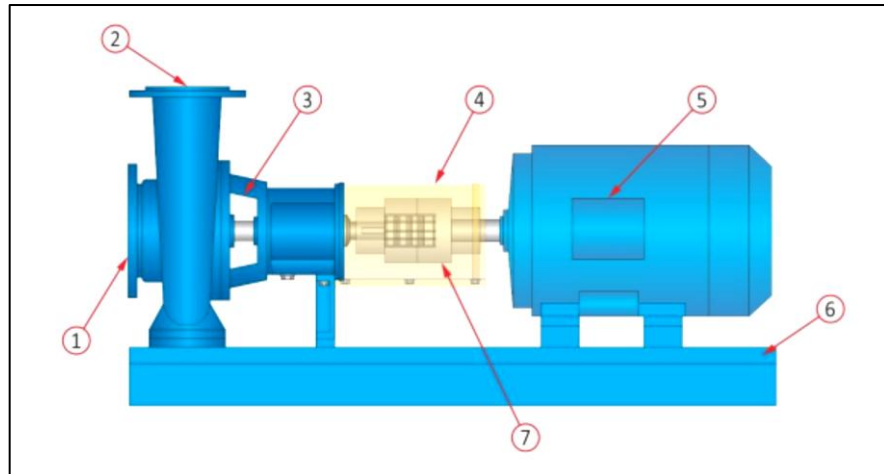
MOTOR ELECTRICO

P 4800 msnm (HP)	200
V (RPM)	1770

Nota: Manual de operaciones 2016

Figura 10

Bomba de solución rica



Nota: <https://www.ebara.eu.com/>

Tabla N° 8

Leyenda

LEYENDA	
1	conducto de vacío
2	conducto de descarga
3	Centro primario
4	Protección de transmisión
5	Motor eléctrico
6	Base del equipo
7	Acoplador adaptable

Nota: Manual de operación 2016

- **Filtro clarificador**

Piezas de equipo estacionario horizontal de 2.134 m de diámetro por 6.553 m de longitud que funcionan discontinuamente. Su finalidad es eliminar los sólidos (impuros) de la solución rica mediante la formación de una precapa en cada hoja del filtro. Tiene conglomerados de laminillas, una vía para lavar y una vía de mecánica/hidráulica.

Tabla N° 9

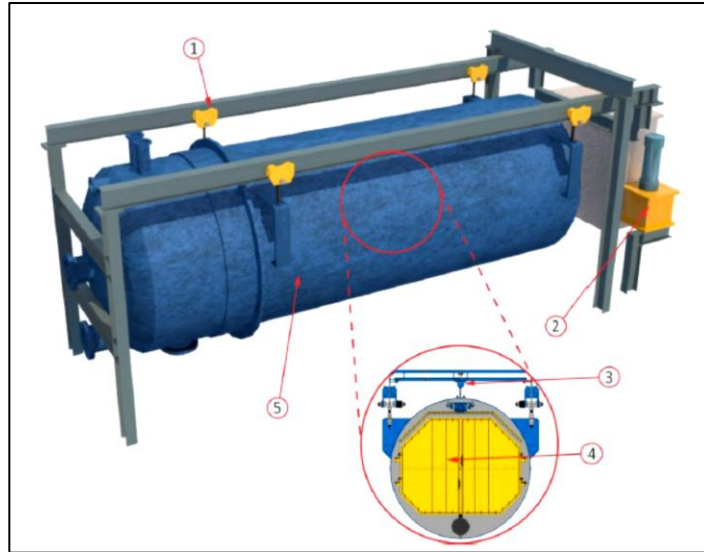
Datos Generales

Elaborado en	Sparkler Filters INC.
hola filtrante	Tubular Slit
Cap de flujo (m ³ /h)	600
Área (m ²)	278.7
Cap de filtrado (m ³)	7
Presión	75
L. filtro (pulg.)	258
D. filtro (pulg.)	84
D. tubería de alimentación (pulg.)	10
D. tubería de descarga (pulg.)	10
D. tubería de lavado (pulg.)	4
D. tubería de drenaje (pulg.)	10
D. tubería de venteo de aire (pulg.)	4
UNIDAD HIDRAULICA	
P (HP/Kw)	1.5/ 1
V (RPM)	1700
Cap bomba hidráulica (m ³ /h)	0.4
Cap reservorio aceite (L)	37.8

Nota: Manual de operación 2016

Figura 11

Filtro Clarificador



Nota: www.carbotecnia.info

Tabla N° 10

Leyenda

LEYENDA	
1	Via para traslado
2	Via de hidrotecnia
3	Via para lavar
4	Lámina para filtrar
5	Depósito para filtrar

Nota: *Manual de operación 2016*

El reactivo de tierra de diatomeas, creado en el tanque de precapa y suministrado por las bombas, entra en los filtros de

clarificación para formar la capa de prefiltro. Tras el desarrollo de la precapa, obtienen la solución rica del depósito a través de dos bombas -una en uso y otra de reserva- y le añaden diatomita junto con la solución del depósito de alimentación del cuerpo a través de la bomba.

Para eliminar el oxígeno disuelto de la solución, la mezcla aclarada se coloca en una torre de vacío.

Partes principales

1. Tanque

Mide 6,55 metros de largo y 2,13 metros de diámetro. Está hecha de acero al carbono y cuenta con tubos de alimentación y descarga que miden 25,4 cm y 10,16 cm respectivamente, así como tubos de ventilación y drenaje que miden 10,16 cm y 25,4 cm. Las hojas filtrantes se encuentran en su interior.

Figura 12

Tanque del Filtro Clarificador



Nota: www.carbotecnia.info

Tabla N° 11

Leyenda

LEYENDA	
1	Depósito
2	Conducto ventilador
3	Conducto para lavar
4	Conducto alimentación
5	Conducto de transferencia
6	Conducto para drenar

Nota: Manual de operación 2016

A las hojas del filtro se les debe aplicar una precapa antes del ciclo de filtrado. Esta precapa se compone de una solución de tierra de diatomeas, que entra en el tanque de precapa a través de la línea de alimentación de 25,4 cm a una determinada presión y es bombeada por la bomba centrífuga durante 15 a 20 minutos.

Antes de que comience el ciclo de filtración, la pre capa ayuda a recubrir las telas filtrantes de las hojas.

- **Torre de vacío**

Con un tubo de entrada de la solución, 2 tubos de vacío (una para la solución y otra para el oxígeno) y una placa distributiva, es un depósito circular de 9,144 m. de alto que se utiliza al eliminar el O₂ de la disolución.

Tabla N° 12.

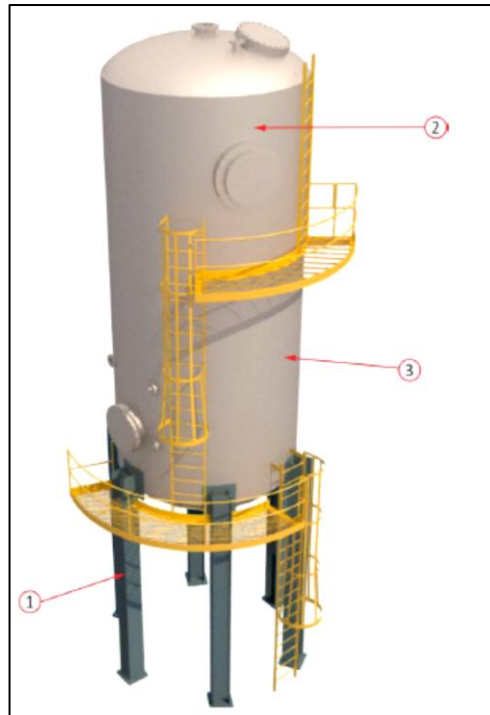
Datos Generales

Elaborado en	KCA
D. (m.)	3.696
Al. (m.)	9.144
Alto (m)	32.62
D. entrada de solución (mm)	305
D. Manway (mm)	710
D. abertura de oxigeno (mm)	100
D. abertura de solución (mm)	305

Nota. Manual de operación 2016

Figura N° 13

Torre de vacío



Nota: Manual de operaciones 2016

Tabla N° 13

Leyenda

LEYENDA	
1	Soporte del tanque
2	Plato de distribución
3	Tanque

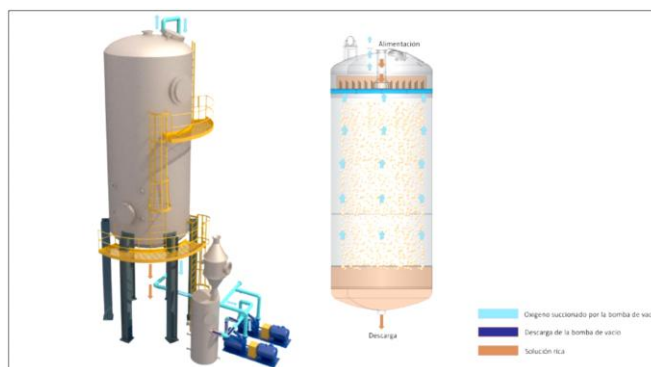
Nota: Manual de operación 2016

Principio de funcionamiento

Después de entrar en la solución a través del tubo de alimentación, ésta viaja a través de una placa distribuidora que separa y fracciona el flujo para eliminar la mayor cantidad posible de oxígeno mientras se mantiene un filtrado constante. En este punto, el oxígeno disuelto de la solución es eliminado por la presión negativa y expulsado al exterior. Por último, la aproximación correspondiente libera la solución que se ha acumulado en el fondo del tanque y que tiene el máximo contenido de oxígeno.

Figura N° 14

Principio de funcionamiento de la Torre de Vacío



Nota: Manual de operaciones 2016

- **Bomba de vacío**

El aire o el gas se extrae de la torre desgasificadora por bombas de anillo líquido accionadas por un motor eléctrico de

100 CV. Las piezas principales son los conductos de aspiración y descarga, la placa intermedia, los impulsores, el eje, los cojinetes.

Tabla N° 14

Datos Generales

Elaborado en	SIHI
L (pulg.)	58.46
An. (pulg)	23.5
Al. (pulg.)	32.62
D. succión (pulg.)	4
D. entrada de liquido de servicio (pulg.)	1.5
D. descarga (pulg.)	4
Postura de descarga	Vertical
Cap. diseño (m ³ /h)	1255 a 635 mmHg
Cap. agua de servicio (USGPM)	9.8
V. bomba (RPM)	1150
Máx. presión de trabajo (PSI)	30
Sello	Prensaestopas
Cap. de flujo de agua de sello (m ³ /h)	5.7
TORRE GENERALES	
O2 disuelto en la alimentación (ppm)	7
O2 disuelto en la descarga (ppm)	0.5
Cap. de diseño (m ³ /h)	600
D. (m)	3.66
Al. (m)	8.11
MOTOR ELECTRICO	
P (HP)	100
V (RPM)	1150
T/fre (V/Hz)	575/60

Nota: Manual de operación 2016

Figura N° 15

Bomba de vacío



Nota: Manual de operaciones 2016

Tabla N° 15.

Leyenda

LEYENDA	
1	Centro primario
2	Arandela de aceite
3	Rueda impulsora
4	Estuche

Nota: Manual de operación 2016

- **Bomba de precoat**

Se trata de una centrífuga estacionaria de la marca SULZER para aspiración axial con impulsor semiabierto. Se compone de una carcasa con un conducto de descarga de 0,102 m y un conducto de aspiración de 0,152 m. Está accionada por un motor eléctrico trifásico de 29,42 kW con transmisión directa que utiliza una conexión con protección de seguridad para girar a 1,770 RPM. El sistema de sellado dinámico de estas bombas.

Tabla N° 16

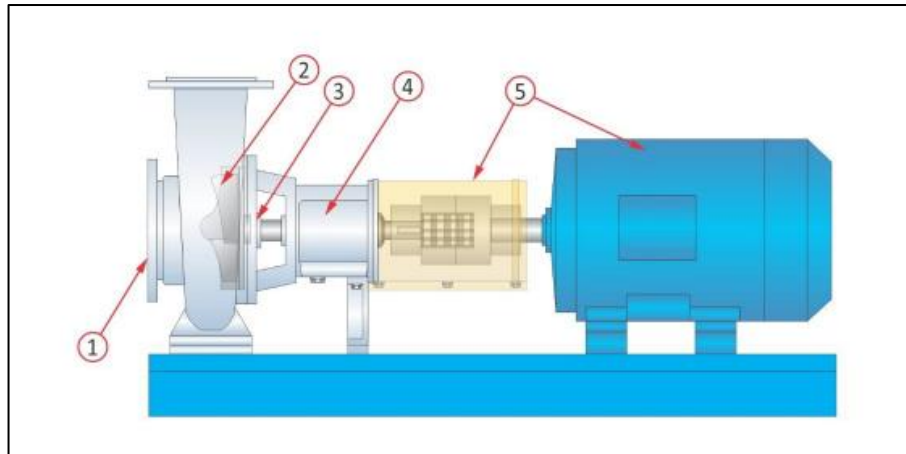
Datos generales

Elaborado en	SULZER
L. (pulg)	64
An. (pulg)	21
Al. (pulg)	23.5
D. de succión (pulgada)	6
D. de descarga (pulgada)	4
D. de impulsor (pulg/mm)	11.25
Al. de descarga (metro)	25
Pose de descarga	Vertical
Cap. de diseño (m ³ /h)	300
V. de la bomba (RPM)	1770
T. de preparación (min)	Oct-15
Eficiencia (%)	78.38
Sello	dinámico
SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	
MOTOR ELECTRICO	
P. (HP/kw)	40/30
V. (RPM)	1770
Ten./frec. (V/Hz)	460/60

Nota: Manual de operación 2016

Figura N° 16

Bomba de Precoat



Nota: Manual de operaciones 2016

Tabla N° 17

Leyenda

LEYENDA	
1	Estuche de la bomba
2	Rueda impulsora
3	Arandela dinámica
4	Capote para rodeo
5	Engranaje

Nota: Manual de operación 2016

- **Bomba de body feed**

Se trata de las bombas peristálticas de manguera VERDEFLEX de "desplazamiento positivo", que se distinguen por el hecho de que la solución que se bombea está totalmente contenida dentro de una manguera robusta y extremadamente resistente y no entra en contacto con ninguno de los elementos de trabajo de la bomba. Las partes principales de esta bomba son un impulso acoplado a una variante de rapidez, un rotor que comprime toda la longitud de la manguera y un acoplamiento atornillado ellos.

Tabla 18

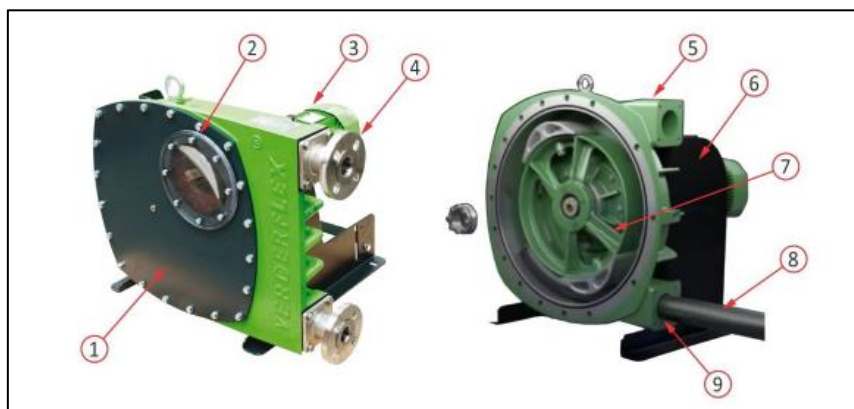
Datos generales

Elaborado en	Verdeflex
L (pulg)	98
An (pulg)	26.4
Al (pulg)	20
D. de succión (pulg)	32
D. de descarga (pulg)	32
Equipamiento	Hierro fundido
Equipamiento de zapatas	Aluminio
Equipamiento de manguera	NRB (Goma de nitrilo butadediéno)
Indicador (m ³ /h)	Hasta 90
Al. descarga (metro)	9.5
Pose de descarga	Horizontal
Cap. de diseño (m ³ /h)	0.4 – 2
V. de la bomba (RPM)	Hasta 87
T. de trabajo	10 – 15
Ten. frec. del motor (V/Hz)	440/60

Nota. Manual de operación 2016

Figura N° 17

Bomba de body feed



Nota:

Tabla N° 19

Leyenda

LEYENDA	
1	Blindaje delantero
2	Ventana de examen
3	Accionamiento de electricidad
4	Uniones con bridas
5	Respiradero para descargar
6	Bastidor
7	Anclaje
8	Tubo flexible
9	Distancia de succión

Nota: Manual de operación 2016

- Bomba vertical

Se trata de bombas centrífugas horizontales de 25,4x25,4 cm (aspiración/descarga) con impulsores cerrados. Están formadas por una carcasa y un alojamiento de cojinetes con un conducto de aspiración de 25,4 cm y un conducto de vacío de 25,4 cm.

Funciona con un motor eléctrico de 186 kW, al que se conecta mediante un conector cubierto por un protector. Estas bombas disponen de un mecanismo de cierre automático.

Tabla N° 20.

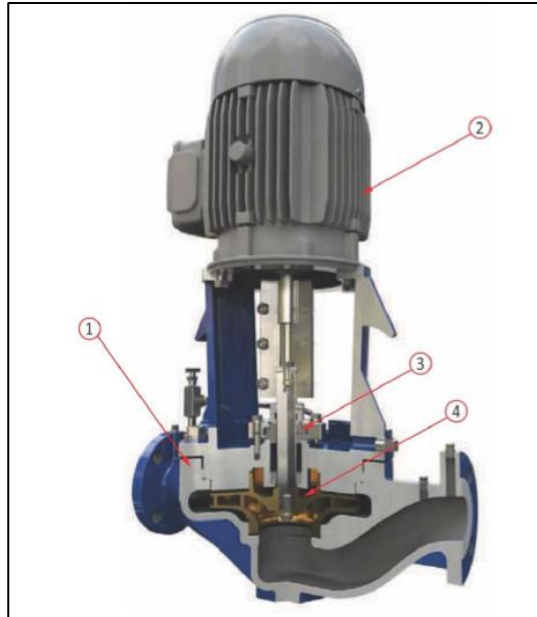
Datos Generales

Elaborado en	RUHRPUMPEN
L (pulg)	49
An (pulg)	26
Alt (pulg)	15.25
D. de succión (pulg)	10
D. de descarga (pulg)	10
Al de descarga (ft)	7.6
Pose de descarga	Horizontal
Cap. de diseño (GPM)	2640
V. de la bomba (RPM)	1750
Eficiencia (%)	78.8
Pot. de bomba (HP)	182
SISTEMA DE ACCIONAMIENTO	
MOTOR ELECTRICO	
P (HP/kw)	250/186.4
V (RPM)	1750
Tens/frec (V/Hz)	460/60

Nota: Manual de operación 2016

Figura N° 18

Bomba vertical



Nota: <https://www.aguamarket.com/>

Tabla N° 21.

Leyenda

LEYENDA	
1	Cubierta
2	Engranaje
3	Arandela de mecánica
4	Rotor impulsador

Nota: Manual de operación 2016

La solución de la torre de desgasificación se envía a los filtros prensa a través de las bombas de solución rica, una de las cuales está siempre en funcionamiento y la otra siempre en reserva. El zinc en polvo también se suministra directamente después del cono de dosificación.

- **Dosificador de zinc**

Se trata de un dispositivo electromecánico de la marca TECWEIGH que transfiere zinc en polvo a un depósito dosificador cónico. Tiene una capacidad adicional de 0,000556 m³/s y se compone de un único eje de transmisión accionado por un motor de 3,73 kW mediante una vía para transmitir formado por cadenas y engranajes. La velocidad del dispositivo se ajusta mediante un cambio de rapidez.

Tabla N° 22.

Datos Generales

Elaborado en	TECWEIGH
Calibre	12 series
Clase	Volumétrico
Cap. de Hooper (m ³)	0.28
V.del transportador (RPM)	20 - 160 RPM

SISTEMA DE ACCIONAMIENTO

MOTOR ELECTRICO

P. (HP)	0.5 HP / 3.73 Kw
V. (RPM)	172 RPM
Tens/frec. (V/Hz)	240/60

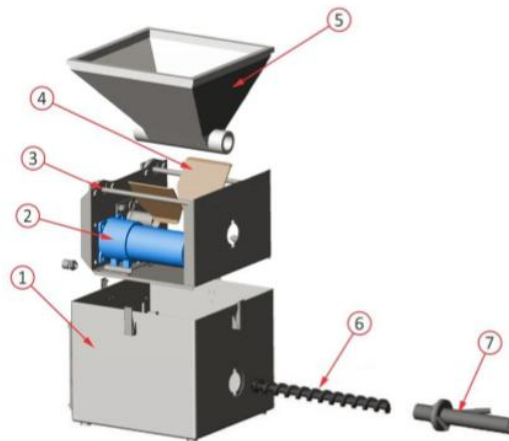
VARIADOR DE VELOCIDAD

Clase	Velocidad variable
Calibre	200
Tens/frec (V/Hz)	90 VDC

Nota: Manual de operación 2016

Figura N° 19

Dosificador de zinc



Nota:

Tabla N° 23.

Leyenda

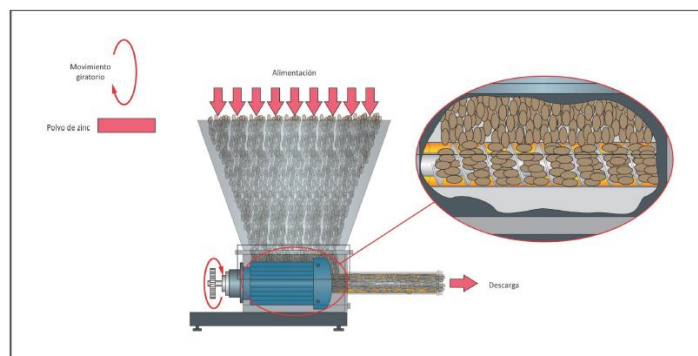
LEYENDA	
1	Caja
2	Arranque motoriz
3	Marco de paletas
4	Paletas amasadoras
5	Alimentador
6	Pasador helicoidal
7	Alimentador tubular

Nota: Manual de operación 2016

El polvo de zinc se introduce en la tolva de alimentación y se descarga en el tubo de alimentación del tornillo. Un motor de 3,73 kW hace girar el tornillo helicoidal, y un piñón, una rueda guía y un sistema de transmisión por cadena mueven el polvo. A continuación, el polvo se deposita en las paletas del tornillo, que están dispuestas para dirigir el polvo hacia el conducto de descarga. El motor se acciona mediante un variador de velocidad.

Figura N° 20

Funcionamiento del Dosificador de zinc



Nota:

- **Filtro prensa**

El objetivo de estos filtros prensa horizontales fijos de 8,81 m de largo por 1,56 m de ancho es dividir la liquidez de la solución rica del precipitado sólido. Esto se consigue colocando

telas filtrantes entre las placas del filtro. El filtro está equipado con numerosas placas filtrantes, una vía para lavar las telas, una vía para secar las telas y un sistema de accionamiento hidráulico.

Tabla N° 24.

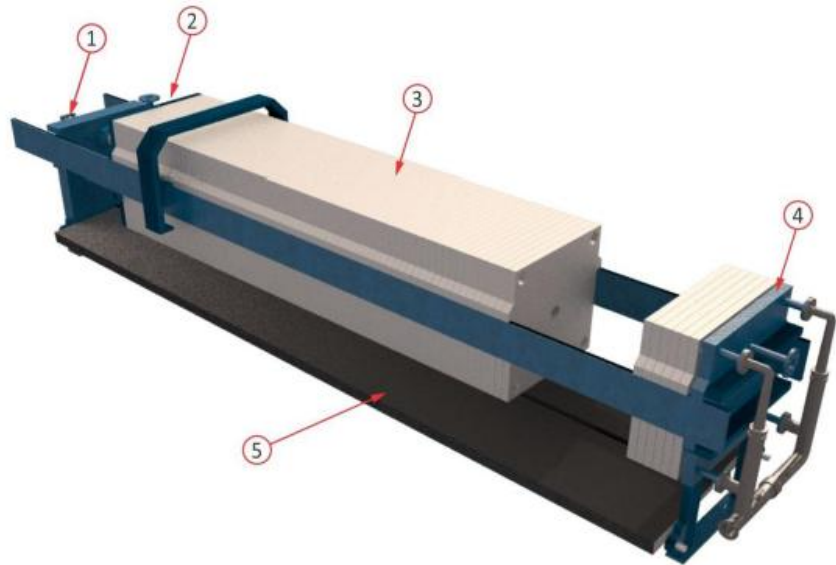
Datos Generales

DATOS GENERALES	
Elaborado en	SPERRY
Calibre	EHCP
L. de filtro (m)	8.81
Al de filtro (m)	2.97
An del filtro (m)	1.56
Pres de operación (bar)	6.8
V. total (m ³)	2.35
Área total de filtrado (m ²)	160.44
N. de placas	100
V. de placas (m ³)	0.024
Área de filtrado por placa	1.6
Tam. de placas (ancho X largo) (mm)	1000 X 1000
Espe.r de torta (mm)	32

Nota: Manual de operación 2016

Figura N° 21

Filtro prensa



Nota: Manual de operaciones 2016

Tabla N° 25.

Leyenda

LEYENDA	
1	Via hidrostática
2	Laminilla dinámica
3	Laminilla de filtro
4	Laminilla de fijación
5	Almacenaje

Nota: Manual de operación 2016

Suministran la solución precipitada a los filtros prensa dispuestos en paralelo (540-FL-001/002/003). Además, se recibe agua de lavado del depósito de agua de mina tratada, aire del compresor (540-CM-001) y diatomita en solución del depósito (540-TK-003). Las bandejas que contienen el precipitado de los filtros se entregan a la sección de fundición y retorta.

Placas de filtrado

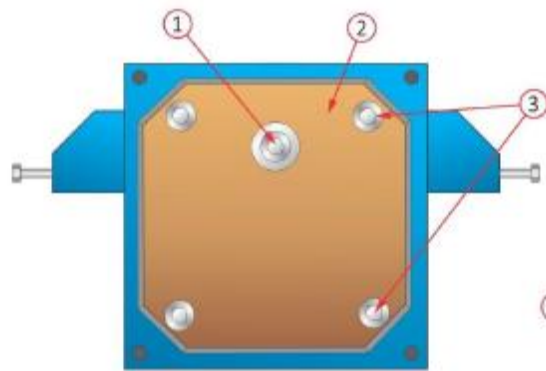
Se compone de mallas y placas colocadas verticalmente en la estructura del filtro, de 1.000 m de longitud y 1.000 m de anchura.

Cuatro orificios cilíndricos y un orificio central de alimentación permiten transportar la reserva precipitada al ser necesario.

La zona de cada cara de la laminilla (diafragma), que retiene la torta y libera el agua filtrada, forma la cámara de filtración.

Figura N° 22

Placas de filtrado



Nota: Manual de operaciones 2016

Tabla N° 26.

Leyenda

LEYENDA	
1	Telas de filtrado
2	Cámara de filtrado
3	Orificios

Nota: Manual de operación 2016

Capítulo IV

Resultados y Discusión

4.1. Resultados

En los presentes resultados se aprecian que tenemos datos constantes como la turbidez, el oxígeno disuelto, y la ratio de zinc; así como también variaremos el parámetro de fuerza de cianuro (Procedimiento de determinar fuerza de cianuro en el anexo 4).

Tabla 27

Límites fijos

Limites	Und	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set
Empañamiento	NTU	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
O2 en disolución	mg/m3	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
Proporción de zinc		3.123	4.838	5.634	4.365	2.963	1.726

Nota: Elaboración propia

- Para reducir la turbidez a ≤ 1 NTU se pre cotea el clarificador con tierra diatomea para así formar una capa que clarifique mucho mejor la solución rica que ingresa a la siguiente etapa del proceso.
- El oxígeno disuelto es vital mantenerlo al mínimo, ya que el ingreso de oxígeno en el proceso causa que el oro precipitado se vuelva a disolver.

- El ratio de zinc, se evalúa de acuerdo a cálculos estequiométricos, es por eso que el muestre de puntuales te permite regular tu dosificación de zinc.
- En la presente tabla se tiene la data histórica del antes y después de la mejora de las leyes del método

Tabla 28

Leyes de solución barren

Dia	Au (gr/m ³)					
	Abr	May	Ju	Jul	Agos	Set
1	0.18	0.55	0.20	0.44	0.01	0.21
2	0.08	0.66	0.29	0.39	0.01	0.35
3	0.08	0.83	0.23	0.10	0.13	0.04
4	0.16	0.90	0.02	0.02	0.05	0.06
5	0.28	1.02	0.07	0.01	0.04	0.07
6	0.33	1.22	0.10	0.00	0.02	0.08
7	0.43	1.11	0.34	0.01	0.03	0.02
8	0.33	1.23	0.06	0.02	0.05	0.05
9	0.21	1.41	0.03	0.03	0.04	0.02
10	0.49	1.28	0.39	0.01	0.02	0.04
11	0.72	1.38	0.51	0.01	0.15	0.01
12	0.45	0.00	0.42	0.01	0.07	0.03
13	0.55	1.44	0.22	0.03	0.02	0.15
14	0.66	1.54	0.37	0.00	0.09	0.15
15	0.81	1.48	0.50	0.00	0.13	0.20
16	0.33	1.23	0.30	0.06	0.21	0.04
17	0.36	1.39	0.26	0.02	0.13	0.05
18	0.54	0.34	0.21	0.01	0.02	0.08
19	0.69	0.38	0.52	0.01	0.03	0.18
20	0.00	0.52	0.71	0.12	0.02	0.40
21	0.00	0.39	0.45	0.06	0.02	1.20
22	0.60	0.40	0.10	0.06	0.01	0.46
23	0.69	0.40	0.50	0.01	0.02	0.03
24	0.54	0.42	0.43	0.01	0.01	0.06
25	0.54	0.48	0.41	0.01	0.03	0.03
26	0.68	0.66	0.06	0.01	0.03	0.05

Nota: Fuente propia

En la Tabla 30 se tiene la data histórica, del antes y después de la mejora de las leyes de fuerza de cianuro del proceso de Merrill Crowe.

Tabla 29

Leyes de fuerza de cianuro

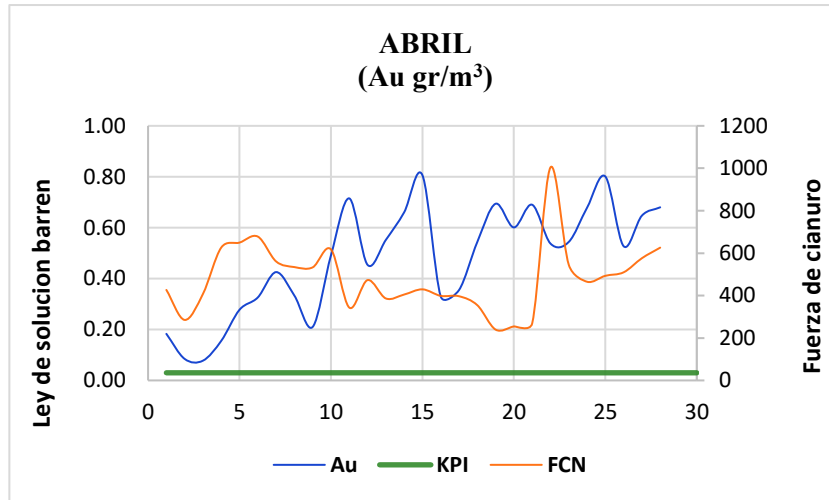
	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Set
1	426.6	757.0	745.6	454.6	1087.1	1001.4
2	285.3	606.1	643.8	674.7	1068.2	652.8
3	407.8	826.3	462.9	660.6	1226.9	904.9
4	626.3	466.0	460.2	295.6	773.8	908.1
5	649.7	456.7	175.1	1061.3	1715.0	803.7
6	678.0	410.1	0.0	971.1	1629.0	658.1
7	560.8	869.3	0.0	1189.9	2023.8	763.5
8	534.3	625.6	0.0	1264.6	449.8	865.3
9	533.0	817.5	0.0	1167.5	324.0	837.4
10	617.6	222.0	0.0	1106.3	555.3	771.0
11	343.2	514.6	85.0	1264.2	442.5	617.2
12	472.9	1.0	223.0	1191.3	362.5	708.5
13	386.4	1311.4	567.7	1448.3	580.0	733.4
14	405.0	587.1	207.0	0.0	488.3	783.4
15	429.3	307.3	209.6	0.0	375.2	727.5
16	398.7	508.2	281.3	228.7	562.2	690.5
17	396.9	551.8	238.8	684.7	592.7	941.7
18	354.7	424.4	350.3	279.4	1009.5	662.7
19	239.6	578.2	246.7	328.8	1169.6	841.4
20	0.0	668.1	325.4	310.1	803.7	770.9
21	0.0	817.6	889.9	432.5	719.3	293.7
22	254.6	798.4	848.0	720.6	595.0	415.4
23	268.8	945.4	822.9	456.6	1271.0	700.3
24	1004.2	432.5	724.7	474.2	840.6	632.2

Nota: Fuente propia

Datos de los limites operativos alejados del campo.

Figura 23

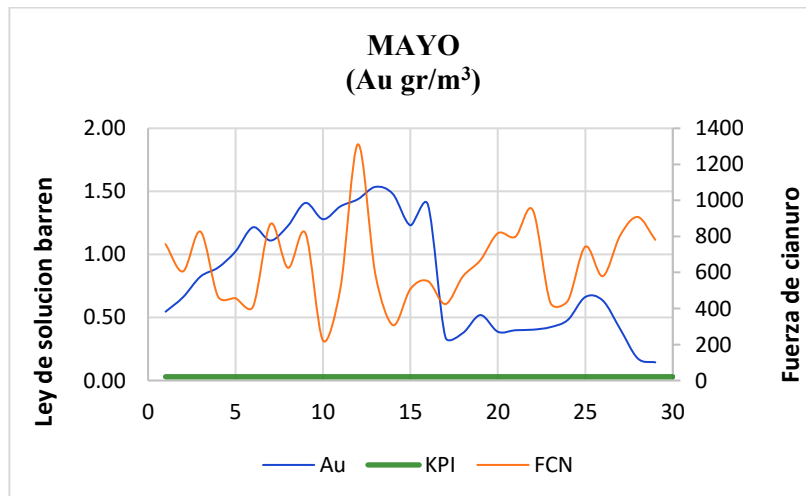
Resultados Abril



Nota: Fuente propia

Figura 24

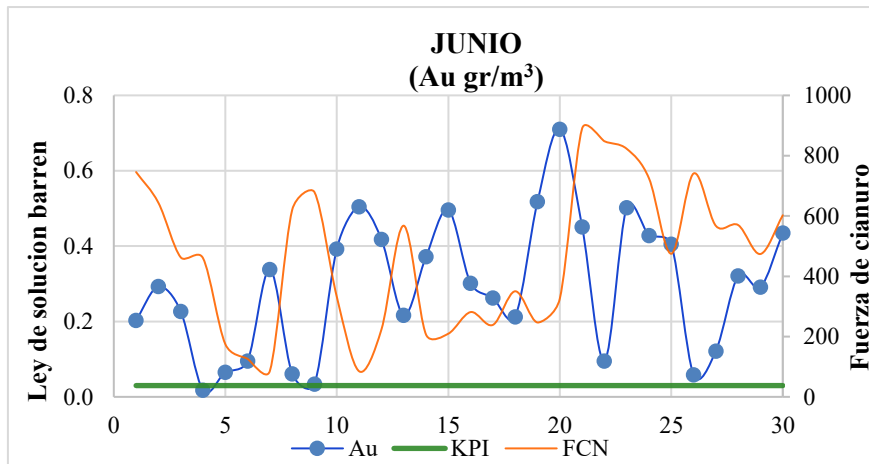
Resultados Mayo



Nota: Fuente propia

Figura 25

Resultados Junio

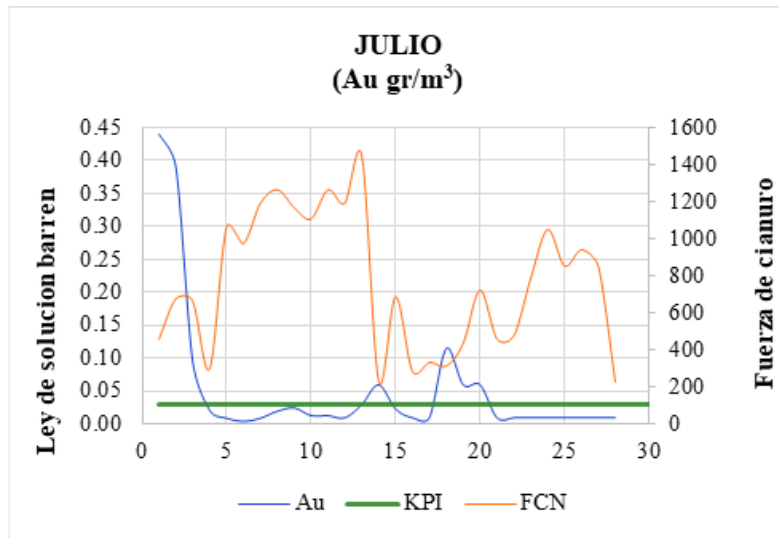


Nota: Fuente propia

En el siguiente grafico se aprecia que los valores de oro en la solución de barren están por debajo del KPI establecido, obtenidos con la modificación de la fuerza de cianuro.

Figura 26

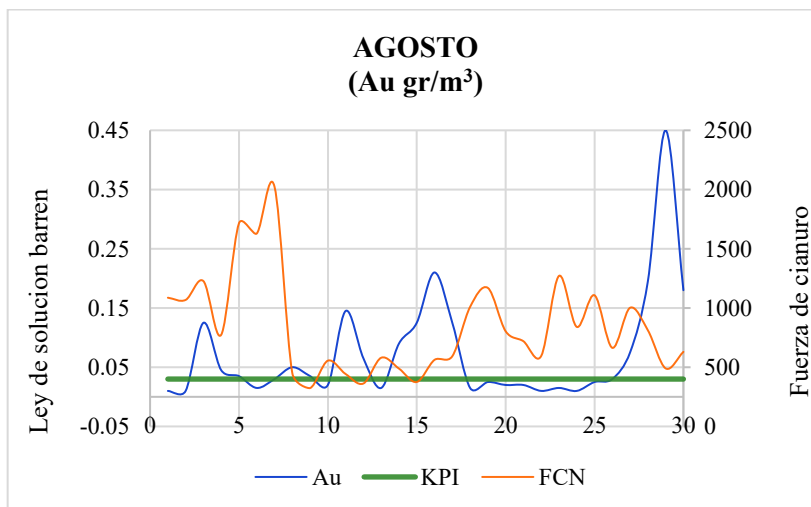
Resultados Julio



Nota: Fuente propia

Figura 27

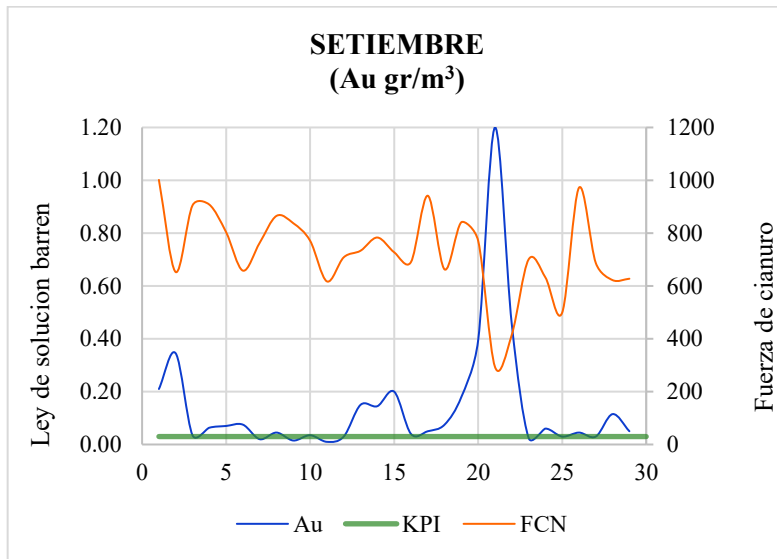
Resultados Agosto



Nota: Fuente propia

Figura 28

Resultados Setiembre

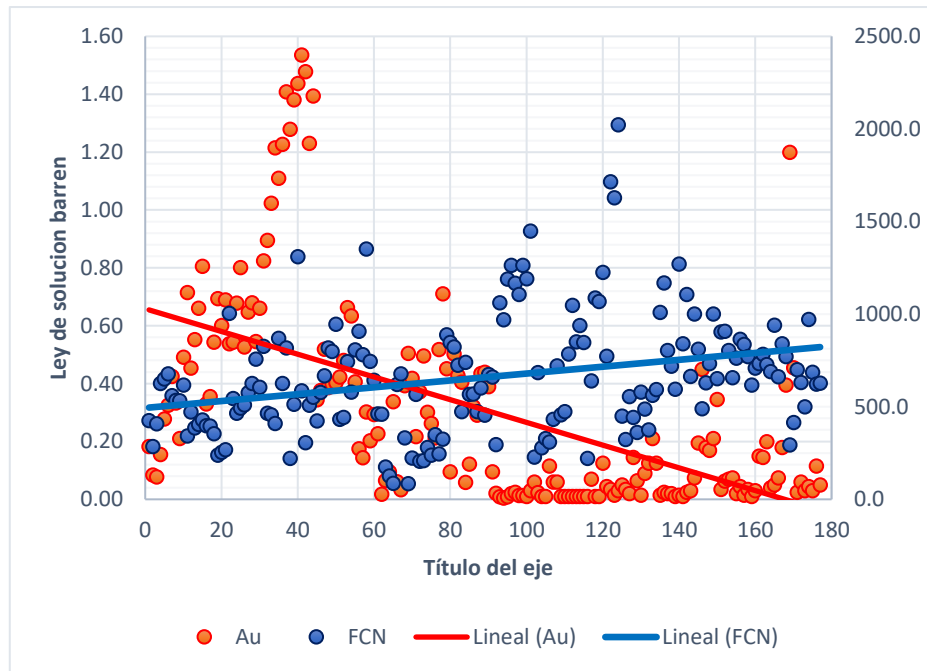


Nota: Fuente propia

En la presente curva se aprecia que aumentando la fuerza de cianuro influye en el descenso de la ley de oro en solución barren

Figura 29

Demostración de relación de datos



Nota: Fuente propia

Con la modificación de la fuerza de cianuro se mejoró la recuperación de oro en el proceso de Merrill Crowe, se muestra en la tabla 31.

$$\text{Contenido metalico} = \text{ley} \times \text{flujo a tratar}$$

$$\% \text{ Recuperacion} = 100 - \left(\frac{\text{contenido metalico barren} \times 100}{\text{contenido metalico rica}} \right)$$

Tabla 30*Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica*

Mes	Leyes Au (gr/m3)		Contenido metalico		% Recuperacion
	Rica	Barren	Rica	Barren	
Julio	0.93	0.05	206671	11303	94.53
Agosto	1.48	0.08	329904	17208	94.78
Setiembre	1.71	0.05	369948	7692	97.92

Nota: Fuente propia**Tabla 31***Evaluación de recuperación mensual y la pérdida económica*

Mes	Contenido metalico		% Recuperacion	Pérdida económica (\$/onza)
	Rica	Barren		
Abril	323435	96352	70.21	\$4,016,267.30
Mayo	368276	175026	52.47	\$7,295,687.88
Junio	290923	63744	78.09	\$2,657,069.97
Julio	206671	11303	94.53	\$471,139.72
Agosto	329904	17208	94.78	\$717,288.84
Setiembre	369948	7692	97.92	\$320,629.11

Nota: Fuente propia

4.2. Discusión

Tras recopilar los datos, podemos ver lo crucial que es gestionar varios factores del proceso, ya que afectan directamente a la recuperación.

Para mantenerlos por debajo de 1, factores como la turbidez y el oxígeno disuelto en la solución son cruciales.

Según las gráficas de las páginas anteriores a ésta, la ley del oro en la solución estéril presenta valores elevados o similares a los de la solución rica hasta junio.

A continuación, en las pruebas realizadas en julio, agosto y septiembre se observa cómo rangos de oro en la solución estéril descienden para lograr 0,03 mg/L de oro.

Es evidente que la optimización de la precipitación de oro es dependiente del volumen de cianuro libre presente en la solución.

Conclusiones

- La dosificación de cianuro libre en la solución se ajustó para maximizar la obtención del elemento según el método planteado, manteniendo constantes el contenido de oxigenación, las dosis de zinc, el opacamiento y la turbiedad.
- Al aumentar el concentrado de CN^- por encima de 0,5 g/L y por debajo de 0,1 g/L de cianuro libre, la recuperación se superó en un 90%.
- La fuerza del cianuro en la solución era la única forma de reducir los grados de oro en la solución estéril a 0,03 mg/L.

Recomendaciones

- Se aconseja comprobar continuamente las variables operativas, ya que cualquier desviación podría tener efectos negativos y provocar altas concentraciones de oro.
- Mantenga el nivel de cianuro libre de la solución por debajo de 1.000 mg/L (1 g/L) para evitar que el procedimiento se vuelva contraproducente y disuelva todo el oro.
- Para evitar que los metales precipitados se resuelvan y se conviertan en polvo pasivo de zinc, mantenga el nivel de oxígeno disuelto por debajo de 1 mg/L (1 ppm).
- La turbidez debe mantenerse por debajo de 1 ppm, ya que aumenta el consumo de zinc y reduce la eficacia de la precipitación.
- Se aconseja vigilar los parámetros operativos para racionalizar aún más el procedimiento.
- Para conseguir una recuperación de oro superior al 90%, se aconseja mantener la concentración de cianuro entre ≤ 600 mg/L (0,6 g/L).
- Se recomienda generar datos para conocer mejor el procedimiento y seguir mejorándolo.

Referencias Bibliográficas

- Cáceres Arenas Germán, Introducción a la hidrometalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile 1996, pp. 3-25,37-43,59-60,77
- Fleming, C. (1992). Hidrometallurgy of Precious Metals Recovery. *Hydrometallurgy*, volumen30, n1-3, p. 127-162.
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90081-A](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90081-A)
- Habashi, F. (1999). *Hidrometallurgy*. 2ª edición, Universidad de Laval, Quebec, Canadá 1999, pp.651-653. (2)
- Errol G. Kelly, David J. Spottswood, (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*, Limusa, pp. 54-55
- Marsden, J., House, I. (1992). *The Chemistry of Gold Extraction*, Ellis Horwood Series in Metals and Associated Materials, England, p. 34, 1992.
- Mullen, T. Short History of Man and Gold, *Mining Engineering*, Jan., p. 50-56, 1998.
- Figuroa, G. Parga, J. Valenzuela, J. Tiburcio, G. & Gonzáles, G. (2012). Kinetic Aspects of Gold and Silver Recovery in Cementation with Zinc Power and Electrocoagulation Iron Process. *Advances in Chemical Engineering and Science*. Vol.2 No.3. DOI: 10.4236/aces.2012.23040
- Chi, G. Fuerstenau, M. & Marsden, J. (1997). Study of Merrill-Crowe processing. Part I: Solubility of zinc in alkaline cyanide solution. *International Journal*

of Mineral Processing. Volume 49, Issues 3–4, Pages 171-183.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00043-9)

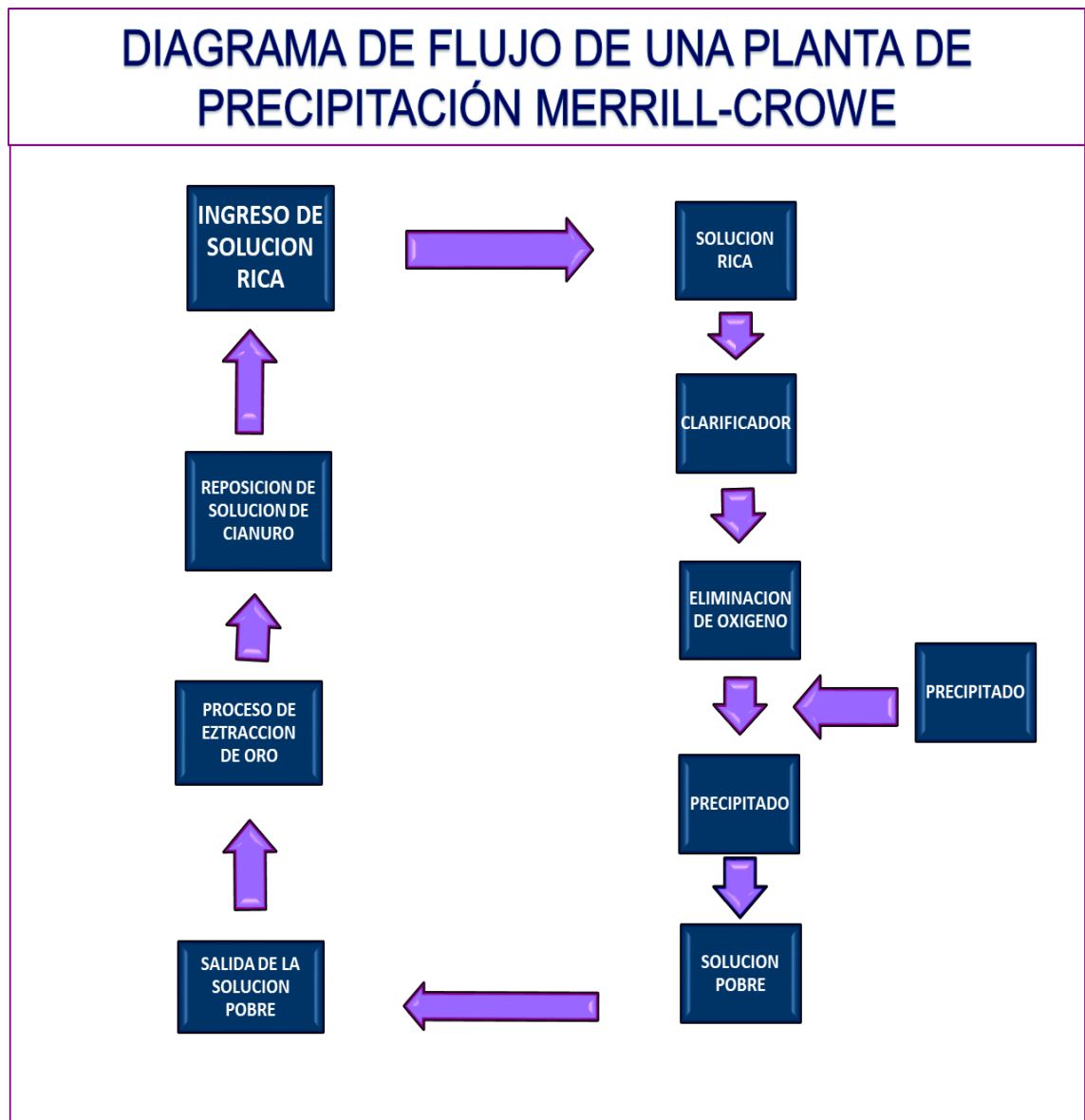
Vásquez, V. Parga, J. Valenzuela, J. Figueroa, G. Valenzuela, A. & Munive, G. (2014). Recovery of Silver from Cyanide Solutions Using Electrochemical Process Like Alternative for Merrill-Crowe Process. *Materials Sciences and Applications*, 863-870. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2014.512087>

Viramontes, G. Medina, M. & López, A. (2005). The effect of cyanide and lead ions on the cementation rate, stoichiometry and morphology of silver in cementation from cyanide solutions with zinc powder. *Hydrometallurgy. Volume 76, Issues 3–4, Pages 193-205.*
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.11.005>

Oo, M. & Tran, T. (1991). The effect of lead on the cementation of gold by zinc. *Hydrometallurgy. Volume 26, Issue 1, Pages 61-74.*
[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(91\)90022-E](https://doi.org/10.1016/0304-386X(91)90022-E)

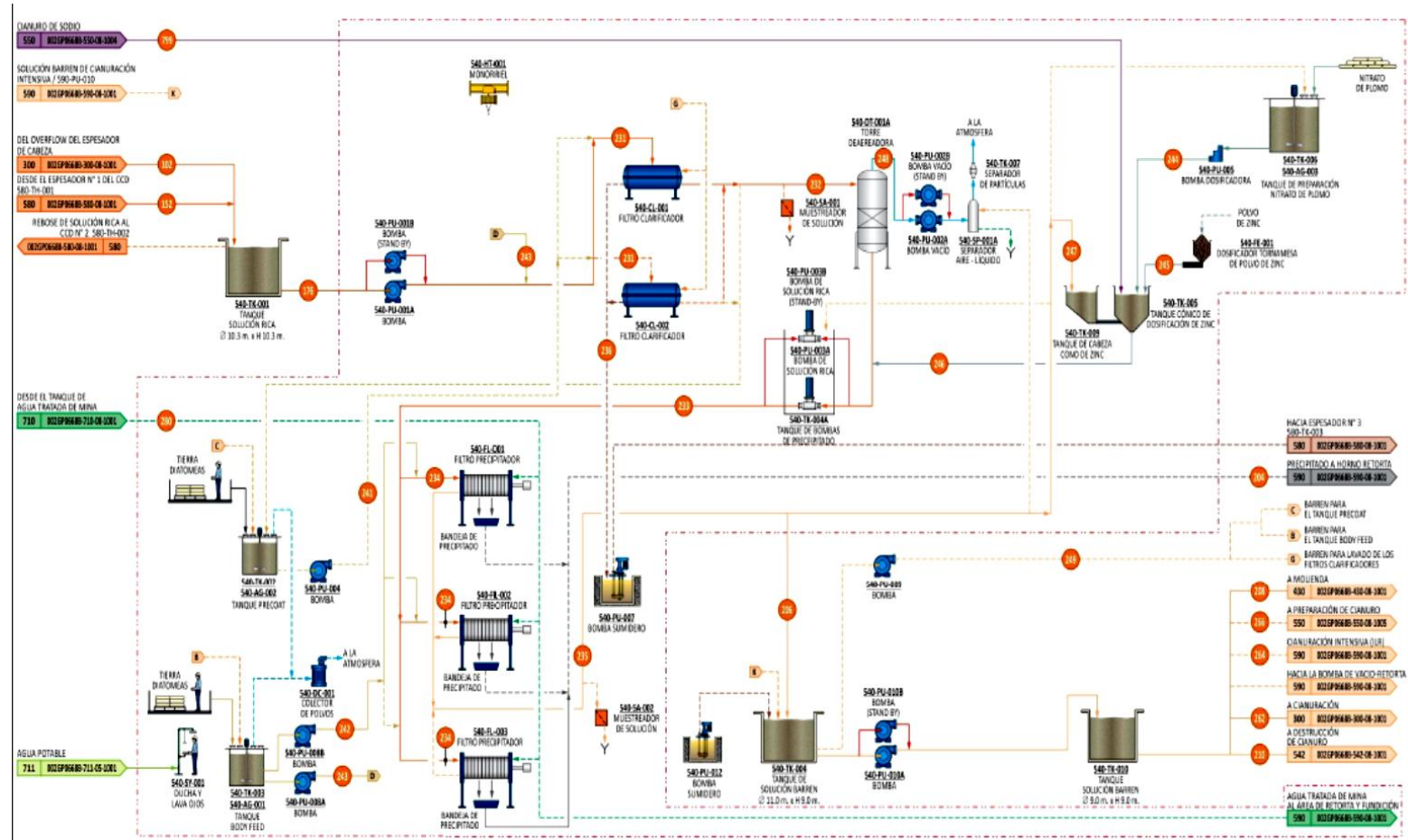
Anexos

Anexo 1 Diagrama de flujo de una planta de precipitación Merrill-Crowe

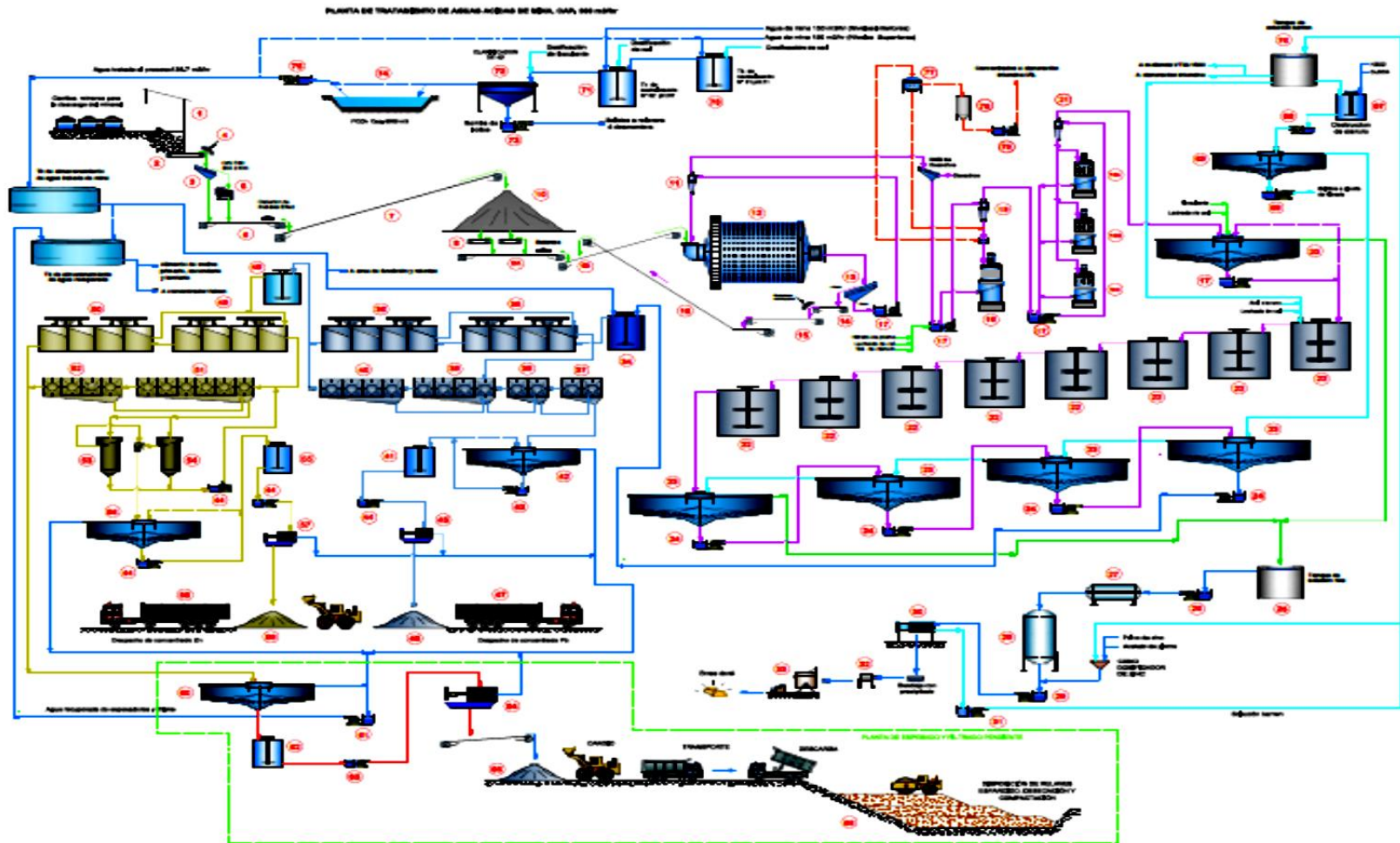


Fuente: Fuente propia

Anexo 2



Anexo 3



Anexo 4 Determinación del Cianuro Libre, Titulación con AgNO_3

II. OBJETIVOS:

- 2.1. Aprender a determinar el contenido de Cianuro Libre en soluciones aurocianuradas.
- 2.2. Manejar correctamente los conceptos de Cianuro libre, Cianuro Total.
- 2.3. Manejar y emplear correctamente las relaciones de titulación con Nitrato de Plata.

III. FUNDAMENTO TEORICO

3.1. INTRODUCCION.

Para una cianuración eficiente es necesario el control diario de la concentración de cianuro libre. De esta forma se evita un exceso de consumo de cianuro, lo cual es costoso y contaminante al medio ambiente. Se requiere un equipo mínimo de laboratorio.

3.2. Uso del cianuro en la Extracción de oro

Una de las razones para el alto valor adjudicado al oro es su resistencia al ataque de la mayoría de los químicos. Una excepción es el cianuro o, más específicamente, una solución que contiene cianuro y que disuelve el metal precioso. El cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) del mineral, en particular mineral de baja ley y mineral que no puede tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por

gravedad. El uso de soluciones a base de agua para extraer y recuperar metales como el oro se denomina hidrometalurgia. Las operaciones de minería del oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón).

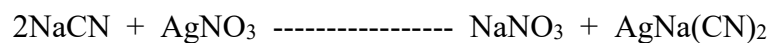
3.3. Cianuro libre

“Cianuro libre” es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro (CN⁻) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Las briquetas sólidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion de sodio y el anión de cianuro (CN⁻). El anión de cianuro se combina luego con el ion de hidrógeno para formar HCN molecular. La concentración del ion de hidrógeno en el agua del proceso se expresa mediante el conocido parámetro pH.³ Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno presentes, es decir, a un valor de pH de 8 o menos. Este HCN, entonces, puede volatilizarse y dispersarse en el aire. Cuando el pH es superior a 10.5, hay pocos iones de hidrógeno presentes y casi todo el cianuro libre está presente como CN⁻. En condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN⁻ son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9.⁴ Los análisis químicos de las soluciones utilizadas en los procesos y de los efluentes residuales derivados del procesamiento indican que la mayor parte del cianuro

en solución está químicamente ligado a metales distintos de las pequeñas cantidades de oro o plata.

3.4. Principio del método de titulación

Consiste en titular las soluciones lixiviadas con sus respectivos indicadores y reactivos a una determinada concentración.



IV. Equipos, Materiales e Instrumentos.

4.1. Equipos.

- ✓ Calculadora

4.2. Materiales

- ✓ Jeringa de 1 mL
- ✓ Jeringa de 10 mL

Reactivos

- ✓ Solución de AgNO_3
- ✓ Yoduro de Potasio (KI)

4.3. Instrumentos

- ✓ Fiola.

V. PROCEDIMIENTO:

5.1. PREPARACION DE REACTIVOS

5.1.1. Preparación de la solución de nitrato de plata:

1. Calibración de la botella: Se pesa la botella de 1 litro en vacío. Se llena la botella con tanta agua, hasta que su peso es el peso en vacío más un kilo (esto corresponde a un litro). Se marca el nivel de agua y se seca la botella.
2. Preparación de la solución: Se pesa 17,33 gramos de nitrato de plata, y se lo mete en la botella. Se llena la botella con agua destilada exactamente hasta la marca que corresponde a un litro.
3. Si no se ha conseguido una botella de vidrio oscuro (color café), se debe forrar la botella con cinta aislante negra, porque a contrario la luz daña la solución.

5.1.2. Preparación de la solución de yoduro de potasio:

1. Calibración de la botella: Se pesa la botella de 100 cm³ (centímetros cúbicos) en vacío. Se llena la botella con tanta agua, hasta que su peso es el peso en vacío más unos 100 gramos (esto corresponde a 100 cm³). Se marca el nivel de agua y se seca la botella.
2. Preparación de la solución: Se pesa 3 gramos de yoduro de potasio, y se lo mete en la botella. Se llena la botella con agua destilada

exactamente hasta la marca que corresponde a 100 cm³ (centímetros cúbicos).

$$\%NaCN_{libre} = Factor\ Titulante \times mL.\ AgNO_3\ gastado$$

$$Factor\ Titulante = \frac{0.057 \times Peso}{m.}$$

Para obtener un factor titulante de 0.1 es que debemos pesar los 17.33 g AgNO₃ / L Sol.

O también:

$$Factor\ Titulante = \frac{9,8 \times N}{mL.}$$

5.1.3. Procedimiento para la titulación

- Obtener solución aurocianurada.
- Sacar con la jeringa grande 10 mL de solución.
- Llevarla a la fiola.
- Agregar 2-3 gotas de Yoduro de Potasio.
- En la jeringa con 1 mL ir adicionando hacia la fiola pequeñas cantidades de AgNO₃.
- Agitar la fiola cada vez que se va adicionando el Nitrato de plata.
- Observar el cambio de color hacia verde lima.
- Anotar gasto de Nitrato de plata