

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO A
ESCALAS LABORATORIO Y PILOTO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA

CARLA ALEJANDRA SUÁREZ BELTRÁN
carla.suarez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVÍN Ph.D
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, Junio de 2017

© Escuela Politécnica Nacional (2017)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Carla Alejandra Suárez Beltrán, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Carla Alejandra Suárez Beltrán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carla Alejandra Suárez Beltrán, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Ph.D
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del Proyecto PIS 039 12 de la Escuela Politécnica Nacional, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX).

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la obra maravillosa que ha hecho sobre mi vida, por regalarme en esta ocasión la alegría de estar cerca de culminar este objetivo profesional.

A mi querida pequeña familia: Myri, Edwin y Key, por todo el apoyo y amor incondicional que me brindan, en especial mi madre quien ha sido mi guía e inspiración durante toda mi vida y me ha impulsado a lograr mis metas.

A Daniel, porque desde los inicios de la carrera me brindó su apoyo en todo sentido y en todo tiempo, sobre todo al final. Gracias por enseñarme a ser más fuerte y no rendirme. Te amo mucho esposo y amigo.

A mis abuelitos César y Regina por sus cuidados, su ternura y sus enseñanzas que me han acompañado siempre.

Al Ing. Ernesto De La Torre por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto bajo su dirección, por compartir conmigo sus conocimientos y su linda amistad.

A la Ing. Alicia Guevara por su guía indispensable en la planificación del presente trabajo.

Al Ing. Marcelo Salvador por su ayuda en la corrección y calificación de este proyecto.

Al Departamento de Metalurgia Extractiva y las valiosas personas que lo conforman: Ing. Dianita, Ing. Eddy, Pauly, Eve, Verito, Ing. Kleberito, Anilú, Wilmercito, quienes han contribuido de gran manera en este proceso y a mis compañeros y amigos tesistas con los que compartimos tantos momentos y charlas inolvidables: David, Fefe, Patito, Cesi, Diego, Cris, Mevecita, Jennycita,

Moni, Raque, Stalin C, Stalin H, Irenita, Vale, Jonas, Javi, Juank, y Raúl. Los echaré de menos criaturas de cuentos de hadas.

A mis profesores de la carrera, por su aporte a mi formación profesional y personal. Por el cariño sembrado hacia la ingeniería química.

A la hermosa familia que Dios me regaló y que me ha apoyado en cada paso importante y no tan importante en mi vida: Paty, Masho, Marce, Kate, Edwin, Key, Mary, Cesar, Caro, Liz, Cesitar, Llogui, Kari, Belén, Vivi, Lloguito, Nandy y Nandito. A Carlos, Michelle, Agustina y Juandi, mi familia paterna. A Lucy, por estar pendiente en todo momento de Dani y yo. A mi ñaïneins por su colaboración como señorita arquitecta. Les amo a todos.

A mis amigos de la vida y de la carrera. A los procesos, a Sebas, David, Cesi gominola, Sophie, Vane, Freddy, Dianita. A aquellos que siempre han estado: Giss, Fre, Geova. Gracias por estar junto a mí y alegrar mi vida dentro de las aulas y fuera de ellas, les quiero mucho.

A mis niñas Patito y Fefe, un agradecimiento especial por tanta ayuda en este paso tan importante y siempre. Les dije que lo lograríamos ja ja, les quiero muuucho.

Infinitas gracias a todas aquellas personas cuyas palabras y buenos ánimos fueron una inspiración para seguir hasta el final.

DEDICATORIA

A Dios

A Myri

A Daniel.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | PÁGINA |
|---|---------------|
| RESUMEN | xv |
| INTRODUCCIÓN | xvii |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 1.1. Reciclaje de cobre | 1 |
| 1.1.1. Generalidades del cobre | 1 |
| 1.1.1.1. Calcopirita | 2 |
| 1.1.1.2. Bornita | 2 |
| 1.1.1.3. Producción y reciclaje del cobre | 2 |
| 1.1.2. Importancia del reciclaje de cobre | 4 |
| 1.1.3. Fuentes del cobre reciclado | 7 |
| 1.1.4. Recuperación del cobre a partir de chatarra de cobre | 9 |
| 1.1.4.1. Recuperación de cobre a partir de cables eléctricos | 10 |
| 1.1.4.2. Recuperación de cobre a partir de residuos de origen electrónico | 11 |
| 1.1.5. Usos y aplicaciones del cobre | 12 |
| 1.2. Producción de oxiclورو de cobre | 14 |
| 1.2.1. Generalidades del oxiclورو de cobre | 14 |
| 1.2.2. Lixiviación ácida | 17 |
| 1.2.2.1. Influencia del agente lixivante | 18 |
| 1.2.2.2. Influencia del agente oxidante | 19 |
| 1.2.2.3. Influencia de la temperatura | 21 |
| 1.2.2.4. Influencia del tiempo de lixiviación | 22 |
| 1.2.2.5. Diagrama de Pourbaix para el sistema cobre-cloro-agua | 23 |
| 1.2.3. Precipitación alcalina | 26 |
| 1.2.4. Métodos de producción de oxiclورو de cobre | 28 |
| 1.2.4.1. Método tradicional | 28 |
| 1.2.4.2. Método del ácido sulfúrico | 29 |
| 1.2.4.3. Recuperación de oxiclورو de cobre a partir de tci | 30 |
| 2. PARTE EXPERIMENTAL | 32 |
| 2.1. Definición de las condiciones operatorias para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala laboratorio | 32 |
| 2.1.1. Caracterización y preparación del cobre reciclado | 32 |
| 2.1.1.1. Caracterización física del cobre reciclado | 32 |
| 2.1.1.2. Caracterización química del cobre reciclado | 34 |
| 2.1.2. Determinación de las condiciones oxidantes en la lixiviación de cobre reciclado en ácido clorhídrico | 35 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.1.2.1. | Evaluación del oxígeno del aire como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico | 35 |
| 2.1.2.2. | Evaluación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico | 35 |
| 2.1.3. | Determinación de la concentración del agente lixivante | 36 |
| 2.1.4. | Determinación de la concentración de sólidos en la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico | 36 |
| 2.1.5. | Determinación del tiempo de lixiviación de cobre reciclado en ácido clorhídrico | 37 |
| 2.1.6. | Determinación del mejor agente neutralizante para la precipitación de oxiclورو de cobre | 37 |
| 2.1.6.1. | Evaluación del hidróxido de sodio como agente neutralizante para la precipitación de oxiclورو de cobre | 37 |
| 2.1.6.2. | Evaluación del hidróxido de calcio como agente neutralizante para la precipitación de oxiclورو de cobre | 38 |
| 2.2. | Evaluación de las condiciones operatorias para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala piloto | 39 |
| 2.2.1. | Aplicación del criterio de semejanza entre los experimentos laboratorio y piloto | 39 |
| 2.2.1.1. | Determinación del flujo de agitación | 39 |
| 2.2.1.2. | Escalado volumétrico | 40 |
| 2.2.2. | Evaluación del tiempo de operación a escala piloto | 40 |
| 2.2.3. | Determinación del consumo energético de la producción de oxiclورو de cobre a nivel piloto | 42 |
| 2.3. | Evaluación de la pre-factibilidad técnico-conómica para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado con base en los resultados obtenidos a nivel piloto | 42 |
| 3. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 43 |
| 3.1. | Definición de las condiciones operatorias para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala laboratorio | 43 |
| 3.1.1. | Caracterización física y química del cobre reciclado | 43 |
| 3.1.2. | Evaluación de las condiciones oxidantes en la lixiviación de cobre reciclado en ácido clorhídrico | 44 |
| 3.1.2.1. | Evaluación de la temperatura de lixiviación de cobre en ácido clorhídrico con el oxígeno del aire como agente oxidante | 44 |
| 3.1.2.2. | Evaluación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico | 46 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.1.2.3. | Comparación del oxígeno del aire y del peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico | 47 |
| 3.1.2.4. | Comparación de la recuperación de cobre en solución según la dosificación de peróxido de hidrógeno en la lixiviación | 49 |
| 3.1.3. | Evaluación de la concentración del agente lixivante (ácido clorhídrico) | 51 |
| 3.1.4. | Evaluación de la concentración de sólidos en la lixiviación de cobre reciclado con ácido clorhídrico | 52 |
| 3.1.5. | Evaluación del tiempo de lixiviación del cobre reciclado en ácido clorhídrico | 53 |
| 3.1.6. | Determinación del mejor agente neutralizante para la precipitación de oxiclورو de cobre | 54 |
| 3.1.6.1. | Evaluación y comparación de hidróxido de sodio e hidróxido de calcio como agentes neutralizantes para la precipitación de oxiclورو de cobre | 55 |
| 3.1.6.2. | Caracterización del producto final | 58 |
| 3.1.6.3. | Evaluación de la influencia de la acidez de la solución lixiviada sobre el gasto de agente neutralizante | 60 |
| 3.2. | Evaluación de las condiciones operatorias para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala piloto | 61 |
| 3.2.1. | Criterio de semejanza entre los experimentos laboratorio y piloto | 61 |
| 3.2.1.1. | Determinación del flujo de agitación | 61 |
| 3.2.1.2. | Escalado volumétrico | 63 |
| 3.2.2. | Evaluación del tiempo de lixiviación del cobre reciclado en ácido clorhídrico a escala piloto | 63 |
| 3.2.3. | Caracterización del oxiclورو de cobre obtenido a escala piloto y comparación con el de escala laboratorio | 64 |
| 3.2.4. | Determinación del consumo energético de la producción de oxiclورو de cobre a nivel piloto | 66 |
| 3.2.4.1. | Balance de masa del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a escala piloto | 66 |
| 3.2.4.2. | Consumo energético del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a escala piloto | 67 |
| 3.3. | Evaluación de la pre-factibilidad técnico económica para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado | 69 |
| 3.3.1. | Descripción del proceso | 69 |
| 3.3.1.1. | Estudio de mercado | 70 |
| 3.3.1.2. | Diagrama de bloques | 71 |
| 3.3.1.3. | Condiciones de operación | 73 |
| 3.3.2. | Evaluación de la pre-factibilidad técnico - económica para una planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad | 75 |
| 3.3.2.1. | Balance de masa | 75 |
| 3.3.2.2. | Diagrama de flujo | 75 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.3.2.3. | Dimensionamiento de los equipos | 77 |
| 3.3.2.4. | Balance de energía | 82 |
| 3.3.2.5. | Diagrama de distribución en la planta (lay-out) | 83 |
| 3.3.2.6. | Estudio de pre-factibilidad económica | 85 |
| 3.3.3. | Evaluación de la pre-factibilidad técnico económica para una planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad | 93 |
| 3.3.3.1. | Balance de masa | 93 |
| 3.3.3.2. | Diagrama de flujo | 93 |
| 3.3.3.3. | Dimensionamiento de los equipos | 95 |
| 3.3.3.4. | Balance de energía | 99 |
| 3.3.3.5. | Diagrama de distribución en la planta (lay-out) | 100 |
| 3.3.3.6. | Estudio de pre-factibilidad económica | 102 |
| 3.3.4. | Comparación de la pre-factibilidad técnico y económica para la planta de producción de 1 t/mes y la de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 108 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 110 |
| 4.1. | Conclusiones | 110 |
| 4.2. | Recomendaciones | 112 |
| 5. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |
| | ANEXOS | 120 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | PÁGINA |
|--------------------|---|--------|
| Tabla 1.1. | Propiedades del cobre | 1 |
| Tabla 1.2. | Costo del cobre en Ecuador | 5 |
| Tabla 1.3. | Composición promedio de metales preciosos en componentes electrónicos | 12 |
| Tabla 1.4. | Composición promedio de metales base en componentes electrónicos | 12 |
| Tabla 1.5. | Datos termodinámicos de ΔG_f° para el sistema cobre-cloro-agua a 25 °C | 25 |
| Tabla 3.1. | Tamaño promedio y densidad aparente de los fragmentos de cobre reciclado obtenidos mediante cizallamiento | 43 |
| Tabla 3.2. | Composición elemental del cable reciclado | 44 |
| Tabla 3.3. | Comparación de los resultados de la precipitación de oxiclورو de cobre con hidróxido de sodio antes y después del lavado. | 59 |
| Tabla 3.4. | Número adimensional de Reynolds calculados para los experimentos laboratorio y piloto | 61 |
| Tabla 3.5. | Flujo de agitación según el número adimensional de Reynolds | 62 |
| Tabla 3.6. | Parámetros calculados para el escalado del proceso de producción de oxiclورو de cobre | 63 |
| Tabla 3.7. | Comparación entre los productos obtenidos a escala laboratorio y a escala piloto | 65 |
| Tabla 3.8. | Rendimiento calculado para las etapas principales del proceso y para el proceso en total | 66 |
| Tabla 3.9. | Ingreso de materia prima y reactivos a cada proceso llevado a cabo a escala piloto | 66 |
| Tabla 3.10. | Productos obtenidos del proceso de producción de oxiclورو de cobre a escala piloto. | 67 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tabla 3.11. | Balance de energía y consumo energético del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a escala piloto | 67 |
| Tabla 3.12. | Importaciones y exportaciones de chatarra de cobre y fungicidas con contenido de cobre en los últimos dos años | 70 |
| Tabla 3.13. | Condiciones de operación en la reducción de tamaño del cobre reciclado | 73 |
| Tabla 3.14. | Condiciones de operación en el proceso de lixiviación | 73 |
| Tabla 3.15. | Condiciones de operación en la neutralización | 74 |
| Tabla 3.16. | Condiciones de operación en el lavado | 74 |
| Tabla 3.17. | Condiciones de operación en el secado | 74 |
| Tabla 3.18. | Flujo de reactivos y materia prima al ingreso de cada proceso para una planta de 1 t/mes de capacidad | 75 |
| Tabla 3.19. | Productos obtenidos de la planta de 1 t/mes de capacidad | 75 |
| Tabla 3.20. | Características de la trituradora de cable de cobre para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TC-101) | 77 |
| Tabla 3.21. | Características del tamiz vibratorio para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TV-102) | 78 |
| Tabla 3.22. | Características del tanque agitado de lixiviación para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TK-201) | 78 |
| Tabla 3.23. | Características del tanque agitado de neutralización para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TK-202) | 79 |
| Tabla 3.24. | Características del tanque agitado de lavado para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TK-203) | 80 |
| Tabla 3.25. | Características de los filtros prensa para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (FP-201, FP-202 y FP-203) | 81 |
| Tabla 3.26. | Características de la estufa de secado para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (E-201) | 82 |
| Tabla 3.27. | Balance de energía para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad | 82 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabla 3.28. | Codificación de los equipos en la planta de 1 t/mes de capacidad | 83 |
| Tabla 3.29. | Parámetros del proyecto para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre | 85 |
| Tabla 3.30. | Inversión en equipos industriales requeridos para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre | 86 |
| Tabla 3.31. | Gastos en la obra civil para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre | 86 |
| Tabla 3.32. | Costos fijos por mano de obra | 87 |
| Tabla 3.33. | Costos variables para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre | 88 |
| Tabla 3.34. | Costos de operación | 89 |
| Tabla 3.35. | Inversión total | 89 |
| Tabla 3.36. | Ingresos por ventas | 90 |
| Tabla 3.37. | Amortización del préstamo para el financiamiento de la planta de 1 t/mes | 90 |
| Tabla 3.38. | Flujo de caja para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre. | 91 |
| Tabla 3.39. | Flujo de reactivos y materia prima al ingreso de cada proceso para una planta de 3 t/mes de capacidad | 93 |
| Tabla 3.40. | Características del tanque agitado de lixiviación para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-201) | 96 |
| Tabla 3.41. | Características del tanque agitado de neutralización para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-202) | 97 |
| Tabla 3.42. | Características del tanque agitado de lavado para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-203) | 98 |
| Tabla 3.43. | Características de los filtros prensa para la planta de 3 t/mes de capacidad | 99 |
| Tabla 3.44. | Características de la estufa de secado para la planta de 3 t/mes de capacidad | 99 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| Tabla 3.45. | Balance de energía para la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad | 100 |
| Tabla 3.46. | Inversión en equipos industriales requeridos para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 102 |
| Tabla 3.47. | Costos variables para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 103 |
| Tabla 3.48. | Costos de operación para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 104 |
| Tabla 3.49. | Inversión total para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 104 |
| Tabla 3.50. | Ingresos por ventas para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 105 |
| Tabla 3.51. | Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 105 |
| Tabla 3.52. | Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 106 |
| Tabla 3.53. | Indicadores financieros calculados para las plantas de capacidad de 1 y 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 108 |
| Tabla AI.1. | Mediciones de 20 fragmentos de alambre de cobre reciclado | 121 |
| Tabla AI.2. | Datos del cálculo de la densidad aparente del cobre reciclado fragmentado mediante cizallamiento | 122 |
| Tabla AVII.1. | Espesores mínimos requeridos en función del diámetro del tanque | 158 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | PÁGINA |
|---------------------|--|---------------|
| Figura 1.1. | Ciclo del cobre | 8 |
| Figura 1.2. | Proceso hidrometalúrgico de obtención de cobre a partir de residuos electrónicos | 13 |
| Figura 1.3. | Aplicaciones del cobre | 13 |
| Figura 1.4. | Crecimiento interanual del PIB en el Ecuador en el año 2015 | 15 |
| Figura 1.5. | Crecimiento interanual del PIB en el Ecuador en el primer trimestre del año 2016 | 15 |
| Figura 1.6. | Variación de la recuperación de cobre con la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación oxidante de las TCI (10 g TCI, 100 mL solución, porcentaje inicial de cobre: 10 g/L, 10 mL de peróxido de hidrógeno, T = 28 °C, 2 horas) | 20 |
| Figura 1.7. | Variación de la recuperación de cobre con el volumen de peróxido de hidrógeno en la lixiviación oxidante de las TCI (10 g TCI, 100 mL solución, porcentaje inicial de cobre: 10 g/L, 15 % ácido sulfúrico, T = 28 °C, 2 horas) | 21 |
| Figura 1.8. | Influencia de la temperatura en la lixiviación del alambre de cobre reciclado | 22 |
| Figura 1.9. | Influencia del tiempo de lixiviación del alambre de cobre reciclado con diferentes cantidades de ácido sulfúrico | 23 |
| Figura 1.10. | Diagrama de Pourbaix del sistema cobre-cloro-agua a 25 °C ($[Cu_{aq}]_{tot}=10^{-4}$ molal y $[Cl_{aq}]_{tot}=0,2$ molal) | 26 |
| Figura 1.11. | Método tradicional para recuperar oxiclورو de cobre | 29 |
| Figura 1.12. | Método del ácido sulfúrico para recuperar oxiclورو de cobre | 30 |
| Figura 1.13. | Recuperación de oxiclورو de cobre a partir de TCI | 31 |
| Figura 2.1. | Cizalla Diacro utilizada para la reducción de tamaño del cobre reciclado | 33 |
| Figura 2.2. | Preparación de la muestra de cobre reciclado para el análisis por espectrofotometría de chispa | 34 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 2.3. | Montaje del ensayo para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a nivel piloto | 41 |
| Figura 3.1. | Recuperación de cobre en la lixiviación con burbujeo de 4 NL/min de aire como agente oxidante a 20, 50 y 70 °C (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm) | 45 |
| Figura 3.2. | Efecto de la adición de peróxido de hidrógeno como agente oxidante sobre la recuperación de cobre en la lixiviación de cobre reciclado (20 °C, HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm) | 46 |
| Figura 3.3. | Comparación entre la recuperación de cobre en la lixiviación con 4 NL/min de aire como agente oxidante a 70°C y 5 mL de peróxido de hidrógeno como agente oxidante a 20 °C (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm) | 48 |
| Figura 3.4. | Comparación entre la recuperación de cobre en solución obtenida al colocar 1 mL de peróxido de hidrógeno cada hora durante 5 horas y al colocar los 5 mL al inicio del experimento (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 20°C, 24 h, 500 rpm) | 49 |
| Figura 3.5. | Temperatura del sistema de lixiviación con la adición de 1 mL de peróxido de hidrógeno durante las primeras horas del experimento (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 20 °C, 24 h, 500 rpm) | 50 |
| Figura 3.6. | Efecto de la concentración de HCl sobre la recuperación de cobre en solución (20 °C, 5 mL de peróxido de hidrógeno, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm) | 51 |
| Figura 3.7. | Influencia de la cantidad de sólidos en la recuperación de cobre en solución (20 °C, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm) | 52 |
| Figura 3.8. | Influencia del tiempo en la lixiviación del cobre reciclado (20 °C, 9,1 % sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm) | 53 |
| Figura 3.9. | Comparación entre los agentes neutralizantes NaOH y Ca(OH) ₂ (Lixiviación a 20 °C, 9,1 % sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm, pH de neutralización = 6) | 55 |
| Figura 3.10. | Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con NaOH como agente neutralizante, a nivel laboratorio | 56 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Figura 3.11. | Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente neutralizante, a nivel laboratorio | 57 |
| Figura 3.12. | Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con NaOH como agente neutralizante después del proceso de lavado, a nivel laboratorio. | 58 |
| Figura 3.13. | Difractograma del producto del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a partir de tarjetas de circuitos impresos. | 59 |
| Figura 3.14. | Producto del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala laboratorio con NaOH como agente neutralizante | 60 |
| Figura 3.15. | Gasto de solución de NaOH según la concentración de HCl a la que se llevó la lixiviación. | 61 |
| Figura 3.16. | Recuperación de Cu en la lixiviación a escala piloto (20 °C, 9,1 % sólidos, 2 000 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm) | 64 |
| Figura 3.17. | Diagrama de bloques (BFD) del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a nivel piloto. | 68 |
| Figura 3.18. | Diagrama de bloques (BFD) del proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala industrial | 72 |
| Figura 3.19. | Diagrama de Flujo (PFD) para el proceso de producción de oxiclورو de cobre proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad. | 76 |
| Figura 3.20. | Diagrama de distribución en planta (lay - out) para la producción de oxiclورو de cobre de cobre a partir de cobre reciclado para 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad. | 84 |
| Figura 3.21. | Diagrama de Flujo (PFD) para el proceso de producción de oxiclورو de cobre proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad. | 94 |
| Figura 3.22. | Diagrama de proceso (lay-out) para la producción de oxiclورو de cobre proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad. | 101 |

| | | |
|-----------------------|---|-----|
| Figura AVI.1. | Esquema del proceso de lixiviación | 148 |
| Figura AVI.2. | Esquema del proceso de la filtración posterior a la lixiviación | 149 |
| Figura AVI.3. | Esquema del proceso de precipitación alcalina | 152 |
| Figura AVI.4. | Esquema del proceso de la filtración posterior a la precipitación | 153 |
| Figura AVI.5. | Esquema del proceso de lavado | 154 |
| Figura AVI.6. | Esquema del proceso de filtración y secado final | 154 |
| Figura AVII.1. | Resumen de parámetros para la selección del tipo de impulsor a utilizar | 161 |
| Figura AVII.2. | Relación entre el número de Potencia (N_P) y el número de Reynolds (Re) para sistemas de agitación | 163 |
| Figura AVII.3. | Relación entre el número de Caudal (N_Q) y el número de Reynolds (Re) para sistemas de agitación | 164 |
| Figura AVIII.1 | Esquema de la trituradora de cable de cobre para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 165 |
| Figura AVIII.2 | Esquema del tamiz vibratorio para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 166 |
| Figura AVIII.3 | Esquema del tanque agitado de lixiviación de cobre para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 167 |
| Figura AVIII.4 | Esquema del tanque agitado de neutralización para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 168 |
| Figura AVIII.5 | Esquema del tanque agitado de lavado para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 169 |
| Figura AVIII.6 | Esquema de los filtros para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 170 |
| Figura AVIII.7 | Esquema de la estufa para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre | 171 |
| Figura AVIII.8 | Esquema de la trituradora de cable de cobre para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 172 |
| Figura AVIII.9 | Esquema del tamiz vibratorio para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 173 |

| | | |
|------------------------|---|-----|
| Figura AVIII.10 | Esquema del tanque agitado de lixiviación de cobre para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 174 |
| Figura AVIII.11 | Esquema del tanque agitado de neutralización para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 175 |
| Figura AVIII.12 | Esquema del tanque agitado de lavado para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 176 |
| Figura AVIII.13 | Esquema de los filtros para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 177 |
| Figura AVIII.14 | Esquema de la estufa para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | 178 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | PÁGINA |
|---|---------------|
| ANEXO I Caracterización física del cobre reciclado | 121 |
| ANEXO II Fichas técnicas de los ensayos experimentales de lixiviación de cobre reciclado con ácido clorhídrico a escala laboratorio | 123 |
| ANEXO III Fichas técnicas de los ensayos experimentales de precipitación de oxiclورو de cobre a partir del cloruro cúprico formado en la lixiviación de cobre reciclado con ácido clorhídrico | 136 |
| ANEXO IV Cálculo del factor de escalado geométrico y del número adimensional de Reynolds | 140 |
| ANEXO V Fichas técnicas de lixiviación y neutralización para la obtención de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala piloto | 143 |
| ANEXO VI Balance de masa del experimento a nivel piloto | 145 |
| ANEXO VII Diseño de tanques agitados | 156 |
| ANEXO VIII Especificaciones técnicas equipos | 165 |

RESUMEN

Históricamente, el Ecuador se ha caracterizado por ser un exportador de materia prima y un importador de bienes y servicios; en ocasiones, la materia prima para la producción de estos bienes sale masivamente del país como es el caso de residuos con contenido de cobre (Reyes y Taco, 2009, p. 54). El presente trabajo busca brindarle una utilidad a estos desechos mediante la obtención de un producto de mayor valor agregado como es el oxiclورو de cobre sintetizado a partir de cobre reciclado.

El oxiclورو de cobre es principalmente demandado por el sector agrícola, al ser un fungicida de contacto que posee grandes ventajas sobre otros fungidas del mismo tipo como su baja fitotoxicidad. En este trabajo se evaluó la síntesis de este compuesto a escala laboratorio y piloto a partir de cobre reciclado mediante lixiviación en ácido clorhídrico en condiciones oxidantes y neutralización hasta un pH entre 5,5 y 7,0 donde precipita el oxiclورو de cobre.

Es así que las condiciones de operación de las etapas de lixiviación y neutralización fueron definidas a nivel de laboratorio y con base en los resultados que lograron los mayores rendimientos, se escaló el proceso a nivel piloto.

Inicialmente, a escala laboratorio, se experimentó con aire y peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes y se obtuvo que con el uso del 4,8 % de peróxido en la solución lixivante se alcanza una recuperación de cobre en solución mayor al 85 %. Además se varió la concentración de ácido clorhídrico como lixivante entre 140, 185 y 230 g/L y se obtuvo que la concentración de 140 g/L era suficiente para alcanzar hasta un 83 % de cobre lixiviado. Se varió el porcentaje de sólidos en solución entre 9, 13 y 17 % y se determinó que es mejor trabajar con el porcentaje más bajo de 9 %. Se determinó que el tiempo de lixiviación de 8 horas es suficiente para recuperar más del 83 % de cobre en la solución y evitar costos excesivos al lixiviar por 24 horas. Se experimentaron dos agentes neutralizantes diferentes: hidróxido de sodio e hidróxido de calcio; se concluyó que el mejor agente neutralizante es el hidróxido de sodio para la

precipitación de oxiclورو de cobre. Del procedimiento a nivel laboratorio se obtuvo un producto de 82 % de oxiclورو de cobre previo al proceso de lavado y de 100 % de oxiclورو de cobre después del lavado.

Con las condiciones determinadas a escala laboratorio, se replicó el experimento a escala piloto con un factor de escalado de 400 y un flujo de agitación turbulento, donde se obtuvo un producto de 70 % de pureza previo al lavado y de 97 % de pureza después del lavado. La cantidad de producto obtenido fue de 5,2 kg de oxiclورو de cobre 97 % a partir de 4 kg de cobre reciclado procesado. Se realizó el balance de masa y energía del proceso y se calculó que el consumo energético del ensayo piloto fue de 16,83 Kw-h.

Finalmente se evaluó la pre-factibilidad técnico y económica para la instalación de una planta de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para dos escenarios de diferentes capacidades: 1 y 3 t/mes de oxiclورو de cobre producido. Se dimensionaron los equipos necesarios, se realizó el balance de masa y energía y los diagramas de flujo (PFD) y de distribución en planta (lay-out) para cada capacidad. También se realizó el flujo de fondos para cada uno de los proyectos y se calcularon y compararon los indicadores financieros. Se obtuvo que la planta de 1 t/mes de capacidad no es factible con un valor actual neto (VAN) y una tasa interna de retorno (TIR) negativos; mientras que la planta de 3 t/mes obtuvo un VAN de 688 615 USD, un TIR de 140 % y una relación beneficio – costo de 6,9, valores que indican la alta rentabilidad económica del proyecto al trabajar con la mayor capacidad.

INTRODUCCIÓN

El oxiclورو de cobre se aplica principalmente en la rama de la agricultura como fungicida, en la nutrición animal, como pigmento, en pirotecnia, entre otros usos (Richardson, 2012, p. 11). Los compuestos de cobre ocupan un rol marcado en la industria y la agricultura, su carácter antimicrobiano le permite ser el componente principal de las sustancias inhibidoras del crecimiento de hongos y bacterias que provocan enfermedades en las plantas (Domy, 2001, p. 520-521).

En el Ecuador, este compuesto es principalmente importado, lo que evidencia la necesidad del desarrollo de una industria nacional que proporcione dicho producto (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1). La gran mayoría del cobre reciclado es vendido a plantas de fundición extranjeras o terminan en botaderos (Reyes y Taco, 2009, p. 279). En 2015, el Ecuador exportó 7 967 toneladas métricas de desechos de cobre, principalmente hacia China (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1; Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016, p. 1). Además, en el mismo año, se importaron 255 toneladas de fungicidas con contenido de cobre, principalmente de Francia, Estados Unidos, Alemania, Colombia y China (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1).

La obtención del oxiclورو de cobre ha sido objeto de varios estudios debido a sus ventajas sobre otros fungicidas cúpricos. A través de la transformación de los compuestos de cobre, se han desarrollado diversos métodos como: la electrólisis de salmuera en un ánodo de cobre mediante una neutralización controlada del óxido de cobre (Butts, 1960, p. 795), la neutralización de hidróxido de cobre con solución de ácido clorhídrico (HCl), el tratamiento de cloruro cúprico con hidróxido de cobre, la oxidación de cloruro cuproso en aire (Othmer, 1963, p. 271) y el tratamiento de cloruro cúprico con carbonato de calcio y con sosa cáustica (Shikarev, 1990, p. 50). Sin embargo, la utilización de los compuestos mencionados como materia prima, representa un costo muy alto y es por ello que varias investigaciones se han centrado en un proceso que utilice cobre metálico como material de partida.

En estudios anteriores, se realizó una comparación de la obtención de oxiclورو de cobre a partir de cobre metálico mediante una lixiviación con soluciones de ácido clorhídrico, cloruro de sodio y con una mezcla de ambos (Muhammad, Rashid, Muhammad y Shahnaz, 2008, p. 361). Además, en diversos trabajos se ha investigado el uso de peróxido de hidrógeno como agente oxidante en la lixiviación de minerales cúpricos con el fin de acelerar la reacción (Antonijević, Dimetrijević y Janković, 2004, p. 329; Mahajan, Misra, Zhong y Fuerstenau, 2007, p. 671). Por otro lado, en la búsqueda de utilizar materias primas de bajo costo y promover el reciclaje, los residuos de cobre han sido utilizados para este proceso en diversas maneras.

En 2014, Chaverra realizó un estudio de la producción de oxiclورو de cobre a partir de las tarjetas de circuitos impresos (TCI); no obstante, para una producción a gran escala se encuentra más utilidad en partir de residuos comunes con mayor contenido de cobre como los cables eléctricos reciclados (Reyes y Taco, 2009, p. 54). Es por ello que en el presente trabajo se busca establecer las condiciones necesarias para obtener oxiclورو de cobre en un tiempo reducido mediante el tratamiento de cobre reciclado con ácido clorhídrico en medio oxidante y la posterior precipitación con hidróxido de sodio o hidróxido de calcio (cal).

La producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre metálico reciclado constituye una alternativa atractiva en el Ecuador, debido al importante papel que ocupa la rama de la agricultura en nuestro país, así como al valor agregado que se brindará al proceso metalúrgico del cobre.

La evaluación de la influencia de las condiciones de operación que intervienen en el proceso de obtención del oxiclورو de cobre, a escalas laboratorio y piloto, son necesarias para realizar una estimación cercana del funcionamiento de una planta industrial. Finalmente, el estudio de pre factibilidad económica establecerá el beneficio que representa la implementación de la planta industrial que, más allá de intereses económicos, busca promover la práctica del desarrollo sustentable en el país.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. RECICLAJE DE COBRE

1.1.1. GENERALIDADES DEL COBRE

El cobre es uno de los metales más importantes de la sociedad actual debido a sus ventajosas propiedades; es dúctil, maleable y un excelente conductor del calor y la electricidad, además puede formar aleaciones con otros metales para mejorar sus propiedades. En la naturaleza se lo puede encontrar en dos estados de oxidación, como Cu^{1+} y Cu^{2+} generalmente en sulfuros, sulfatos, carbonatos y óxidos, como la cuprita, malaquita, bornita y calcopirita. Suele presentarse con otros metales como zinc (Zn^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y hierro (Fe^{2+}) (Domy, 2001, p. 500). Las principales fuentes primarias de cobre son la calcopirita y la bornita, con las cuales se produce alrededor del 50 % del cobre a nivel mundial (Copper Alliance, 2016, p. 1).

En la Tabla 1.1 se resumen las propiedades más importantes del cobre.

Tabla 1.1. Propiedades del cobre

| | |
|---|--|
| Dureza (escala Mohs) | 2,5 – 3,0 |
| Gravedad específica | 8,9 |
| Cristalografía | Isométrico con caras cúbicas en dodecaedro u octaedro |
| Metales asociados al cobre nativo | Plata, bismuto, arsénico, mercurio y antimonio |
| Color | Rojo cobre en superficie reciente. Oscuro con brillo apagado al oxidarse |
| Brillo | Metálico |
| Color a la llama | Verdoso |
| Punto de fusión | 1 085 °C |
| Se reconoce por su color en superficie reciente, fractura astillosa, alto peso específico y por ser muy dúctil y maleable | |

(Klein y Hurlbut, 1999, p. 375, Copper Alliance, 2016, p. 1)

1.1.1.1. Calcopirita

La calcopirita es un sulfuro natural de cobre que presenta una cristalografía tetragonal con caras diesfenoidales. Su fórmula estequiométrica es CuFeS_2 , con un contenido de 34,6 % de Cu, 30,4 % Fe y 35,0 % S. Tiene una dureza entre 3,5 y 4,0 según la escala Mohs, una gravedad específica de 4,1 a 4,3, color amarillo latón, huella negra verdosa y posee brillo metálico. Se encuentra en la mayoría de las menas de sulfuros por lo cual es el mineral de cobre más común e importante como fuente primaria para la producción del metal (Klein y Hurlbut, 1999, p. 395).

1.1.1.2. Bornita

La bornita, por su parte, es un mineral de cobre y hierro cuya fórmula estequiométrica es Cu_5FeS_4 . Tiene un contenido de Cu del 63,3 %, 11,2 % Fe y 25,25 % S. Posee una dureza en la escala Mohs de 3, gravedad específica alrededor de 5, color superficial bronce pardo, pero al oxidarse con aire se vuelve púrpura y azul; su huella es negra grisácea y posee brillo metálico. Se encuentra comúnmente con otros sulfuros como calcopirita, pirita y pirrotina, por lo cual también es una mena importante de cobre (Klein y Hurlbut, 1999, p. 391).

1.1.1.3. Producción y reciclaje del cobre

La vida cotidiana depende enteramente del cobre ya que prácticamente se lo utiliza en todo el entorno, viviendas, escuelas, oficinas, construcciones, medios de transportes, tuberías de agua, generalmente, para la conducción de energía eléctrica. Es por esto que anualmente se obtienen grandes cantidades de chatarra de cobre que pueden ser recicladas adecuadamente para su reutilización (Copper Alliance, 2016, p. 1).

Debido a su versatilidad, el cobre es 100 % reciclable con un ciclo de vida bastante extenso durante el cual conserva sus propiedades sin mayores alteraciones, razón por la cual permite abaratar costos de operación, reducir el

consumo de energía (alrededor del 85 % inicial) y favorecer la protección ambiental con un ahorro anual de 100 millones de MW-h de energía eléctrica y 40 millones de toneladas menos de dióxido de carbono (CO₂) (Procobre, 2016a, p. 1).

Alrededor del 80 % de la producción mundial de cobre primario se obtiene por pirometalurgia, es decir, por métodos a alta temperatura que implican enormes gastos energéticos y además producen contaminación ambiental por emisiones de dióxido de azufre (SO₂) principalmente. Por esta razón, desde hace algunos años se está incrementando el desarrollo de los métodos hidrometalúrgicos (reacciones químicas en sistema acuoso) que, aunque implican extracciones de menas con bajo contenido de cobre y procesos mucho más largos, son más amigables con el medio ambiente y más económicos. Dichos métodos hidrometalúrgicos involucran principalmente las siguientes etapas, lixiviación ácida en presencia de agentes oxidantes, extracción y electrodeposición (Antonijević, Dimetrijević y Janković, 2004, p. 329).

La lixiviación del cobre consiste básicamente en disolver el cobre en la fase acuosa formada por un ácido, comúnmente ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, un medio oxidante como el oxígeno del aire, hierro (Fe³⁺), o peróxido de hidrógeno, este último es un fuerte oxidante que ha sido calificado como un reactivo ambientalmente seguro ya que durante la reacción con los minerales de cobre solamente produce agua. Debido a estas características, el peróxido de hidrógeno ha sido ampliamente estudiado como agente oxidante en las reacciones redox para disolver la materia prima de algunos minerales (Antonijević, Dimetrijević y Janković, 2004, pp. 329 y 330).

La etapa de extracción consiste en reducir el cobre, que se encuentra en solución, a su fase metálica, lo cual se puede realizar mediante cementación o extracción por solventes. Finalmente, dependiendo de la aplicación, el cobre puede ser purificado con electrodeposición (electro-obtención), el cual es un proceso electroquímico donde el cobre en solución se deposita en un cátodo de cobre de alta pureza (99,99 %) (Copper Alliance, 2016, p. 1).

Aunque la tercera parte de la demanda mundial del cobre se obtiene del reciclaje, el manejo incorrecto de los residuos sólidos en el Ecuador provoca que materiales con contenido de metales valiosos y reciclables como cobre terminen en botaderos y en su gran mayoría sean vendidos a plantas de fundición extranjeras (Procobre, 2016b, p. 1; Reyes y Taco, 2009, p. 279).

Entre 2014 y 2015 se produjeron más de 4 millones de toneladas de residuos sólidos (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016, p. 1) entre las cuales se calculan 28 420 toneladas de chatarra metálica ferrosa y no ferrosa (Organización Mundial de la Salud, 2002, p. 1); además en estos años se exportaron en promedio 8 730 toneladas métricas de desperdicios y desechos de cobre, principalmente hacia China (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1).

1.1.2. IMPORTANCIA DEL RECICLAJE DE COBRE

El cobre se puede reciclar como la mayoría de los metales, sin embargo, éste es uno de los pocos metales que son 100 % reciclables. En muchos casos existe la incógnita de por qué reciclar el cobre, cuales son las ventajas tanto ambientales como a nivel económico para una empresa, o si vale la pena invertir recursos en este tipo de investigaciones.

La preservación del planeta debería ser la razón principal para incursionar en el reciclaje, incluso más allá de los réditos económicos que esto pueda generar industrialmente. Además, la principal ventaja del cobre, como ya se mencionó, es la capacidad de ser totalmente reciclable, es por ello que la importancia de su recuperación radica justamente en darle un nuevo uso a lo que se puede considerar como basura, y al mismo tiempo disminuir la cantidad de desechos en los botaderos (Reyes y Taco, 2009, p. 65).

Las estadísticas del Banco Central del Ecuador (2017a) no presentan registros de exportaciones de cobre refinado durante los últimos 5 años, mientras que las importaciones de cobre en el 2015 fueron de 8 168 toneladas y en el 2016

superaron las 3 200 toneladas. En cuanto al cobre reciclado, entre el 2015 y enero del 2017, el Ecuador importó apenas 32 toneladas frente a 15 664 toneladas que se exportaron (p. 1). Estos datos muestran que el Ecuador es un país que solamente vende cobre reciclado, más no lo refina para vender este metal con un valor agregado.

En la Tabla 1.2 se muestra el costo del cobre en el Ecuador durante los últimos dos años, tanto del cobre refinado que se importa como de la chatarra de cobre que se vende al exterior. El valor del cobre en el 2016 bajó respecto a su valor en el 2015, lo cual incide directamente en la venta del cobre reciclado afectando a la economía nacional.

Tabla 1.2. Costo del cobre en Ecuador

| Año | Cátodos de cobre refinado (costo en USD/kg) | Chatarra de cobre (costo en USD/kg) |
|------|--|--|
| 2015 | 6,08 | 4,38 |
| 2016 | 5,35 | 4,02 |

(Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1)

Todos los recursos naturales, y el cobre no es la excepción, poseen recursos limitados de los minerales que son la principal fuente primaria de los metales. Hasta la actualidad solamente entre el 12 y 13 % de las reservas de cobre conocidas han sido explotadas, sin embargo, es necesario no explotar a un nivel muy acelerado dichos recursos para poder alargar el tiempo de vida de los mismos y mantener al planeta en un ciclo estable y duradero (Copper Alliance, 2016, p. 1).

Desde 1950 se conocía que el tiempo estimado de reservas explotables de cobre era de 40 años y más de 200 años de recursos existentes. En el año 2000 se explotaron 180 millones de toneladas de cobre, cuyo resultado influyó en un incremento del tiempo en las reservas de producción del cobre entre 26 y 39 años (Procobre, 2016b, p. 1). Aunque la demanda de cobre sigue en aumento y se siguen encontrando más reservas de este preciado metal, es importante mantener y alargar el ciclo del cobre mediante el reciclaje.

Otra de las razones por las cuales se recicla el cobre se debe a la eficiencia energética. Por cada tonelada de cobre reciclado que se procesa, se utiliza apenas el 85 % de la energía que se usaría para procesar el cobre primario (extracción de mina), lo cual influye directamente en la disminución de los costos operativos de las productoras de cobre y por ende en todas sus aplicaciones, y además es muy beneficioso para el medio ambiente, ya que reduce las emisiones de SO₂ y CO₂, y el consumo de los combustibles derivados del petróleo (Copper Alliance, 2016, p. 1).

La cantidad de desechos de los rellenos sanitarios crece exponencialmente año tras año debido al incremento poblacional y a la mayor demanda del mercado actual, es así que el costo para dar una disposición final adecuada a los desechos también va en aumento y se va tornando una opción muy cara, lo cual se puede ahorrar también mediante el reciclaje (Copper Alliance, 2016, p. 1).

Del mismo modo el incremento de la basura que se acumula en los vertederos incrementa por la innovación tecnológica que incita a un cambio más acelerado y por lo tanto a un consumismo en masa que genera más desechos. Adicionalmente, como consecuencia de dicha innovación se ha reducido el tiempo de uso de los productos e incluso se ha integrado lo que se conoce como obsolescencia premeditada o programada, mediante la cual los fabricantes han acortado la vida útil de sus productos, aunque tengan tecnología de punta (Chaverra, 2014, p. 2).

Por lo general no se da una disposición final adecuada a los materiales que llegan al término de su vida útil, ya que en los rellenos sanitarios se tiene una mezcla de material orgánico e inorgánico junto con chatarra metálica que representa un peligro de alto impacto ambiental para el suelo y el agua por contaminación de soluciones saturadas de metales pesados, e incluso mediante la incineración se llega a contaminar el aire con grandes cantidades de compuestos de hidrocarburos altamente contaminantes para la atmósfera (Chaverra, 2014, p. 2).

Adicionalmente el reciclaje del cobre, y de la chatarra en general, genera beneficios socioeconómicos mediante el incremento de pequeñas empresas como son las recicladoras de chatarra de materiales ferrosos (acero y hierro) y no ferrosos (cobre, aluminio, zinc y sus aleaciones) alrededor de las medianas y grandes industrias productoras de cobre (Reyes y Taco, 2009, pp. 54 y 65).

Debido al alto impacto ambiental que generan los residuos de cobre y a los beneficios que involucra el hecho de que sea totalmente reciclable, se busca promover las prácticas de reciclaje de este metal.

1.1.3. FUENTES DEL COBRE RECICLADO

Para determinar las fuentes principales del cobre, en primera instancia se debe entender cómo funciona el ciclo del mismo. El cobre, como todos los materiales, posee un ciclo de vida determinado por las siguientes etapas, tal como se muestra en la Figura 1.1:

- Explotación primaria. Se refiere a la fase en la cual se extrae el mineral de cobre (por ejemplo, calcopirita) y se le da un tratamiento adecuado que consiste principalmente en la reducción de tamaño y eliminación de otros metales que podrían interferir en el proceso de producción del cobre.
- Producción de materia prima. En esta etapa se refina el cobre y dependiendo de su aplicación se lo vende en forma de concentrado de cobre, cátodos de alta pureza, *billets* o alambrón.
- Fabricación de productos elaborados. Se producen las diversas piezas que serán utilizadas en un gran número de aplicaciones como cables eléctricos, tuberías, adornos y muchos más.

- Reciclaje y disposición final. Una vez que se ha utilizado el cobre y cumple con su periodo de vida útil, se tienen dos opciones, se lo recicla para reutilizarlo y continuar con el ciclo o es eliminado como desecho en los depósitos donde con el tiempo se descompone por lixiviación y genera gran contaminación ambiental (Codelco, 2008, p. 1; Reyes y Taco, 2009, p. 68).

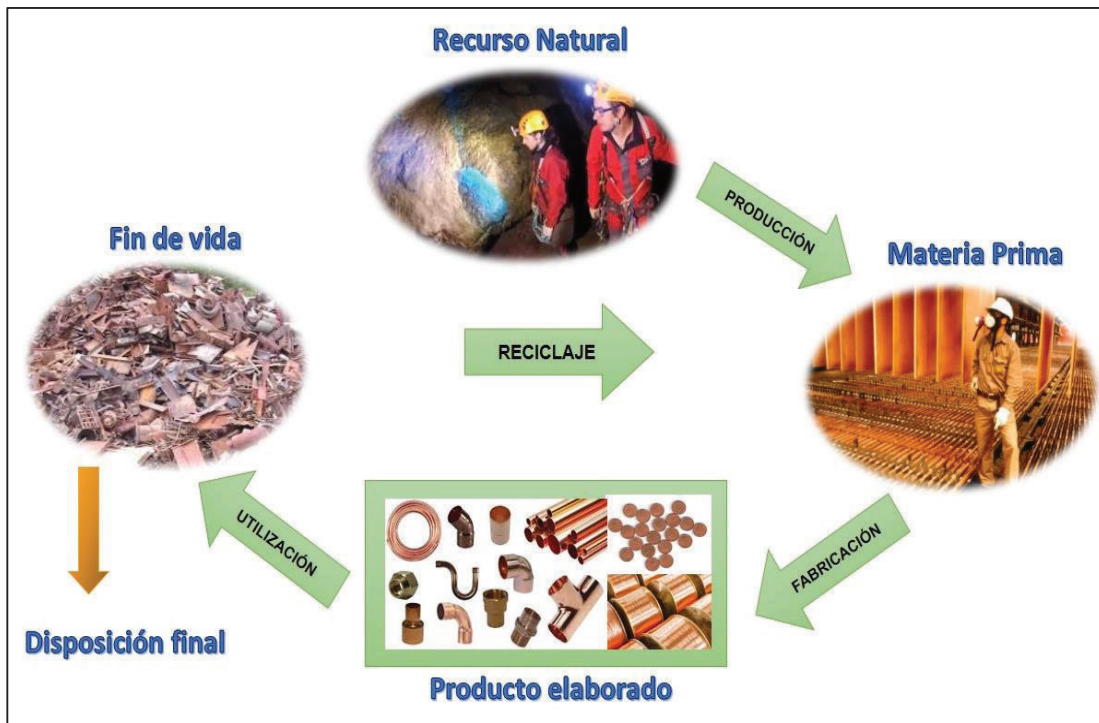


Figura 1.1. Ciclo del cobre
(Codelco, 2008, p.1 y El Bayabuyiba, 2015, p.1)

Por lo tanto, se puede definir que las fuentes del cobre reciclado provienen básicamente de todas las aplicaciones que se les pueden dar a los productos elaborados. De un modo más generalizado, la chatarra metálica proviene en su mayoría de plantas industriales en mantenimiento o que han terminado su tiempo de vida útil y por ende de todos los equipos y herramientas que generan, de las construcciones en demolición, de vehículos aéreos, marítimos y terrestres obsoletos, de los electrodomésticos y baterías usadas (Reyes y Taco, 2009, p. 54).

Dentro de todos estos tipos de chatarra metálica, la chatarra de cobre se divide en dos grandes grupos:

- Chatarra vieja. Proviene de los productos desechados que ya han sido utilizados, como por ejemplo los cables eléctricos o las tuberías de cobre de edificios antiguos.
- Chatarra nueva. Es la que se genera de las industrias productoras de cobre, latón o bronce durante el mismo proceso de producción durante el cual las máquinas generan residuos como trozos y virutas de cobre que se pueden recolectar para volver a incluir en el proceso productivo (Codelco, 2008, p. 1).

La pureza del cobre depende de su aplicación, por ejemplo, el grado eléctrico tiene una pureza del 99,99 % en contenido de cobre y es el que se utiliza en los cables eléctricos justamente por la alta conductividad eléctrica. Este tipo de cobre no debe ser mezclado con cobre de pureza inferior ya que al disminuir su pureza también disminuye la eficiencia del cobre en su aplicación. La chatarra de cobre de más baja pureza puede ser utilizado en aleaciones o en la producción de productos químicos como el sulfato de cobre, por ejemplo, mientras que la chatarra de latón solo puede utilizarse para elaborar otras piezas de latón (Codelco, 2008, p. 1). Por esta razón es importante realizar un adecuado reciclaje del cobre para lo cual se debe tener un conocimiento adecuado de las diversas fuentes del cobre.

1.1.4. RECUPERACIÓN DEL COBRE A PARTIR DE CHATARRA DE COBRE

Como ya se mencionó, el reciclaje del cobre tiene muchos beneficios tanto económicos como ambientales, por esta razón, es importante conocer y realizar estudios más amplios que permitan aprovechar esta chatarra no ferrosa. Los procesos de recuperación de cobre a partir de fuentes recicladas incluyen los mismos procesos (pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos) que se utilizan para

producir cobre, la diferencia radica en que la materia prima ya no es un mineral, sino la chatarra de cobre que ha llegado al término de su vida útil, lo cual representa una gran ventaja energética, económica y ambiental dependiendo de la fuente de reciclaje y el proceso que se aplique.

1.1.4.1. Recuperación de cobre a partir de cables eléctricos

Los cables eléctricos generalmente contienen una gran cantidad de cobre metálico, por lo cual se considera como una fuente muy rentable para obtener cobre refinado. Es necesario encontrar formas alternativas para lograr este objetivo de forma económica y con un bajo impacto ambiental (Ayala y Fernández, 2014, p. 1099).

La primera etapa es la de recolección del cobre reciclado, la cual se realiza en los botaderos generalmente, aunque en la actualidad se han implementado pequeñas industrias que se dedican especialmente al reciclaje de residuos sólidos tanto ferrosos como los no ferrosos dentro de los cuales se incluye al cobre (Reyes y Taco, 2009, p. 55).

El siguiente paso consiste en eliminar la parte plástica del cable eléctrico con la cual viene generalmente recubierto. Una forma sencilla y económica, pero muy contaminante, es la quema directa de los cables eléctricos a cielo abierto. Sin embargo, actualmente las técnicas mecánicas como el triturado y el pelado de los cables, son los medios que predominan. Este proceso de quema directa es el que utilizan principalmente las pequeñas industrias en países en desarrollo donde no se controla la temperatura de combustión ni la emisión de gases a la atmósfera, aunque es una práctica que se lleva a cabo también en países desarrollados, por lo cual es un tema que debe ser atendido a nivel mundial.

Debido a los problemas ambientales que la combustión de los cables recubiertos de plástico genera, se promueve evitar esta práctica dando un valor especial a los cables de cobre que se lleven intactos a las empresas que procesan estos

residuos adecuadamente, además de plantear legislaciones que prohíban la quema al aire libre de cualquier tipo de desecho e imponer multas a las personas que lo sigan realizando (UNEP Chemicals, 2008, p. 5).

Una vez que se obtiene el cable sin recubrimiento se puede obtener cobre refinado o concentrados de cobre por cualquiera de las vías (pirometalurgia o hidrometalurgia) que se indicaron en la sección 1.1.1.3.

1.1.4.2. Recuperación de cobre a partir de residuos de origen electrónico

Actualmente los residuos de componentes electrónicos están aumentando aún más que los residuos de cables eléctricos, tornándose en uno de los mayores problemas ambientales del siglo XXI debido al manejo y disposición final de los mismos por los grandes volúmenes que se generan, en parte porque las industrias promueven al mayor consumismo con la obsolescencia premeditada disminuyendo el tiempo de vida útil de estos dispositivos y por otro lado por un mercado demasiado amplio que está muy lejos de saturarse debido a tantos avances tecnológicos. Anualmente en todo el mundo se generan hasta 50 millones de toneladas de desechos electrónicos con un crecimiento del 3 al 5 % (Chaverra, 2014, p. 1)

Las tarjetas de circuitos impresos (TCI) son la base de todos los aparatos eléctricos y electrónicos, están formados por una placa de plástico (resina epoxi con retardantes de llama tóxicos) y comúnmente metales como Ag, Au, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Nb, Ni, Pb, Pd, Pt y Zn. Por ejemplo, las tarjetas de celulares están compuestas en promedio de 13 % polímeros, 24 % cerámicos y 63 % metales; en las computadoras se tiene 27 % polímeros, 28 % cerámicos y 45 % metales (Chaverra, 2014, pp. 1 y 2).

En las Tablas 1.3 y 1.4 se muestra la composición promedio de los principales metales preciosos y metales base que se encuentran en procesadores de computadora y TCI reciclados.

Tabla 1.3. Composición promedio de metales preciosos en componentes electrónicos

| Metal | Ag (g/t) | Au (g/t) | Nb (g/t) |
|--------------|----------|----------|----------|
| Procesadores | 4 462 | 1 836 | 124 |
| TCI | 1 764 | 712 | 48,2 |

(Montero, 2012, pp. 68 y 69)

Tabla 1.4. Composición promedio de metales base en componentes electrónicos

| Metal | Cu (%) | Fe (%) | Ni (%) | Zn (%) |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Procesadores | 48,76 | 3,68 | 2,32 | 2,91 |
| TCI | 23,43 | 5,72 | 1,57 | 1,14 |

(Montero, 2012, p. 70)

Como se aprecia en la Tabla 1.4, los aparatos electrónicos tienen grandes cantidades de cobre que mediante procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos adecuados pueden ser recuperados de forma rentable y sin demasiada contaminación. Sin embargo, debido a la complejidad en la composición de los mismos, es necesario realizar varias etapas en las cuales se puede recuperar selectivamente cada metal y obtener un valor agregado de cada uno.

En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de un proceso hidrometalúrgico para obtener cobre selectivamente a partir de residuos electrónicos.

1.1.5. USOS Y APLICACIONES DEL COBRE

En los últimos años se ha experimentado a nivel mundial un aumento en la demanda del cobre debido al incremento poblacional y a la versatilidad de aplicaciones de este metal en construcciones, instalaciones eléctricas (cables), tuberías, transporte, computadoras, aparatos electrónicos y de comunicación, aplicaciones biológicas, agricultura, medio ambiente, entre otros (AQM Copper Inc., 2016, p. 4). El incremento de la demanda a su vez implicará una mayor cantidad de desechos con contenido de cobre en los futuros años y la necesidad de un proceso para disponer correctamente de ellos.

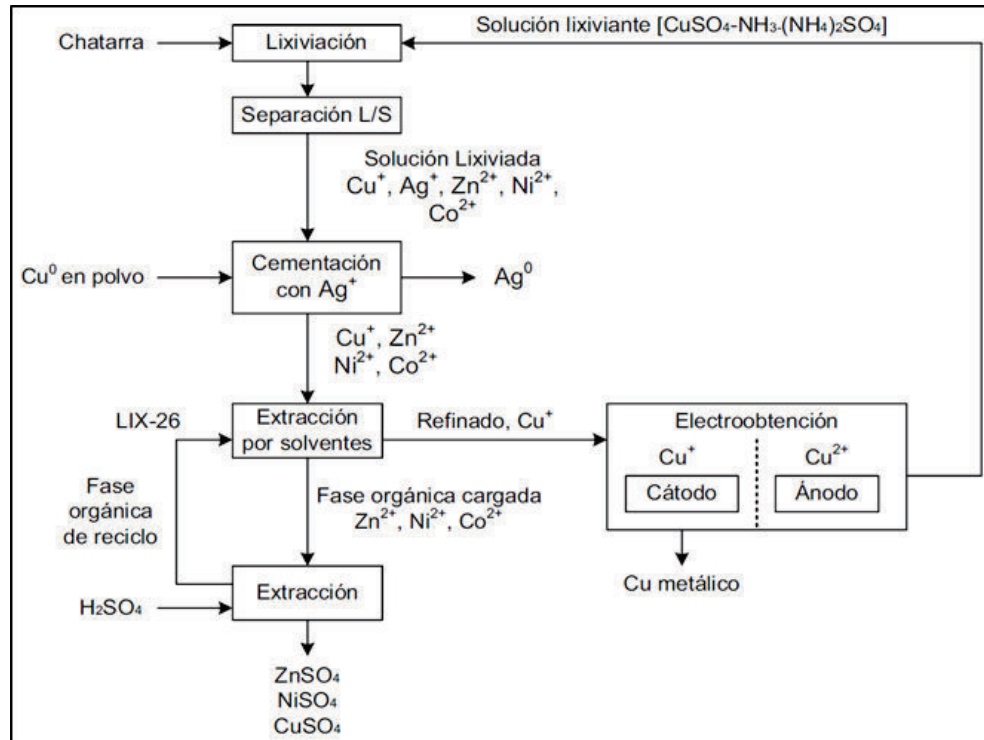


Figura 1.2. Proceso hidrometalúrgico de obtención de cobre a partir de residuos electrónicos

(Ramachandra, 2006, p. 194)

En la Figura 1.3 se exponen las aplicaciones generales del cobre, donde se aprecia que el 70 % del cobre está dirigido a la industria eléctrica.

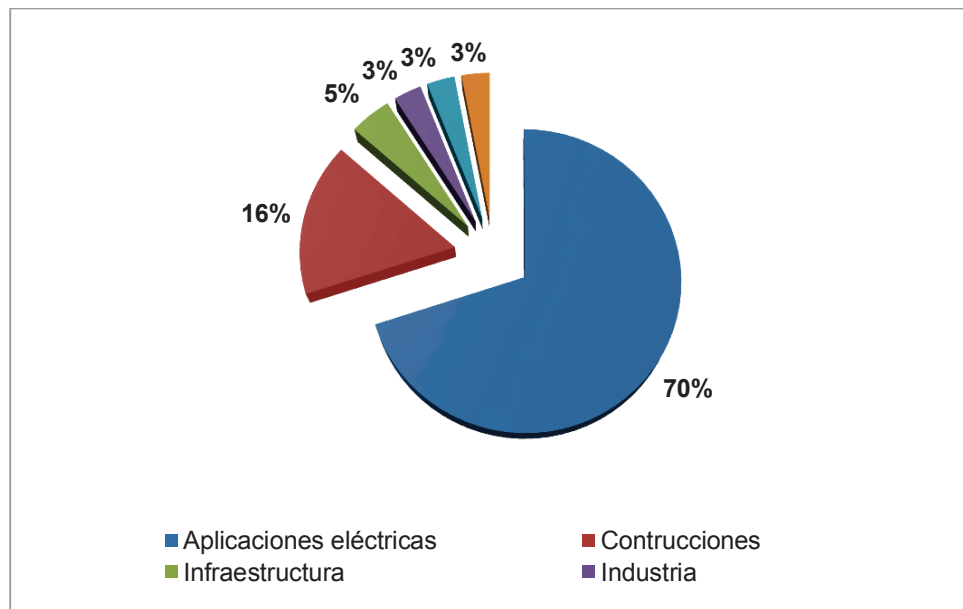


Figura 1.3. Aplicaciones del cobre

(Procobre, 2016b, p. 1)

El cobre es un metal esencial en la civilización actual, es por esto que tiene un sin número de usos entre los cuales se destacan: la construcción de cables eléctricos y comunicaciones, tuberías de gas y agua, electroimanes, circuitos integrados, elaboración de adornos y artesanías, en algunas monedas, motores eléctricos, intercambiadores de calor, en la agricultura como fertilizantes y fungicidas, productos y componentes antimicrobianos y muchas más (Codelco, 2008, p. 1; Domy, 2001, p. 500; Reyes y Taco, 2009, p. 64). Otro campo de gran aplicación son las aleaciones de cobre como por ejemplo el bronce (cobre y estaño con pequeñas cantidades de zinc), el latón (cobre y zinc) y la lata alemana (cobre, zinc y níquel) (Klein y Hurlbut, 1999, p. 376).

Los compuestos de cobre ocupan un rol marcado en la industria y la agricultura, su carácter antimicrobiano le permite ser el componente principal de las sustancias inhibidoras del crecimiento de hongos y bacterias que provocan enfermedades en las plantas (Domy, 2001, p. 520-521).

1.2. PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE

1.2.1. GENERALIDADES DEL OXICLORURO DE COBRE

La agricultura es una de las ramas económicas que en el 2015 contribuyeron al crecimiento del PIB en el Ecuador con 0,11 puntos porcentuales, como se muestra en la Figura 1.4 (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1). En este año, Ecuador importó 255,39 toneladas de fungicidas con contenido de cobre, principalmente desde Francia, Estados Unidos, Alemania, Colombia y China, sin embargo, en el 2016 se importaron apenas 100,4 toneladas (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1).

Esta baja en la importación de fungicidas de cobre va de la mano con la disminución de la actividad agrícola, lo cual se demuestra en la Figura 1.5, donde se presenta que la agricultura ha aportado apenas con 0,03 puntos porcentuales.

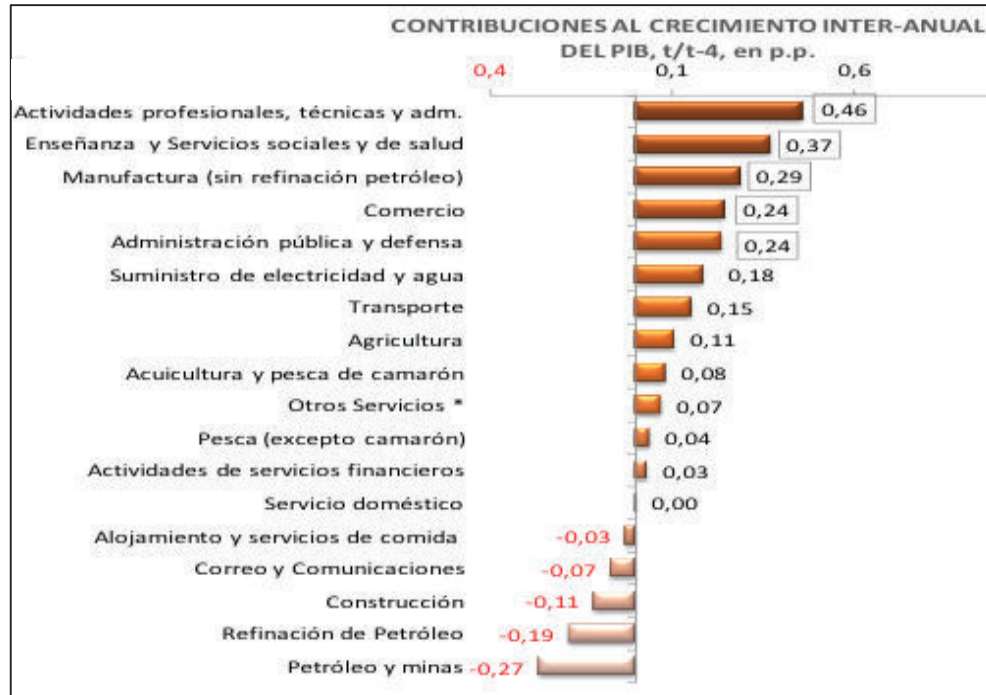


Figura 1.4. Crecimiento interanual del PIB en el Ecuador en el año 2015
(Banco Central del Ecuador, 2016a, p. 1)

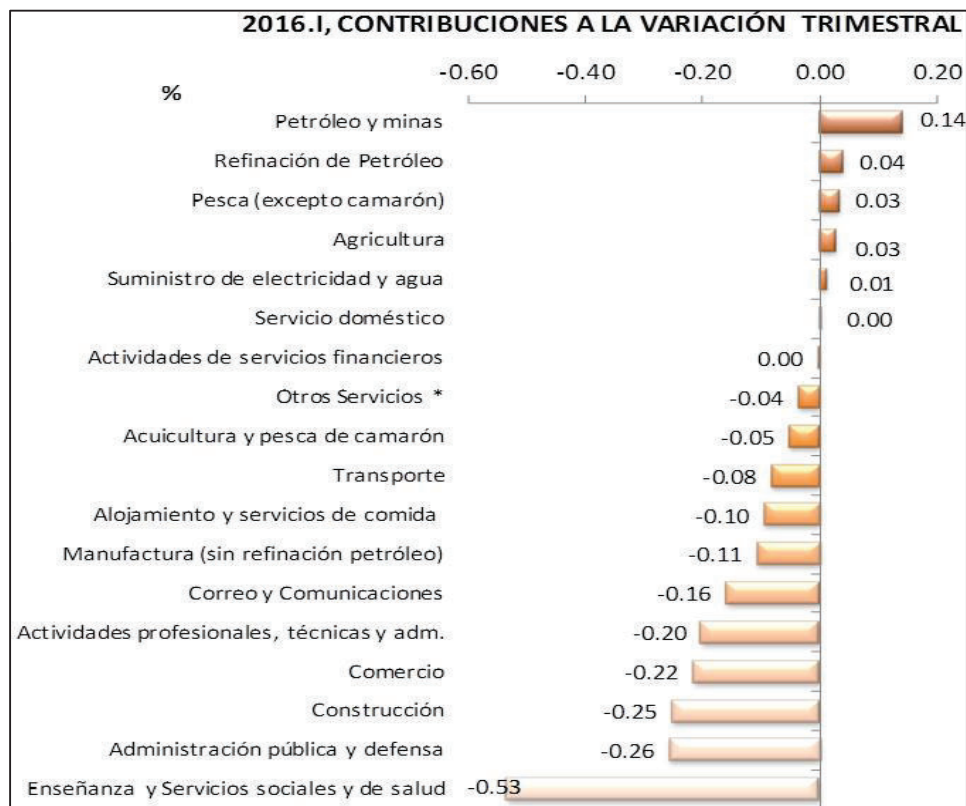


Figura 1.5. Crecimiento interanual del PIB en el Ecuador en el primer trimestre del año 2016
(Banco Central del Ecuador, 2016b, p. 1)

En la actividad agricultora del Ecuador existen varios productos, en su mayoría derivados de cobre, que se utilizan para mantener en un estado apropiado los cultivos, como por ejemplo el sulfato de cobre y el oxiclورو de cobre. Aunque los derivados del cobre representan una pequeña cantidad del uso total del cobre, no dejan de tener un rol muy importante en la industria y la agricultura (Richardson, 2012, p. 1).

El oxiclورو de cobre (nombre comercial) también conocido como clورو de cobre básico o trihidroxiclورو de dicobre (nomenclatura IUPAC), cuya fórmula química es $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ o $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$, es un compuesto químico derivado del cobre que se utiliza en la agricultura como fungicida y bactericida en todo tipo de plantas y cultivos. Se puede encontrar en la naturaleza como minerales de atacamita (cristales rómbicos verdes), paratacamita (cristales hexagonales verdes) y botallackita (cristales monoclinicos verdes) (Richardson, 2012, p. 11; Pollard, Thomas y Willams, 1989, p. 557).

El oxiclورو de cobre se utiliza principalmente como fungicida foliar debido a su gran capacidad para controlar las plagas y enfermedades en las plantas aún en cantidades muy bajas (en el orden de ppm) que son suficientes para combatir los hongos. También se usa como pigmento fungicida en pinturas especiales que van a estar expuestas a humedad donde se pueden propagar fácilmente los hongos, mohos y bacterias. Su uso también se extiende a la preservación de madera que va a ser utilizada principalmente en pisos (Muhammad et al., 2008, p. 361; Sayán y Francia, 2009, pp. 84 y 85).

Aunque el sulfato de cobre fue el primer químico utilizado como fungicida para el trigo, su aplicación es limitada en el follaje de las plantas por su alto grado de fitotoxicidad, para lo cual la mezcla de burdeos o caldo bordelés (sulfato de cobre y cal) es un sustituto más eficiente, aunque de igual manera al ser utilizado en exceso puede ser tóxico para la planta y contaminar el suelo (Muhammad et al., 2008, p. 361). Es así, que el oxiclورو de cobre presenta ventajas sobre otros fungicidas a base de cobre, por ejemplo, es muy eficaz para combatir las plagas y hongos patógenos, es el fungicida más económico ya que no necesita ninguna

preparación, no forma grumos, manipulación fácil y segura, puede ser utilizado en menores dosis y se puede mezclar sin problemas con otros fungicidas (Sayán y Francia, 2009, p. 84).

El oxiclورو de cobre se comercializa como un polvo fino (0,2 a 5,0 μm) de color verde claro o azul verdoso, funde a 140 °C, el contenido mínimo de cobre que debe tener es el 55 % hasta un máximo de 59 %. Es un polvo mojable insoluble en agua (soluble en amoníaco y ácidos) que actúa como medio preventivo y curativo, especialmente contra antracnosis, roya, bacteriosis, repilo, mildiu, alternaría y monila. El calor lo convierte en una sal anhidra de color negro y mediante absorción de agua pasa nuevamente a su color original (Chaverra, 2014, p. 14; Sayán y Francia, 2009, p. 85).

Generalmente, el oxiclورو de cobre se obtiene de forma comercial partiendo del cobre metálico o cementos de cobre de alta ley, mediante una lixiviación en ácido sulfúrico o ácido clorhídrico con medio oxidante, que puede ser aire o peróxido de hidrógeno, se obtiene una solución de cloruro de cobre, de la cual se puede precipitar dicho cloruro como oxiclورو de cobre, ya sea con cal o con sosa caustica, y por varias etapas de purificación (filtrado, lavado y secado) se obtiene un producto de elevada pureza con un contenido mínimo del 55 % de cobre (Richardson, 2012, p. 11; Sayán y Francia, 2009, p. 85).

1.2.2. LIXIVIACIÓN ÁCIDA

En cualquier tipo de lixiviación se debe que tener en cuenta varios factores importantes, tales como:

- Seleccionar un agente lixivante adecuado, es decir, que sea selectivo para el material que se desea disolver.
- Concentración y cantidad del agente lixivante.
- El tamaño de partícula debe ser el mínimo posible para asegurar mayor área de contacto entre el material con el agente lixivante.

- Mantener un proceso estable que asegure el contacto entre el material y el medio lixivante, esto se consigue mediante agitación neumática o mecánica.
- El porcentaje de sólidos.
- La temperatura y el tiempo de lixiviación (Landázuri y Muñoz, 2013 p. 22; Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

Por lo tanto, previo a cualquier tipo de tratamiento hidrometalúrgico, como la lixiviación ácida, se debe realizar una preparación adecuada de la materia prima, ya sea removiendo elementos peligrosos o contaminantes (plástico, por ejemplo) o reduciendo de tamaño de partícula, con el fin de aumentar la eficiencia del proceso exponiendo mayor área del material a disolver con el agente lixivante (Chaverra, 2014, p. 6).

Adicionalmente, en el caso de la lixiviación del cobre, es importante seleccionar un agente oxidante que incremente la velocidad de reacción, que generalmente es oxígeno o peróxido de hidrógeno.

1.2.2.1. Influencia del agente lixivante

Varios estudios han demostrado que los mejores agentes lixiviantes para el cobre son, el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico, acorde a las Ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3 respectivamente (Chaverra, 2014, p. 11).



La energía libre de Gibbs (ΔG) representa la espontaneidad y el equilibrio de una reacción química, es decir, la facilidad con la que se puede dar dicha reacción. Cuando ΔG es igual a 0, se mantiene el equilibrio termodinámico, cuando ΔG es

menor que cero la reacción es espontánea y cuando ΔG es mayor a 0 el proceso es no espontáneo (Garritz y Chamizo, 2005, p. 340). Por lo tanto, para valores más negativos de ΔG , la reacción es más espontánea y se da con mayor facilidad.

También es importante analizar la influencia de la concentración de ácido para no desperdiciar reactivos y optimizar el proceso de lixiviación.

En términos generales, al aumentar la concentración del agente lixivante también aumenta la cinética de lixiviación, disminuye el tiempo de reacción y aumenta la disolución del material de interés. Sin embargo, a concentraciones muy elevadas este efecto ya no es significativo (Antonijević, Dimetrijević y Janković, 2004, p. 333; Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

En la Figura 1.6 se muestra la influencia de la concentración del ácido sulfúrico en la recuperación de cobre de las TCI mediante la lixiviación ácida con peróxido de hidrógeno. Se puede apreciar que hasta una concentración de 15 % en peso de ácido sulfúrico la variación en el porcentaje de recuperación de cobre es importante, y alcanza un máximo de alrededor del 95 %, mientras que entre el 15 y el 35 % prácticamente la recuperación ya no varía (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396). Esto corrobora que existe un límite máximo de concentración del agente lixivante con el cual se alcanza un máximo de recuperación o disolución del material de interés, y que es muy importante determinarlo para ahorrar gastos en reactivos.

1.2.2.2. Influencia del agente oxidante

Para recuperar el cobre en solución, se han realizado varios estudios con diferentes ácidos (como se indicó en la sección anterior) y agentes oxidantes, por ejemplo, el oxígeno del aire, hierro (III) y peróxido de hidrógeno. Hace algunos años se dejó de utilizar el hierro (III) como oxidante debido a que requiere ser removido de la solución después de su uso y deja rastros de contaminación en el

producto final, por lo cual, actualmente se utiliza burbujeo de aire o peróxido de hidrógeno (Antonijević, Dimetrijević y Janković, 2004, pp. 330 y 334; Chaverra, 2014, pp. 12 y 57; Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

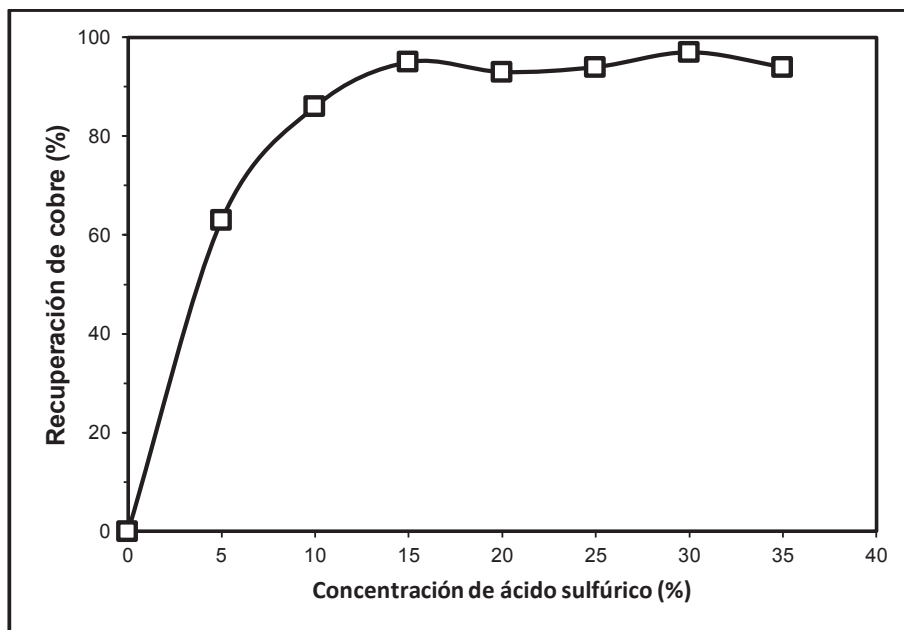


Figura 1.6. Variación de la recuperación de cobre con la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación oxidante de las TCI (10 g TCI, 100 mL solución, porcentaje inicial de cobre: 10 g/L, 10 mL de peróxido de hidrógeno, T = 28 °C, 2 horas) (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 397)

La lixiviación con burbujeo de aire es un proceso mucho más lento que con el peróxido de hidrógeno, pero tiene la ventaja que es mucho más económico, de fácil manejo y presenta temperaturas de reacción más bajas, y por ende menos evaporación de la solución. Aunque el peróxido de hidrógeno es más caro, no se regenera, sino que se pierde en la solución al descomponerse en oxígeno, presenta una eficiencia mucho mayor en la reacción de lixiviación que al utilizar aire, debido a que la solubilidad del oxígeno en agua y en ácidos diluidos es baja, el peróxido de hidrógeno al ser un reactivo líquido, no presenta este inconveniente y tiene mayor facilidad para reaccionar con el cobre (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

Análogamente como sucede con el agente lixivante, la cantidad de peróxido de hidrógeno utilizado también tienen un punto de saturación en el cual su efecto

deja de ser significativo y se mantiene constante a pesar de añadir más reactivo, como se muestra en la Figura 1.7, el porcentaje de recuperación de cobre en las tarjetas de circuitos impresos mediante la lixiviación ácida con peróxido de hidrógeno, alcanza el punto máximo con la cantidad de 10 mL de peróxido de hidrógeno y se mantiene constante aún con 25 mL (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

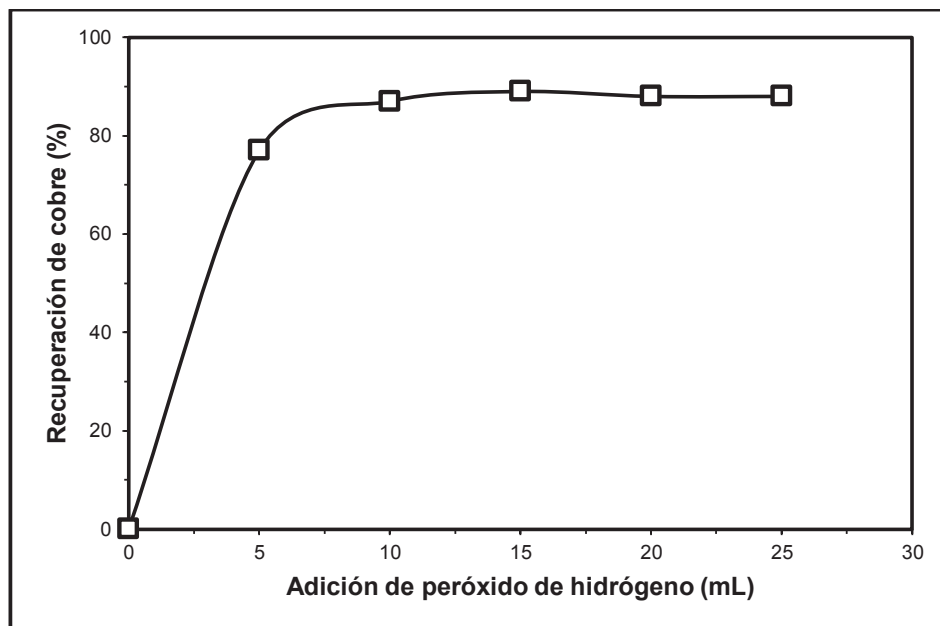


Figura 1.7. Variación de la recuperación de cobre con el volumen de peróxido de hidrógeno en la lixiviación oxidante de las TCI (10 g TCI, 100 mL solución, porcentaje inicial de cobre: 10 g/L, 15 % ácido sulfúrico, T = 28 °C, 2 horas)
(Yang, Liu y Yang, 2011, p. 397)

1.2.2.3. Influencia de la temperatura

Otro factor que se debe tomar en cuenta es la temperatura a la cual se realiza el proceso de lixiviación. Mediante varios estudios se ha demostrado que la recuperación del cobre en solución es mayor con el aumento de la temperatura (Ayala y Fernández, 2014, p. 1101; Yang, Liu y Yang, 2011, p. 397).

En la Figura 1.8 se puede advertir la influencia de la temperatura en la lixiviación de alambre de cobre reciclado con ácido sulfúrico al 30 % en peso durante 1 hora

en agitación constante (500 rpm) entre 20 y 100 °C. Se observa que a mayor temperatura aumenta el porcentaje de cobre en solución; el aumento más significativo se da a 45 °C con una recuperación del 50 % mientras que a 100 °C se recupera un máximo del 63 % (Ayala y Fernández, 2014, p. 1102).

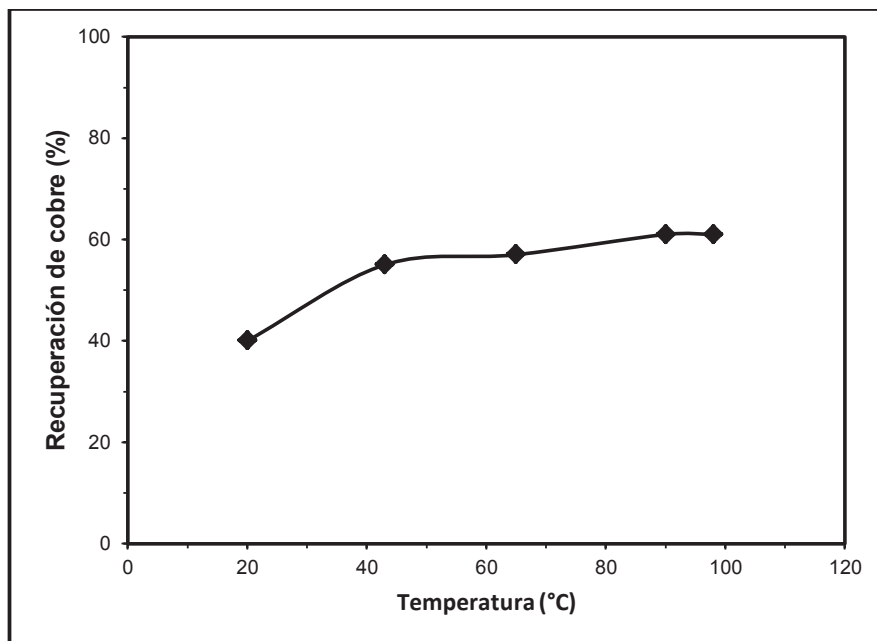


Figura 1.8. Influencia de la temperatura en la lixiviación del alambre de cobre reciclado (Ayala y Fernández, 2014, p. 1101)

1.2.2.4. Influencia del tiempo de lixiviación

Así mismo, es importante determinar el tiempo en el que se obtiene la máxima recuperación de cobre en solución. Este tiempo depende de las condiciones predefinidas en las etapas anteriores, como son, el tipo y la concentración del agente lixivante y agente oxidante, la temperatura, el tamaño de partícula, el porcentaje de sólidos, entre otros. Dependiendo de todos estos parámetros el tiempo de lixiviación puede tardar apenas unas horas hasta varios días (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

En la Figura 1.9 se muestra la variación de la recuperación de cobre con el tiempo de lixiviación en ácido sulfúrico al 30 % en peso con agitación constante (500 rpm)

a temperatura ambiente con dos cantidades de ácido, uno calculado estequiométricamente (curva inferior) y otro con el 100 % en exceso (curva superior).

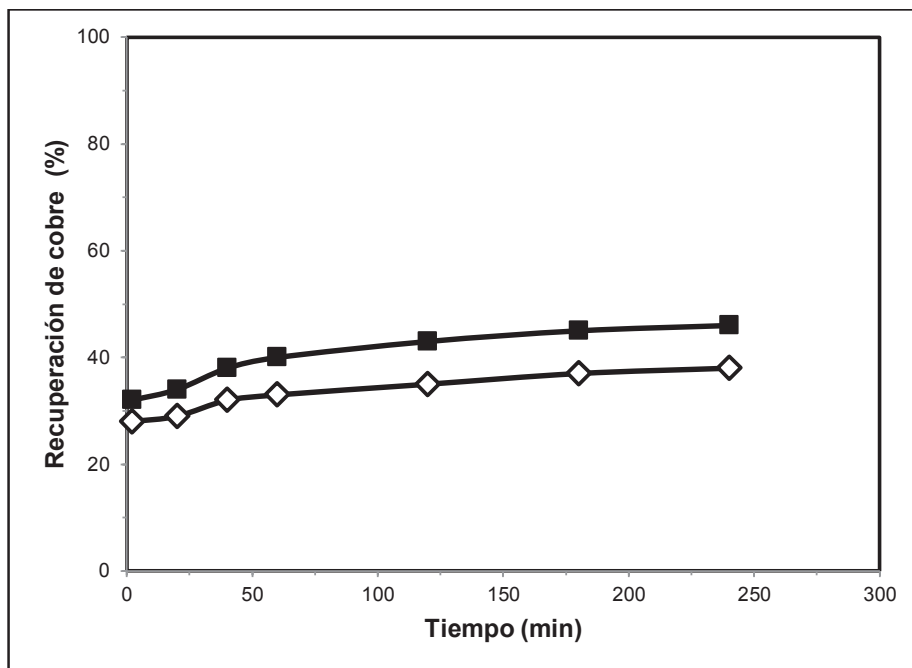


Figura 1.9. Influencia del tiempo de lixiviación del alambre de cobre reciclado con diferentes cantidades de ácido sulfúrico (Ayala y Fernández, 2014, p. 1101)

En ambos casos el porcentaje de cobre en solución aumenta con el tiempo; durante la primera hora se observa una curva creciente bien definida y luego se mantiene casi constante. Esto se debe a que la reacción inicial de disolución del cobre es muy rápida y luego la lixiviación se vuelve más lenta debido a que se producen reacciones de dismutación (el cobre es oxidado y reducido al mismo tiempo) y se requiere mayor cantidad de agente oxidante para permitir la disolución (Ayala y Fernández, 2014, p. 1101).

1.2.2.5. Diagrama de Pourbaix para el sistema cobre-cloro-agua

Como se indicó en la sección 1.2.2.1, la lixiviación oxidante con ácido clorhídrico es un medio muy favorable para recuperar el cobre en solución como cloruro de

cobre (II) (CuCl_2) y mediante un proceso de precipitación alcalina se puede obtener el oxiclورو de cobre.

Para entender cómo funcionan estos procesos es importante entender el diagrama de Pourbaix para el sistema cobre-cloro-agua.

Existen varios factores que se deben tener en cuenta en estos diagramas para poder interpretarlos de manera correcta, estos son:

- Selección de las especies. Es fundamental conocer qué tipo de especies (sólido, líquido, iones, complejos acuosos, etc.) se encuentran en un sistema termodinámico dado, ya que algunas especies no son estables en sistemas acuosos mientras que otros se forman a altas temperaturas y condiciones extremas. Por lo tanto, se debe evaluar las especies que se esperan tener en un sistema determinado, lo cual se puede realizar mediante la energía libre de Gibbs de formación estándar (ΔG_f°), valores más negativos de este parámetro indican especies más estables.

Beverkog y Puigdomenech (1998) realizaron un amplio estudio de los diagramas de Pourbaix y de las especies más estables para el sistema cobre-cloro-agua, los cuales se muestran en la Tabla 1.5.

- Temperatura. Los diagramas de equilibrio de Pourbaix dependen de la temperatura ya que las propiedades termodinámicas y electroquímicas de las especies, como la ΔG_f° y el potencial (V) por ejemplo, no serán las mismas a diferentes temperaturas. El sistema más estudiado y sencillo es a la temperatura estándar (25 °C), ya que en esta condición existen más datos termodinámicos y electroquímicos. Para realizar los diagramas a diferente temperatura, es necesario extrapolar dichos datos. Por lo tanto, la estabilidad de una especie dependerá directamente de la temperatura en la que se evalúe.

Tabla 1.5. Datos termodinámicos de $\Delta_f G^\circ$ para el sistema cobre-cloro-agua a 25 °C

| Especie | $\Delta_f G^\circ$ (kJ/mol) | Especie | $\Delta_f G^\circ$ (kJ/mol) |
|-------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|
| Cl ⁻ | -131,2 | Cu(OH) ₃ ⁻ | -493,98 |
| ClO ⁻ | -37,67 | Cu(OH) ₄ ²⁻ | -657,48 |
| HClO (aq) | -80,02 | Cu ₂ (OH) ₂ ²⁺ | -285,1 |
| ClO ₂ ⁻ | -10,25 | CuCl (cr) | -121,3 |
| HClO ₂ (aq) | -0,94 | CuCl ₂ ·3Cu(OH) ₂ (s) | -1339,5 |
| Cu ₂ O (cr) | -147,90 | CuCl (aq) | -94,3 |
| CuO (cr) | -128,29 | CuCl ₂ ⁻ | -246,0 |
| Cu(OH) ₂ (cr) | -359,92 | CuCl ₃ ²⁻ | -373,4 |
| Cu ⁺ | 48,87 | CuCl ⁺ | -69,83 |
| Cu ²⁺ | 65,04 | CuCl ₂ (aq) | -200,83 |
| CuOH ⁺ | -126,66 | CuCl ₃ ⁻ | -327,5 |
| Cu(OH) ₂ (aq) | -316,54 | CuCl ₄ ²⁻ | -452,42 |

(Beverkog y Puigdomenech, 1998, pp. 3-5)

- Concentración de cobre y cloro. Dependiendo de la concentración de estos dos compuestos, se verá favorecida la formación de una u otra especie en un rango de pH determinado. De este modo, en la Figura 1.10 se muestra el diagrama de Pourbaix del sistema cobre-cloro-agua a 25 °C ($[Cu_{aq}]_{tot}=10^{-4}$ molal y $[Cl_{aq}]_{tot}=0,2$ molal).

En la Figura 1.10 se muestra que en la zona rayada en rojo se forma el oxiclورو de cobre sólido, en un rango estrecho de pH alrededor de 6 y 7, mientras que en la zona rayada de azul es estable el cloruro de cobre (II), con un rango más amplio de pH que comienza desde 0 hasta alrededor de 7 (Beverkog y Puigdomenech, 1998, p. 6; Scott, 1990, p. 200).

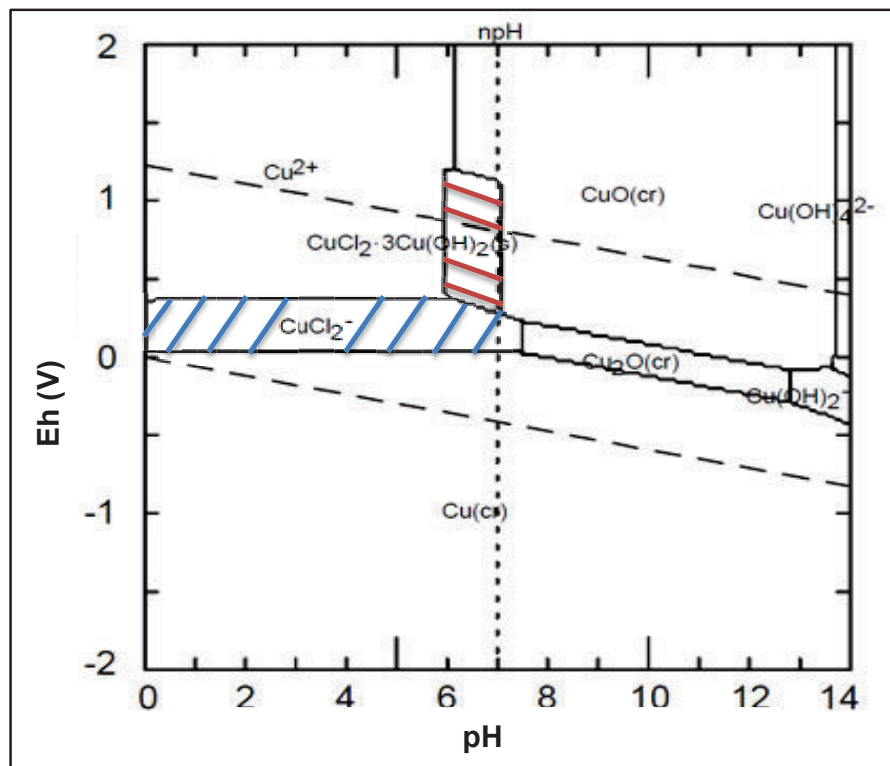


Figura 1.10. Diagrama de Pourbaix del sistema cobre-cloro-agua a 25 °C
 ($[Cu_{aq}]_{tot}=10^{-4}$ molal y $[Cl_{aq}]_{tot}=0,2$ molal)
 (Beverskog y Puigdomenech, 1998, p. 17)

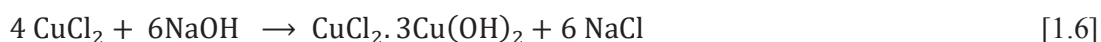
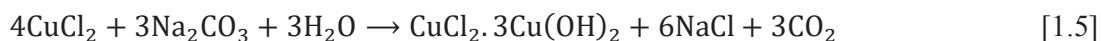
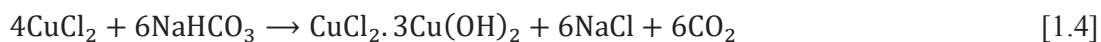
En 1998, Beverskog y Puigdomenech determinaron que la estabilidad del oxiclورو de cobre disminuye al aumentar la temperatura; dependiendo de la temperatura y de las concentraciones de cobre y cloro, este compuesto se forma en un rango de pH entre 5,5 hasta 7,5; el cloruro de cobre (II) predomina en el sistema cobre-cloro-agua entre 5 y 100 °C cuando la concentración de cloro es 0,2 molal, mientras que al aumentar dicha concentración a 1,5 molal solamente se forma entre 50 y 80 °C, y en el resto de temperaturas predomina el cloruro de cobre (III) (p. 14).

1.2.3. PRECIPITACIÓN ALCALINA

Como ya se mencionó en la sección 1.2.2.5, el oxiclورو de cobre precipita en un rango de pH entre 5,5 hasta 7,5, razón por la cual los estudios de precipitación realizados para la obtención de este producto, se encuentran alrededor de este

rango de pH (Pollard, Thomas y Willams, 1989, p. 558; Sayán y Francia, 2009, p. 86).

Se puede obtener el oxiclورو de cobre a partir de la solución concentrada de cloruro de cobre (II), utilizando bicarbonato de sodio (NaHCO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH), o hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para neutralizar la solución y precipitar el producto, cuyas reacciones se muestran en las Ecuaciones 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7, respectivamente. (Chaverra, 2014, p. 14; Richardson, 2012, p. 11; Sayán y Francia, 2009, p. 86). El uso de uno u otro reactivo dependerá de factores tanto económicos como de disponibilidad o facilidades de manejo.



El hidróxido de sodio es el reactivo más utilizado para la neutralización de las soluciones de cloruro de cobre (II) y la posterior recuperación del oxiclورو de cobre, este reactivo se añade directamente o en solución manteniendo agitación continua o incluso con aireación, hasta alcanzar un pH alrededor de 6 y observar que la solución toma un color celeste verdoso claro (Chaverra, 2014, p. 14; Pollard, Thomas y Willams, 1989, p. 557; Richardson, 2012, p. 11; Sayán y Francia, 2009, p. 86).

Como se mencionó en la sección 1.2.1, el oxiclورو de cobre presenta 3 fases cristalinas, atacamita, paratacamita y botallackita; de entre las cuales la tercera es la menos común en la naturaleza. Aún no hay suficiente información de cuál especie, atacamita o paratacamita, es la más estable a temperatura ambiente, debido a la inconsistencia en los resultados obtenidos de los diferentes procedimientos de síntesis de oxiclورو de cobre. Sin embargo, se ha llegado a

considerar que la formación de una de las tres fases del oxiclورو de cobre depende de la velocidad de agitación durante la reacción de neutralización, de la temperatura y de las concentraciones de los reactivos y complejos iónicos en solución (Pollard, Thomas y Willams, 1989, pp. 557 y 558).

Acorde al diagrama de Pourbaix de la Figura 1.10, el rango de pH en el cual precipita el oxiclورو de cobre es muy limitado, por lo cual éste es un factor crítico que se debe tener en cuenta durante la neutralización para obtener un producto de alta calidad.

1.2.4. MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE

Actualmente existen varios métodos para producir oxiclورو de cobre, los cuales dependen principalmente de la materia prima disponible y de los reactivos a utilizar, como son el agente lixivante, oxidante y neutralizante. A continuación, se detallan tres procesos diferentes para obtener oxiclورو de cobre, dos de los cuales parten de cobre metálico y uno de TCI.

1.2.4.1. Método Tradicional

En la Figura 1.11 muestra el método tradicional para obtener el oxiclورو de cobre, el cual parte de alambrón de cobre o cementos de cobre de alta ley como materia prima. Dicho cobre se coloca en un reactor junto con ácido clorhídrico al 13 % en peso y se inyecta aire comprimido como agente oxidante y medio de agitación. Se deja reaccionar la mezcla por alrededor de 60 h hasta alcanzar un pH entre 3,5 y 4,0, después de lo cual se obtiene un precipitado de lodos de oxiclورو de cobre. Después, se neutraliza con hidróxido de calcio (cal) hasta alcanzar un pH de 6,0 y se realizan varias etapas de lavado (alrededor de 8 h) para eliminar impurezas solubles en agua; después de lo cual se obtiene un producto con el 40 % de humedad. Posteriormente se realiza un calentamiento durante 30 h para eliminar la humedad hasta obtener solamente el 10 % de humedad y consecutivamente se transfiere el producto a un secador de bandejas

a 110 °C. Finalmente, tras operaciones de molienda y envasado se obtiene el producto final con un rendimiento del proceso del 93 % (Sayán y Francia, 2009, p. 85).

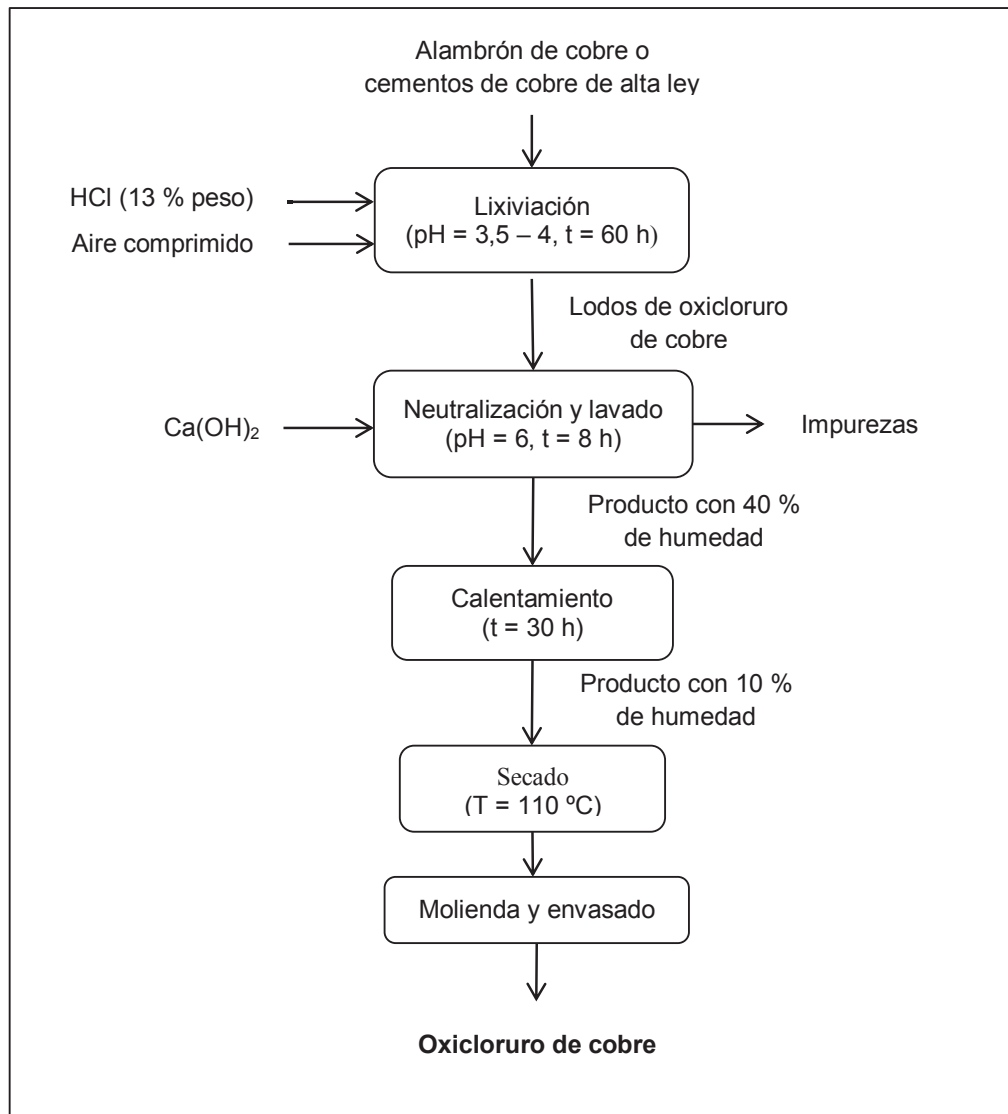


Figura 1.11. Método tradicional para recuperar oxiclورو de cobre (Sayán y Francia, 2009, p. 85)

1.2.4.2. Método del Ácido Sulfúrico

En este proceso, que se muestra en la Figura 1.12, se coloca cobre metálico en un reactor batch, mediante un sistema de bombeo se introduce una solución de ácido sulfúrico disuelto en agua y sal industrial (NaCl). El cobre reacciona con la

solución hasta alcanzar un pH entre 1,0 y 3,0 formándose mucha espuma y oxidando el cobre metálico a Cu^{2+} tornando la solución a un color verde oscuro (Sayán y Francia, 2009, p. 86).

Después, se coloca el HCl al 36 % en peso en relación 3 a 1 con agua alcanzando un pH de 1,0. Aproximadamente 1 h después, se agrega una solución de amoníaco en relación 1 a 3 con agua permitiendo la precipitación del oxiclورو de cobre al alcanzar un pH entre 5,0 y 6,0 (Sayán y Francia, 2009, p. 86).

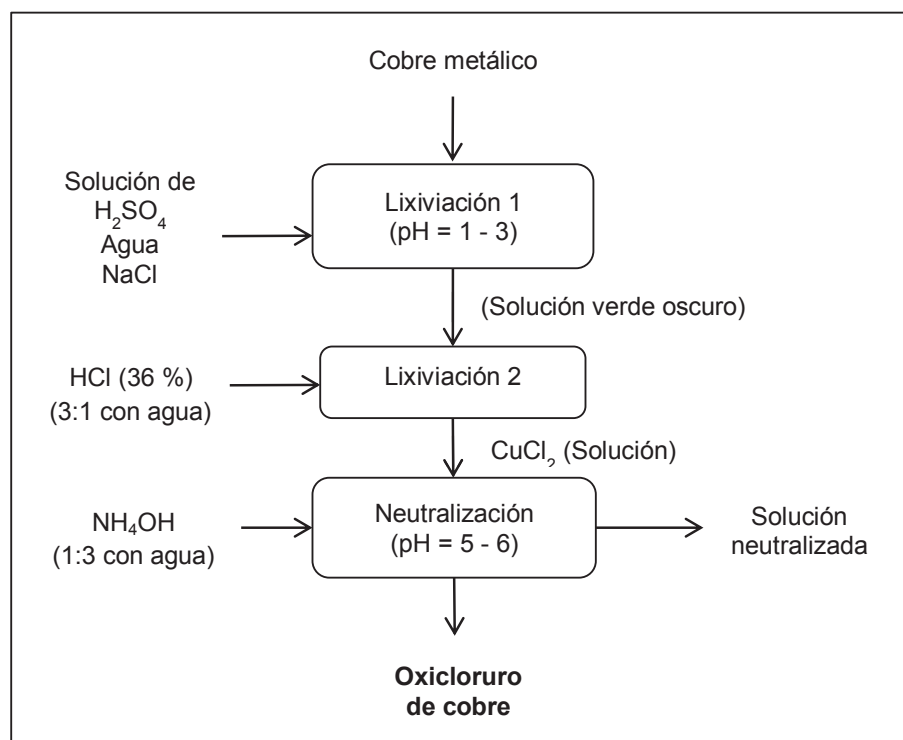


Figura 1.12. Método del ácido sulfúrico para recuperar oxiclورو de cobre (Sayán y Francia, 2009, p. 86)

1.2.4.3. Recuperación de oxiclورو de cobre a partir de TCI

En la Figura 1.13 se muestra un método para obtener oxiclورو de cobre a partir de las TCI. El proceso inicia con la preparación de la materia prima mediante reducción de tamaño, separación magnética y electrostática hasta obtener un concentrado de cobre hasta el 85 %. En una primera lixiviación con una solución de ácido sulfúrico 2,32 M por alrededor de 60 min, se obtiene sulfato de cobre con

un rendimiento del 95,2 %. El sulfato de cobre disuelto se neutraliza con hidróxido de sodio para obtener hidróxido de cobre y mediante calentamiento se produce el óxido de cobre (Chaverra, 2014, p. 35).

Una vez lavado, filtrado y secado, el óxido de cobre se disuelve con ácido clorhídrico y posteriormente se precipita nuevamente con hidróxido de sodio hasta alcanzar un pH de 7,0 en donde se forma el oxiclورو de cobre.

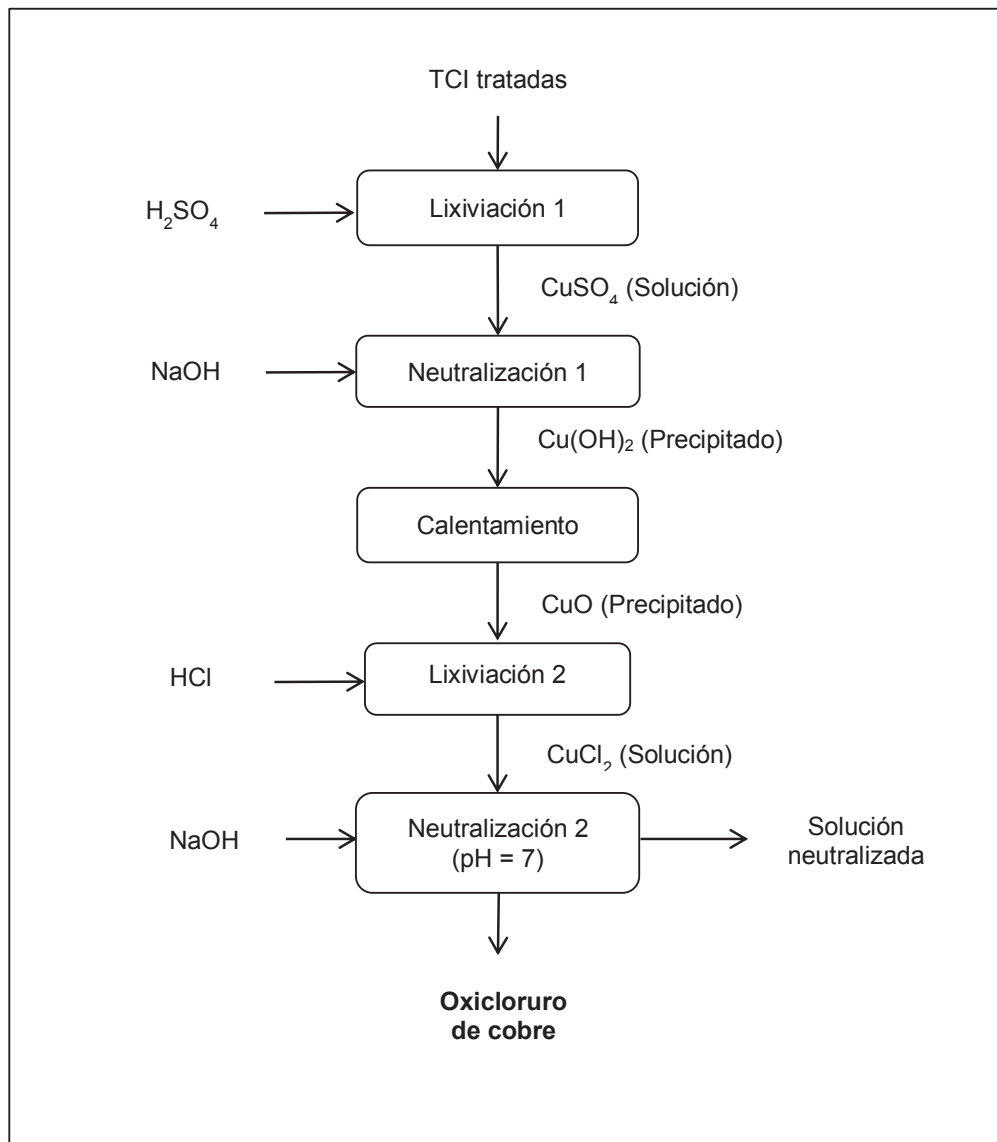


Figura 1.13. Recuperación de oxiclورو de cobre a partir de TCI (Chaverra, 2014, p. 35)

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se evaluó el proceso de producción de oxiclورو de cobre a escalas laboratorio y piloto mediante la formación de cloruro cúprico a partir de cobre reciclado, para su posterior tratamiento con solución de hidróxido de sodio o cal (Muhammad et al., 2008, p. 361) (Sayán y Francia, 2009, p. 85). A escala laboratorio se definieron las condiciones de operación para la obtención de oxiclورو de cobre tales como el agente oxidante, la concentración de HCl, el porcentaje de sólidos, el tiempo de lixiviación y el agente neutralizante para la precipitación. Las condiciones obtenidas a escala laboratorio se replicaron a nivel piloto con el objetivo de recolectar mayor información acerca del proceso de obtención de oxiclورو de cobre para realizar una evaluación técnico-económica del mismo y conocer su factibilidad.

2.1. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATORIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO A ESCALA LABORATORIO

2.1.1. CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DEL COBRE RECICLADO

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó el cobre proveniente de cables eléctricos reciclados que fueron adquiridos en la empresa Maprina S.A., la cual se dedica a recolectar materiales descartados con contenido metálico ferroso y no ferroso. El material fue caracterizado física y químicamente, además se redujo de tamaño para ingresar a la primera etapa del proceso de producción de oxiclورو de cobre, la lixiviación.

2.1.1.1. Caracterización física del cobre reciclado

El cobre fue reducido de tamaño longitudinalmente mediante una cizalla Diacro que se muestra en la Figura 2.1 hasta obtener pequeños fragmentos. Posteriormente, este material fue caracterizado físicamente mediante la determinación del tamaño promedio de partícula y su densidad aparente.

Para la determinación del tamaño promedio de los fragmentos de cobre, se homogenizó el material y se tomó una muestra de 20 fragmentos para medir su longitud con la ayuda de un calibrador digital marca MITUTOYO y definir el tamaño promedio como se indica en el ANEXO I.



Figura 2.1. Cizalla Diacro utilizada para la reducción de tamaño del cobre reciclado

Para la determinación de la densidad aparente, se pesó una probeta de 1 000 mL vacía. Se tomó una muestra de fragmentos de cobre y se rellenó la probeta hasta los 50 mL de volumen. Posteriormente se pesó la probeta con el cobre reciclado. Se repitió el procedimiento para reducir errores de medición y se determinó la densidad aparente mediante la Ecuación 2.1:

$$\delta_{\text{aparente}} = \frac{W_{\text{probeta+muestra}} - W_{\text{probeta}}}{V_{\text{probeta}}} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad [2.1]$$

Donde:

| | |
|--------------------------------|--|
| δ_{aparente} : | densidad aparente (g/cm^3) |
| W_{probeta} : | peso de la probeta (g) |
| $W_{\text{probeta+muestra}}$: | peso de la probeta con muestra (g) |
| V_{probeta} : | volumen de la probeta (cm^3) |

2.1.1.2. Caracterización química del cobre reciclado

Para la caracterización química de la materia prima se utilizó la técnica de espectrofotometría de chispa. En primera instancia se realizó una separación manual del metal y su polímero de recubrimiento con la ayuda de un alicate. Con el objetivo de formar una lámina, se cortaron y juntaron uniformemente hilos de cable como se muestra en la Figura 2.2. La muestra obtenida se analizó en el equipo BRUKER modelo Q4T4ZMAN para conocer su contenido de cobre y otros metales.

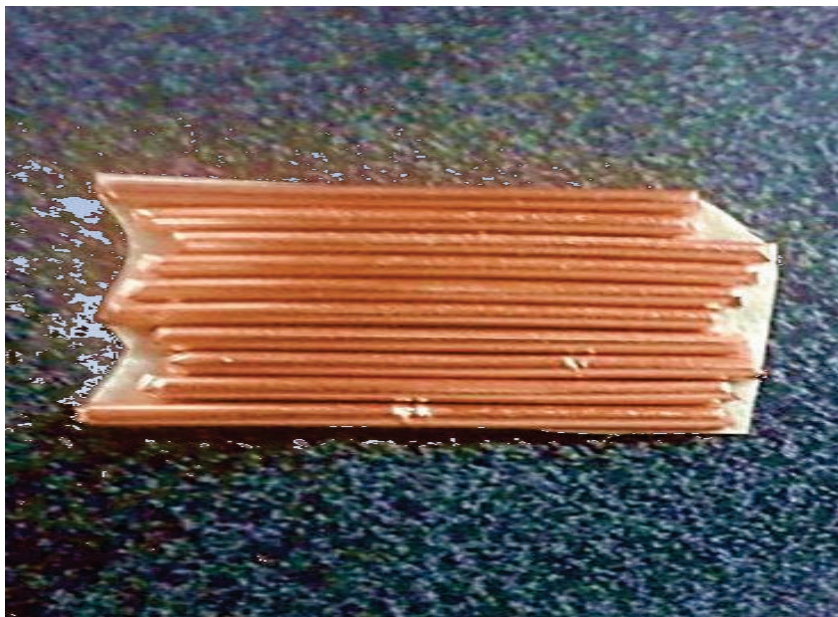


Figura 2.2. Preparación de la muestra de cobre reciclado para el análisis por espectrofotometría de chispa

2.1.2. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES OXIDANTES EN LA LIXIVIACIÓN DE COBRE RECICLADO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

Para determinar las condiciones oxidantes en las que se obtenga la mayor recuperación de cobre en solución, se utilizaron dos tipos de agentes oxidantes: oxígeno del aire y peróxido de hidrógeno.

Se realizaron ensayos de lixiviación en 100 mL de soluciones de HCl con una concentración de 230 g/L y porcentaje de sólidos del 9,1 %, que corresponde a 10 g de cobre metálico en 100 mL de solución. Cada ensayo se realizó con agitación magnética de 500 rpm durante 24 h y la concentración de cobre en solución fue determinada por espectrofotometría de absorción atómica (AA) en un equipo Analyst 300 Perkin Elmer.

2.1.2.1. Evaluación del oxígeno del aire como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico

Para la evaluación del oxígeno del aire como agente oxidante se empleó agitación neumática adicionalmente a la agitación magnética. Para ello se colocó un burbujeador de aire que trabaja a razón de 4 NL/min de aire acoplado a un vaso de precipitación de 250 mL donde se dio lugar la lixiviación.

Durante el proceso se controlaron las condiciones de pH y Eh (potencial óxido reducción) tomando alícuotas al inicio y a 1, 2, 4, 8 y 24 h de lixiviación. Adicionalmente, en esta etapa se evaluó el efecto de la temperatura mediante ensayos a condiciones ambientales, 50 y 70 °C (Ayala y Fernández, 2014, p. 1101).

2.1.2.2. Evaluación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico

Para la evaluación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante se utilizó este reactivo con una concentración al 50 % en peso y se añadieron alícuotas de 5, 10,

15, 20 y 25 mL sobre la solución lixiviante mientras se mantuvo el resto de parámetros constantes (Mahajan, Misra, Zhong y Fuerstenau, 2007, p. 672). Además se evaluaron los resultados al colocar el volumen total de peróxido de hidrógeno al inicio de la lixiviación y al colocar una fracción cada hora hasta alcanzar el volumen total a añadirse.

Durante el proceso se controlaron las condiciones de pH y Eh de igual manera que en la sección 2.1.2.1 y se analizó la concentración por AA.

2.1.3. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGENTE LIXIVIANTE

Una vez que se definieron las condiciones oxidantes con las que se logró obtener la mayor cantidad de cobre en solución, se procedió a determinar la concentración de HCl que incremente la recuperación de cobre en solución.

Se realizaron ensayos de lixiviación estándar en 100 mL de soluciones de HCl con las condiciones de oxidación más favorables resultantes de la sección 2.1.2, con un porcentaje de sólidos del 9,1 % (10 g de cobre). Cada ensayo se realizó con agitación magnética de 500 rpm durante 24 h a temperatura ambiente y, en este caso, se variaron los valores de concentración de HCl a 140, 185 y 230 g/L (Sayán y Francia, 2009, p.85).

2.1.4. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN LA LIXIVIACIÓN DE COBRE EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

Una vez determinadas las condiciones oxidantes y la concentración de HCl que lograron obtener las recuperaciones más altas de cobre en solución y economizar el gasto de reactivos, se evaluó el porcentaje de sólidos durante el proceso de lixiviación con el objetivo de determinar la mayor capacidad de producción y obtener un producto de alta pureza.

Para ello se realizaron ensayos de lixiviación estándar en 100 mL de soluciones de HCl con las mejores condiciones resultantes de las secciones 2.1.2 y 2.1.3 y se varió el porcentaje de sólidos al 9,1, 13,0 y 16,7 %, que corresponden a 10, 15 y 20 g de cobre en 100 mL de solución (Chaverra, 2014, p. 23). Cada ensayo se realizó con agitación magnética de 500 rpm durante 24 h a temperatura ambiente. la concentración de cobre en solución fue determinada por espectrofotometría de absorción atómica (AA).

2.1.5. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE RECICLADO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

Para la determinación del tiempo necesario de lixiviación de cobre reciclado en HCl se tomaron las condiciones de oxidación, concentración de lixiviante y porcentaje de sólidos que lograron obtener los mejores resultados de recuperación de cobre en solución y se realizó un seguimiento de la variación de la recuperación de cobre con el tiempo a 1, 2, 3, 5, 8, 20 y 24 h. El tiempo necesario de lixiviación fue el tiempo al cual se obtuvo el mayor porcentaje de recuperación de cobre en solución con una diferencia significativa.

2.1.6. DETERMINACIÓN DEL MEJOR AGENTE NEUTRALIZANTE PARA LA PRECIPITACIÓN DE OXICLORURO DE COBRE

Para la segunda etapa del proceso, se evaluaron por separado hidróxido de sodio e hidróxido de calcio (cal) como agentes neutralizantes para la precipitación de oxiclорuro de cobre.

2.1.6.1. Evaluación del hidróxido de sodio como agente neutralizante para la precipitación de oxiclорuro de cobre

En primera instancia se prepararon soluciones de hidróxido de sodio 2 M para la evaluación de la sosa cáustica como agente neutralizante en la precipitación de

oxicloruro de cobre. La solución preparada fue añadida poco a poco sobre los lixiviados de cobre que se obtuvieron con las mejores condiciones de lixiviación. Se mantuvo una agitación constante y se controló el pH con cada adición hasta ajustar un pH entre 5,5 y 7,5, en el que precipitó el oxicluro de cobre (Pollard, Thomas y Willams, 1989, p. 558; Sayán y Francia, 2009, p. 86).

Posteriormente, el precipitado formado y la solución neutralizada fueron separados mediante filtración por gravedad. La torta filtrada se sometió a un lavado con agua destilada y luego se secó en la estufa (VENTICELL L515-B2U/VCIII) a 110 °C por 24 horas (Sayán y Francia, 2009, p. 85).

Al final del proceso, el producto fue pulverizado para ser caracterizado mineralógicamente mediante difracción de rayos X (DRX) en el equipo Bruker AXS, modelo D8 Advance, cuyo límite de detección es del 1 %, con el fin de determinar el contenido de oxicluro de cobre e impurezas presentes. Asimismo, finalizada la síntesis de oxicluro de cobre, se determinó el rendimiento del proceso.

2.1.6.2. Evaluación del hidróxido de calcio como agente neutralizante para la precipitación de oxicluro de cobre

Para la evaluación del hidróxido de calcio como agente neutralizante, se ajustó el pH de precipitación de oxicluro de cobre mediante la adición de la cal con constante agitación y control del pH sobre una solución de lixiviados de cobre que se obtuvo con las mejores condiciones de lixiviación (gemela a la utilizada para evaluar el hidróxido de sodio). Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento descrito para la sosa cáustica en la sección 2.1.6.1 con el sólido precipitado y la solución neutralizada.

2.2. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATORIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO A ESCALA PILOTO

Con base en los resultados obtenidos a escala laboratorio, se seleccionaron las condiciones de operación (agente oxidante, concentración de ácido clorhídrico, porcentaje de sólidos, agente neutralizante) con las cuales se obtuvo la concentración más elevada de oxiclорuro de cobre y se replicó este ensayo a escala piloto.

2.2.1. APLICACIÓN DEL CRITERIO DE SEMEJANZA ENTRE LOS EXPERIMENTOS LABORATORIO Y PILOTO

El alcance del ensayo piloto fue determinado por el tamaño de los equipos disponibles, así como la materia prima, de tal manera que pudo ser una referencia para la evaluación técnico-económica a una mayor escala en donde se tomaron en cuenta adicionalmente los factores propios de mercado detallados en la Tabla 3.12 Además de replicar las condiciones de laboratorio, se procuró mantener un criterio de semejanza en la geometría a través del escalado volumétrico del sistema y en el flujo de agitación mediante el cálculo del número adimensional de Reynolds con el fin de que los experimentos sean comparables.

2.2.1.1. Determinación del flujo de agitación

A partir de la agitación realizada a nivel laboratorio, se calculó el número adimensional de Reynolds en el sistema según la Ecuación 2.2 y se determinó el tipo de flujo de agitación, el mismo que se mantuvo constante para el experimento a nivel piloto.

$$Re = \frac{N * D^2 * d}{u} \quad [2.2]$$

Donde:

$N =$ Velocidad de agitación (rps)

$D =$ Diámetro del reactor (m)

$d =$ Densidad de la solución $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$u =$ Viscosidad (Pa.s)

2.2.1.2. Escalado Volumétrico

Para mantener una semejanza geométrica entre los experimentos laboratorio y piloto, se determinó un factor de escalado resultante de la relación entre la cantidad de cobre tratado a nivel piloto y a nivel laboratorio que permita establecer una relación entre los volúmenes de ambos experimentos y, por consiguiente, determinar las dimensiones lineales que conforman el sistema a nivel piloto (altura y diámetro).

$$f_e = \frac{mCu_{piloto}}{mCu_{lab}} \quad [2.3]$$

$$f_e = \frac{V_{experimento\ piloto}}{V_{experimento\ lab}} \quad [2.4]$$

2.2.2. EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE OPERACIÓN A ESCALA PILOTO

Con base en los cálculos realizados para guardar una semejanza entre los experimentos a nivel laboratorio y piloto, se instaló el sistema de lixiviación como se indica en la Figura 2.3.

El tanque de lixiviación consistió en un bidón plástico de 100 litros de capacidad acoplado con un agitador mecánico marca DENVER donde se lixiviaron 4 kg de cobre reciclado en ácido clorhídrico técnico, a razón de 607 rpm. Para determinar el tiempo de operación necesario para la lixiviación del cobre reciclado, se

tomaron alícuotas de solución al inicio y a 1, 2, 3, 4, 5, 8 y 24 horas de lixiviación. Las alícuotas tomadas fueron analizadas por AA.

Posteriormente, la solución de cloruro cúprico formada se neutralizó hasta el pH de precipitación del oxiclورو de cobre (entre de 5,5 y 7,5). La pulpa obtenida fue sedimentada en recipientes plásticos y se separaron el licor y el precipitado mediante un sifón. Finalmente, el producto fue secado, reducido de tamaño y se analizó por DRX como se explicó en la sección 2.1.6.1.



Figura 2.3. Montaje del ensayo para la producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a nivel piloto

2.2.3. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A NIVEL PILOTO

El consumo energético del ensayo realizado a nivel piloto fue determinado mediante los tiempos de operación experimentados y la realización de los balances de materia y energía. El balance de masa, a su vez, se realizó con base en los resultados de los análisis químicos y mineralógicos, en donde se determinaron las composiciones de las corrientes de entrada y salida en cada etapa del proceso de producción de oxiclорuro de cobre.

2.3. EVALUACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO CON BASE EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS A NIVEL PILOTO

Con base en los resultados obtenidos a escala piloto, se propuso un diagrama de bloques del proceso de producción de oxiclорuro de cobre (BFD) y un diagrama de flujo (PFD). Adicionalmente, se estimaron los costos de reactivos, materiales y equipos para llevar a cabo las diferentes operaciones unitarias necesarias en el proceso. Posteriormente, se evaluó la pre-factibilidad económica; para lo cual se determinó el valor de la inversión total y de los ingresos generados y con ellos se realizó un análisis de flujo de fondos para un tiempo de vida de 10 años. Esta evaluación se realizó para dos distintos escenarios estimados mediante los datos de las importaciones que realiza el Ecuador de fungicidas con contenido de cobre y a la materia prima disponible para su síntesis (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1).

Finalmente, se determinaron los indicadores financieros: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo y se hizo una comparación de los resultados para las dos diferentes capacidades de una planta de oxiclорuro de cobre.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado, a escalas laboratorio y piloto, así como la evaluación de pre-factibilidad técnico-económica del mismo.

3.1. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATORIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO A ESCALA LABORATORIO

3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL COBRE RECICLADO

En la Tabla 3.1 se presentan los valores de la longitud promedio y diámetro de los alambres de cobre reciclado, así como de la densidad aparente del mismo. Se realizaron 20 mediciones para determinar la longitud promedio de los cables de cobre que se utilizaron en el proceso de recuperación de oxiclورو de cobre, cuyos valores se muestran en la Tabla A1.1 del ANEXO I. Adicionalmente se midió el diámetro del cable de cobre reciclado el cual dio un valor de 2,05 mm, y se determinó que corresponde al número 12 AWG (General Cable Cablec, 2015, p. 3). En cuanto al valor de la densidad aparente, el cálculo arrojó un resultado de 3,39 g/cm³, el cual se puede utilizar para saber la cantidad de material que se puede transportar o almacenar en un volumen determinado.

Tabla 3.1. Tamaño promedio y densidad aparente de los fragmentos de cobre reciclado obtenidos mediante cizallamiento

| Material | Longitud promedio (mm) | Diámetro (mm) | Densidad aparente (g/cm ³) |
|--|------------------------|---------------|--|
| Cobre reciclado de alambres eléctricos | 4,05 | 2,05 | 3,39 |

En la Tabla 3.2 se detallan los resultados de la caracterización química por espectrofotometría de chispa, la cual indica la composición química elemental en

porcentaje. Se puede apreciar que el cable de cobre reciclado es de alta pureza, con un 99,69 % de cobre y cantidades menores de Zn, Pb, P, Fe, Ni, Co, Sb y Te. Este dato es de suma importancia ya que permitirá determinar la cantidad máxima de cobre que puede ser transformado a oxiclورو de cobre y también los contaminantes que pudieran influenciar el proceso de síntesis de dicho producto.

Tabla 3.2. Composición elemental del cable reciclado

| Metal | Símbolo | Contenido en la muestra (%) |
|--------------|----------------|------------------------------------|
| Zinc | Zn | 0,08 |
| Plomo | Pb | 0,02 |
| Fósforo | P | 0,01 |
| Hierro | Fe | 0,02 |
| Níquel | Ni | 0,01 |
| Cobalto | Co | 0,02 |
| Antimonio | Sb | 0,02 |
| Teluro | Te | 0,01 |
| Cobre | Cu | 99,69 |
| TOTAL | | 99,88 |

3.1.2. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OXIDANTES EN LA LIXIVIACIÓN DE COBRE RECICLADO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

3.1.2.1. Evaluación de la temperatura de lixiviación de cobre en ácido clorhídrico con el oxígeno del aire como agente oxidante

Se realizó una evaluación inicial de la influencia de la temperatura durante la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico de 230 g/L con 9,1 % de sólidos durante 24 h a 500 rpm y un flujo de aire de 4 NL/min, para lo cual se evaluó el proceso a temperatura ambiente (20 °C), a 50 y 70 °C.

En la lixiviación de cobre reciclado en ácido clorhídrico con burbujeo de 4 NL/min de aire se observó un aumento de la recuperación de cobre en solución con el incremento de la temperatura, lo cual coincide con el trabajo realizado por Ayala y Fernández (2014), quienes realizaron la lixiviación de alambre de cobre reciclado

en ácido sulfúrico (30 % en peso) durante 1 h a 500 rpm, para obtener productos comerciales evaluando el rango de temperatura entre 20 y 100 °C obteniendo una recuperación de cobre del 39,94 % y 63,00 % respectivamente (p. 1101).

En la Figura 3.1 se muestra que a 20 °C la disolución de cobre es tan solo el 19,99 %, mientras que a 50 y 70 °C incrementa a 54,32 y 63,94 %, respectivamente.

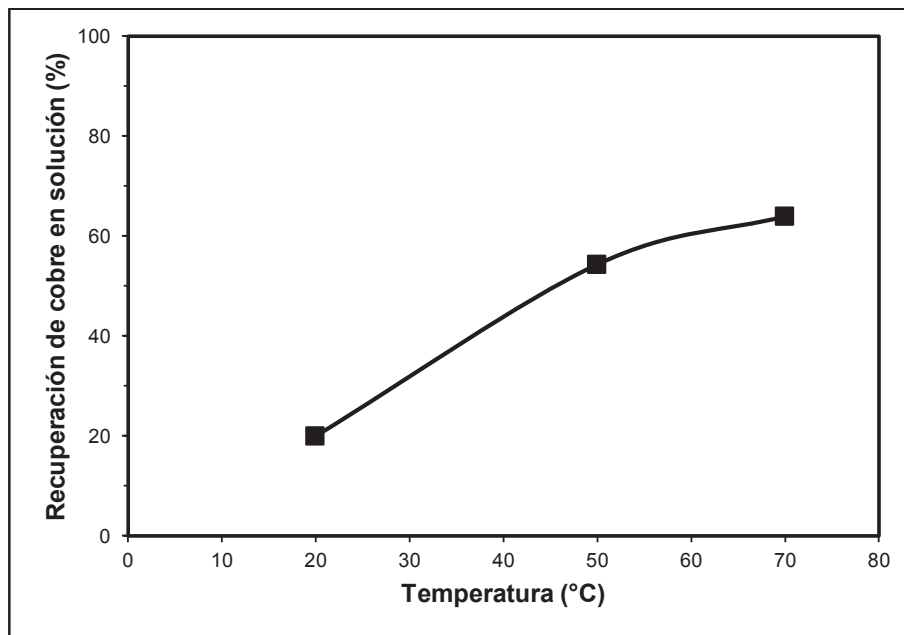


Figura 3.1. Recuperación de cobre en la lixiviación con burbujeo de 4 NL/min de aire como agente oxidante a 20, 50 y 70 °C (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm)

Se puede apreciar que el aumento entre 20 y 50 °C es muy significativo incluso entre 50 y 70 °C aunque en menor proporción. Por lo tanto, la temperatura es un factor muy importante durante la lixiviación de cobre con burbujeo de aire como agente oxidante.

La presencia de un agente oxidante y la cantidad de suministro del mismo, es de gran importancia durante la reacción de lixiviación, ya que éste determina el valor del potencial óxido reducción del sistema que a su vez determinará el estado de oxidación del cobre en solución y por ende la especie que se forme durante el proceso (Beverkog y Puigdomenech, 1998, pp. 3-5).

3.1.2.2. Evaluación del peróxido de hidrógeno como agente oxidante para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico

Para la evaluación del peróxido de hidrógeno (50 % en peso) como agente oxidante, se realizó la lixiviación del cobre con HCl de 230 g/L, 9,1 % de sólidos durante 24 h a 500 rpm y a temperatura ambiente (20 °C), y se varió la cantidad de peróxido de hidrógeno añadido, 5, 10, 15, 20 y 25 mL.

En los resultados que se muestran en la Figura 3.2, se obtuvo que mientras mayor es la cantidad de peróxido de hidrógeno añadida, mayor es la recuperación de cobre en la solución. El máximo valor alcanzado de recuperación de cobre fue de 92,79 % al añadir 25 mL de agente oxidante en el sistema de lixiviación. A su vez, el menor valor se alcanzó con la adición de 5 mL de peróxido de hidrógeno (85,57 %).

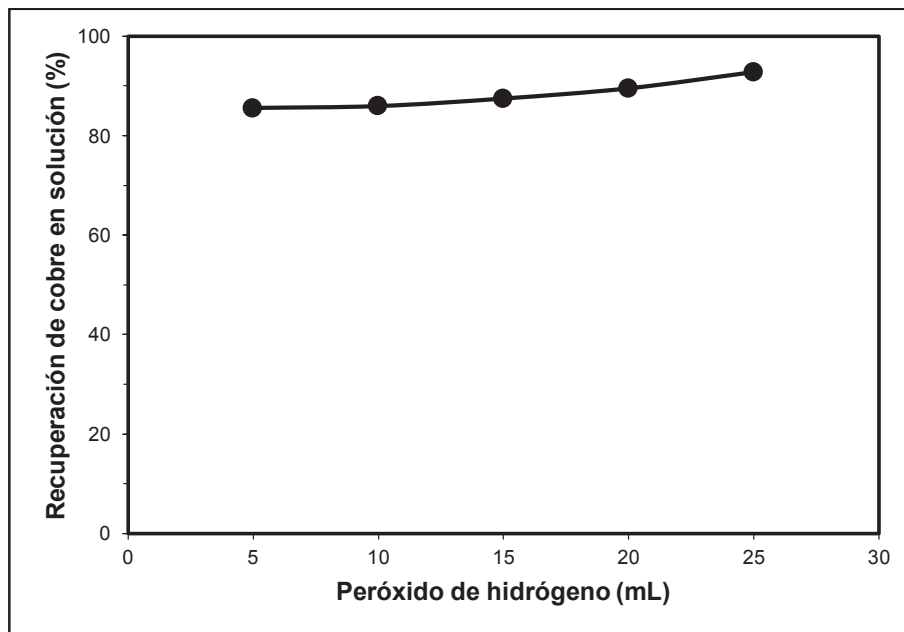


Figura 3.2. Efecto de la adición de peróxido de hidrógeno como agente oxidante sobre la recuperación de cobre en la lixiviación de cobre reciclado (20 °C, HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm)

Si se realiza una comparación del aumento de la recuperación de cobre con el aumento de gasto de agente oxidante, se tiene que la recuperación solamente

incrementa en siete puntos porcentuales con la adición de cinco veces más de peróxido de hidrogeno; por lo tanto, para fines prácticos no es conveniente gastar demasiado reactivo por un incremento que no es muy significativo, lo cual se puede observar en la curva de la Figura 3.2, que presenta una tendencia casi lineal.

Además, solamente con 5 mL de agente oxidante la recuperación obtenida de 85,57 % es superior que al realizar la lixiviación con el oxígeno del aire como agente oxidante a 70 °C (63,94 %).

En esta sección, no se realizó un análisis de la lixiviación a mayores temperaturas debido a que al añadir peróxido de hidrógeno al sistema cobre-ácido clorhídrico se da lugar una reacción fuertemente exotérmica, debido a la descomposición térmica del peróxido de hidrógeno, lo cual resulta ser beneficioso si se realiza en pequeñas cantidades y bajo un control continuo del sistema, pues ese incremento de temperatura momentáneo disminuye la energía de activación y acelera la reacción del proceso (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 398).

Sin embargo, si además de ello se utilizara un sistema de calentamiento externo, el incremento de temperatura podría ser demasiado alto y llegaría a ser perjudicial para la lixiviación, porque el peróxido de hidrógeno se consumiría con mayor rapidez y se necesitaría un control más complejo y estricto dentro del sistema por la volatilización de gases e inestabilidad de temperatura.

3.1.2.3. Comparación del oxígeno del aire y del peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes para la lixiviación de cobre en ácido clorhídrico

En la Figura 3.3 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con el uso del oxígeno del aire y peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes, al realizar la lixiviación con HCl de 230 g/L, 9,1 % de sólidos durante 24 h y agitación magnética de 500 rpm.

Con el fin de contrastar ambos escenarios, se ha tomado la mayor recuperación de cobre en solución con el burbujeo de 4 NL/min de oxígeno que corresponde a la lixiviación a 70°C, la cual se compara con la menor recuperación obtenida con peróxido de hidrógeno que corresponde a la adición de 5 mL de peróxido de hidrógeno.

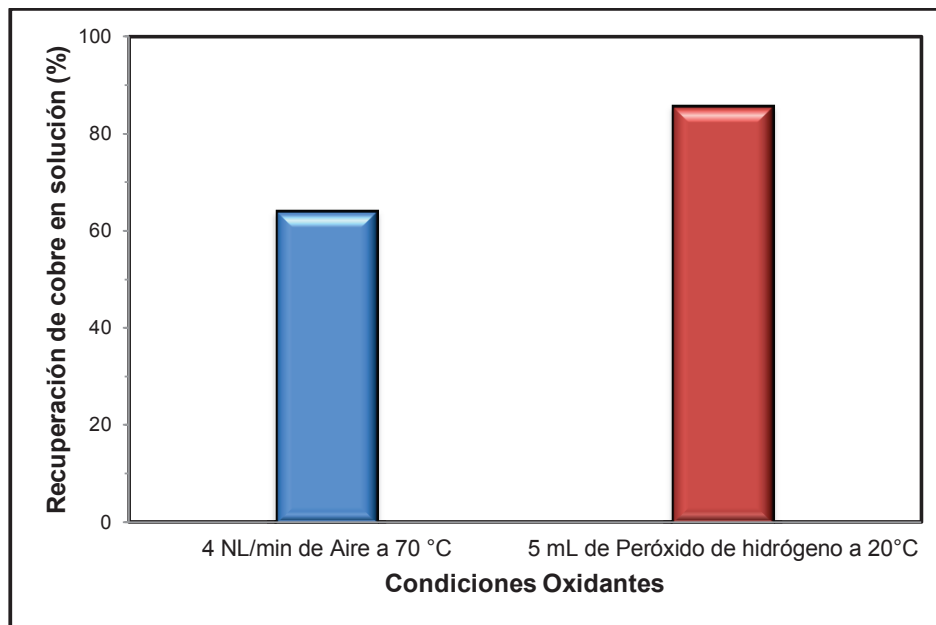


Figura 3.3. Comparación entre la recuperación de cobre en la lixiviación con 4 NL/min de aire como agente oxidante a 70°C y 5 mL de peróxido de hidrógeno como agente oxidante a 20 °C (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm)

En el primer caso se observa una recuperación de 63,94 % con el uso de aire, mientras que al añadirse los 5 mL de peróxido de hidrógeno la recuperación aumenta a 85,57 %, sin la necesidad de aumentar la temperatura. En primer lugar, ese hecho ya representa un factor decisivo debido a que los procesos que trabajan a altas temperaturas implican altos costos energéticos, mayor seguridad operacional y control ambiental. Es por ello que se determina que las mejores condiciones oxidantes se dan con el uso de peróxido de hidrógeno como agente oxidante en el proceso de lixiviación de cobre reciclado para obtener oxiclورو de cobre.

La gran diferencia entre el porcentaje de recuperación del cobre en la solución con el uso de aire respecto al peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes, se

debe a la baja solubilidad que tiene el oxígeno del aire en agua, y por lo tanto en soluciones ácidas diluidas, este fenómeno provoca que el proceso de lixiviación con aire sea mucho más lento incluso a altas temperaturas. Este problema no se presenta con el peróxido de hidrógeno, ya que, al ser un reactivo en estado líquido reacciona rápidamente con la solución acelerando el proceso de lixiviación de manera notoria y significativa (Chaverra, 2014, p. 57; Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

3.1.2.4. Comparación de la recuperación de cobre en solución según la dosificación de peróxido de hidrógeno en la lixiviación

En la Figura 3.4 se presenta una gráfica comparativa de los resultados obtenidos al colocar el volumen entero de peróxido de hidrógeno al inicio del experimento y al colocarlo en pequeñas dosis durante las 5 primeras horas del experimento. Se observa que se obtiene una recuperación mayor en el primer experimento, donde 1 mL de peróxido de hidrógeno es colocado cada hora durante 5 horas.

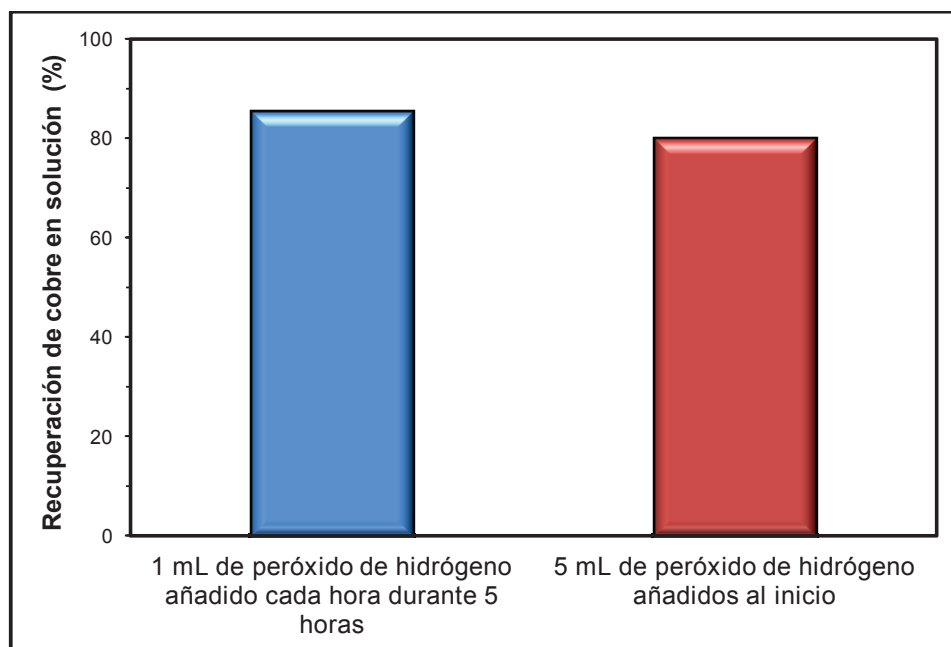


Figura 3.4. Comparación entre la recuperación de cobre en solución obtenida al colocar 1 mL de peróxido de hidrógeno cada hora durante 5 horas y al colocar los 5 mL al inicio del experimento (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 20°C, 24 h, 500 rpm)

Estos resultados difieren de los resultados obtenidos por Chaverra en el 2014, donde obtiene mayor recuperación en menor tiempo cuando se agrega la cantidad total de peróxido de hidrógeno al comienzo. Sin embargo, coincide con los resultados de Landázuri y Muñoz (2013), en un estudio realizado para disolver sulfuros metálicos con ácido sulfúrico como agente lixivante y peróxido de hidrógeno como agente oxidante, donde explican que el peróxido de hidrógeno se consume más rápido mientras mayor es la concentración al inicio del experimento (pp. 44 y 45).

Además la adición de todo el reactivo provoca un aumento de temperatura en una sola ocasión, diferente a lo que se puede extraer de la Figura 3.5 donde cada adición del oxidante constituye un aumento de temperatura por el desprendimiento de calor de la reacción y, por ende, una aceleración de la reacción de disolución de cobre por disminución de la energía de activación.

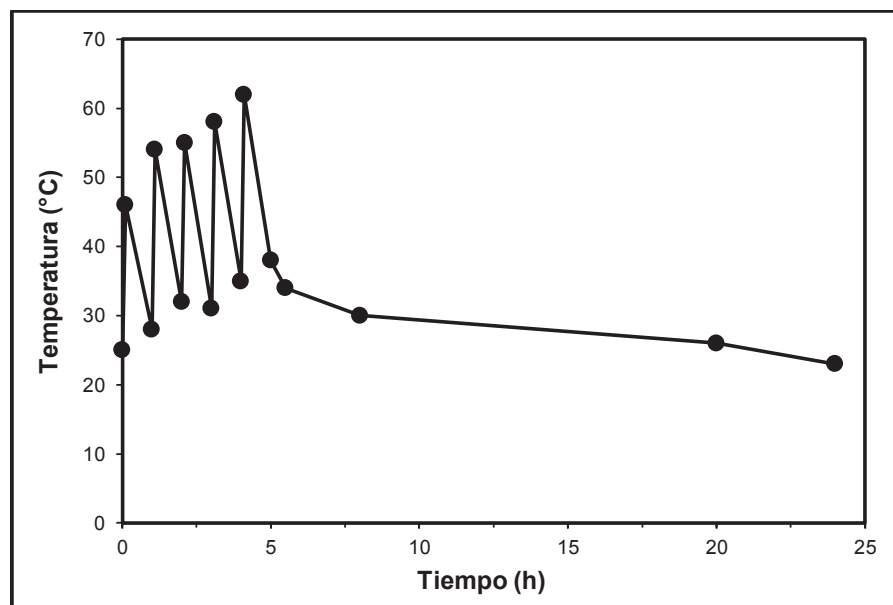


Figura 3.5. Temperatura del sistema de lixiviación con la adición de 1 mL de peróxido de hidrógeno durante las primeras horas del experimento (HCl de 230 g/L, 9,1 % sólidos, 20 °C, 24 h, 500 rpm)

Por lo tanto, no resulta conveniente la adición de todo el volumen de peróxido de hidrógeno al inicio del ensayo pues el peróxido de hidrógeno se consume con mayor rapidez y se aprovecha el aumento de temperatura que se da al contacto de los reactivos una sola vez.

3.1.3. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGENTE LIXIVIANTE (ÁCIDO CLORHÍDRICO)

Una vez determinadas las mejores condiciones oxidantes en el proceso de lixiviación del cobre reciclado (5 mL de peróxido de hidrógeno, 20 °C, 9,1 % de sólidos, 24 h y 500 rpm), se varió la concentración de ácido clorhídrico de 230 g/L a menores concentraciones, 185 y 140 g/L, y se mantuvo el resto de parámetros constantes, con el fin de evaluar la influencia de la concentración del agente lixivante sobre la recuperación de cobre en la lixiviación, lo cual se muestra en la Figura 3.6.

En primera instancia, se puede apreciar que la recuperación del cobre en la solución aumenta ligeramente, de 83,29 % a 85,57 %, con el aumento de la concentración de HCl entre 140 g/L y 230 g/L, respectivamente, sin embargo, estos valores de recuperación no representan una diferencia significativa.

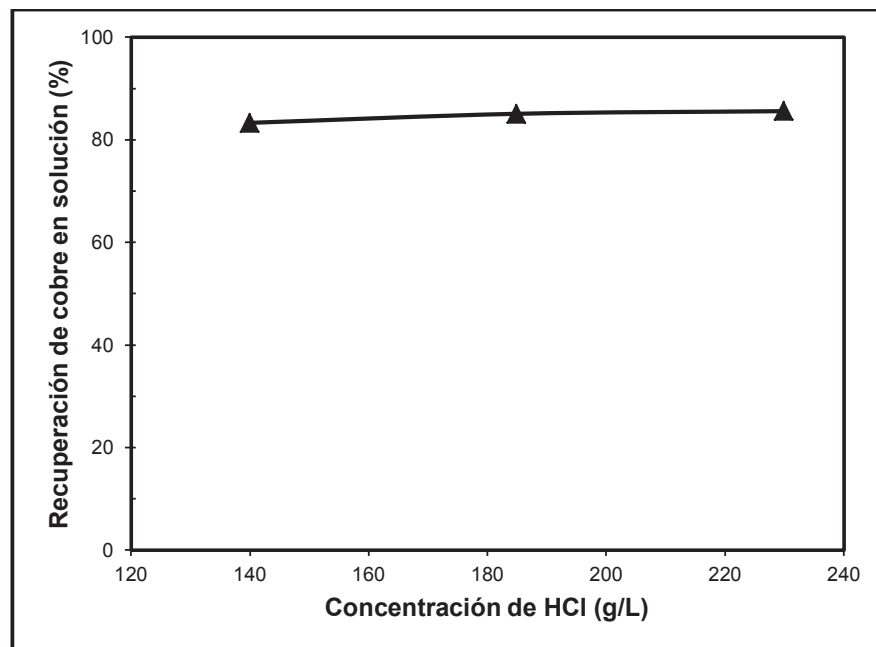


Figura 3.6. Efecto de la concentración de HCl sobre la recuperación de cobre en solución (20 °C, 5 mL de peróxido de hidrógeno, 9,1 % sólidos, 24 h, 500 rpm)

Los resultados obtenidos en la Figura 3.6 van acordes a lo obtenido por Landázuri y Muñoz (2013), donde concluyen que al variar la concentración del agente

lixiviante se obtiene prácticamente la misma recuperación de sulfuros de cobre para las concentraciones evaluadas (0,5 M, 1,0 M y 1,5 M) (pp. 53 y 54).

3.1.4. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN LA LIXIVIACIÓN DE COBRE RECICLADO CON ÁCIDO CLORHÍDRICO

En la Figura 3.7 se muestra la influencia de la cantidad de sólidos en la lixiviación de alambre de cobre reciclado con ácido clorhídrico de 140 g/L a 20 °C con 5 mL de peróxido de hidrógeno durante 24 h y agitación magnética de 500 rpm.

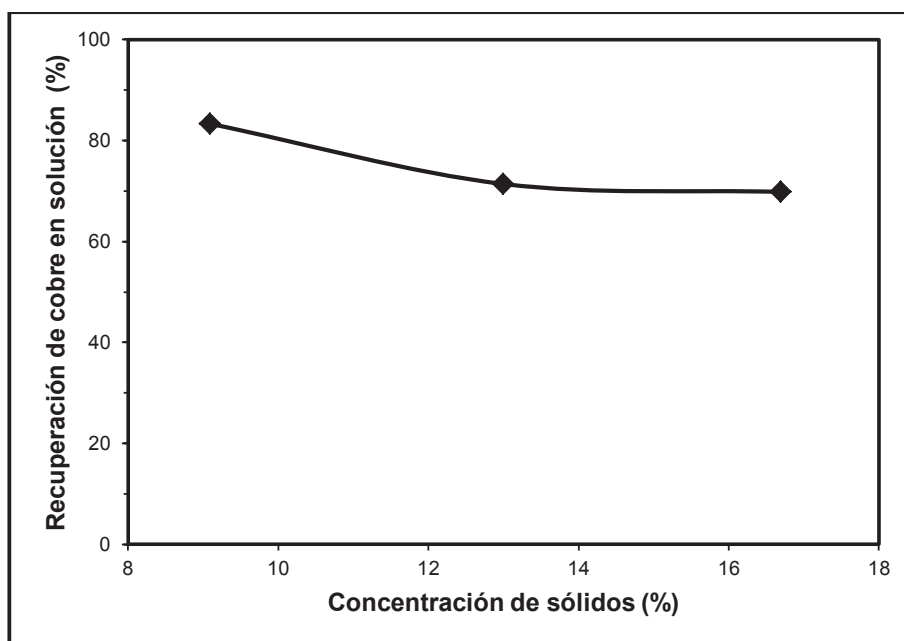


Figura 3.7. Influencia de la cantidad de sólidos en la recuperación de cobre en solución (20 °C, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm)

Se puede apreciar que mientras la cantidad de sólidos aumenta, la recuperación de cobre disminuye. Cuando se trabajó con 9,1 % (10 g de cobre) de sólidos se obtuvo una recuperación de 83,29 %, al 13 % (15 g de cobre) de sólidos, el 71,40 % de recuperación y con 16,7 % de sólidos (20 g de cobre) la recuperación de cobre en solución descendió a 69,82 %. Este comportamiento es el esperado ya que el incremento en la cantidad de sólidos implica menor volumen de reactivos en solución para disolver el cobre y disminuye la eficiencia de la

transferencia de masa disminuyendo la velocidad de reacción en la lixiviación (Yang, Liu y Yang, 2011, p. 396).

Por lo tanto, es recomendable realizar la lixiviación del cobre reciclado solamente con 9,1 % (10 g de cobre) de sólidos para obtener la mejor recuperación del mismo en la solución.

3.1.5. EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE LIXIVIACIÓN DEL COBRE RECICLADO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

En la Figura 3.8 se muestra la influencia del tiempo en la lixiviación del cobre reciclado con ácido clorhídrico de 140 g/L a 20 °C con 9,1 % de sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno durante 24 h y 500 rpm, las cuales se determinaron como las mejores condiciones de lixiviación. Se puede apreciar que a medida que aumenta el tiempo de lixiviación, la recuperación del cobre en solución también aumenta, hasta alcanzar un valor prácticamente constante de 82,53 % a las 8 h.

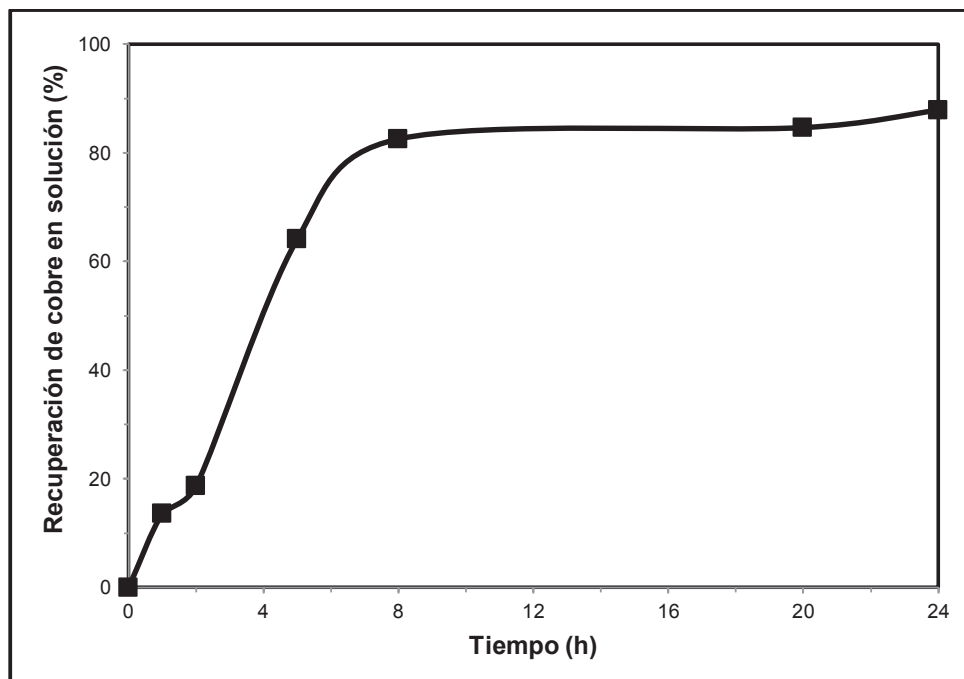


Figura 3.8. Influencia del tiempo en la lixiviación del cobre reciclado (20 °C, 9,1 % sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm)

El comportamiento de la curva de la Figura 3.8 va acorde con el estudio realizado por Yang, Liu y Yang en el 2011, en el cual demuestran que la cantidad de cobre en solución es directamente proporcional al tiempo de lixiviación, hasta alcanzar un valor máximo en el cual dicha cantidad de cobre se mantiene prácticamente constante (p. 397).

Con base en este resultado se puede recalcar que es suficiente realizar la lixiviación del cobre reciclado bajo las condiciones antes mencionadas por un tiempo de 8 h para obtener una recuperación de cobre en solución superior al 80 %.

Aunque estos valores de recuperación son altos, se podría optimizar el proceso utilizando un ácido más concentrado y variando la cantidad de los reactivos, lo cual implicaría mayor costo de operación, sin embargo, también se puede proponer para el diseño del proceso realizar un reciclo del cobre que no se disuelve para aprovecharlo como materia prima y que no quede como desperdicio.

3.1.6. DETERMINACIÓN DEL MEJOR AGENTE NEUTRALIZANTE PARA LA PRECIPITACIÓN DE OXICLORURO DE COBRE

Una vez que se recuperó el cobre en la solución de ácido clorhídrico, se procedió con la segunda etapa del proceso, la neutralización. Como agentes neutralizantes se utilizaron y compararon, hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) para la precipitación de oxiclорuro de cobre a partir de la solución lixiviada con las condiciones establecidas en las secciones anteriores.

El precipitado obtenido fue filtrado, secado y analizado mediante la técnica de difracción de rayos X, con el fin de determinar el contenido de oxiclорuro de cobre e impurezas presentes.

3.1.6.1. Evaluación y comparación de hidróxido de sodio e hidróxido de calcio como agentes neutralizantes para la precipitación de oxiclорuro de cobre

En la Figura 3.9 se muestran los resultados obtenidos de la neutralización con los dos tipos de agentes neutralizantes (hidróxido de sodio e hidróxido de calcio), realizada sobre dos soluciones lixiviadas con las condiciones establecidas como las más favorables para obtener la mayor recuperación de cobre en solución al menor costo posible y que permitieron el mayor ahorro de reactivos y energía (5 mL peróxido de hidrógeno, 20 °C, HCl de 140 g/L, 9,1 % sólidos, 500 rpm durante 8 h).

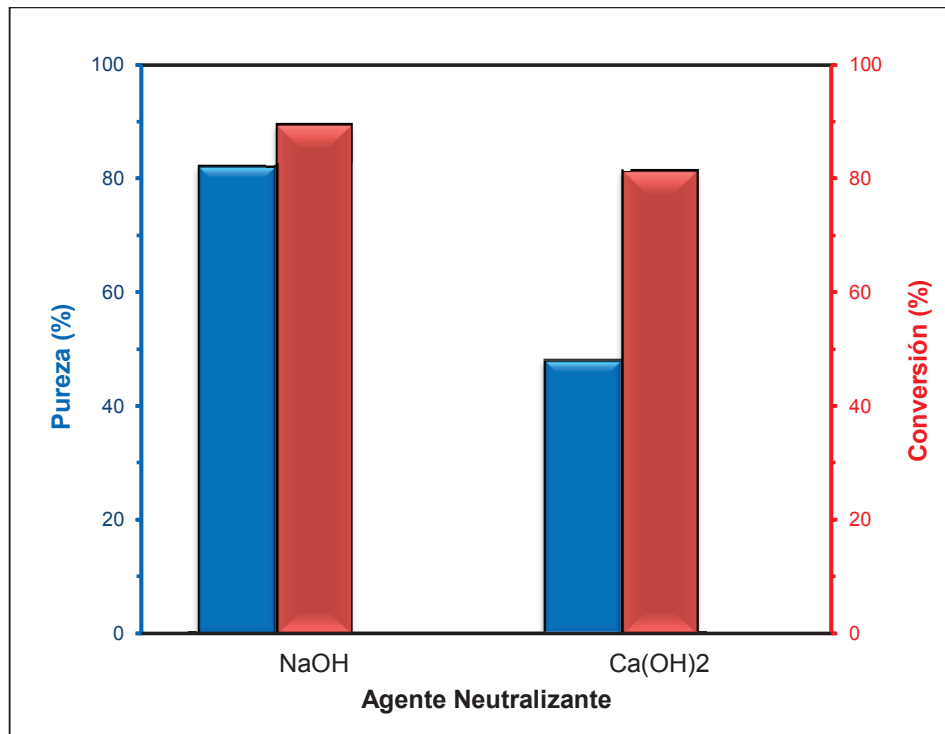


Figura 3.9. Comparación entre los agentes neutralizantes NaOH y Ca(OH)₂ (Lixiviación a 20 °C, 9,1 % sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm, pH de neutralización = 6)

Se advierte que existe una diferencia muy significativa entre la pureza del producto según el agente neutralizante utilizado: se puede notar que al utilizar hidróxido de sodio se alcanzó un 82 % de pureza, un valor alto en relación con el 48 % de pureza alcanzada al realizar la precipitación con hidróxido de calcio.

Además, se observa que el porcentaje de conversión también es mayor con el uso de sosa cáustica (89,40 %) que con el uso de cal (81,25 %); sin embargo, la diferencia es mucho menor que al comparar las purzas. Por lo tanto, los resultados indican que con ambos agentes neutralizantes el cobre en forma de solución de cloruro cúprico es altamente convertido y precipitado como oxiclورو de cobre; no obstante, junto con él precipitan otros compuestos cuya dificultad de ser separados del producto de interés depende de la naturaleza del agente y los compuestos que forma.

En la Figura 3.10 se presenta el difractograma obtenido de los análisis por difracción de rayos X del producto precipitado con hidróxido de sodio.

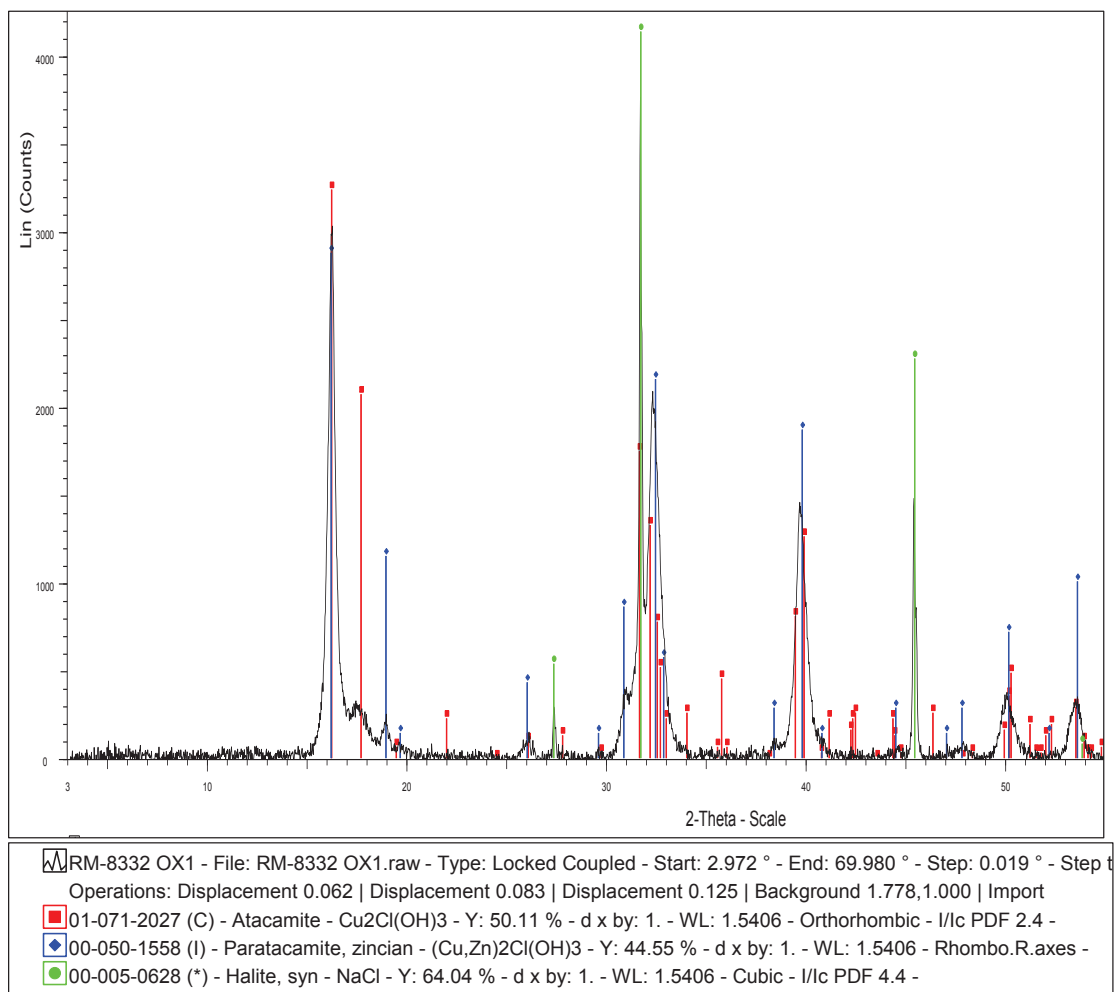


Figura 3.10. Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con NaOH como agente neutralizante, a nivel laboratorio

Se observa que el producto consiste en una mezcla de atacamita, paratacamita y halita. Estos dos primeros constituyen las formas más comunes de oxiclорuro de cobre, mientras que el tercer mineral correspondiente a la sal común constituye la impureza propia del uso de sosa cáustica como neutralizante.

Por otro lado, en la Figura 3.11 se puede observar la formación de otras impurezas en el proceso de precipitación con hidróxido de calcio, principalmente calcita. La solubilidad de las impurezas que se forman en la precipitación será la característica que determine la pureza del producto, pues al ser solubles como la halita, parte de la sal se disuelve en el mismo proceso y se remueve en el filtrado.

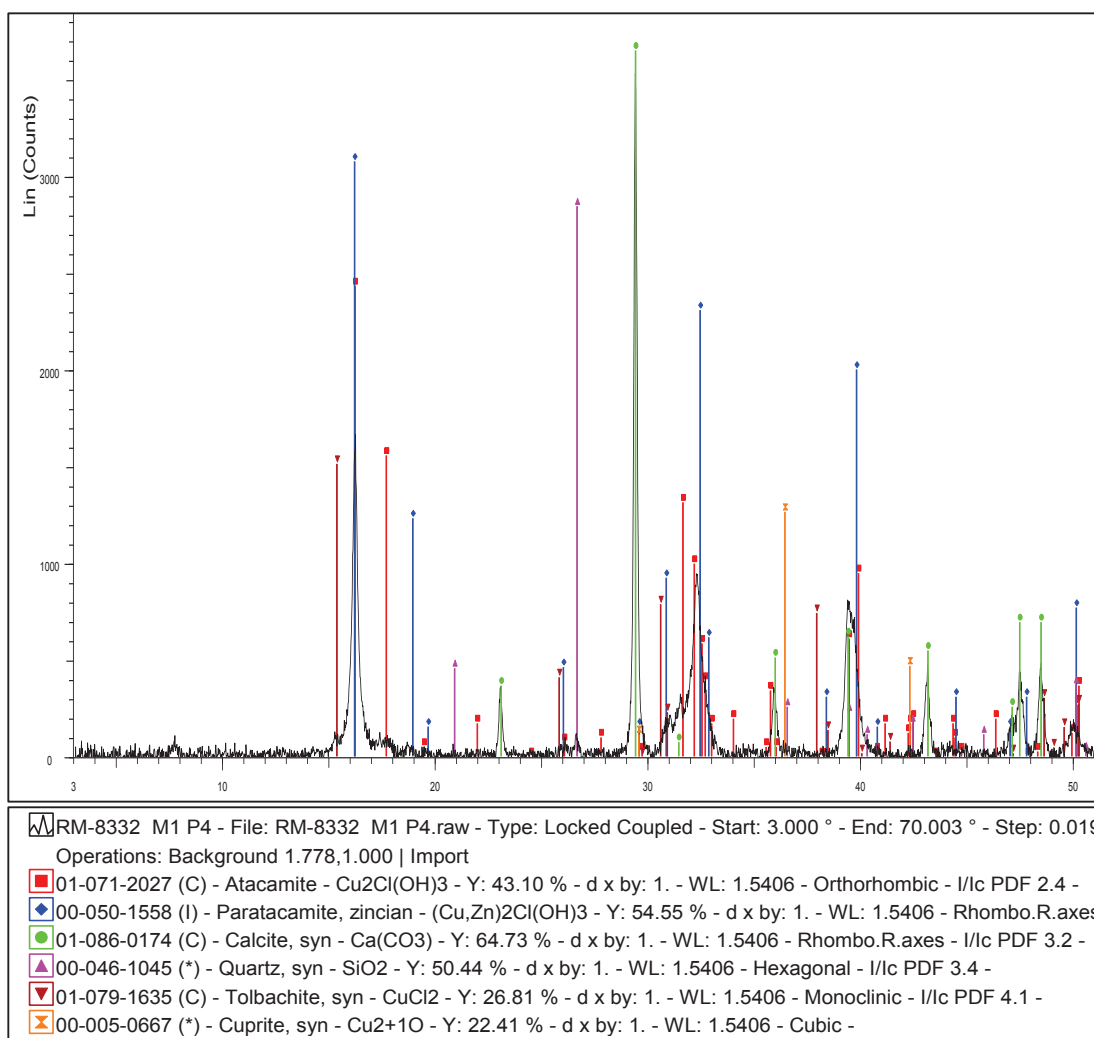


Figura 3.11. Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente neutralizante, a nivel laboratorio

Dado que las impurezas propias de la precipitación con cal son más difíciles de eliminar debido a su baja solubilidad en agua se opta por utilizar hidróxido de sodio pese a su mayor costo, entre otras ventajas como la facilidad de manejo (Digital Analysis Corp, 2016).

3.1.6.2. Caracterización del producto final

En este apartado se presentan los resultados de los análisis realizados al producto final, posterior al proceso de lavado y secado a 110°C por 24 horas. En la Figura 3.12 se observa el difractograma del producto una vez lavado, donde predominan solamente las dos formas comunes de oxicloruro de cobre, cuyos ángulos “ θ ” de formación de los picos se pueden comparar con los de la Figura 3.13 obtenida por Chaverra (2008) con los cuales coinciden exactamente.

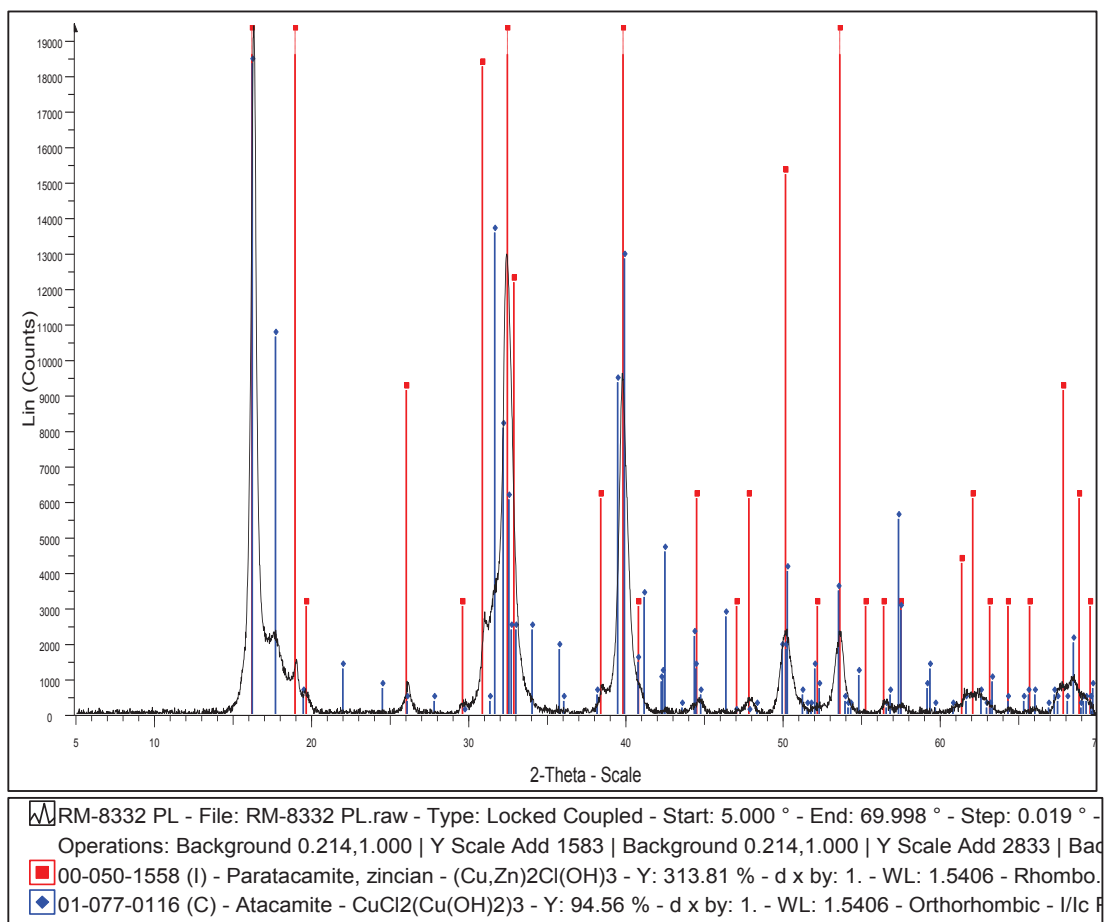


Figura 3.12. Difractograma obtenido por difracción de rayos X del producto precipitado con NaOH como agente neutralizante después del proceso de lavado, a nivel laboratorio.

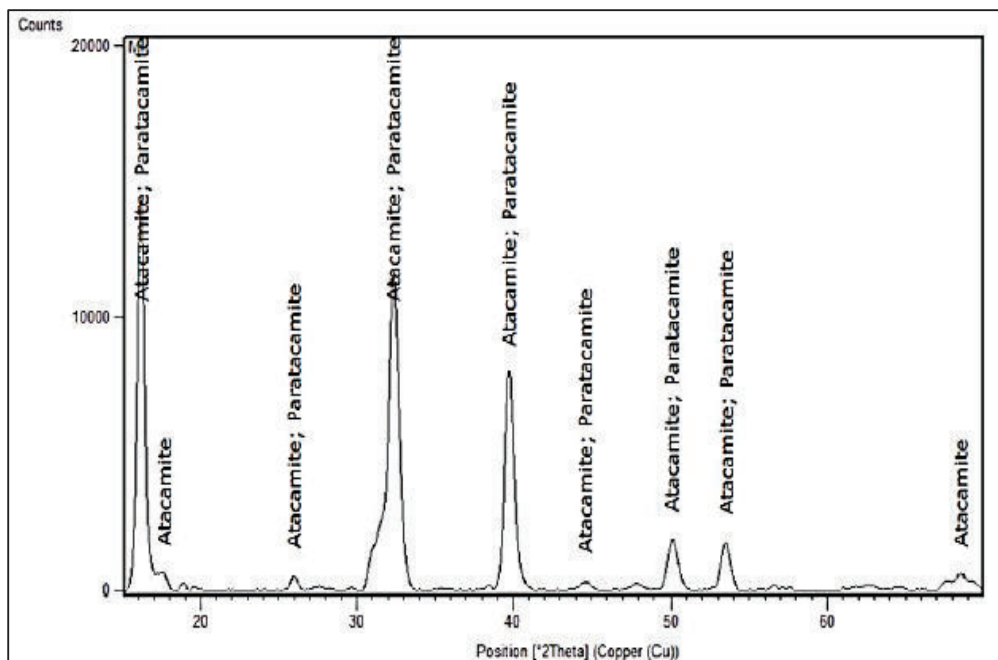


Figura 3.13. Difractograma del producto del proceso de obtención de oxiclورو de cobre a partir de tarjetas de circuitos impresos.
(Chaverra, 2008)

Tanto en la Figura 3.12 como en la Tabla 3.3 se puede observar cómo la totalidad del cloruro de sodio (halita) ha sido eliminado del producto por medio del proceso de lavado, de manera que el producto final consiste en oxiclورو de cobre puro.

A su vez se puede observar que el mineral que predomina es la paratacamita, resultado que coincide con lo estudiado por Pollard., Thomas y Williams (1989) donde expresan que la paratacamita es el mineral más estable termodinámicamente a condiciones ambientales (pp. 557 y 558).

Tabla 3.3. Comparación de los resultados de la precipitación de oxiclورو de cobre con hidróxido de sodio antes y después del lavado.

| Mineral | Fórmula | Contenido en la muestra (%) | |
|--------------|-------------------------------------|---|---|
| | | Precipitado antes del proceso de lavado | Precipitado después del proceso de lavado |
| Atacamita | $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ | 30 | 35 |
| Paratacamita | $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ | 52 | 65 |
| Halita | NaCl | 18 | - |

El producto obtenido de la precipitación con hidróxido de sodio con el color característico del oxiclорuro de cobre se presenta en la Figura 3.14 después del proceso de lavado y secado a 110 °C durante 24 horas.



Figura 3.14. Producto del proceso de obtención de oxiclорuro de cobre a partir de cobre reciclado a escala laboratorio con NaOH como agente neutralizante

3.1.6.3. Evaluación de la influencia de la acidez de la solución lixiviada sobre el gasto de agente neutralizante

Finalmente, se evaluó el efecto de la concentración de la solución lixiviante sobre el gasto de hidróxido de sodio. Para ello se precipitaron las soluciones lixiviadas con ácido clorhídrico de concentraciones 230 y 185 g/L con solución de hidróxido de sodio 2 M y se compararon con la de 140 g/L realizada previamente. De la Figura 3.15 se puede extraer que mientras mayor es la concentración de ácido clorhídrico en la solución lixiviante, mayor es el volumen de solución de sosa cáustica necesario para la neutralización. Este era un resultado esperado ya que según Ayala (2014), el porcentaje de precipitación disminuye cuando el pH de la solución que se va a neutralizar es menor, por lo tanto se necesita mayor cantidad de reactivo que se encargue de elevar el pH hasta el nivel de acidez deseado, en este caso desde 5,5 a 7,5.

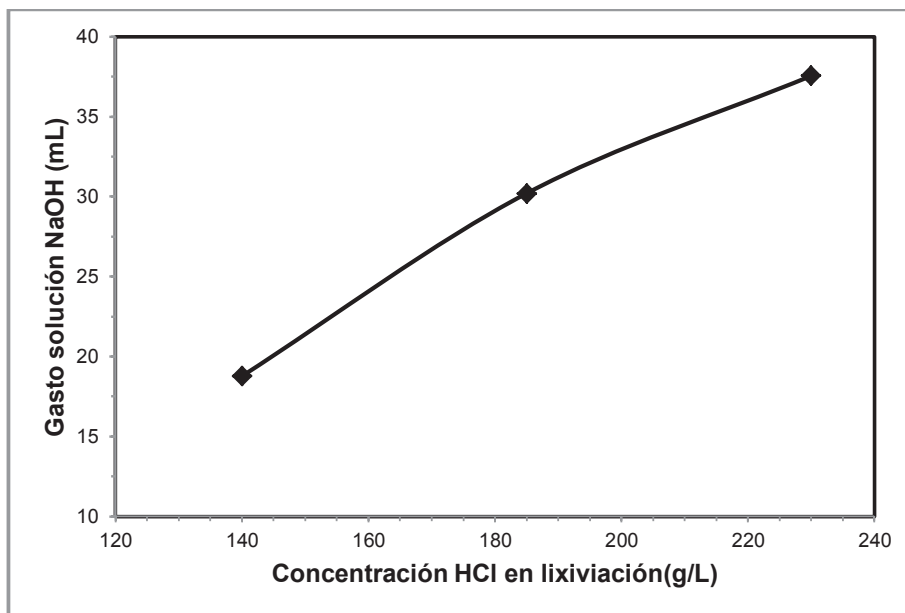


Figura 3.15. Gasto de solución de NaOH según la concentración de HCl a la que se llevó la lixiviación.

3.2. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATORIAS PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO A ESCALA PILOTO

3.2.1. CRITERIO DE SEMEJANZA ENTRE LOS EXPERIMENTOS LABORATORIO Y PILOTO

3.2.1.1. Determinación del flujo de agitación

En la Tabla 3.4 se exponen los resultados del número adimensional de Reynolds calculado tanto para el experimento laboratorio como para el piloto, el cual tiene como objetivo determinar en qué régimen de turbulencia se encuentra el sistema y, en este caso, es necesario que ambos experimentos se encuentren en el mismo régimen para que sean comparables.

Tabla 3.4. Número adimensional de Reynolds calculados para los experimentos laboratorio y piloto

| Nivel del experimento | Laboratorio | Piloto |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Re calculado | 11 777, 78 | 128 696, 47 |

En la Tabla 3.5 se describe el flujo de agitación característico de un sistema según su número adimensional de Reynolds, que es directamente proporcional al diámetro del impulsor, la densidad y la velocidad de agitación, e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido agitado.

Tabla 3.5. Flujo de agitación según el número adimensional de Reynolds

| Re | Flujo de agitación |
|-------------------|---------------------------|
| < 10 | Laminar |
| 300 < Re < 10 000 | Transitorio |
| > 10 000 | Turbulento |

(Castillo, 2013)

Al comparar la Tabla 3.5 con los resultados expresados en la Tabla 3.4 se tiene que tanto el experimento laboratorio como el piloto se encuentran en régimen turbulento, es importante que ambos ensayos se encuentren en el mismo régimen de agitación pues como indican Anaya y Pedroza (2008), trabajar con fluidos cinéticamente similares también resulta en velocidades de transferencia de masa y de calor similares.

La determinación del tipo de régimen del sistema proporciona información para el diseño o rediseño de los procesos, en este caso, la característica del régimen turbulento es que las partículas dentro del sistema se mueven a grandes velocidades en trayectorias indefinidas; ingresar a este tipo de régimen es deseable ya que asegura una mejor agitación y mezclado del fluido, y una vez dentro del régimen turbulento, otros parámetros como el número de potencia o de caudal permanecen constantes.

Consecuentemente, la diferencia entre los números de Reynolds calculados para los experimentos a nivel laboratorio y piloto no influye en otros parámetros de operación del sistema.

3.2.1.2. Escalado Volumétrico

En la Tabla 3.6 se indica que el factor de escalado obtenido entre los ensayos laboratorio y piloto es de 400, este factor proporciona una idea de cuántas veces mayor es el experimento piloto en comparación con los ensayos de laboratorio.

Tabla 3.6. Parámetros calculados para el escalado del proceso de producción de oxiclورو de cobre

| Factor de escalado | Volumen de la solución lixivante (L) | Volumen del tanque de lixiviación piloto (L) | Diámetro del tanque de lixiviación piloto (L) | Altura del tanque de lixiviación piloto (L) |
|---------------------------|---|---|--|--|
| 400 | 40 | 100 | 40 | 80 |

González (2000) indica que los límites entre una escala y otra no están bien definidos, lo importante es cumplir con el objetivo de predecir el funcionamiento a escala industrial mediante experimentos a escalas intermedias entre la industria y el laboratorio (p.5).

3.2.2. EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE LIXIVIACIÓN DEL COBRE RECICLADO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO A ESCALA PILOTO

En la Figura 3.16 se muestra la variación de la recuperación de cobre en solución con el tiempo de operación del tanque de agitado de lixiviación a escala piloto. Al igual que en el ensayo a nivel laboratorio, se observa que la recuperación incrementa con el paso de las horas de lixiviación. Los mayores incrementos se dan las tres primeras horas de lixiviación y al llegar a las 6 horas se tiene de nuevo un incremento grande hasta 82,95 % de recuperación, este valor es muy similar al de 82,53 % alcanzado a las 8 horas a nivel laboratorio lo cual indica que la velocidad de lixiviación no depende del tamaño de la producción y que se guardó una relación de semejanza entre los dos ensayos. La mayor recuperación de cobre en solución se dio a las 24 horas de lixiviación con un valor de 87,35 %, sin embargo, nuevamente se opta por el tiempo de 8 horas ya que corresponde al

uso de la tercera parte del tiempo de operación a cambio de una pequeña disminución en la recuperación.

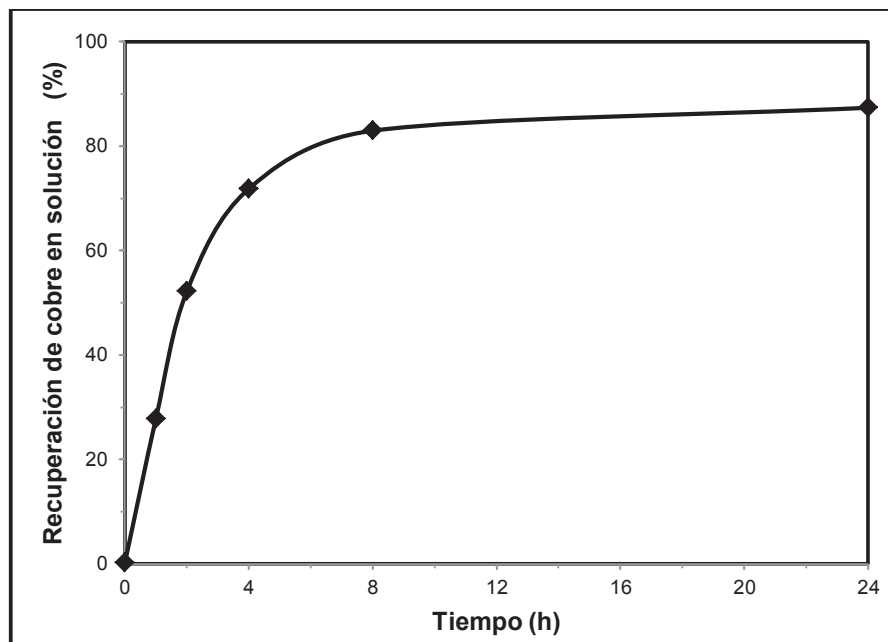


Figura 3.16. Recuperación de Cu en la lixiviación a escala piloto (20 °C, 9,1 % sólidos, 2 000 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h, 500 rpm)

3.2.3. CARACTERIZACIÓN DEL OXICLORURO DE COBRE OBTENIDO A ESCALA PILOTO Y COMPARACIÓN CON EL DE ESCALA LABORATORIO

Los productos obtenidos en el proceso a escala laboratorio y piloto se comparan en la Tabla 3.7 mediante su contenido mineralógico resultante del análisis de difracción por rayos X. Se observa que, mientras el producto a escala laboratorio está formado únicamente de atacamita y paratacamita y no posee impurezas, el producto a escala piloto contiene una impureza de 3 % de óxido de cobre, cuyo origen puede ser debido a que el pH de precipitación en el ensayo fue de 7,0.

Aunque la bibliografía señala que se puede precipitar oxiclورو de cobre hasta un pH de 7,5; según el diagrama de Pourbaix mostrado en la Figura 1.10, este pH está en el límite superior del rango de precipitación del oxiclورو de cobre y el inferior de formación de óxido de cobre, por lo tanto, no es conveniente trabajar

en el límite del rango, sino que es necesario controlar lentamente el proceso y ajustar un pH menor para evitar la formación de óxido de cobre.

Tabla 3.7. Comparación entre los productos obtenidos a escala laboratorio y a escala piloto

| Mineral | Fórmula | Contenido en la muestra (%) | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | | Producto escala laboratorio | Producto escala piloto |
| Atacamita | $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ | 35 | 30 |
| Paratacamita | $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ | 65 | 67 |
| Óxido de cobre | CuO | - | 3 |
| Contenido de cobre (%) | | 59,47 | 57,68 |

Para complementar el análisis, se determinaron los rendimientos parciales (de cada etapa) y el rendimiento total del proceso. Se puede advertir en la Tabla 3.8 que el mayor rendimiento es el de la neutralización con un valor de 90,36 %, lo cual es una ventaja porque es un proceso crítico y con mayor dificultad de manejo que la lixiviación en donde el relave puede ser sometido nuevamente a lixiviación: si se trabaja en una planta simplemente se realiza un reciclo del relave hacia la lixiviación para asegurarse que no existan desperdicios de materia prima.

Además se observa que el rendimiento total del proceso es el menor con un valor de 74,96 %, este rendimiento ha sido calculado con la masa de oxiclورو de cobre que se debía formar teóricamente según la masa total de cobre reciclado que ingresa al inicio del proceso, se esperaba un valor semejante ya que el rendimiento total se ve influenciado por el rendimiento en cada etapa y, a pesar de que no es un valor alto, se puede mejorar el proceso por medio de reciclos como se mencionó anteriormente.

Por último en la caracterización se puede observar que ambos productos tienen un contenido de cobre mayor al mínimo (55 %) para ser considerado de grado técnico, cabe recalcar que este porcentaje es el de interés, sobre todo para su utilización como fungicida (Syngenta, 2011).

Tabla 3.8. Rendimiento calculado para las etapas principales del proceso y para el proceso en total

| Etapas | Lixiviación | Neutralización | Total |
|------------------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| Rendimiento (%) | 82,95 | 90,36 | 74,96 |

3.2.4. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A NIVEL PILOTO

3.2.4.1. Balance de masa del proceso de obtención de oxiclорuro de cobre a escala piloto

En primera instancia se realizó el balance de masa del proceso a escala piloto y se elaboró un diagrama de bloques (BFD) con los flujos másicos calculado. En la Tabla 3.9 se muestra un resumen de los ingresos de materia prima y reactivos a cada proceso a escala piloto, determinados por el balance de masa con base en los resultados de absorción atómica y difracción de rayos X para la caracterización de las corrientes.

Tabla 3.9. Ingreso de materia prima y reactivos a cada proceso llevado a cabo a escala piloto

| Proceso | Material / Reactivo | Masa (kg) |
|---------------------|----------------------------|------------------|
| Reducción de tamaño | Cobre reciclado | 4,00 |
| Lixiviación | Cobre reciclado | 4,00 |
| | Ácido clorhídrico | 5,60 |
| | Peróxido de hidrógeno | 1,00 |
| | Agua | 35,40 |
| Neutralización | Hidróxido de sodio | 8,33 |
| Lavado | Agua | 10,00 |

En la Tabla 3.10 se indica la masa del producto obtenido del proceso completo a escala piloto.

Tabla 3.10. Productos obtenidos del proceso de producción de oxiclорuro de cobre a escala piloto.

| Producto | Fórmula | Pureza | Masa (kg) |
|---------------------|---|--------|-----------|
| Oxicloruro de cobre | $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ | 97 % | 5,20 |

3.2.4.2. Consumo energético del proceso de obtención de oxiclорuro de cobre a escala piloto

Se llevó a cabo el balance de energía con los tiempos de operación de cada equipo utilizado en el ensayo piloto. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.11. Además se calculó el consumo energético mensual si se realizara este ensayo diariamente, como resultado se obtuvieron 18,83 kW-h mensuales para 4 kg de cobre diarios procesados.

Tabla 3.11. Balance de energía y consumo energético del proceso de obtención de oxiclорuro de cobre a escala piloto

| Equipo | Número | Potencia (kW) | Tiempo operación (h) | Consumo energético (kW-h) |
|--|--------|---------------|----------------------|---------------------------|
| Tanque agitado lixiviación | 1 | 1,49 | 8 | 11,93 |
| Tanque agitado neutralización | 1 | 1,49 | 2 | 2,98 |
| Estufa de secado | 1 | 0,08 | 24 | 1,92 |
| Consumo energético mensual (kW-h) | | | | 16,83 |

En la Figura 3.17 se presenta el diagrama de bloques (BFD) del proceso para la obtención de oxiclорuro de cobre a nivel piloto con base en los resultados de los balances de materia. En este esquema es posible observar de mejor manera los flujos y composiciones de las corrientes de entrada y salida de los procesos. Además el cálculo del balance se encuentra detallado en el ANEXO VI.

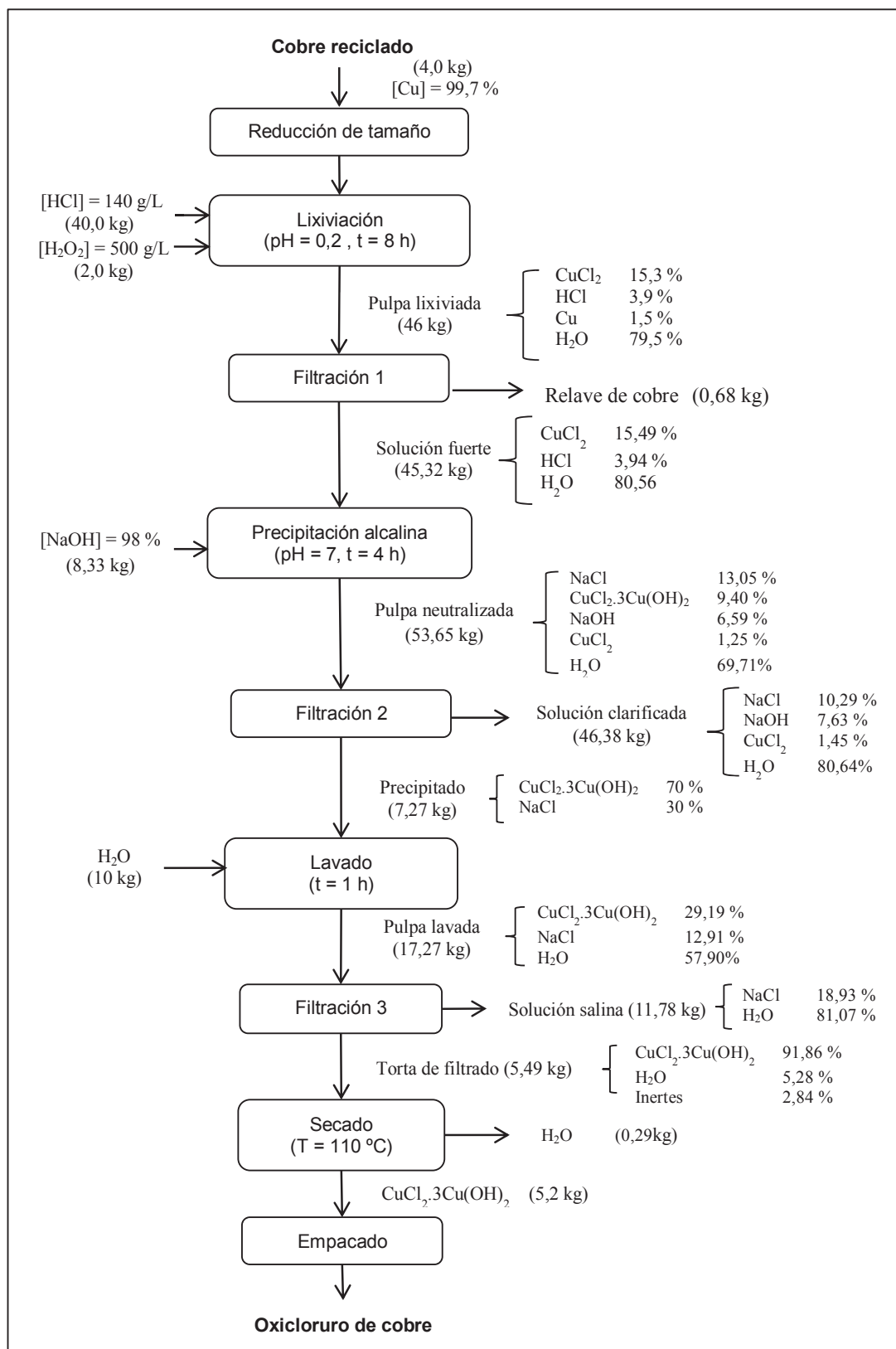


Figura 3.17. Diagrama de bloques (BFD) del proceso de obtención de oxicloruro de cobre a nivel piloto.

3.3. EVALUACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA PARA LA PRODUCCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE COBRE RECICLADO

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la pre-factibilidad técnico-económica para la producción de oxiclорuro de cobre a partir de cobre reciclado.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El cobre reciclado es recibido en una zona de almacenaje, para luego ser llevado a un proceso de reducción de tamaño mediante una trituradora de cuchillas donde es reducido a pequeños fragmentos menores a 8 mm. Dichos fragmentos son llevados al tanque de agitación donde se lixivian en ácido clorhídrico 140 g/L y peróxido de hidrógeno 500 g/L. Este proceso se realiza durante 8 horas y luego se separa la solución cargada de cobre con el relave mediante un filtro prensa. El relave es recirculado a la lixiviación, mientras que la solución pasa a un proceso de neutralización.

En la neutralización se utiliza hidróxido de sodio de 98 % que se añade directamente a la solución lixiviada con agitación constante, durante 2 horas. Se obtiene un precipitado que posteriormente es separado de la solución mediante filtración. El precipitado cargado de oxiclорuro de cobre es lavado con abundante agua durante 1 hora para eliminar impurezas insolubles formadas en la neutralización y nuevamente es filtrado para obtener un producto de mayor pureza. El producto es secado a 110°C durante 8 horas para eliminar la humedad presente y obtener un polvo verde correspondiente a oxiclорuro de cobre de 97 % de pureza.

Además de las condiciones de trabajo previamente estudiadas, todos los valores de flujos de las corrientes de entrada y de salida de los procesos que intervienen en la síntesis de oxiclорuro de cobre se ven determinados directamente por la capacidad de producción de la planta. Es por ello que se ha realizado una

evaluación para dos diferentes capacidades de producción a gran escala basadas en los datos investigados del mercado de oxiclورو de cobre en el Ecuador. Algunos de los datos estadísticos necesarios para la determinación de la capacidad de la planta han sido previamente introducidos como parte de la Revisión Bibliográfica de este trabajo.

3.3.1.1. Estudio de mercado

En la Tabla 3.12 se muestran las importaciones y exportaciones de chatarra de cobre y fungicidas con contenido de cobre que se han realizado en el Ecuador entre el 2015 y Enero del 2017, la cual recopila datos importantes que se utilizarán para realizar un estudio adecuado del mercado para la producción de oxiclورو de cobre, en cuanto a disponibilidad de materia prima y la facilidad para vender el producto en cuestión.

Las inmensas cantidades de desechos de cobre exportadas en los últimos años (15 664,38 t en total), frente a una mínima cantidad que se ha importado (32,45 t), indican que la disponibilidad de materia prima para este proceso no es un limitante en el Ecuador, al contrario, utilizar dichos desechos en la industria nacional representaría una gran mejora del sistema productivo del país (Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1).

Tabla 3.12. Importaciones y exportaciones de chatarra de cobre y fungicidas con contenido de cobre en los últimos dos años

| Producto | Importaciones (t) | | | Exportaciones (t) | | |
|-----------------------------------|-------------------|--------|------------|-------------------|----------|------------|
| | 2015 | 2016 | Enero 2017 | 2015 | 2016 | Enero 2017 |
| Chatarra de cobre | 20,90 | 11,55 | - | 7 967,00 | 6 692,38 | 1 005,00 |
| Fungicidas con contenido de cobre | 255,40 | 100,40 | - | - | - | - |

(Banco Central del Ecuador, 2017a, p. 1)

Por otro lado, a pesar de que la cantidad de importaciones de fungicidas con contenido de cobre han reducido en comparación con el 2015, se puede observar que aún se requieren alrededor de 100,40 toneladas métricas anuales de estos productos agrícolas. Al transformar estos valores a una demanda mensual, se tiene que se requieren aproximadamente 8 toneladas métricas mensuales de fungicidas de cobre.

Se toma en cuenta que el oxiclورو de cobre no es el único fungicida a base de cobre utilizado, pero como se ha mencionado, posee grandes ventajas en comparación con otros como el sulfato de cobre por las cuales puede ser introducido al mercado y ocupar, para empezar, aproximadamente el 10 % de la demanda actual; por tanto, se puede apuntar a una producción de 1 tonelada mensual de este producto.

Es así que se procedió a evaluar la pre-factibilidad técnico-económica para una planta que produzca 1 t/mes de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado, con miras a triplicar su capacidad de producción, es por ello que se comparó con la pre-factibilidad técnico y económica para una planta que produzca 3 t/mes de oxiclورو de cobre.

3.3.1.2. Diagrama de bloques

En la Figura 3.18 se muestra el diagrama de bloques (BFD) general donde se describe el proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado de las plantas, tanto de 1 como de 3 t/mes de capacidad.

A diferencia del proceso utilizado a escala piloto que se detalló en el diagrama de bloques de la Figura 3.17, se puede observar que a escala industrial se realiza un reciclo del relave de cobre hacia el proceso de lixiviación para evitar un desperdicio de la materia prima. También se calcularon los flujos para el circuito de trituración a escala industrial.

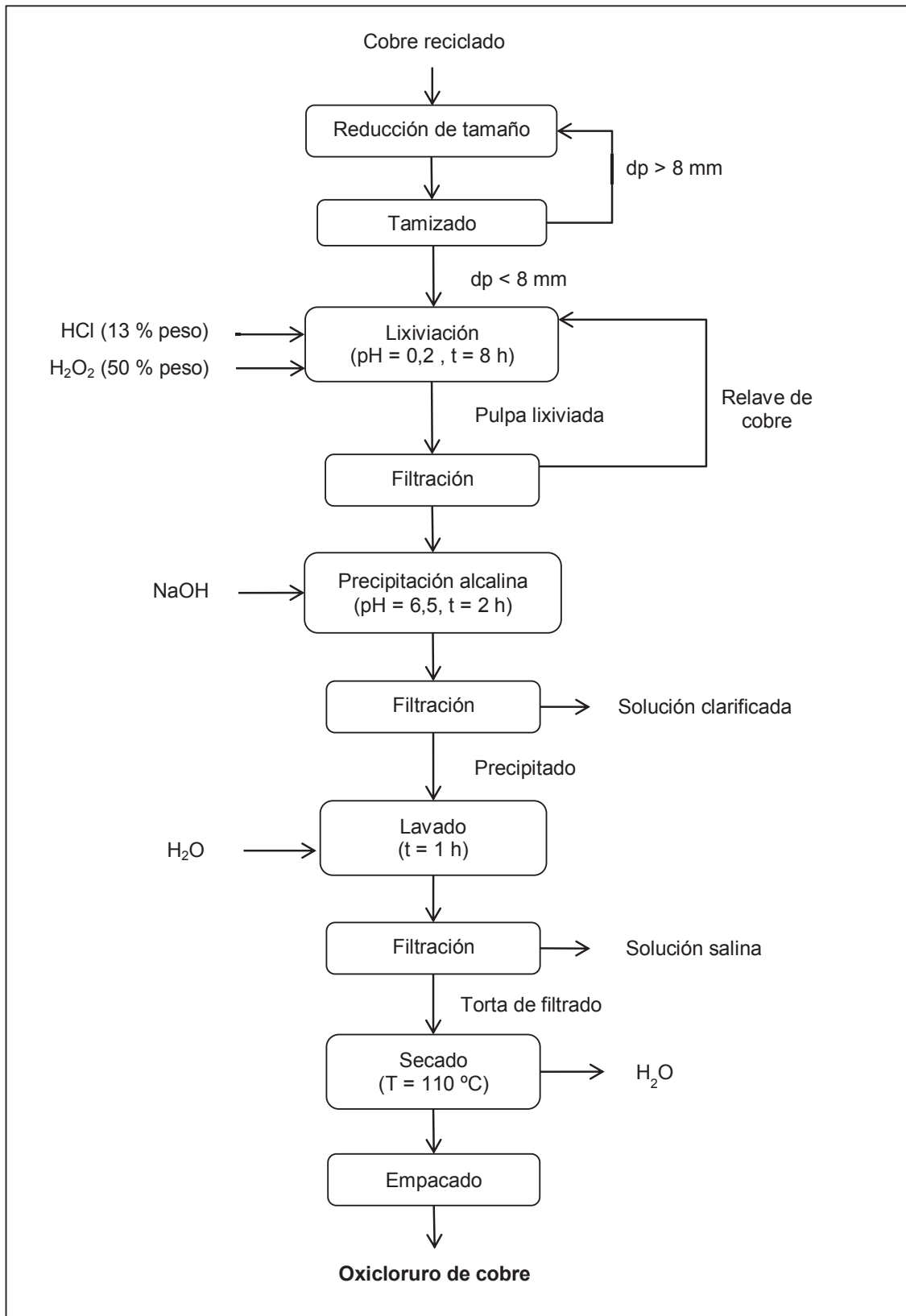


Figura 3.18. Diagrama de bloques (BFD) del proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado a escala industrial

3.3.1.3. Condiciones de operación

En esta sección se detallan las condiciones en que se realizan los procesos de reducción de tamaño, lixiviación, filtración, neutralización y secado para la síntesis de oxiclورو de cobre a escala industrial con base en los resultados a escala piloto.

El cobre reciclado recibido ingresa a un proceso de reducción de tamaño mediante una trituradora de cuchillas donde es reducido a pequeños fragmentos de tamaño inferior a 8 mm y sometido a un circuito directo con un tamiz vibratorio para asegurar que los trozos de cobre de mayor tamaño no ingresen al siguiente proceso. En la Tabla 3.13 se exponen las condiciones de operación en este proceso.

Tabla 3.13. Condiciones de operación en la reducción de tamaño del cobre reciclado

| | |
|--------------------------------|-----|
| Carga circulante (%) | 250 |
| Tamaño de descarga (mm) | < 8 |

Después, el cobre reducido es llevado a un tanque de lixiviación. En la Tabla 3.14 se detallan las condiciones bajo las cuales se realizó el proceso de lixiviación.

Tabla 3.14. Condiciones de operación en el proceso de lixiviación

| | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Agente lixivante | HCl |
| Concentración (g/L) | 140 |
| Agente oxidante | H ₂ O ₂ |
| Concentración (g/L) | 500 |
| Porcentaje de sólidos (%) | 9,1 |
| Tiempo de lixiviación (h) | 8 |
| Temperatura (°C) | 20 |
| pH | 0,2 |
| Eh (mV) | 430 |

La solución cargada de cobre proveniente de la lixiviación pasa a un proceso de neutralización, mientras que el relave es recirculado a la lixiviación. Las condiciones de operación para la operación de neutralización se pueden observar en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Condiciones de operación en la neutralización

| | |
|--------------------------|--------|
| Precipitante | NaOH |
| Estado agregación | Sólido |
| Tiempo (h) | 2 |
| Temperatura (°C) | 20 |
| pH | 6,5 |
| Eh (mV) | 195 |

El precipitado cargado de oxicluro de cobre es lavado para eliminar impurezas insolubles formadas en la neutralización. El lavado se llevó a cabo a las condiciones indicadas en la Tabla 3.16

Tabla 3.16. Condiciones de operación en el lavado

| | |
|-------------------------|------------------|
| Agente | H ₂ O |
| Tiempo (h) | 1 |
| Temperatura (°C) | 20 |

Finalmente, el producto es secado a las condiciones que se muestran en la Tabla 3.17 para eliminar el exceso de humedad y así obtener polvo de oxicluro de cobre de 97 % de pureza.

Tabla 3.17. Condiciones de operación en el secado

| | |
|-------------------------|-----|
| Temperatura (°C) | 110 |
| Tiempo (h) | 8 |

3.3.2. EVALUACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO - ECONÓMICA PARA UNA PLANTA DE 1 T/MES DE OXICLORURO DE COBRE DE CAPACIDAD

3.3.2.1. Balance de masa

Con base en la cantidad de producto obtenida y el gasto de reactivos a escala piloto, se realizó el balance de masa para una planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad. En la Tabla 3.18 se muestran los flujos de reactivos y materia prima que ingresan a cada proceso en la planta y en la Tabla 3.19 el producto obtenido.

Tabla 3.18. Flujo de reactivos y materia prima al ingreso de cada proceso para una planta de 1 t/mes de capacidad

| Proceso | Material / Reactivo | Flujo (kg/día) |
|---------------------|-----------------------|----------------|
| Reducción de tamaño | Cobre reciclado | 21,94 |
| Lixiviación | Cobre reciclado | 21,94 |
| | Ácido clorhídrico | 37,02 |
| | Peróxido de hidrógeno | 6,61 |
| | Agua | 234,00 |
| Neutralización | Hidróxido de sodio | 55,07 |
| Lavado | Agua | 66,11 |

Tabla 3.19. Productos obtenidos de la planta de 1 t/mes de capacidad

| Producto | Fórmula | Pureza | Flujo (kg/día) |
|---------------------|---|--------|----------------|
| Oxicloruro de cobre | $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ | 97 % | 33,33 |

3.3.2.2. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo del proceso, con los flujos másicos calculados para la producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre, se exhibe en la Figura 3.19.

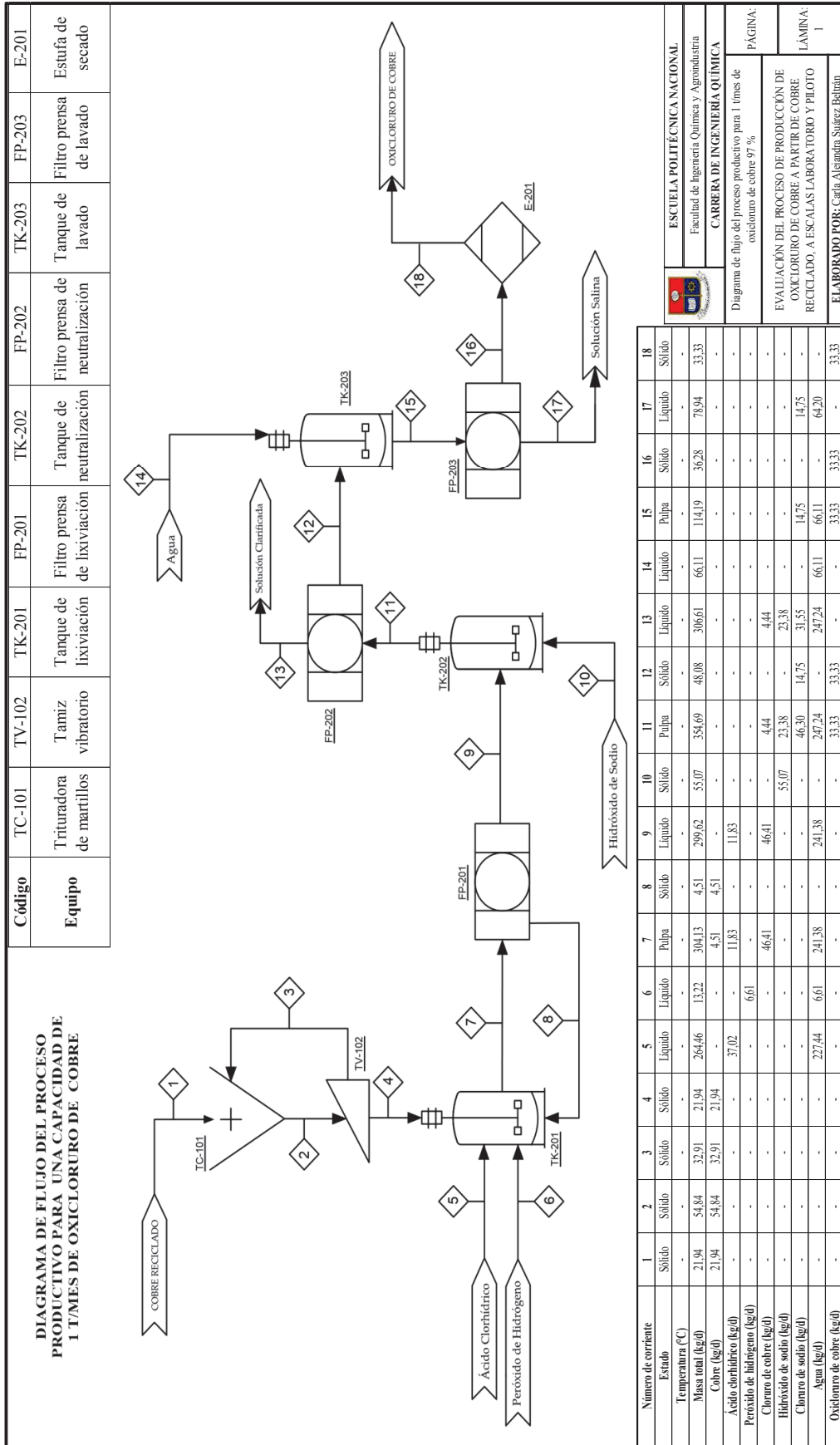


Figura 3.19. Diagrama de Flujo (PFD) para el proceso de producción de oxiclouro de cobre a partir de cobre reciclado para 1 t/mes de oxiclouro de cobre de capacidad.

3.3.2.3. Dimensionamiento de los equipos

Con base en el balance de masa y los flujos másicos calculados se dimensionaron los equipos requeridos para el funcionamiento de la planta de producción de oxiclورو de cobre de 1 t/mes de capacidad. Las especificaciones de cada proceso se detallan a continuación. Además, en el ANEXO VII se muestran los cálculos realizados para el dimensionamiento de los equipos.

- Especificaciones para la reducción de tamaño

El cobre reciclado recibido en la planta ingresa en su mayoría en forma de cable eléctrico y alambres reciclados, por lo que es necesaria una disminución del tamaño, la cual se realiza mediante un circuito de trituración directa con una trituradora de cuchillas y un tamiz vibratorio. El cobre sale de la trituradora y pasa al tamiz vibratorio, en donde los fragmentos menores a 8 mm de tamaño pasan al siguiente proceso y los mayores son recirculados a la trituradora. Las características del equipo de trituración se presentan en la Tabla 3.20 y en la Tabla 3.21 se muestran las características del tamiz.

Tabla 3.20. Características de la trituradora de cable de cobre para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TC-101)

| Parámetro | Valor |
|----------------------|---|
| Material | Acero soldado |
| Altura (m) | 2,20 |
| Longitud (m) | 0,85 |
| Ancho (m) | 0,65 |
| Capacidad (kg/h) | 150 |
| Tecnología | Cuchillas de corte con sistema de tamizado y bandas transportadoras |
| Número de cuchillas | 4 fijas y 6 móviles |
| Tamaño de corte (mm) | 8 |
| Potencia (kW) | 30,00 |

Tabla 3.21. Características del tamiz vibratorio para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TV-102)

| Parámetro | Valor |
|----------------------|---|
| Material | Acero soldado |
| Altura (m) | 2,20 |
| Longitud (m) | 0,60 |
| Ancho (m) | 0,55 |
| Capacidad (kg/h) | 150 |
| Tecnología | Tamiz vibratorio parte de la trituradora de cobre |
| Tamaño de corte (mm) | 8 |

- **Especificaciones para la lixiviación**

En la Tabla 3.22 se muestran las especificaciones técnicas para la lixiviación.

Tabla 3.22. Características del tanque agitado de lixiviación para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TK-201)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero AISI 316 |
| Diámetro (m) | 0,69 |
| Altura (m) | 1,04 |
| Volumen (m ³) | 0,42 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 1,40 |
| Presión de diseño (psi) | 1,04 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,14 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Diámetro impulsor (m) | 0,35 |
| Altura impulsor (m) | 0,35 |
| RPM | 85 |
| Potencia (kW) | 7,00 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

Para este proceso se utiliza un tanque de agitación en el que se pone en contacto la solución lixivante y oxidante con la materia prima, y se permite la disolución del cobre metálico hasta formar cloruro cúprico. El material escogido para el tanque y el agitador es Acero AISI 316 debido a las propiedades altamente corrosivas de los reactivos utilizados.

- **Especificaciones para la neutralización**

En la Tabla 3.23 se presentan las especificaciones para el equipo de neutralización que consiste en un tanque agitado en donde se pone en contacto la solución lixiviada correspondiente a cloruro cúprico con el hidróxido de sodio

Tabla 3.23. Características del tanque agitado de neutralización para la planta de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre de capacidad (TK-202)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero AISI 316 |
| Díámetro (m) | 0,73 |
| Altura (m) | 1,09 |
| Volumen (m ³) | 0,49 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 25 381,60 |
| Presión de diseño (psi) | 1,69 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,15 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Díámetro impulsor (m) | 0,36 |
| Altura impulsor (m) | 0,36 |
| RPM | 80 |
| Potencia (kW) | 7,50 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

Se neutraliza hasta ajustar un pH aproximadamente de 6,5 con el que se obtuvieron mejores resultados experimentales de precipitación de oxiclورو de cobre. La neutralización se realiza durante 2 horas.

- **Especificaciones para el lavado**

En la Tabla 3.24 se exponen las especificaciones técnicas para el tanque de lavado en donde se mezcla el precipitado con agua para eliminar las impurezas solubles. El lavado se realiza durante 1 hora con agitación constante y, debido a que la pulpa ha sido previamente neutralizada, no es necesario el uso de materiales anticorrosivos.

Tabla 3.24. Características del tanque agitado de lavado para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (TK-203)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero al carbono |
| Diámetro (m) | 0,46 |
| Altura (m) | 0,69 |
| Volumen (m ³) | 0,12 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 19 580,10 |
| Presión de diseño (psi) | 1,36 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,09 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Diámetro impulsor (m) | 0,23 |
| Altura impulsor (m) | 0,23 |
| RPM | 129 |
| Potencia (kW) | 4,00 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

- Especificaciones para la filtración

Con el fin de separar las fases sólidas de las líquidas en la planta, se utilizan filtros prensa cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.25. Después del proceso de lixiviación se utiliza el filtro FP-201 para separar la solución lixiviada del relave de cobre que no fue lixiviado y debe recircularse. El filtro FP-202 se utiliza para separar el precipitado de la solución clarificada después de neutralización y el filtro FP-203 separa el agua de lavado del producto final previo el proceso de secado.

Tabla 3.25. Características de los filtros prensa para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (FP-201, FP-202 y FP-203)

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------------|------------------|
| Material | Polímero Durapol |
| Altura (m) | 0,65 |
| Longitud (m) | 0,65 |
| Ancho (m) | 0,30 |
| Capacidad (m ³ /h) | 0,1 - 0,4 |
| Área de filtración (m ²) | 0,9 |
| Presión (psi) | 20,00 |
| Potencia (kW) | 1,1 |

- Especificaciones para el secado

Para la obtención del producto final de oxiclورو de cobre, se somete la pulpa lavada a un proceso de secado para eliminar el exceso de humedad después del lavado. El secado se realiza acorde al contenido de humedad calculado en el balance de masa, por lo tanto se ha visto que es suficiente someter la torta de filtrado a 110 °C durante 8 horas dentro de una estufa cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Características de la estufa de secado para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad (E-201)

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|------------------|
| Material | Acero inoxidable |
| Altura (m) | 0,60 |
| Longitud (m) | 0,57 |
| Ancho (m) | 0,55 |
| Capacidad (kg) | 50 |
| Temperatura de operación (°C) | 0 - 300 |
| Potencia (kW) | 0,08 |

3.3.2.4. Balance de energía

Con los tiempos de operación de cada equipo, fue posible realizar el balance de energía para la planta de 1 t/mes de capacidad, herramienta necesaria para establecer costos de operación por el consumo energético. Los datos se muestran en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Balance de energía para la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad

| Equipo | Número | Potencia (kW) | Tiempo operación (h/mes) | Consumo energético (kW-h/mes) |
|--|--------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| Trituradora de cobre (incluye banda transportadora y tamiz vibratorio) | 1 | 30,00 | 4,4 | 132,00 |
| Tanque agitado de lixiviación | 1 | 7,00 | 240,0 | 1.680,00 |
| Tanque agitado de neutralización | 1 | 7,50 | 60,0 | 450,00 |
| Tanque agitado de lavado | 1 | 4,00 | 30,0 | 120,00 |
| Filtro prensa | 3 | 1,10 | 45,0 | 148,50 |
| Estufa de secado | 1 | 0,08 | 240,0 | 19,20 |
| Consumo energético mensual (kW-h) | | | | 2 549,70 |

Se puede observar que el equipo que demanda un mayor consumo energético mensual es el tanque de lixiviación debido a que es el que opera la mayor cantidad de tiempo junto con la estufa, por lo tanto se puede extraer que la agitación necesita más energía que la necesaria para calentar la estufa. Por otro lado, se observa que la trituradora solamente trabaja 4,4 horas mensuales, esto se debe a que la capacidad es mayor que la capacidad de producción de la planta.

3.3.2.5. Diagrama de distribución en la planta (lay-out)

Con base en el dimensionamiento de los equipos, se presenta el diagrama de distribución en la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre en la Figura 3.20. Se observa la ubicación de los equipos señalados mediante códigos que se indican en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Codificación de los equipos en la planta de 1 t/mes de capacidad

| Código | Equipo |
|---------------|---------------------------------|
| TC-101 | Trituradora de martillos |
| TV-102 | Tamiz vibratorio |
| TK-201 | Tanque de lixiviación |
| FP-201 | Filtro prensa de lixiviación |
| TK-202 | Tanque de neutralización |
| FP-202 | Filtro prensa de neutralización |
| TK-203 | Tanque de lavado |
| FP-203 | Filtro prensa de lavado |
| E-201 | Estufa de secado |

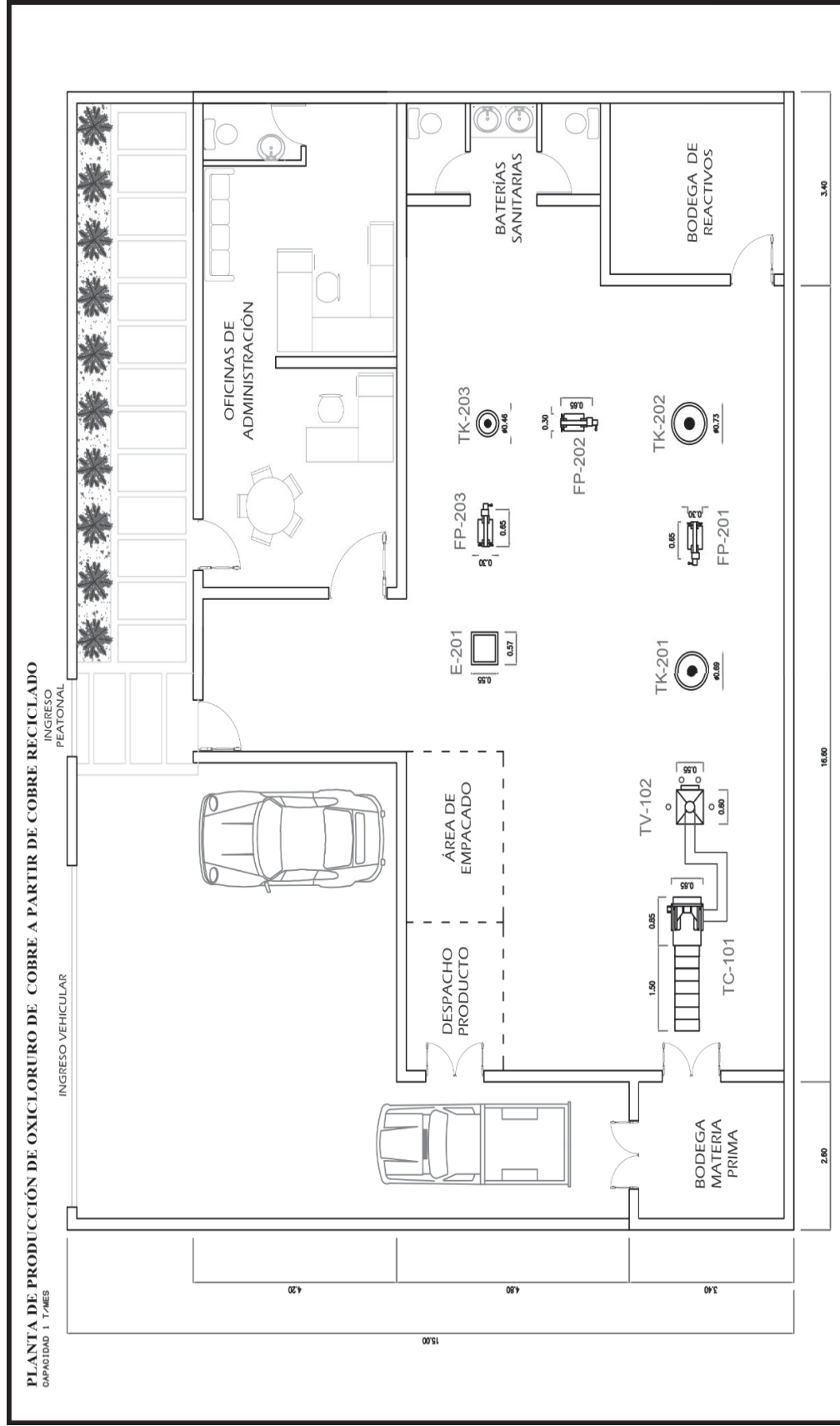


Figura 3.20. Diagrama de distribución en planta (lay - out) para la producción de oxiclорuro de cobre de cobre a partir de cobre reciclado para 1 t/mes de oxiclорuro de cobre de capacidad.

3.3.2.6. Estudio de pre-factibilidad económica

En este apartado se evaluó la pre-factibilidad económica de la planta de 1 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad; para ello se empleó un análisis de flujo de fondos para un tiempo de vida de 10 años. Posteriormente se determinan y comparan los indicadores financieros para las dos capacidades de la planta: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio costo.

En la Tabla 3.29 se muestran los parámetros económicos con la que se manejará la planta de oxiclورو de cobre de 1 t/mes de capacidad. Los indicadores económicos mostrados son los vigentes en el mes de marzo de 2017 según el Banco Central del Ecuador (2017b); la tasa de oportunidad es la sumatoria de la tasa pasiva anual (4,89 %), la tasa de inflación (0,96 %) y una prima de riesgo del 10 % considerada. También se ha considerado una inversión propia para el proyecto del 30 %.

Tabla 3.29. Parámetros del proyecto para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclورو de cobre

| Parámetro | Unidad | Valor |
|--------------------------------------|--------|-----------|
| Inversión propia | % | 30 |
| Inversión propia | (USD) | 31 185,43 |
| Aporte Patronal al IEES | % | 11,15 |
| Impuesto a la renta sobre utilidades | % | 30,00 |
| Tasa de oportunidad | % | 15,85 |
| Tasa préstamo bancario | % | 8,14 |
| Tiempo de amortización | Años | 10 |
| Mantenimiento de equipos | % | 2,00 |
| Mantenimiento de instalaciones | % | 3,00 |
| Reparación de maquinaria | % | 2,00 |
| Amortización de instalaciones | Años | 5 |
| Depreciación | Años | 10 |

(Banco Central del Ecuador, 2017b)

- **Inversión**

A continuación se muestra la inversión requerida para el arranque de la planta de oxiclورو de cobre de 1 t/mes de capacidad. En la Tabla 3.30 se consideran los equipos necesarios para el funcionamiento de la planta, además de maquinaria útil para la gestión diaria de la misma. En la Tabla 3.31 se anotan los valores correspondientes a los gastos de adquisición del terreno y construcción.

Tabla 3.30. Inversión en equipos industriales requeridos para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclورو de cobre

| Equipo | Nomenclatura | Nro | Costo unitario (USD) | Costo total (USD) |
|----------------------------------|----------------------|-----|----------------------|-------------------|
| Producción | | | | |
| Trituradora de cable de cobre | TC-101/TV-102 | 1 | 5 000,00 | 5 000,00 |
| Tanque agitado de lixiviación | TK-201 | 1 | 3 500,00 | 3 500,00 |
| Tanque agitado de neutralización | TK-202 | 1 | 4 700,00 | 4 700,00 |
| Tanque agitado de lavado | TK-203 | 1 | 1 200,00 | 1 200,00 |
| Filtros prensa | FP-201/FP-202/FP-203 | 3 | 2 100,00 | 6 300,00 |
| Estufa de secado | E-201 | 1 | 400,00 | 400,00 |
| Otros | | | | |
| Montacargas | - | 1 | 1 250,00 | 1 250,00 |
| Camioneta | - | 1 | 23 000,00 | 23 000,00 |
| Total | | | | 45 350,00 |

Tabla 3.31. Gastos en la obra civil para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Área (m ²) | Costo del m ² (USD) | Costo por activos (USD) | Costo total (USD) |
|------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Terreno | 339 | 50,00 | 800,00 | 17 750,00 |
| Oficinas y baños | 55,6 | 80,00 | 3 680,00 | 8 128,00 |
| Producción | 136,12 | 120,00 | - | 16 334,40 |
| Bodegas | 22,44 | 100,00 | 400,00 | 2 644,00 |
| Total | | | | 44 856,40 |

Además, para calcular la inversión total es necesario tomar en cuenta los costos totales en los que debe incurrirse para el inicio de operación de la planta que, a su vez, están compuestos por costos fijos y variables.

- Costos fijos

En la Tabla 3.32 se detallan los costos fijos para la planta que corresponden a la mano de obra, es decir, los sueldos del personal de la planta con sus respectivos beneficios de ley. Además al final se considera un porcentaje de participación de cada empleado que puede resultar una herramienta útil para la administración de los sueldos y contratos del personal.

Tabla 3.32. Costos fijos por mano de obra

| Puesto de trabajo | Nro | Sueldo | Aporte al IESS 11,15% | Total mensual (USD) | Décimo tercero (USD) | Décimo cuarto (USD) | Total anual (USD) | Porcentaje de Participación (%) |
|---|-----------|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| Gerente General | 1 | 1 200,00 | 133,80 | 1 333,80 | 1 200,00 | 375,00 | 17 580,60 | 23 |
| Jefe de producción | 1 | 750,00 | 83,63 | 833,63 | 750,00 | 375,00 | 11 128,50 | 15 |
| Secretaria | 1 | 450,00 | 50,18 | 500,18 | 450,00 | 375,00 | 6 827,10 | 9 |
| Operario | 4 | 375,00 | 41,81 | 416,81 | 375,00 | 375,00 | 23 007,00 | 30 |
| Guardia | 2 | 375,00 | 41,81 | 416,81 | 375,00 | 375,00 | 11 503,50 | 15 |
| Polifuncional (chofer/mensajero/limpieza) | 1 | 375,00 | 41,81 | 416,81 | 375,00 | 375,00 | 5 751,75 | 8 |
| Total | 10 | 3 525,00 | 393,04 | 3 918,04 | 3 525,00 | 2 250,0 | 75 798,45 | 100 |

- Costos variables

Los costos variables dependen directamente de la capacidad de la planta de producción de oxiclورو de cobre, ya que corresponden a los costos de reactivos,

materia prima e insumos necesarios para su funcionamiento. Para la planta de capacidad 1 t/mes se muestran en la Tabla 3.33, además de los gastos por servicios industriales como la energía eléctrica y el agua, que se han calculado con el precio establecido de 0,50 USD el m³ de agua y 0,08 USD el kw-h de electricidad (Empresa eléctrica Quito S.A., 2017 y EPMAPS, 2017)

Tabla 3.33. Costos variables para la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Unidad | Costo unitario (USD) | N° de unidades / mes | Costo mensual (USD) | Costo anual (USD) | Porcentaje de participación (%) |
|------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| Materias primas | | | | | | |
| Cobre reciclado | kg | 2,64 | 658,20 | 1 737,65 | 20 851,78 | 45 |
| Ácido clorhídrico (140 g/L) | kg | 0,13 | 7 933,80 | 1 031,39 | 12 376,73 | 27 |
| Peróxido de hidrógeno (50 %) | kg | 0,50 | 396,60 | 198,30 | 2 379,60 | 5 |
| Hidróxido de sodio (98 %) | kg | 0,40 | 1 652,10 | 660,84 | 7 930,08 | 17 |
| Insumos | | | | | | |
| Empaques | Unidades | 0,30 | 100 | 30,00 | 360,00 | 1 |
| Utilitarios oficina | Unidades | 0,05 | 400 | 20,00 | 240,00 | 1 |
| Útiles de aseo y limpieza | Unidades | 0,15 | 50 | 7,50 | 90,00 | 0 |
| Servicios | | | | | | |
| Agua potable | m ³ | 0,50 | 2,43 | 1,22 | 14,60 | 0 |
| Energía Eléctrica | kW-h | 0,08 | 2 549,70 | 203,98 | 2 447,71 | 5 |
| Total | | | | 3 890,87 | 46 690,50 | 100 |

Es así que se pueden calcular los costos de operación cuyo detalle se encuentra en la Tabla 3.34, se observa que aparte de los costos fijos por mano de obra y los

costos variables, se incurre en gastos de mantenimiento y reparación de equipos e instalaciones calculados con las tasas establecidas anteriormente como parámetros en la Tabla 3.29.

Tabla 3.34. Costos de operación

| Detalle | Valor mensual (USD) | Valor anual (USD) |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Mano de obra | 6 316,54 | 75 798,45 |
| Depreciación de los equipos | 377,92 | 4 535,00 |
| Mantenimiento de equipos | 907,00 | 10 884,00 |
| Mantenimiento de instalaciones | 1 345,69 | 16 148,30 |
| Reparación de maquinaria | 907,00 | 10 884,00 |
| Total costos fijos | 9 854,15 | 118 249,75 |
| Total costos variables | 3 890,87 | 46 690,50 |
| Total | 13 745,02 | 164 940,25 |

La inversión total se calcula como la sumatoria de la inversión en equipos, gastos de construcción y los costos de operación, tal como se indica en la Tabla 3.35, donde alcanza un valor mayor a los 100 000 USD.

Tabla 3.35. Inversión total

| Detalle | Valor (USD) |
|----------------------|--------------------|
| Maquinaria y equipos | 45 350,00 |
| Obra civil | 44 856,40 |
| Costos de operación | 13 745,02 |
| Total | 103 951,42 |

- Ingresos

Para realizar el flujo de caja del proyecto, es necesario también conocer los ingresos que genera la planta, en este caso son por concepto de la venta del

oxicloruro de cobre 97 % producido, que se vende en presentaciones de 1 kg y 500 g y va dirigido especialmente al sector agrícola del país. Tales ingresos son mostrados en la Tabla 3.36.

Tabla 3.36. Ingresos por ventas

| Producto | Unidad | Precio unitario (USD) | Unidades producidas / mes | Unidades vendidas / mes | Ingreso mensual | Ingreso anual |
|----------------------------|--------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|-------------------|
| Oxicloruro de cobre (97 %) | kg | 14,00 | 1 000,00 | 1 000,00 | 14 000,00 | 168 000,00 |
| Total | | | | | 14 000,00 | 168 000,00 |

- Amortización del préstamo

Como se indicó en la Tabla 3.29, la inversión total de la planta será financiada con un 30 % de financiamiento propio y el 70 % restante mediante un préstamo. Según la inversión total calculada en la Tabla 3.35 y una tasa de interés de 8,14 % para 10 años, se muestra la amortización del préstamo en la Tabla 3.37.

Tabla 3.37. Amortización del préstamo para el financiamiento de la planta de 1 t/mes

| Año | Interés (USD) | Pago cuotas (USD) | Cuotas (USD) | Saldo (USD) |
|-------|---------------|-------------------|--------------|-------------|
| 1,00 | 5 923,15 | 10 912,86 | 4 989,70 | -67 776,29 |
| 2,00 | 5 516,99 | 10 912,86 | 5 395,87 | -62 380,43 |
| 3,00 | 5 077,77 | 10 912,86 | 5 835,09 | -56 545,34 |
| 4,00 | 4 602,79 | 10 912,86 | 6 310,07 | -50 235,27 |
| 5,00 | 4 089,15 | 10 912,86 | 6 823,70 | -43 411,57 |
| 6,00 | 3 533,70 | 10 912,86 | 7 379,15 | -36 032,41 |
| 7,00 | 2 933,04 | 10 912,86 | 7 979,82 | -28 052,59 |
| 8,00 | 2 283,48 | 10 912,86 | 8 629,37 | -19 423,22 |
| 9,00 | 1 581,05 | 10 912,86 | 9 331,81 | -10 091,41 |
| 10,00 | 821,44 | 10 912,86 | 10 091,41 | 0,00 |

- **Flujo de caja**

En la Tabla 3.38 se presenta el flujo de caja realizado para 10 años de funcionamiento de la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre. Se colocaron como egresos principales los valores calculados para la inversión, es decir, el financiamiento propio al inicio del proyecto y el pago del préstamo durante los 10 años considerados, además se tomaron en cuenta los costos de operación. Como ingresos, básicamente se tiene el valor correspondiente a la venta del producto.

Tabla 3.38. Flujo de caja para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre.

| Detalle | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Inversión total | -103 951,42 | | | |
| Inversión propia | 31 185,43 | | | |
| Ingreso por ventas | | 168 000,00 | 168 000,00 | 168 000,00 |
| Costo de operación | | -164 940,25 | -164 940,25 | -164 940,25 |
| Utilidad bruta | | 3 059,75 | 3 059,75 | 3 059,75 |
| Préstamo bancario | -72 765,99 | | | |
| Intereses préstamo | | -5 923,15 | -5 516,99 | -5 077,77 |
| Utilidad antes de impuestos | | -2 863,40 | -2 457,24 | -2 018,02 |
| Impuesto a la renta | | 859,02 | 737,17 | 605,40 |
| Utilidad neta | | -2 004,38 | -1 720,07 | -1 412,61 |
| Más depreciación | | 4 535,00 | 4 535,00 | 4 535,00 |
| Amortización préstamo | | -4 989,70 | -5 395,87 | -5 835,09 |
| Valor de desecho | | | | |
| Flujo efectivo | -103 951,42 | -2 459,09 | -2 580,93 | -2 712,70 |
| Valor actual | -103 951,42 | -2 122,65 | -1 923,02 | -1 744,67 |

Tabla 3.38. Flujo de caja para la planta de 1 t/mes de capacidad (**continuación...**)

| Detalle | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ingreso por ventas | 168 000,00 | 168 000,00 | 168 000,00 | 168 000,00 |
| Costo de operación | -164 940,25 | -164 940,25 | -164 940,25 | -164 940,25 |
| Utilidad bruta | 3 059,75 | 3 059,75 | 3 059,75 | 3 059,75 |
| Préstamo bancario | | | | |
| Intereses préstamo | -4 602,79 | -4 089,15 | -3 533,70 | -2 933,04 |
| Utilidad antes de impuestos | -1 543,04 | -1 029,40 | -473,95 | 126,71 |
| Impuesto a la renta | 462,91 | 308,82 | 142,19 | -38,01 |
| Utilidad neta | -1 080,13 | -720,58 | -331,77 | 88,70 |
| Más depreciación | 4 535,00 | 4 535,00 | 4 535,00 | 4 535,00 |
| Amortización préstamo | -6 310,07 | -6 823,70 | -7 379,15 | -7 979,82 |
| Valor de desecho | | | | |
| Flujo efectivo | -2 855,19 | -3 009,29 | -3 175,92 | -3 356,12 |
| Valor actual | -1 585,08 | -1 442,06 | -1 313,69 | -1 198,30 |

Tabla 3.38. Flujo de caja para la planta de 1 t/mes de capacidad (**continuación...**)

| Detalle | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Ingreso por ventas | 168 000,00 | 168 000,00 | 168 000,00 |
| Costo de operación | -164 940,25 | -164 940,25 | -164 940,25 |
| Utilidad bruta | 3 059,75 | 3 059,75 | 3 059,75 |
| Préstamo bancario | | | |
| Intereses préstamo | -2 283,48 | -1 581,05 | -821,44 |
| Utilidad antes de impuestos | 776,27 | 1 478,70 | 2 238,31 |
| Impuesto a la renta | -232,88 | -443,61 | -671,49 |
| Utilidad neta | 543,39 | 1 035,09 | 1 566,82 |
| Más depreciación | 4 535,00 | 4 535,00 | 4 535,00 |
| Amortización préstamo | -8 629,37 | -9 331,81 | -10 091,41 |
| Valor de desecho | | | 22 551,60 |
| Flujo efectivo | -3 550,99 | -3 761,72 | 18 562,00 |
| Valor actual | -1 094,41 | -1 000,74 | 4 262,50 |

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA PARA UNA PLANTA DE 3 t/MES DE OXICLORURO DE COBRE DE CAPACIDAD

De la misma manera, con base en los resultados a escala piloto, se evaluó la pre-factibilidad técnica y económica para una planta de producción de oxiclорuro de cobre de 3 t/mes de capacidad.

3.3.3.1. Balance de masa

En la Tabla 3.39 se muestran los flujos de reactivos y materia prima que ingresan a cada proceso en la planta de capacidad de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre según el balance de masa.

Tabla 3.39. Flujo de reactivos y materia prima al ingreso de cada proceso para una planta de 3 t/mes de capacidad

| Proceso | Material / Reactivo | Flujo (kg/día) |
|---------------------|-----------------------|----------------|
| Reducción de tamaño | Cobre reciclado | 65,81 |
| Lixiviación | Cobre reciclado | 65,81 |
| | Ácido clorhídrico | 111,07 |
| | Peróxido de hidrógeno | 19,83 |
| | Agua | 702 |
| Neutralización | Hidróxido de sodio | 165,22 |
| Lavado | Agua | 198,34 |

3.3.3.2. Diagrama de flujo

El diagrama de flujo del proceso de la planta de producción de oxiclорuro de cobre de 3 t/mes de oxiclорuro de cobre, se muestra en la Figura 3.21 con los flujos másicos determinados en el balance de masa.

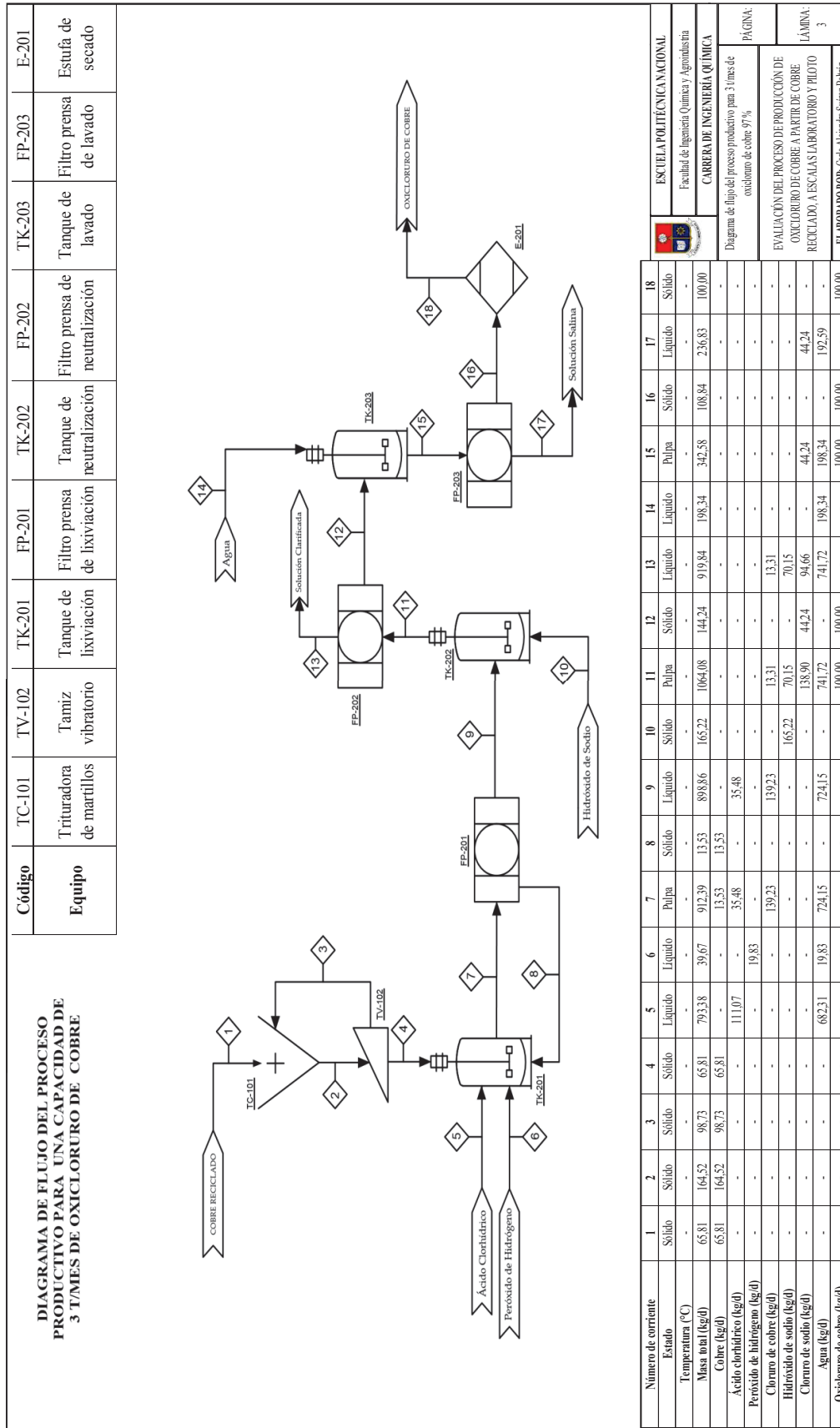


Figura 3.21. Diagrama de Flujo (PFD) para el proceso de producción de oxiclóruo de cobre proceso de producción de oxiclóruo de cobre a partir de cobre reciclado para 3 t/mes de oxiclóruo de cobre de capacidad.

3.3.3.3. Dimensionamiento de los equipos

Con base en el balance de masa y los flujos másicos calculados se dimensionaron los equipos requeridos para el funcionamiento de la plantas de producción de oxiclورو de cobre de 3 t/mes de capacidad, los cálculos respectivos se detallan en el ANEXO VII.

- Especificaciones para la reducción de tamaño

Dado que la trituradora utilizada para la planta de producción de 1 t/mes tiene una capacidad suficientemente grande para el triple de la producción, se opta por utilizar el mismo equipo, cuyas especificaciones se detallaron en la Tabla 3.20. Lo mismo sucede con el tamiz vibratorio indicado en la Tabla 3.21.

- Especificaciones para la lixiviación

En el proceso de lixiviación se utiliza un tanque de agitación cuyas dimensiones dependen de la capacidad de producción de la planta, es por ello que en la Tabla **3.40** se muestran las especificaciones técnicas para 3 t/mes de oxiclورو de cobre. El material a utilizarse para el tanque y el agitador es también de Acero AISI 316 debido a las que se utilizan los reactivos mismos reactivos corrosivos.

- Especificaciones para la neutralización

En la Tabla 3.41 se observan las especificaciones para el tanque agitado diseñado para la neutralización y precipitación de 3 t/mes de oxiclورو de cobre con hidróxido de sodio.

Tabla 3.40. Características del tanque agitado de lixiviación para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-201)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero AISI 316 |
| Diámetro (m) | 1,00 |
| Altura (m) | 1,50 |
| Volumen (m ³) | 1,26 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 25 381,60 |
| Presión de diseño (psi) | 2,31 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,20 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Diámetro impulsor (m) | 0,50 |
| Altura impulsor (m) | 0,50 |
| RPM | 58 |
| Potencia (kW) | 14,00 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

- Especificaciones para lavado

En la Tabla 3.42 se muestran las especificaciones del tanque de agitación para el proceso de lavado dimensionado para la producción de 3 t/mes de oxocloruro de cobre de capacidad.

Tabla 3.41. Características del tanque agitado de neutralización para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-202)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero AISI 316 |
| Diámetro (m) | 1,05 |
| Altura (m) | 1,58 |
| Volumen (m ³) | 1,46 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 25 381,60 |
| Presión de diseño (psi) | 2,44 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,21 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Diámetro impulsor (m) | 0,53 |
| Altura impulsor (m) | 0,53 |
| RPM | 55 |
| Potencia (kW) | 15,00 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

- Especificaciones para filtros

Al igual que los tanques de agitación cambian de dimensiones según la capacidad de la planta. En la Tabla 3.43 se indican las especificaciones técnicas para los

filtros prensa utilizados en la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre posterior a la lixiviación, neutralización y lavado.

Tabla 3.42. Características del tanque agitado de lavado para la planta de 3 t/mes de capacidad (TK-203)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| Material | Acero al carbono |
| Diámetro (m) | 0,66 |
| Altura (m) | 1,00 |
| Volumen (m ³) | 0,37 |
| Espesor (mm) | 5 |
| Resistencia de diseño (psi) | 19 580,10 |
| Presión de diseño (psi) | 1,96 |
| Eficiencia de soldadura | 0,85 |
| Tipo | Tanque abierto con fondo torisférico |
| Altura de fondo (m) | 0,14 |
| Número de deflectores | 4 |
| Impulsor | Turbina marina |
| Diámetro impulsor (m) | 0,33 |
| Altura impulsor (m) | 0,33 |
| RPM | 88 |
| Potencia (kW) | 8,00 |
| Sobredimensionamiento (%) | 33,16 |

- Especificaciones para el secado

Por último para el proceso de secado, las especificaciones de la estufa para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre se pueden observar en la Tabla 3.44.

Tabla 3.43. Características de los filtros prensa para la planta de 3 t/mes de capacidad (FP-201, FP-202 y FP-203)

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------------|------------------|
| Material | Polímero Durapol |
| Altura (m) | 0,92 |
| Longitud (m) | 1,50 |
| Ancho (m) | 0,70 |
| Capacidad (m ³ /h) | 0,3 - 1,0 |
| Área de filtración (m ²) | 2,6 |
| Presión (psi) | 30 |
| Potencia (kW) | 2,5 |

Tabla 3.44. Características de la estufa de secado para la planta de 3 t/mes de capacidad

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|------------------|
| Material | Acero inoxidable |
| Altura (m) | 1,00 |
| Longitud (m) | 0,75 |
| Ancho (m) | 0,65 |
| Capacidad (kg) | 120 |
| Temperatura de operación (°C) | 0 - 300 |
| Potencia (kW) | 0,45 |

3.3.3.4. Balance de energía

El balance de energía fue realizado para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre con base en los tiempos de operación de los equipos y el flujo másico determinado para cada corriente.

En la Tabla 3.45 se detallan los resultados de consumo energético que posteriormente serán utilizados para la evaluación financiera del proyecto.

Tabla 3.45. Balance de energía para la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad

| Equipo | Número | Potencia (kW) | Tiempo operación (h/mes) | Consumo energético (kW-h/mes) |
|--|--------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| Trituradora de cobre (incluye banda transportadora y tamiz vibratorio) | 1 | 30,00 | 4,4 | 132,00 |
| Tanque agitado de lixiviación | 1 | 14,00 | 240,0 | 3 360,00 |
| Tanque agitado de neutralización | 1 | 15,00 | 60,0 | 900,00 |
| Tanque agitado de lavado | 1 | 8,00 | 30,0 | 240,00 |
| Filtro prensa | 3 | 2,50 | 45,0 | 337,50 |
| Estufa de secado | 1 | 0,45 | 240,0 | 108,00 |
| Consumo energético mensual (kW-h) | | | | 5 077,50 |

3.3.3.5. Diagrama de distribución en la planta (lay-out)

El diagrama de distribución y ubicación en la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre se muestra en la Figura 3.22 con la misma codificación descrita en la Tabla 3.28. En esta vista superior se puede observar que el dimensionamiento de algunos equipos es el mismo que en la planta de menor capacidad, mientras que otros como los tanques de agitación aumentan en su diámetro, en una vista frontal se pudiera observar también el incremento de la altura de los tanques.

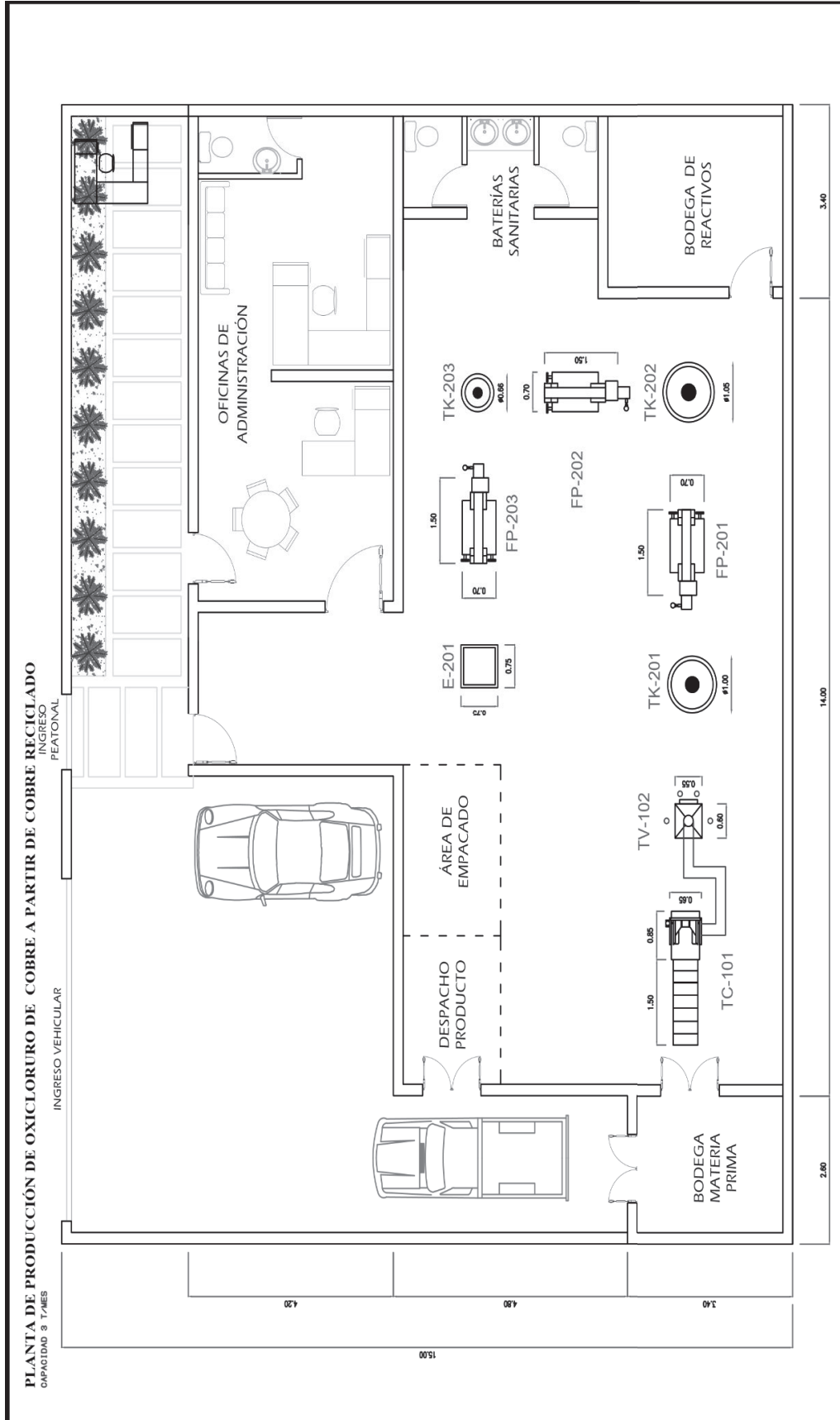


Figura 3.22. Diagrama de proceso (lay-out) para la producción de oxiclورو de cobre proceso de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para 3 t/mes de oxiclورو de cobre de capacidad.

3.3.3.6. Estudio de pre-factibilidad económica

De la misma manera, se evaluó la pre-factibilidad económica de la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre; para lo cual se empleó un análisis de flujo de fondos para un tiempo de vida de 10 años. Posteriormente se determinan y comparan los indicadores financieros para las dos capacidades de la planta: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo.

Para la evaluación se utilizaron los mismos parámetros financieros que para la planta de producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre que se indicaron en la Tabla 3.29. La inversión en equipos industriales y maquinaria para esta capacidad se muestran en la Tabla 3.46.

Tabla 3.46. Inversión en equipos industriales requeridos para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Equipo | Nomenclatura | Nro | Costo unitario (USD) | Costo total (USD) |
|----------------------------------|----------------------|-----|----------------------|-------------------|
| Producción | | | | |
| Trituradora de cable de cobre | TC-101/TV-102 | 1 | 5 000,00 | 5 000,00 |
| Tanque agitado de lixiviación | TK-201 | 1 | 5 300,00 | 5 300,00 |
| Tanque agitado de neutralización | TK-202 | 1 | 6 400,00 | 6 400,00 |
| Tanque agitado de lavado | TK-203 | 1 | 1 600,00 | 1 600,00 |
| Filtros prensa | FP-201/FP-202/FP-203 | 3 | 2 500,00 | 7 500,00 |
| Estufa de secado | E-201 | 1 | 600,00 | 600,00 |
| Otros | | | | |
| Montacargas | - | 1 | 1 250,00 | 1 250,00 |
| Camioneta | - | 1 | 23 000,00 | 23 000,00 |
| Total | | | | 50 650,00 |

Los costos variables, como su nombre lo indica, variaron para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre. Ellos son los correspondientes a materias primas, insumos y servicios como se puede observar en la Tabla 3.47.

Tabla 3.47. Costos variables para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Unidad | Costo unitario (USD) | N° de unidades / mes | Costo mensual (USD) | Costo anual (USD) | Porcentaje de participación (%) |
|------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| Materias primas | | | | | | |
| Cobre reciclado | kg | 2,64 | 1 974,60 | 5 212,94 | 62 555,33 | 45 |
| Ácido clorhídrico (140 g/L) | kg | 0,13 | 23 801,40 | 3 094,18 | 37 130,18 | 27 |
| Peróxido de hidrógeno (50 %) | kg | 0,50 | 1 189,80 | 594,90 | 7 138,80 | 5 |
| Hidróxido de sodio (98 %) | kg | 0,40 | 4 956,30 | 1 982,52 | 23 790,24 | 17 |
| Insumos | | | | | | |
| Empaques | Unidades | 0,90 | 300 | 270,00 | 3 240,00 | 2 |
| Utilitarios oficina | Unidades | 0,05 | 500 | 25,00 | 300,00 | 0 |
| Útles de aseo y limpieza | Unidades | 0,15 | 50 | 7,50 | 90,00 | 0 |
| Servicios | | | | | | |
| Agua potable | m ³ | 0,50 | 7,30 | 3,65 | 43,80 | 0 |
| Energía Eléctrica | kW-h | 0,08 | 5 077,50 | 406,20 | 4 874,40 | 4 |
| Total | | | | 11 596,90 | 139 162,75 | 100 |

Los detalles de los costos de operación o capital de operación fueron calculados para la planta de producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre y se muestran en la Tabla 3.48.

Tabla 3.48. Costos de operación para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Valor mensual (USD) | Valor anual (USD) |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Mano de obra | 6 316,54 | 75 798,45 |
| Depreciación de los equipos | 422,08 | 5 065,00 |
| Mantenimiento de equipos | 1 013,00 | 12 156,00 |
| Mantenimiento de instalaciones | 1 345,69 | 16 148,30 |
| Reparación de maquinaria | 1 013,00 | 12 156,00 |
| Costos variables | 11 596,90 | 139 162,75 |
| Costos fijos | 10 110,31 | 121 323,75 |
| Total | 21 707,21 | 260 486,51 |

- Inversión

La inversión total se calculó como la suma de los costos de maquinaria, equipos, construcción y el capital de operación. El valor obtenido para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre se indica en la Tabla 3.49.

Tabla 3.49. Inversión total para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Valor (USD) |
|----------------------|--------------------|
| Maquinaria y equipos | 50 650,00 |
| Obra civil | 44 856,40 |
| Capital de operación | 21 707,21 |
| Total | 117 213,61 |

- Ingresos

En la Tabla 3.50 se puede observar que los ingresos por concepto de venta del producto (oxiclورو de cobre 97 %) corresponden al triple de los ingresos de la planta de menor capacidad. En adelante se observa cómo este valor repercute en el flujo de caja de la planta.

Tabla 3.50. Ingresos por ventas para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Producto | Unidad | Precio unitario (USD) | Unidades producidas / mes | Unidades vendidas / mes | Ingreso mensual | Ingreso anual |
|----------------------------|--------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|-------------------|
| Oxicloruro de cobre (97 %) | kg | 14 | 3 000,00 | 3 000,00 | 42 000,00 | 504 000,00 |
| Total | | | | | 42 000,00 | 504 000,00 |

- Amortización del préstamo

Para esta capacidad, de igual manera la inversión total de la planta será financiada con un 30 % de financiamiento propio y el 70 % restante mediante un préstamo. Según la inversión total calculada en la y una tasa de interés de 8,14 % para 10 años, se muestra la amortización del préstamo en la Tabla 3.37.

Tabla 3.51. Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Año | Interés (USD) | Pago cuotas (USD) | Cuotas (USD) | Saldo (USD) |
|-------|---------------|-------------------|--------------|-------------|
| 0,00 | - | | | |
| 1,00 | 6 678,83 | 12 305,12 | 5 626,29 | -76 423,23 |
| 2,00 | 6 220,85 | 12 305,12 | 6 084,27 | -70 338,96 |
| 3,00 | 5 725,59 | 12 305,12 | 6 579,53 | -63 759,43 |
| 4,00 | 5 190,02 | 12 305,12 | 7 115,11 | -56 644,32 |
| 5,00 | 4 610,85 | 12 305,12 | 7 694,28 | -48 950,04 |
| 6,00 | 3 984,53 | 12 305,12 | 8 320,59 | -40 629,45 |
| 7,00 | 3 307,24 | 12 305,12 | 8 997,89 | -31 631,56 |
| 8,00 | 2 574,81 | 12 305,12 | 9 730,32 | -21 901,25 |
| 9,00 | 1 782,76 | 12 305,12 | 10 522,36 | -11 378,88 |
| 10,00 | 926,24 | 12 305,12 | 11 378,88 | 0,00 |

- **Flujo de caja**

El flujo de caja para la planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre se exhibe en la Tabla 3.52. . Se colocaron como egresos principales los valores calculados para la inversión, además se tomaron en cuenta los costos de operación. Como ingresos, básicamente se tiene el valor correspondiente a la venta del producto, que en este caso es 3 veces mayor.

Tabla 3.52. Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Detalle | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Inversión total | -117 213,61 | | | |
| Inversión propia | 35 164,08 | | | |
| Ingreso por ventas | | 504 000,00 | 504 000,00 | 504 000,00 |
| Costo de operación | | -260 486,51 | -260 486,51 | -260 486,51 |
| Utilidad bruta | | 243 513,49 | 243 513,49 | 243 513,49 |
| Préstamo bancario | -82 049,53 | | | |
| Intereses préstamo | | -6 678,83 | -6 220,85 | -5 725,59 |
| Utilidad antes de impuestos | | 236 834,66 | 237 292,64 | 237 787,90 |
| Impuesto a la renta | | -71 050,40 | -71 187,79 | -71 336,37 |
| Utilidad neta | | 165 784,26 | 166 104,85 | 166 451,53 |
| Más depreciación | | 5 065,00 | 5 065,00 | 5 065,00 |
| Amortización préstamo | | -5 626,29 | -6 084,27 | -6 579,53 |
| Valor de desecho | | | | |
| Flujo efectivo | -117 213,61 | 165 222,97 | 165 085,58 | 164 937,00 |
| Valor actual | -117 213,61 | 142 618,02 | 123 003,38 | 106 079,14 |

Tabla 3.52. Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes (continuación...)

| Detalle | Año 4 | Año 5 | Año 6 | Año 7 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ingreso por ventas | 504 000,00 | 504 000,00 | 504 000,00 | 504 000,00 |
| Costo de operación | -260 486,51 | -260 486,51 | -260 486,51 | -260 486,51 |
| Utilidad bruta | 243 513,49 | 243 513,49 | 243 513,49 | 243 513,49 |
| Intereses préstamo | -5 190,02 | -4 610,85 | -3 984,53 | -3 307,24 |
| Utilidad antes de impuestos | 238 323,48 | 238 902,65 | 239 528,96 | 240 206,26 |
| Impuesto a la renta | -71 497,04 | -71 670,79 | -71 858,69 | -72 061,88 |
| Utilidad neta | 166 826,43 | 167 231,85 | 167 670,27 | 168 144,38 |
| Más depreciación | 5 065,00 | 5 065,00 | 5 065,00 | 5 065,00 |
| Amortización préstamo | -7 115,11 | -7 694,28 | -8 320,59 | -8 997,89 |
| Valor de desecho | | | | |
| Flujo efectivo | 164 776,33 | 164 602,58 | 164 414,68 | 164 211,49 |
| Valor actual | 91 476,74 | 78 878,10 | 68 008,68 | 58 631,54 |

Tabla 3.52. Flujo de caja para 10 años de la planta de 3 t/mes (continuación...)

| Detalle | Año 8 | Año 9 | Año 10 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Ingreso por ventas | 504 000,00 | 504 000,00 | 504 000,00 |
| Costo de operación | -260 486,51 | -260 486,51 | -260 486,51 |
| Utilidad bruta | 243 513,49 | 243 513,49 | 243 513,49 |
| Intereses préstamo | -2 574,81 | -1 782,76 | -926,24 |
| Utilidad antes de impuestos | 240 938,68 | 241 730,73 | 242 587,25 |
| Impuesto a la renta | -72 281,61 | -72 519,22 | -72 776,18 |
| Utilidad neta | 168 657,08 | 169 211,51 | 169 811,08 |
| Más depreciación | 5 065,00 | 5 065,00 | 5 065,00 |
| Amortización préstamo | -9 730,32 | -10 522,36 | -11 378,88 |
| Valor de desecho | | | 23 876,60 |
| Flujo efectivo | 163 991,76 | 163 754,15 | 187 373,79 |
| Valor actual | 50 542,15 | 43 564,02 | 43 027,73 |

3.3.4. COMPARACIÓN DE LA PRE-FACTIBILIDAD TÉCNICO Y ECONÓMICA PARA LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE 1 T/MES Y LA DE 3 T/MES DE OXICLORURO DE COBRE

Finalmente, se calcularon los indicadores financieros del proyecto para la planta de producción de oxiclورو de cobre a partir de cobre reciclado para la capacidad de 1 y 3 t/mes. En la Tabla 3.53 se pueden observar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo para cada capacidad.

Tabla 3.53. Indicadores financieros calculados para las plantas de capacidad de 1 y 3 t/mes de oxiclورو de cobre

| Indicador financiero | Capacidad | |
|----------------------|-------------|------------|
| | 1 t/mes | 3 t/mes |
| VAN (USD) | -113 113,55 | 688 615,89 |
| TIR (%) | -22,38 | 140,85 |
| B/C | 0,09 | 6,87 |

Se aprecia que para la planta de 1 t/mes el valor actual neto (VAN) es negativo debido a que los costos operativos de producción y por ende la inversión inicial es mayor a los ingresos generados, lo cual indica que se deben generar una cantidad de ingresos adicionales al menos de 113 113 USD para obtener el retorno de la inversión, todo esto tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo con una tasa de oportunidad de 15,85 %.

Además de los costos operativos calculados, es claro que el valor considerablemente alto de esta tasa es un aspecto crítico para la determinación del VAN y resultaría en este caso en el rechazo del proyecto (FAO, 2016, p.1). Por otro lado, el TIR calculado no solamente es menor a la tasa considerada sino que es negativo, lo cual indica nuevamente que el proyecto no es rentable; análogamente en la relación beneficio - costo se indica que por cada dólar invertido se ganan 0,07 USD, lo cual no es atractivo. La solución para este

escenario puede ser rebajar los costos operativos o, en su defecto, aumentar los ingresos, lo que en este caso se traduce a un incremento de la capacidad de producción para lo cual será de utilidad el siguiente análisis.

Un panorama muy diferente se puede observar para la planta de capacidad de 3 t/mes debido a que el VAN obtenido es de 688 615,89 USD, lo que cambia completamente la apreciación del proyecto convirtiéndolo en rentable. Además, el TIR es mayor a la tasa de oportunidad considerada y la relación beneficio costo es muy significativa. Con los indicadores financieros para esta capacidad no solamente se alcanza el valor mencionado para que exista un retorno de la inversión, sino que se habla de ganancias considerables.

La diferencia tan grande entre los resultados de una capacidad de la planta y la otra, radica en que los costos fijos no cambian al aumentar la producción y el aumento en la inversión en equipos es mínimo porque se pueden utilizar los mismos de los utilizados a 1 t/mes. Lo que indica que ciertos equipos están sobre dimensionados para la planta de 1 t/mes e incluso pueden estarlo para la de 3 t/mes. Es claro entonces que la decisión de instalación de la planta se basa en la aceptación del mercado hacia el producto obtenido (oxicloruro de cobre 97 %).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Los fragmentos de cobre reciclado procesado a nivel laboratorio tienen una densidad aparente de $3,4 \text{ g/cm}^3$, una longitud promedio de 4 mm y un diámetro de 2 mm. El contenido de cobre en los fragmentos es del 99,7 % ya que solamente posee trazas de otros metales, principalmente zinc.

Las mejores condiciones oxidantes para la lixiviación en el proceso de producción de oxiclورو de cobre son con la adición de peróxido de hidrógeno en un 4,8 % de la solución lixivante para una recuperación de cobre en solución de 85,6 % cercana al 92,7 % alcanzada al añadir el quíntuple de reactivo.

La lixiviación de cobre en ácido clorhídrico con oxígeno como agente oxidante no alcanza la misma recuperación que con la adición de peróxido de hidrógeno incluso con el aumento de temperatura hasta $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

La mejor manera de realizar la adición de peróxido de hidrógeno a la solución es colocarlo por partes cada cierto intervalo de tiempo, en lugar de añadir todo al inicio, de manera que se alcance una mayor recuperación de cobre en la solución.

Como la mejor concentración del agente lixivante (ácido clorhídrico) se eligió la de 140 g/L y como el mejor porcentaje de sólidos en solución se tomó el 9,1 % por comparación de la recuperación obtenida de cobre en solución.

El tiempo de lixiviación en la preparación de oxiclورو de cobre a escala laboratorio es de 8 horas con una recuperación de cobre en solución de 82,5 %.

El mejor agente neutralizante resultante para la precipitación de oxiclورو de cobre fue el hidróxido de sodio, con un rendimiento de 89,4 % del proceso y

una pureza del producto de 82,0 % previo al lavado y de 100 % posterior al proceso de lavado.

El mineral predominante producto de la obtención de oxiclورو de cobre mediante neutralización con hidróxido de sodio a la solución lixiviada a 20 °C, 9 % sólidos, 5 mL de peróxido de hidrógeno, HCl de 140 g/L, 24 h y 500 rpm fue la paratacamita con un 65 % por encima del 35 % de atacamita.

El factor de escalado entre el ensayo laboratorio realizado a las mejores condiciones de lixiviación y neutralización y el ensayo piloto fue de 400. Se determinó que ambos experimentos se llevaron a cabo con un flujo de agitación turbulento.

El tamaño del ensayo no influye en el mejor tiempo de operación, a escala piloto también se optó por una lixiviación durante 8 horas con un 82,9 % de recuperación y una neutralización durante 2 horas con un rendimiento de 90,4 %.

El producto obtenido del ensayo a nivel piloto fueron 5,2 kg de oxiclورو de cobre 97 % a partir de 4 kg de cobre reciclado. El 3 % corresponde a una impureza de óxido de cobre formada por la elevación del pH hasta 7,0.

La pureza del oxiclورو de cobre obtenido depende del agente neutralizante utilizado, del pH de precipitación y del proceso de lavado donde se eliminan las impurezas solubles restantes.

La instalación de la planta de 1 t/mes no resultó factible ya que tanto el VAN como el TIR tienen un valor negativo y la relación beneficio costo indica que por cada dólar invertido se ganan 0,09 USD

Para la planta de capacidad de 3 t/mes se determinó un VAN de 688 615 USD, al ser un valor mayor que cero se convierte en un proyecto atractivo.

La tasa interna de retorno TIR resultó igual a 140,9 % (mayor a la tasa de oportunidad considerada) y la relación beneficio costo es de 6,9 USD, por lo tanto el proyecto de instalación de una planta de capacidad de 3 t/mes de oxiclورو de cobre es muy rentable.

4.2. RECOMENDACIONES

Evaluar la influencia de la agitación tanto en el proceso de lixiviación como en el de neutralización sobre el tiempo de operación, la pureza, rendimiento, y el tamaño de partícula del producto obtenido.

Complementar la evaluación experimentando con diferentes concentraciones de la solución de hidróxido de sodio como agente neutralizante a escala laboratorio.

Evaluar materiales con revestimientos poliméricos o de fibra de vidrio para los recipientes de lixiviación y neutralización como posibles mejoras en la elección de anticorrosivos para el sistema.

Estudiar el efecto del tamaño de partícula de la materia prima sobre la recuperación de cobre en la lixiviación y realizarlo con cobre reciclado de diferentes fuentes.

Evaluar el uso de agentes que retarden el consumo de peróxido de hidrógeno en la reacción y lo prolonguen con el objetivo de disminuir la cantidad añadida de reactivo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Anaya, A. y Pedroza, H. (2008). Escalamiento el arte de la Ingeniería Química. *Tecnología, Ciencia y Comunicación*, 23 (1), 31-39. Instituto Mexicano de Ingeniería Química. Distrito Federal-México.
2. Antonijević, M., Dimetrijević, M. y Janković, Z. (2004). Kinetics of chalcopyrite dissolution by hydrogen peroxide in sulfuric acid. *Hydrometallurgy*, 71, 329-334. doi:10.1016/S0304-386X(03)00082-3.
3. AQM Copper Inc. (2016). Fundamentos de cobre. Recuperado de: http://aqmcopper.com/sp/Fundamentos_del_Cobre.asp (Junio, 2016)
4. Ayala, J. y Fernández, B. (2014). Synthesis of Commercial Products from Copper Wire-Drawing Waste. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 66(6), 1099–1105. doi: 10.1007/s11837-014-0920-4
5. Banco Central del Ecuador. (2016a). *EN EL SEGUNDO TRIMESTRE DE 2015, EL PIB DE ECUADOR MOSTRÓ UN CRECIMIENTO INTER-ANUAL DE 1,0%*. Recuperado de: <https://www.bce.fin.ec/index.php/boletines-de-prensa-archivo/item/836-en-el-segundo-trimestre-de-2015-el-pib-de-ecuador-mostr%C3%B3-un-crecimiento-inter-anual-de-10> (Julio, 2016).
6. Banco Central del Ecuador. (2016b). *PRODUCTO INTERNO BRUTO LA ECONOMÍA ECUATORIANA REGISTRÓ DURANTE EL PRIMER TRIMESTRE DE 2016 UNA VARIACIÓN TRIMESTRAL DE -1,9%*. Recuperado de: <https://www.bce.fin.ec/index.php/boletines-de-prensa-archivo/item/899-producto-interno-bruto-la-econom%C3%ADa-ecuatoriana-registr%C3%B3-durante-el-primer->

trimestre-de-2016-una-variaci%C3%B3n-trimestral-de-19
(Diciembre, 2016).

7. Banco Central del Ecuador. (2017a). *Información de Comercio Exterior de Bienes*. Recuperado de: <http://sintesis.bce.ec:8080/BOE/BI/logon/start.do?ivsLogonToken=bceqsappbo01:6400@800094Jh1wWsqAJqWlucfgnfeUeTn800092J05aMHHhnXamrQyDCOc2mNH> (Diciembre, 2016).
8. Banco Central del Ecuador. (2017b). Indicadores económicos. Recuperado de: <https://www.bce.fin.ec/index.php/indicadores-economicos> (Marzo, 2017)
9. Beverskog, B. y Puigdomenech, I. (1998). Pourbaix diagrams for the system copper-chlorine at 5–100 °C. Recuperado de: http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/SKI_import/010803/04318226039/98-19.pdf (Diciembre, 2016).
10. Butts, A. (1960). *Copper*. Reinhold Publishing Corporation. New York, pp. 795, 813, 816, 818.
11. Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. (Seminario de titulación presentado como requisito para la obtención del título de: Ingeniero en Ejecución Mecánica). Universidad del Bío - Bío, Chile.
12. Chaverra, D. (2014). *Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impreso de residuos electrónicos*. (Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial de obtención del título de: Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
13. Codelco. (2008). *PRINCIPALES PRODUCTOS DE CODELCO: COBRE Y MOLIBDENO*. Recuperado de:

- https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2006/textos/sustentable.htm. (Noviembre, 2016).
14. Copper Alliance. (2016). *Química – Extracción de cobre (de 11 a 14 años)*. Recuperado de: <http://www.copperalliance.es/educacion/programas-educativos/qu%C3%ADmica-extracci%C3%B3n-de-cobre>. (Noviembre, 2016).
 15. Digital Analysis Corporation. (2016). *Neutralization Chemicals*. Recuperado de: <http://www.phadjustment.com/TArticles/Lime.html>. (Febrero, 2017)
 16. Domy, C. (2001). Copper. *Trace elements in terrestrial environments*, 499-546, doi:10.1007/978-0-387-21510-5_13, pp 520-521,537
 17. Educa Madrid. (2007a). *Calcopirita*. Recuperado de: <http://mediateca.educa.madrid.org/imagen/frf6dhs7nar2frnu> (Noviembre, 2016).
 18. Educa Madrid. (2007b). *Bornita (México)*. Recuperado de: <http://mediateca.educa.madrid.org/imagen/e22nh1rx5d5em79r> (Noviembre, 2016).
 19. El Bayabuyiba. (2015). *22 de Abril: Día mundial de la Tierra*. Recuperado de: <https://elbayabuyiba.wordpress.com/2015/04/22/22-de-abril-dia-mundial-de-la-tierra-el-cobre-100-reciclable-metal-amigable-con-el-medio-ambiente/> (Marzo, 2017)
 20. Empresa eléctrica Quito S.A.(2017). *Pliego y Cargos tarifarios 2016-01-02-2016*. Recuperado de: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Pliego-y-Cargos-Tarifarios-2016-01-02-2016.pdf> .pp. 7-8. (Abril, 2017)

21. EPMAPS. (2017). Pliego tarifario EPMAPS. Recuperado de: https://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/pliego_tarifario_epmaps.pdf (Marzo, 2017)
22. FAO. (2016). *Análisis financiero y preparación de recomendaciones*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/008/a0323s/a0323s09.htm> (Marzo, 2017)
23. Garritz, A. y Chamizo, J.A. (2005). *Química Universitaria: Capítulo 8*. (1st. ed.). Delaware, Estados Unidos: Addison Wesley Iberoamericana.
24. General Cable Cablec. (2015). Catálogo de Productos Comerciales. Recuperado de: http://www.kywi.com.ec/files/GENERAL_CABLE_1.pdf (Diciembre, 2016).
25. Gerling, H. (2006). *Alrededor de las máquinas – herramienta*. (3era ed.) Barcelona. España: Reverté.
26. González, R. (2000). *Principios Básicos de Escalado*. Centro de Estudios de Combustión y Energía (CECYEN). Universidad de Matanzas
27. GTM. (2016). Ficha de datos de seguridad cloruro de sodio. Versión 4. Recuperado de: <http://www.gtm.net/images/industrial/c/CLORURO%20DE%20SODIO.pdf>. (Febrero, 2017)
28. Klein, C. y Hurlbut, C. S. (1999). *Manual of Mineralogy: Systematic Mineralogy*. (21st. ed.). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
29. Landázuri, E. y Muñoz, G. (2013). *Disolución de Sulfuros Metálicos Utilizando Peróxido de Hidrógeno como Agente Oxidante en Medio Ácido*. (Tesis de Grado presentada como requisito para la

obtención del título de Ingeniero Químico). Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador.

30. Mahajan, V., Misra, M., Zhong, K. y Fuerstenau, M.C. (2007). Enhanced leaching of copper from chalcopyrite in hydrogen peroxide-glycol system. *Minerals Engineering*, 20, 670-674, doi:10.1016/j.mineng.2006.12.016.
31. Méndez, J. (2010). *Diseño y Construcción del reactor de mezcla completo para la evaluación de inhibidores de corrosión en crudo, agua de formación y petróleo de Petroproducción - Lago Agrio*. (Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba – Ecuador.
32. Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2016). *Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS*. Recuperado de: <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/> (Junio, 2016).
33. Montero, R. (2012). *Diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna*. (Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
34. Muhammad, I., Rashid, A., Muhammad, R. y Shahnaz, P. (2008). A New Method for the Preparation of Copper Oxychloride (A Fungicide). *Journal of The Chemical Society Of Pakistan*, 30(3), 361-364.
35. Organización Mundial de la Salud (2002). *Análisis Sectorial de RSU en el Ecuador*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsars/e/fulltext/analisis/ecuador.pdf> (Junio, 2016)

36. Othmer, K. (1963). *Encyclopedia of chemical Technology*. Inter Science Publishers. New York, 271.
37. Pollard, A., Thomas, R. y Williams, P. (1989). Synthesis and stabilities of the basic copper(II) chlorides atacamite, paratacamite and botallackite. *Mineralogical Magazine*, 53, 557-563.
38. Procobre. (2016a). *El cobre 100% reciclable, además es un metal amigable con el medio ambiente*. Recuperado de: <http://procobre.org/es/noticias/el-cobre-100-reciclable-ademas-es-un-metal-amigable-con-el-medio-ambiente/> (Noviembre, 2016).
39. Procobre. (2016b). *Reciclabilidad y Sustentabilidad del Cobre*. Recuperado de: <http://procobre.org/es/beneficios-sociales/reciclabilidad/> (Junio, 2016).
40. Ramachandra, S. (2006). *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. (1ra edición). Amsterdam, Holanda, Editorial Elsevier.
41. Reyes, E. y Taco, I. (2009). *Administración de desechos metálicos en el Distrito Metropolitano de Quito*. (Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
42. Richardson, H.W. (2012). *Copper Compounds*, en: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
43. Sayán, R. y Francia, J. (2009). Método alternativo para la producción de oxiclورو de cobre. *Investigación aplicada e innovación*, 3(2). Recuperado de:

http://issuu.com/ceditec/docs/investigacion_aplicada/14--- SAYÁN FRANCIA (Agosto, 2016).

44. Scott, D.A. (1990). Bronze disease: a review of some chemical problems and the role of relative humidity. *Journal of the American Institute for Conservation*, 20(2), 193-206.
45. Shikarev, A. (1990). Pervamaisk P.O Khimprom. Pervomisk USSR. *Khim Tekhnol. Kiev* (2) Russ, p. 50.
46. Sinnott, R. K. (2005). *Coulson & Richardsons Chemical Engineering Design* (4ta. ed.). Oxford, Inglaterra: Elsevier Butterworth-Heinemann. [http://doi.org/10.1016/S1385-8497\(00\)00184-4](http://doi.org/10.1016/S1385-8497(00)00184-4)
47. Syngenta. (2011). *Ficha técnica Cuprocol*. Recuperado de: <http://www3.syngenta.com/country/es/sp/Documents/ficha-tecnica/ft-zzcuprocol.pdf> (Junio, 2016).
48. UNEP Chemicals. (2008). *Recuperación del cobre de cables por combustión lenta*. Recuperado de: http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/batbep_guidelines/UNEP-POPS-BATBEP-GUIDE-08-SP-17.Spanish.PDF (Diciembre, 2016).
49. Valenzuela, M. (2015). *Obtención del cobre Minerales sulfurados Minerales oxidados Procesos productivos diferentes*. Recuperado de: <http://slideplayer.es/slide/5473475/> (Noviembre, 2016).
50. Walas, S. M. (2009). *Chemical Process Equipment: Selection and Design* (3ra. ed). Oxford, Inglaterra: Elsevier Butterworth-Heinemann.
51. Yang, H., Liu, J. y Yang, J. (2011). Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 187, 393-400, doi:10.1016/j.jhazmat.2011.01.051.

ANEXOS

ANEXO I

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL COBRE RECICLADO

Ficha Técnica I.1

| | |
|--------------------|---|
| Número de ensayos: | 1 |
| Objetivo: | Determinar el tamaño promedio de los fragmentos de cobre reciclado reducidos mediante cizalla |
| Equipo: | Calibrador digital "Digimatic" Marca MITUTOYO |

Tabla AI.1. Mediciones de 20 fragmentos de alambre de cobre reciclado

| Medición | Largo (mm) |
|-----------------|-------------|
| 1 | 4,36 |
| 2 | 3,91 |
| 3 | 3,28 |
| 4 | 4,55 |
| 5 | 3,05 |
| 6 | 5,02 |
| 7 | 4,40 |
| 8 | 4,19 |
| 9 | 3,25 |
| 10 | 3,72 |
| 11 | 3,79 |
| 12 | 4,06 |
| 13 | 3,83 |
| 14 | 4,61 |
| 15 | 2,94 |
| 16 | 3,87 |
| 17 | 4,73 |
| 18 | 3,65 |
| 19 | 4,93 |
| 20 | 4,82 |
| Promedio | 4,05 |

Ficha Técnica I.2

| | |
|--------------------|---|
| Número de ensayos: | 2 |
| Objetivo: | Determinar la densidad aparente del cobre reciclado fragmentado que se utilizó como materia prima para la producción de oxiclورو de cobre |
| Equipo: | Balanza Mettler P11 |

Tabla AI.2. Datos del cálculo de la densidad aparente del cobre reciclado fragmentado mediante cizallamiento

| Peso probeta vacía (g) | 1° Peso 50 cm ³ de cobre reciclado (g) | 2° Peso 50 cm ³ de cobre reciclado (g) | Densidad aparente promedio (g/cm ³) |
|------------------------|---|---|---|
| 194,5 | 367,3 | 360,6 | 3,39 |

El ejemplo de cálculo de la densidad aparente se realiza con la Ecuación A1.1:

$$\delta_{\text{aparente}} = \frac{W_{\text{probeta+muestra}} - W_{\text{probeta}}}{V_{\text{probeta}}} \quad [\text{A1.1}]$$

$$\delta_{\text{aparente}} = \frac{367,3 - 194,5}{50} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\delta_{\text{aparente } 1} = 3,46 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\delta_{\text{aparente } 2} = 3,32 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\delta_{\text{aparente promedio}} = \frac{3,46 + 3,32}{2} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\delta_{\text{aparente promedio}} = 3,39 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

ANEXO II

**FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES DE
LIXIVIACIÓN DE COBRE RECICLADO CON ÁCIDO
CLORHÍDRICO A ESCALA LABORATORIO**

Ficha Técnica II.1

Ensayo: 1
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: Aire Razón: 4 NL/min

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C

Control de las condiciones de pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | pH | Eh (mV) |
|------------|------|---------|
| 0 | 0,11 | 357 |
| 1 | 0,08 | 363 |
| 2 | 0,08 | 362 |
| 4 | 0,10 | 359 |
| 8 | 0,07 | 359 |
| 24 | 0,09 | 356 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición (%) |
|--------------------------|--------------------------|--------------|-------|-----------------|
| | | (mg/L) | (g) | |
| Solución fuerte (mL) | 100 | 20 150,00 | 2,02 | 18,85 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 30 55,00 | 0,12 | 1,14 |
| Residuo sólido (g) | 8,58 | | 8,55 | 80,01 |
| | Alimentación recalculada | | 10,69 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 19,99 | | | |

Ficha Técnica II.2

Ensayo: 2
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: Aire Razón 4 NL/min

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 50 °C

Control de las condiciones de pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | pH | Eh (mV) |
|------------|------|---------|
| 0 | 0,18 | 361 |
| 1 | 0,12 | 358 |
| 2 | 0,07 | 366 |
| 4 | 0,08 | 364 |
| 8 | 0,07 | 369 |
| 24 | 0,04 | 365 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|--------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 85 | 66 900,00 | 5,69 | 51,39 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 8 090,00 | 0,32 | 2,92 |
| Residuo sólido (g) | 5,07 | | 5,05 | 45,68 |
| | Alimentación recalculada | | 11,06 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 54,32 | | | |

Ficha Técnica II.3

Ensayo: 3
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: Aire Razón 4 NL/min

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C

Control de las condiciones de pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | pH | Eh (mV) |
|------------|------|---------|
| 0 | 0,17 | 360 |
| 1 | 0,10 | 355 |
| 2 | 0,05 | 353 |
| 4 | 0,03 | 347 |
| 8 | 0,04 | 348 |
| 24 | 0,03 | 341 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición (%) |
|--------------------------|--------------------------|--------------|------|-----------------|
| | | (mg/L) | (g) | |
| Solución fuerte (mL) | 80 | 69 950,00 | 5,60 | 61,15 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 6 375,00 | 0,26 | 2,79 |
| Residuo sólido (g) | 3,31 | | 3,30 | 36,06 |
| | Alimentación recalculada | | 9,15 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 63,94 | | | |

Ficha Técnica II.4

Ensayo: 4
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixiviante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 5 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 1 | 0,09 | 370 |
| 1 | 1 | 0,22 | 436 |
| 2 | 1 | 0,19 | 434 |
| 3 | 1 | 0,20 | 430 |
| 4 | 1 | 0,16 | 427 |
| 5 | 0 | 0,15 | 421 |
| 6 | 0 | 0,17 | 408 |
| 24 | 0 | 0,11 | 401 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 105 | 91 050,00 | 9,56 | 84,88 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 1 940,00 | 0,08 | 0,69 |
| Residuo sólido (g) | 1,63 | | 1,62 | 14,43 |
| | Alimentación recalculada | | 11,26 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 85,57 | | | |

Ficha Técnica II.5

Ensayo: 5
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 10 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 2 | 0,09 | 370 |
| 1 | 2 | 0,21 | 442 |
| 2 | 2 | 0,16 | 441 |
| 3 | 2 | 0,15 | 438 |
| 4 | 2 | 0,15 | 435 |
| 5 | 0 | 0,13 | 426 |
| 6 | 0 | 0,11 | 419 |
| 24 | 0 | 0,13 | 408 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 110 | 85 850,00 | 9,44 | 83,71 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 6 330,00 | 0,25 | 2,24 |
| Residuo sólido (g) | 1,59 | | 1,59 | 14,05 |
| | Alimentación recalculada | | 11,28 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 85,95 | | | |

Ficha Técnica II.6

Ensayo: 6
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixiviante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 15 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 3 | 0,12 | 368 |
| 1 | 3 | 0,15 | 446 |
| 2 | 3 | 0,16 | 444 |
| 3 | 3 | 0,18 | 441 |
| 4 | 3 | 0,14 | 436 |
| 5 | 0 | 0,1 | 431 |
| 6 | 0 | 0,11 | 418 |
| 24 | 0 | 0,12 | 410 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición (%) |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-----------------|
| | | (mg/L) | (g) | |
| Solución fuerte (mL) | 115 | 84 550,00 | 9,72 | 84,33 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 9 020,00 | 0,36 | 3,13 |
| Residuo sólido (g) | 1,45 | | 1,45 | 12,54 |
| | Alimentación recalculada | | 11,53 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 87,46 | | | |

Ficha Técnica II.7

Ensayo: 7
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 20 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 4 | 0,08 | 370 |
| 1 | 4 | 0,1 | 456 |
| 2 | 4 | 0,12 | 450 |
| 3 | 4 | 0,11 | 452 |
| 4 | 4 | 0,08 | 445 |
| 5 | 0 | 0,07 | 438 |
| 6 | 0 | 0,07 | 432 |
| 24 | 0 | 0,06 | 416 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición (%) |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-----------------|
| | | (mg/L) | (g) | |
| Solución fuerte (mL) | 120 | 91 000,00 | 10,92 | 86,99 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 7 925,00 | 0,32 | 2,53 |
| Residuo sólido (g) | 1,32 | | 1,32 | 10,48 |
| | Alimentación recalculada | | 12,55 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 89,52 | | | |

Ficha Técnica II.8

Ensayo: 8
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 230 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 25 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 5 | 0,11 | 372 |
| 1 | 5 | 0,08 | 471 |
| 2 | 5 | 0,11 | 464 |
| 3 | 5 | 0,09 | 460 |
| 4 | 5 | 0,14 | 452 |
| 5 | 0 | 0,12 | 445 |
| 6 | 0 | 0,15 | 432 |
| 24 | 0 | 0,15 | 426 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 125 | 87 250,00 | 10,91 | 89,67 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 9 475,00 | 0,38 | 3,12 |
| Residuo sólido (g) | 0,88 | | 0,88 | 7,21 |
| | Alimentación recalculada | | 12,16 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 92,79 | | | |

Ficha Técnica II.9

Ensayo: 9
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 140 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 5 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 1 | 0,22 | 367 |
| 1 | 1 | 0,18 | 435 |
| 2 | 1 | 0,16 | 432 |
| 3 | 1 | 0,19 | 429 |
| 4 | 1 | 0,16 | 425 |
| 5 | 0 | 0,15 | 421 |
| 6 | 0 | 0,19 | 410 |
| 24 | 0 | 0,21 | 405 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición (%) |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-----------------|
| | | (mg/L) | (g) | |
| Solución fuerte (mL) | 105 | 90 000,00 | 9,45 | 80,38 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 8 560,00 | 0,34 | 2,91 |
| Residuo sólido (g) | 1,97 | | 1,96 | 16,71 |
| | Alimentación recalculada | | 11,76 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 83,29 | | | |

Ficha Técnica II.10

Ensayo: 10
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 185 g/L
 Porcentaje de sólidos: 9,1 %
 Masa muestra: 10 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 5 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 1 | 0,17 | 370 |
| 1 | 1 | 0,14 | 432 |
| 2 | 1 | 0,14 | 430 |
| 3 | 1 | 0,16 | 426 |
| 4 | 1 | 0,18 | 422 |
| 5 | 0 | 0,19 | 418 |
| 6 | 0 | 0,22 | 409 |
| 24 | 0 | 0,15 | 403 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 105 | 115 300,00 | 12,11 | 82,47 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 9 490,00 | 0,38 | 2,59 |
| Residuo sólido (g) | 2,2 | | 2,19 | 14,94 |
| | Alimentación recalculada | | 14,68 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 85,06 | | | |

Ficha Técnica II.11

Ensayo: 11
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 140 g/L
 Porcentaje de sólidos: 13,0 %
 Masa muestra: 15 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 5 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 1 | 0,18 | 367 |
| 1 | 1 | 0,15 | 436 |
| 2 | 1 | 0,19 | 430 |
| 3 | 1 | 0,21 | 428 |
| 4 | 1 | 0,20 | 425 |
| 5 | 0 | 0,16 | 420 |
| 6 | 0 | 0,18 | 411 |
| 24 | 0 | 0,15 | 401 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|--------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 105 | 118 100,00 | 12,40 | 71,02 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 1 655,00 | 0,07 | 0,38 |
| Residuo sólido (g) | 5,01 | | 4,99 | 28,60 |
| | Alimentación recalculada | | 17,46 | 100,00 |
| Recuperación (%): | 71,40 | | | |

Ficha Técnica II.12

Ensayo: 12
 Objetivo: Recuperación de cobre en solución
 Agente lixivante: HCl
 Agente oxidante: H₂O₂ Concentración: 50 % p/p

CONDICIONES LIXIVIACIÓN

Volumen solución: 100 mL
 Concentración: 140 g/L
 Porcentaje de sólidos: 16,7 %
 Masa muestra: 20 g
 Tiempo: 24 h
 Temperatura: 20 °C
 Adición total de H₂O₂: 5 mL

Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH y Eh en la lixiviación

| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|--|------|---------|
| 0 | 1 | 0,2 | 370 |
| 1 | 1 | 0,17 | 434 |
| 2 | 1 | 0,12 | 429 |
| 3 | 1 | 0,15 | 423 |
| 4 | 1 | 0,14 | 420 |
| 5 | 0 | 0,17 | 416 |
| 6 | 0 | 0,16 | 410 |
| 24 | 0 | 0,19 | 404 |

Balance metalúrgico de cobre en lixiviación

| Fracción | Cantidad | Contenido Cu | | Repartición |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|-------|-------------|
| | | (mg/L) | (g) | (%) |
| Solución fuerte (mL) | 105 | 148 950,00 | 15,64 | 68,02 |
| Solución de lavado (mL) | 40 | 10 330,00 | 0,41 | 1,80 |
| Residuo sólido (g) | 6,96 | | 6,94 | 30,18 |
| | Alimentación recalculada | | 22,99 | 100,00 |

Recuperación (%): 69,82

- *Determinación del tiempo de lixiviación de cobre reciclado en ácido clorhídrico a escala laboratorio:*

| Ficha Técnica II.13 | | | | | |
|---|---|-------------------------|---------|---------------------|---------------------|
| Ensayo: | 13 | | | | |
| Objetivo: | Recuperación de cobre en solución y determinación del tiempo de lixiviación | | | | |
| Agente lixivante: | HCl | | | | |
| Agente oxidante: | H ₂ O ₂ | Concentración: 50 % p/p | | | |
| CONDICIONES LIXIVIACIÓN | | | | | |
| Volumen solución: | 100 | mL | | | |
| Concentración: | 140 | g/L | | | |
| Porcentaje de sólidos: | 9,1 | % | | | |
| Masa muestra: | 10 | g | | | |
| Tiempo: | 24 | h | | | |
| Temperatura: | 20 | °C | | | |
| Adición total de H ₂ O ₂ : | 5 | mL | | | |
| Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH, Eh y balance metalúrgico en la lixiviación | | | | | |
| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) | Contenido Cu (mg/L) | Recuperación Cu (%) |
| 0 | 1 | 0,2 | 370 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0,17 | 434 | 13 450 | 13,45 |
| 2 | 1 | 0,12 | 429 | 18 300 | 18,3 |
| 3 | 1 | 0,15 | 423 | 18 300 | 18,67 |
| 4 | 1 | 0,14 | 421 | 49 350 | 50,83 |
| 5 | 0 | 0,14 | 420 | 61 050 | 64,10 |
| 8 | 0 | 0,17 | 416 | 78 600 | 82,53 |
| 20 | 0 | 0,16 | 410 | 80 600 | 84,63 |
| 24 | 0 | 0,19 | 409 | 83 650 | 87,83 |
| Recuperación final (%): | | | | | |
| 87,83 | | | | | |

ANEXO III

**FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES DE
PRECIPITACIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DEL
CLORURO CÚPRICO FORMADO EN LA LIXIVIACIÓN DE COBRE
RECICLADO CON ÁCIDO CLORHÍDRICO A ESCALA
LABORATORIO**

| Ficha Técnica III.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|------------|------------------------------|----|---------|---|---|------|-----|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|---|----|---|------|-----|
| Ensayo: | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Objetivo: | Precipitación de oxiclорuro de cobre | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Agente neutralizante: | Ca(OH) ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CONDICIONES NEUTRALIZACIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Volumen solución lixiviada: | 105 | | mL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Concentración solución NaOH: | 2 | | M | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tiempo: | 2 | | h | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura: | 20 | | °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Control de la adición de solución de NaOH, pH y Eh en la neutralización | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 0 auto;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Tiempo (h)</th> <th style="width: 20%;">Masa Ca(OH)₂ (g)</th> <th style="width: 15%;">pH</th> <th style="width: 15%;">Eh (mV)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">0,17</td><td style="text-align: center;">409</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">10</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">0,55</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">20</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">0,86</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">30</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1,09</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">40</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">1,98</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">50</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3,24</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">60</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">3,43</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">70</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">4,26</td><td style="text-align: center;">-</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">80</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">5,85</td><td style="text-align: center;">226</td></tr> </tbody> </table> | | | | | | Tiempo (h) | Masa Ca(OH) ₂ (g) | pH | Eh (mV) | 0 | 5 | 0,17 | 409 | 10 | 4 | 0,55 | - | 20 | 4 | 0,86 | - | 30 | 3 | 1,09 | - | 40 | 3 | 1,98 | - | 50 | 3 | 3,24 | - | 60 | 3 | 3,43 | - | 70 | 3 | 4,26 | - | 80 | 2 | 5,85 | 226 |
| Tiempo (h) | Masa Ca(OH) ₂ (g) | pH | Eh (mV) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 5 | 0,17 | 409 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 4 | 0,55 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 4 | 0,86 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 3 | 1,09 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 3 | 1,98 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 3 | 3,24 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 3 | 3,43 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | 3 | 4,26 | - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 2 | 5,85 | 226 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gasto total solución Ca(OH) ₂ : | 30 | | g | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Parámetros de la neutralización | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cu en solución (g) | Oxicloruro de cobre teórico (g) | Cantidad de precipitado (g) | Pureza producto DRX (%) | Oxicloruro de cobre obtenido (g) | Rendimiento neutralización (%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8,78 | 14,77 | 25,00 | 48,00 | 12,01 | 81,25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Ficha Técnica III.2

Ensayo: 1
 Objetivo: Precipitación de oxiclورو de cobre
 Agente neutralizante: NaOH

CONDICIONES NEUTRALIZACIÓN

Volumen solución lixiviada: 105 mL
 Concentración solución NaOH: 2 M
 Tiempo: 2 h
 Temperatura: 20 °C

Control de la adición de solución de NaOH, pH y Eh en la neutralización

| Tiempo (h) | Volumen NaOH (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|-------------------|------|---------|
| 0 | 20 | 0,21 | 405 |
| 5 | 20 | 0,20 | 404 |
| 10 | 20 | 0,24 | - |
| 20 | 20 | 0,30 | - |
| 30 | 20 | 0,59 | - |
| 40 | 20 | 0,78 | - |
| 50 | 20 | 1,08 | - |
| 60 | 20 | 2,37 | - |
| 70 | 20 | 3,2 | 328 |
| 80 | 20 | 3,45 | - |
| 90 | 10 | 3,72 | - |
| 100 | 10 | 3,90 | - |
| 110 | 5 | 4,44 | - |
| 120 | 5 | 6,6 | 195 |

Gasto total solución NaOH: 230 mL
 Gasto NaOH: 18,77 G

Parámetros de la neutralización

| Cu en solución (g) | Oxicloruro de cobre teórico (g) | Cantidad de precipitado (g) | Pureza producto DRX (%) | Oxicloruro de cobre obtenido (g) | Rendimiento neutralización (%) |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 8,33 | 14,01 | 15,27 | 82,00 | 12,52 | 89,40 |

Ficha Técnica II.10

Ensayo: 2
 Objetivo: Precipitación de oxiclورو de cobre
 Agente neutralizante: NaOH

CONDICIONES NEUTRALIZACIÓN

Volumen solución lixiviada: 105 mL
 Concentración solución NaOH: 2 M
 Tiempo: 2 H
 Temperatura: 20 °C

Control de la adición de solución de NaOH, pH y Eh en la neutralización

| Tiempo (h) | Volumen NaOH (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|-------------------|------|---------|
| 0 | 20 | 0,15 | 403 |
| 5 | 20 | 0,16 | - |
| 10 | 40 | 0,20 | - |
| 15 | 40 | 0,25 | - |
| 20 | 40 | 0,27 | - |
| 25 | 40 | 0,28 | - |
| 30 | 40 | 0,36 | - |
| 40 | 20 | 0,78 | - |
| 50 | 20 | 0,96 | - |
| 60 | 20 | 1,32 | - |
| 70 | 20 | 2,49 | - |
| 80 | 20 | 3,61 | - |
| 90 | 10 | 3,98 | - |
| 100 | 10 | 4,11 | - |
| 110 | 5 | 5,09 | - |
| 120 | 5 | 6,40 | 201 |

Gasto total solución NaOH: 370 mL
 Gasto NaOH: 30,19 G

Parámetros de la neutralización

| Cu en solución (g) | Oxiclورو de cobre teórico (g) | Cantidad de precipitado (g) | Pureza producto DRX (%) | Oxiclورو de cobre obtenido (g) | Rendimiento neutralización (%) |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 8,51 | 14,30 | 17,36 | 74,00 | 12,85 | 89,81 |

Ficha Técnica II.10

Ensayo: 3
 Objetivo: Precipitación de oxiclورو de cobre
 Agente neutralizante: NaOH

CONDICIONES NEUTRALIZACIÓN

Volumen solución lixiviada: 105 mL
 Concentración solución NaOH: 2 M
 Tiempo: 2 H
 Temperatura: 20 °C

Control de la adición de solución de NaOH, pH y Eh en la neutralización

| Tiempo (h) | Volumen NaOH (mL) | pH | Eh (mV) |
|------------|-------------------|------|---------|
| 0 | 20 | 0,11 | 401 |
| 5 | 40 | 0,18 | - |
| 10 | 40 | 0,24 | - |
| 15 | 40 | 0,26 | - |
| 20 | 40 | 0,3 | - |
| 25 | 40 | 0,47 | - |
| 30 | 40 | 0,59 | - |
| 35 | 40 | 0,68 | - |
| 40 | 40 | 0,78 | - |
| 50 | 20 | 1,08 | - |
| 60 | 20 | 2,37 | - |
| 70 | 20 | 3,2 | - |
| 80 | 20 | 3,45 | - |
| 90 | 10 | 3,72 | - |
| 100 | 10 | 3,9 | - |
| 110 | 10 | 4,44 | - |
| 120 | 10 | 5,16 | - |
| 125 | 5 | 5,93 | - |
| 130 | 5 | 6,83 | 197 |

Gasto total solución NaOH: 470 mL
 Gasto NaOH: 38,35 G

Parámetros de la neutralización

| Cu en solución (g) | Oxicloruro de cobre teórico (g) | Cantidad de precipitado (g) | Pureza producto DRX (%) | Oxicloruro de cobre obtenido (g) | Rendimiento neutralización (%) |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 8,56 | 14,39 | 17,24 | 75,00 | 12,93 | 89,86 |

ANEXO IV

CÁLCULO DEL FACTOR DE ESCALADO GEOMÉTRICO Y DEL NÚMERO ADIMENSIONAL DE REYNOLDS

Anexo IV.1. Escalado Volumétrico

Para mantener una semejanza geométrica entre los experimentos a escala laboratorio y piloto, se relacionaron las dimensiones lineales que conforman el volumen del sistema (altura y diámetro) mediante un factor de escala que corresponda al mismo factor resultante de la relación entre la cantidad de cobre tratado a nivel piloto y a nivel laboratorio.

Para mantener una semejanza geométrica entre los experimentos laboratorio y piloto, en primer lugar se determinó un factor de escalado (f_e) resultante de la relación entre la cantidad de cobre tratado a nivel piloto y a nivel laboratorio como se muestra en la Ecuación A.IV.1.

$$f_e = \frac{mCu_{piloto}}{mCu_{lab}} \quad [A.IV.1]$$

$$f_e = \frac{4\,000\,g}{10\,g}$$

$$f_e = 400$$

Posteriormente se estableció el mismo factor para la relación entre los volúmenes de ambos experimentos mediante la Ecuación A.IV.2 y, finalmente, se determinaron las dimensiones lineales de la lixiviación a nivel piloto (altura y diámetro).

$$f_e = \frac{V_{piloto}}{V_{lab}} \quad [A.IV.2]$$

$$V_{piloto} = V_{lab} \cdot f_e$$

Para el volumen de solución de ácido clorhídrico:

$$V_{piloto} = 100 \text{ mL} \cdot 400$$

$$V_{piloto} = 40 \text{ L}$$

Para el volumen del tanque de lixiviación:

$$V_{piloto} = 250 \text{ mL} \cdot 400$$

$$V_{piloto} = 100 \text{ L}$$

$$V_{piloto} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4}$$

Se dispone de un tanque de 40 cm de diámetro, por lo tanto:

$$h = \frac{4\,000 \cdot 100}{\pi \cdot 40^2}$$

$$h = 80 \text{ cm}$$

Anexo IV.2. Determinación del flujo de agitación

En primera instancia se calculó el Número Adimensional de Reynolds del experimento a nivel laboratorio mediante la ecuación IV.2.1

$$Re = \frac{N \cdot D^2 \cdot d}{u} \quad \text{[IV.2.1]}$$

Donde:

N = Velocidad de agitación (rps)

D = Diámetro del impulsor (m)

d = Densidad de la solución $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

u = Viscosidad (Pa. s)

En el caso del experimento a nivel laboratorio, se tuvo una agitación magnética de 500 rpm, por lo tanto el diámetro del impulsor se ve reemplazado por la longitud del agitador magnético que corresponde a 4 cm (Méndez, 2010, p. 105)

$$Re_{lab} = \frac{500 \text{ rpm} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \left(4 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^2 * 1060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0012 \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{lab} = 11\,777,78$$

De la misma manera se calculó el Número Adimensional de Reynolds del experimento a nivel piloto, pero primero se determinó la velocidad de giro del agitador (eje motriz) a partir de la velocidad de giro del motor (eje transmisor) como se indica en la Ecuación IV.2.2 (Gerling, 2006, pp. 12 y 13).

$$N_1 * D_1 = N_2 * D_2 \quad \text{[IV.2.2]}$$

:

Donde

N_1 = Velocidad de rotación motor (rpm)

D_1 = Diámetro del motor (m)

N_2 = Velocidad de rotación motor (rpm)

D_2 = Diámetro del motor (m)

$$N_2 = \frac{1\,720 \text{ rpm} * 12 \text{ cm}}{34 \text{ cm}}$$

$$N_2 = 607,1 \text{ rpm}$$

Entonces, aplicando la Ecuación IV.2.1 nuevamente:

$$Re_{piloto} = \frac{607,1 \text{ rpm} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \left(12 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^2 * 1060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0012 \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{piloto} = 128\,696,47$$

ANEXO V

**FICHAS TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN Y NEUTRALIZACIÓN PARA
LA OBTENCIÓN DE OXICLORURO DE COBRE A PARTIR DE
COBRE RECICLADO A ESCALA PILOTO**

| Ficha Técnica V.1 | | | | | |
|--|--|----------------|----------|---------------------|---------------------|
| Ensayo: | 1 | | | | |
| Objetivo: | Recuperación de cobre en solución | | | | |
| Agente lixivante: | HCl | | | | |
| Agente oxidante: | H ₂ O ₂ | Concentración: | 50 % p/p | | |
| CONDICIONES LIXIVIACIÓN | | | | | |
| Volumen solución: | 105 | mL | | | |
| Concentración: | 140 | g/L | | | |
| Porcentaje de sólidos: | 9,1 | % | | | |
| Masa muestra: | 4 000 | g | | | |
| Tiempo: | 24 | h | | | |
| Temperatura: | 20 | °C | | | |
| Adición total de H ₂ O ₂ : | 2 000 | mL | | | |
| Control de la adición de peróxido de hidrógeno, pH, Eh y balance metalúrgico de cobre en la lixiviación a escala piloto | | | | | |
| Tiempo (h) | Volumen H ₂ O ₂ (mL) | pH | Eh (mV) | Contenido Cu (mg/L) | Recuperación Cu (%) |
| 0 | 400 | 0,2 | 405 | 165 | 0,17 |
| 1 | 400 | 0,18 | 433 | 27 750 | 27,75 |
| 2 | 400 | 0,12 | 429 | 52 150 | 52,15 |
| 3 | 400 | 0,14 | 428 | 71 700 | 71,70 |
| 4 | 400 | 0,15 | 420 | 71 800 | 71,80 |
| 5 | 0 | 0,17 | 409 | 72 650 | 72,65 |
| 6 | 0 | 0,16 | 408 | 72 350 | 72,35 |
| 8 | 0 | 0,15 | 400 | 82 950 | 82,95 |
| 24 | 0 | 0,14 | 402 | 87 350 | 87,35 |
| Recuperación final (%): 87,35 | | | | | |

Ficha Técnica V.2

Ensayo: 1
 Objetivo: Neutralización de la solución y precipitación de oxiclورو de cobre
 Agente neutralizante: NaOH

CONDICIONES NEUTRALIZACIÓN

Volumen solución lixiviada: 105 mL
 Concentración NaOH: 98 %
 Tiempo: 2 h
 Temperatura: 20 °C

Control de la adición de NaOH, pH y Eh en la neutralización

| Tiempo (h) | Masa NaOH (g) | pH | Eh (mV) |
|------------|---------------|------|---------|
| 0 | 1 000 | 0,14 | 402 |
| 20 | 1 000 | 0,18 | - |
| 40 | 1 000 | 0,17 | - |
| 60 | 1 000 | 0,27 | - |
| 70 | 1 000 | 0,31 | - |
| 80 | 500 | 0,57 | - |
| 90 | 500 | 0,89 | - |
| 100 | 500 | 1,65 | - |
| 110 | 500 | 3,20 | - |
| 120 | 500 | 3,45 | - |
| 130 | 500 | 4,38 | - |
| 140 | 500 | 7,39 | 190 |

Gasto total NaOH: 8 500 G

Parámetros de la neutralización

| Cu en solución (g) | Oxiclورو de cobre teórico (g) | Cantidad de precipitado (g) | Pureza producto DRX (%) | Oxiclورو de cobre obtenido (g) | Rendimiento neutralización (%) |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 3 318,00 | 5 579,47 | 5 197,66 | 97,00 | 5 041,73 | 90,36 |

ANEXO VI

BALANCE DE MASA EXPERIMENTO PILOTO

El balance de masa fue realizado para cada operación que constituye el proceso de producción de oxiclорuro de cobre llevado a cabo a escala piloto.

LIXIVIACIÓN DEL COBRE RECICLADO

El cobre reciclado previamente reducido de tamaño ingresó a un proceso de lixiviación en ácido clorhídrico con peróxido de hidrógeno como catalizador.

Según los experimentos realizados a nivel laboratorio se obtuvieron los mejores resultados con las siguientes condiciones de lixiviación: 9,1 % de sólidos, HCl de 140 g/L, 5 mL de peróxido de hidrógeno (que equivale al 4,76 % en solución lixivante), 20 °C y 500 rpm durante 24 horas.

La cantidad de cobre reciclado a lixiviarse en el experimento piloto fue de 4 000 g, alrededor de este valor se calcularon las cantidades de reactivos y se llevó a cabo el ensayo. La densidad considerada para los reactivos líquidos como el ácido clorhídrico y el peróxido de hidrógeno fue de 1 000 kg/m³. Para ajustar el 9,1 % de sólidos en solución, el volumen de ácido clorhídrico se calculó con la Ecuación AVI.1.

$$\% \text{ sólidos} = \frac{m_{\text{sólidos}}}{m_{\text{sólidos}} + m_{\text{solución}}} \quad [\text{AVI.1}]$$

$$9,1 \% = \frac{4\ 000\ \text{g}}{4\ 000\ \text{g} + m_{\text{solución HCl}}}$$

$$m_{\text{solución HCl}} = 40\ 000\ \text{g}$$

$$V_{\text{solución HCl}} = \frac{m_{\text{solución HCl}}}{d_{\text{solución HCl}}}$$

$$V_{\text{solución HCl}} = 40\ 000\ \text{g solución HCl} \cdot \frac{1\ \text{mL}}{1\ \text{g}}$$

$$V_{\text{solución HCl}} = 40\,000 \text{ mL}$$

A continuación se determinó el volumen correspondiente al 4,76 % de solución de peróxido de hidrógeno en la solución lixiviante mediante la Ecuación AVI.2.

$$\% \text{H}_2\text{O}_2 \text{ en sol. lixiviante} = \frac{V_{\text{solución H}_2\text{O}_2}}{V_{\text{solución H}_2\text{O}_2} + V_{\text{solución HCl}}} \quad [\text{AVI.2}]$$

$$4,76 = \frac{V_{\text{solución H}_2\text{O}_2}}{V_{\text{solución H}_2\text{O}_2} + 40\,000 \text{ mL}}$$

$$V_{\text{solución H}_2\text{O}_2} = 2\,000 \text{ mL}$$

$$m_{\text{solución H}_2\text{O}_2} = V_{\text{solución H}_2\text{O}_2} * d_{\text{solución H}_2\text{O}_2}$$

$$m_{\text{solución H}_2\text{O}_2} = 2\,000 \text{ g solución H}_2\text{O}_2$$

Por lo tanto, la masa total que ingresa a la lixiviación está constituida por el cobre reciclado, la solución de ácido clorhídrico y la solución de peróxido de hidrógeno.

$$m_{\text{total entra lix.}} = m_{\text{Cu entra}} + m_{\text{solución HCl}} + m_{\text{solución H}_2\text{O}_2}$$

$$m_{\text{total entra lix.}} = 4\,000 \text{ g} + 40\,000 \text{ g} + 2\,000 \text{ g}$$

$$m_{\text{total entra lix.}} = 46\,000 \text{ g}$$

Para conocer la composición de la corriente de salida de la operación de lixiviación, que corresponde a la pulpa lixiviada, se utilizaron los resultados de los análisis de absorción atómica detallados en la Ficha Técnica III.13 y la estequiometría de la reacción representada en la Ecuación AVI.3.



El cobre en solución corresponde al cobre en forma de cloruro cúprico. Según los análisis de absorción atómica, la recuperación de cobre fue de 83,95 %

correspondiente a las 8 horas de lixiviación, entonces la masa de cloruro cúprico se calcula a continuación:

$$m_{\text{Cu lixiviado}} = 4\,000 \text{ g Cu} \cdot \frac{83,95}{100,00}$$

$$m_{\text{Cu lixiviado}} = 3\,318 \text{ g}$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \text{ pulpa}} = 3\,318 \text{ g Cu} \cdot \frac{1 \text{ mol Cu}}{63,55 \text{ g Cu}} \cdot \frac{1 \text{ mol CuCl}_2}{1 \text{ mol Cu}} \cdot \frac{134,45 \text{ g CuCl}_2}{1 \text{ mol CuCl}_2}$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \text{ pulpa}} = 7\,019,75 \text{ g CuCl}_2$$

Además, en la pulpa lixiviada se encuentra también, cobre metálico que no reaccionó:

$$m_{\text{Cu no lixiviado}} = m_{\text{Cu entra}} - m_{\text{Cu lixiviado}}$$

$$m_{\text{Cu no lixiviado}} = 682 \text{ g Cu}$$

El mismo cálculo se realiza para el ácido clorhídrico de 140 g/L y el peróxido de hidrógeno de 500 g/L, este último se consume por completo en la reacción.

$$m_{\text{HCl pulpa}} = m_{\text{HCl entra}} - m_{\text{HCl Rx}}$$

$$m_{\text{HCl entra}} = 40\,000 \text{ mL} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1\,000 \text{ mL}} \cdot 140 \frac{\text{g}}{\text{L}}$$

$$m_{\text{HCl entra}} = 5\,600 \text{ g HCl}$$

$$m_{\text{HCl Rx}} = 3\,318 \text{ g Cu} \cdot \frac{1 \text{ mol Cu}}{63,55 \text{ g Cu}} \cdot \frac{2 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol Cu}} \cdot \frac{36,5 \text{ g HCl}}{1 \text{ mol HCl}}$$

$$m_{\text{HCl Rx}} = 3\,811,39 \text{ g HCl}$$

$$m_{HCl\ pulpa} = 1\ 788,61\ g\ HCl$$

La cantidad de agua presente en la pulpa de lixiviación se determina por la diferencia entre la masa total de salida y la de cada componente:

$$m_{agua\ pulpa} = m_{total\ pulpa} - m_{CuCl_2\ pulpa} - m_{HCl\ pulpa} - m_{Cu\ no\ lixiviado}$$

$$m_{agua\ pulpa} = 46\ 000\ g - 7\ 019,75\ g - 1\ 788,61\ g - 682\ g$$

$$m_{agua\ pulpa} = 36\ 509,64\ g\ H_2O$$

De esta manera, se encuentra caracterizada la corriente de salida de la lixiviación. A continuación se muestra un ejemplo de cálculo del cálculo de los porcentajes que constituyen la pulpa lixiviada, el cual se realiza para cada componente de la pulpa como se muestra en la Figura AVI.1.

$$\% CuCl_2\ pulpa = \frac{m_{CuCl_2\ pulpa}}{m_{total\ pulpa}} * 100$$

$$\% CuCl_2\ pulpa = \frac{7\ 019,75\ g}{46\ 000\ g} * 100 = 15,26\ \%$$

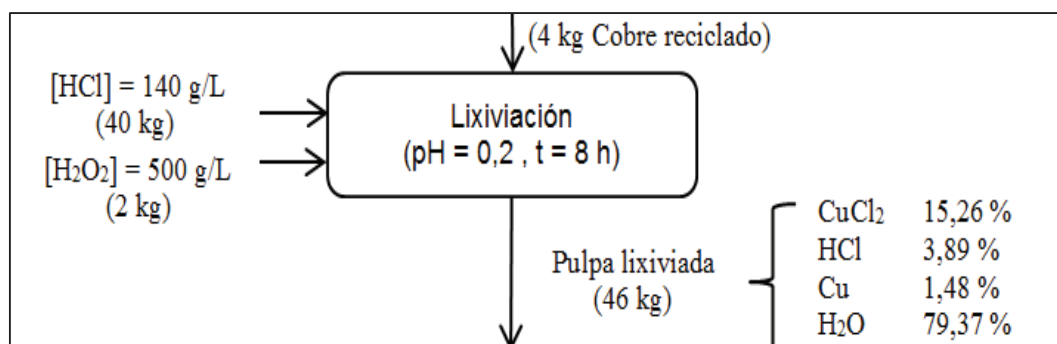


Figura AVI.1. Esquema del proceso de lixiviación

FILTRACIÓN RELAVE DE LIXIVIACIÓN

En el balance de masa de la filtración se asumió un retención del 100% del sólido del relave de cobre y que toda la solución cargada de cobre pasó por el filtro prensa como se muestra en la Figura AVI.2. Por tanto la masa de solución se calcula según la Ecuación AVI.4.

$$m_{\text{solución fuerte}} = m_{\text{pulpa lixiviada}} - m_{\text{relave}} \quad [\text{AVI.4}]$$

$$m_{\text{relave}} = m_{\text{Cu no lixiviado}}$$

$$m_{\text{solución fuerte}} = 46\,000\text{ g} - 682\text{ g}$$

$$m_{\text{solución fuerte}} = 45\,318\text{ g}$$

$$\% \text{CuCl}_2 \text{ solución fuerte} = \frac{7\,019,75\text{ g}}{45\,318\text{ g}} * 100 = 15,49\%$$

$$\% \text{HCl solución fuerte} = \frac{1\,788,61\text{ g}}{45\,318\text{ g}} * 100 = 3,94\%$$

$$\% \text{H}_2\text{O solución fuerte} = \frac{36\,509\text{ g}}{45\,318\text{ g}} * 100 = 80,56\%$$

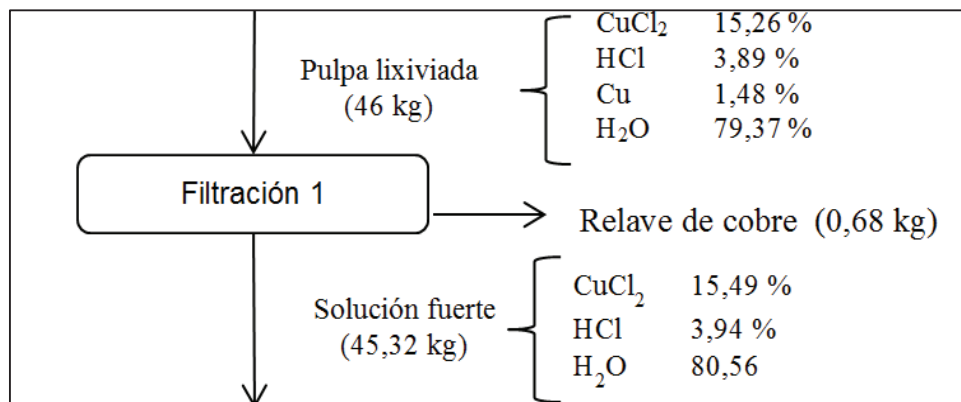
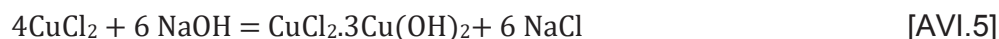


Figura AVI.2. Esquema del proceso de la filtración posterior a la lixiviación

PRECIPITACIÓN DE OXICLORURO DE COBRE CON HIDRÓXIDO DE SODIO

Una vez filtrada, la solución fuerte procedente de lixiviación se neutralizó con hidróxido de sodio de 98 % de pureza hasta un pH de 7. La cantidad introducida de hidróxido de sodio fue de 8,5 kg de este reactivo, con el cual sucedió la reacción de precipitación de oxiclорuro de cobre y la reacción de neutralización del ácido clorhídrico que no se consumió en la lixiviación. Las reacciones que se dan en la precipitación se muestran en las Ecuaciones AVI.5 y AVI.6.



$$m_{\text{NaOH}} = 8\,500 \text{ g} \cdot \frac{98}{100}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 8\,330 \text{ g NaOH}$$

En esta parte, se procedió a realizar el balance de masa con base en la caracterización del producto final. La masa del producto resultante del secado es 5 917,66 g y está compuesto de 97 % de oxiclорuro de cobre ($\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$) según los resultados de los análisis de difracción de rayos X. La cantidad de oxiclорuro de cobre en el producto se utilizó para realizar los cálculos estequiométricos de las diferentes especies

$$m_{\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2} = m_{\text{producto final}} \cdot \frac{97}{100}$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2} = 5\,917,66 \cdot \frac{97}{100}$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2} = 5\,041,73 \text{ g de oxiclорuro de cobre.}$$

Para la pulpa neutralizada se calcula la composición mediante la estequiometría de las Ecuaciones AVI.5 y AVI.6, tomando en cuenta que el hidróxido de sodio se

consume en ambas reacciones y el cloruro de sodio se produce también en ambas.

$$m_{NaOH\ pulpa} = m_{NaOH\ entra} - m_{NaOH\ RX1} - m_{NaOH\ RX2}$$

$$m_{NaOH\ RX1} = 5041,73\ g\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2 \cdot \frac{1\ mol\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2}{427,1\ g\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2} \cdot \frac{6\ mol\ NaOH}{1\ mol\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2} \cdot \frac{40\ g\ NaOH}{1\ mol\ NaOH} = 2\ 833,1\ g\ NaOH$$

Y con la masa de ácido clorhídrico que no reaccionó se calcula:

$$m_{NaOH\ RX2} = 1\ 788,61\ g\ HCl \cdot \frac{1\ mol\ HCl}{36,5\ g\ HCl} \cdot \frac{1\ mol\ NaOH}{1\ mol\ HCl} \cdot \frac{40\ g\ NaOH}{1\ mol\ NaOH} = 1\ 960,12\ g$$

$$m_{NaOH\ pulpa} = 8\ 330 - 2\ 833,1 - 1\ 960,12$$

$$m_{NaOH\ pulpa} = 3\ 536,79\ g$$

Cálculos semejantes se realizan para el cloruro de sodio

$$m_{NaCl\ pulpa} = m_{NaCl\ RX1} + m_{NaCl\ RX2}$$

$$m_{NaCl\ RX1} = 5041,73\ g\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2 \cdot \frac{1\ mol\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2}{427,1\ g\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2} \cdot \frac{6\ mol\ NaCl}{1\ mol\ CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2} \cdot \frac{58,44\ g\ NaCl}{1\ mol\ NaCl} = 4\ 139,15\ g\ NaCl$$

$$m_{NaCl\ RX2} = 1\ 788,61\ g\ HCl \cdot \frac{1\ mol\ HCl}{36,5\ g\ HCl} \cdot \frac{1\ mol\ NaOH}{1\ mol\ HCl} \cdot \frac{58,44\ g\ NaCl}{1\ mol\ NaCl} = 2\ 863,73\ g$$

$$m_{NaCl\ pulpa} = 4\ 139,15 + 2\ 863,73$$

$$m_{NaCl\ pulpa} = 7\ 002,88\ g$$

Además en la pulpa neutralizada se encuentra cloruro de cobre que no reaccionó para formar oxiclорuro de cobre:

$$m_{\text{CuCl}_2 \text{ RX}} = 5\,041,73 \text{ g-CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2 \cdot \frac{1 \text{ mol-CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2}{427,1 \text{ g-CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2} \cdot \frac{4 \text{ mol-CuCl}_2}{1 \text{ mol-CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2} \cdot \frac{134,45 \text{ g-CuCl}_2}{1 \text{ mol-CuCl}_2} = 6\,348,5 \text{ g-CuCl}_2$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \text{ pulpa}} = m_{\text{CuCl}_2 \text{ No RX}} = m_{\text{CuCl}_2 \text{ entra}} - m_{\text{CuCl}_2 \text{ RX}}$$

$$m_{\text{CuCl}_2 \text{ pulpa}} = 671,25 \text{ g}$$

Es así que la composición de la pulpa neutralizada se muestra en la Figura AVI.3.

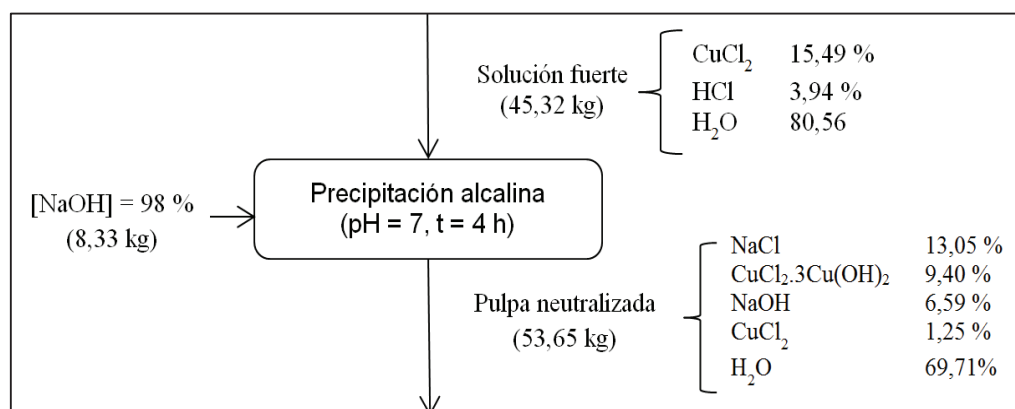


Figura AVI.3. Esquema del proceso de precipitación alcalina

FILTRACIÓN Y LAVADO DE LA PULPA NEUTRALIZADA

Al igual que en la sección anterior, se asumió que solamente el sólido es retenido en el filtro prensa y todo el líquido pasa. En esta etapa donde se elimina el agua del producto, también se eliminan las impurezas solubles o parte de ellas. Para conocer la composición del precipitado, se pesó antes y después de la siguiente operación, es decir, el lavado, y así se determinó la cantidad de impurezas solubles presentes, que en este caso corresponde a cloruro de sodio.

$$m_{\text{NaCl residual}} = m_{\text{producto lavado}} - m_{\text{precipitado}}$$

$$m_{\text{NaCl residual}} = 7\,428,14 - 5\,197,67 \text{ g}$$

$$m_{\text{NaCl residual}} = 2\,230,47 \text{ g}$$

$$\% NaCl = \frac{2\,230,47\text{ g}}{7\,428,14\text{ g}} * 100 = 30,03\%$$

$$\% CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2 = \frac{5\,197,67\text{ g}}{7\,428,14\text{ g}} * 100 = 69,97\%$$

Como se puede observar en la Figura AVI.4, una parte significativa del cloruro de sodio presente en la pulpa neutralizada, se quedó en la solución clarificada del filtrado junto con los demás componentes solubles:

$$m_{NaCl\text{ disuelto}} = m_{NaCl\text{ pulpa}} - m_{NaCl\text{ residual}}$$

$$m_{NaCl\text{ disuelto}} = 7\,002,88 - 2\,230,47 = 4\,772,41\text{ g}$$

$$\% NaCl = \frac{4\,772,41\text{ g}}{46\,375,8\text{ g}} * 100 = 10,29\%$$

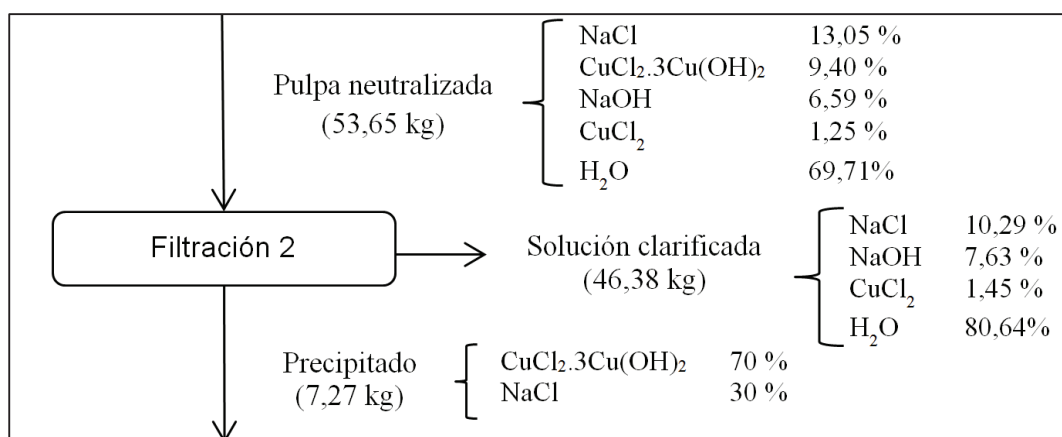


Figura AVI.4. Esquema del proceso de la filtración posterior a la precipitación

En el lavado, se mezcló con agitación constante el precipitado con 10 L de agua con la intención de solubilizar el cloruro de sodio remanente en el producto como se observa en la Figura AVI.5, se formó una pulpa que posteriormente fue separada por medio de una nueva filtración.

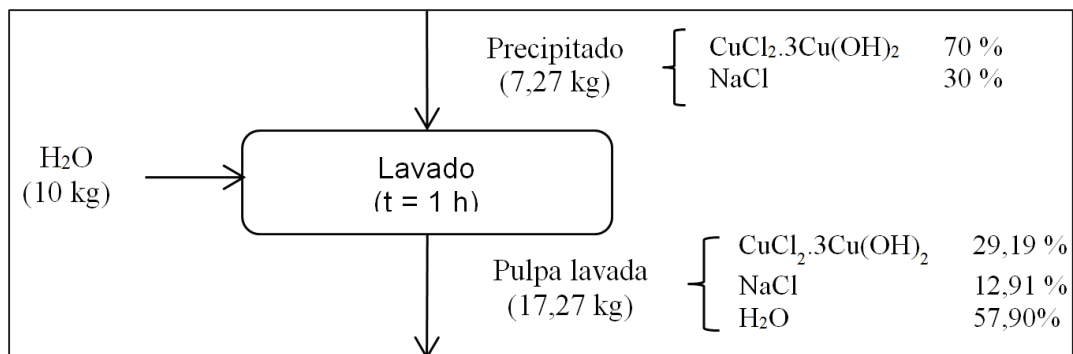


Figura AVI.5. Esquema del proceso de lavado

FILTRACIÓN Y SECADO DE LA PULPA LAVADA

Para conocer la composición de la torta de filtrado se realiza el balance de masa primero en el secado. De esta manera, se pesó el producto antes y después del secado a 110 °C durante 24 horas para conocer el porcentaje de humedad previo a esta operación.

$$m_{H_2O \text{ torta filtrada}} = m_{\text{torta filtrada}} - m_{\text{producto seco}}$$

$$m_{H_2O \text{ torta filtrada}} = 5\,487,62 - 5\,197,67$$

$$m_{H_2O \text{ torta filtrada}} = 289,95 \text{ g}$$

$$\% H_2O = \frac{289,95 \text{ g}}{5\,487,62 \text{ g}} * 100 = 5,28$$

Entonces, el balance de masa del filtrado y el secado se muestran en la Figura AVI.6, donde el porcentaje restante de 3 % corresponden a impurezas insolubles que se quedan en el producto con base en los resultados de DRX.

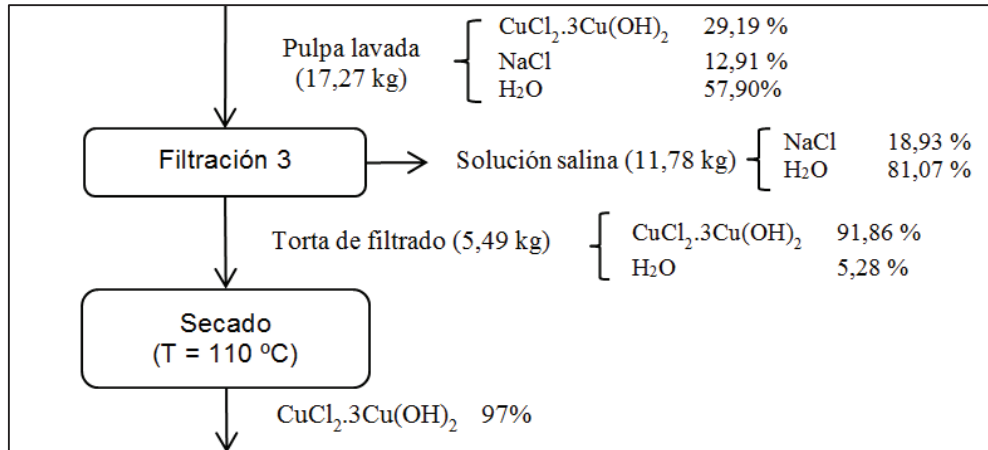


Figura AVI.6. Esquema del proceso de filtración y secado final

ANEXO VII

DISEÑO DE TANQUES AGITADOS

Ejemplos de cálculo para la planta de capacidad de 1 t/mes

El tanque agitado para la neutralización se diseña de la misma manera que el tanque de lixiviación por lo cual no se muestran esos cálculos. Del mismo modo se diseña el tanque de lavado, la diferencia solamente radica en el material utilizado que será acero al carbono debido a las condiciones no tan severas ya que solo se manejará agua con sólidos.

Tanque de lixiviación

El volumen de la pulpa que ingresa al proceso de lixiviación es la suma del volumen que ocupa el cobre reciclado más el volumen de la solución lixivante y del peróxido de hidrogeno.

$$V_1 = \frac{m_{\text{cobre}}}{\rho_{\text{cobre}}} + V_{\text{HCl}} + V_{\text{H}_2\text{O}_2} \quad [\text{AVII.1}]$$

$$V_1 = \frac{21,94 + 4,51 \text{ kg}}{8900 \text{ kg/m}^3} + 0,264 \text{ m}^3 + 0,0132 \text{ m}^3 = 0,28 \text{ m}^3$$

El volumen de pulpa se multiplica por un factor (f_{sd}) de 1,4 para sobredimensionar el volumen del cilindro del tanque en un 40%.

$$V_s = f_{\text{SD}} \cdot V_1 = 1,4 \cdot 0,28 \text{ m}^3 = 0,393 \text{ m}^3 \quad [\text{AVII.2}]$$

Por criterio de diseño la relación altura diámetro del tanque es 1,5; por lo tanto, la altura y el diámetro del tanque serían:

$$\frac{H_s}{D_i} = 1,5 \quad [\text{AVII.3}]$$

$$0,393 \text{ m}^3 = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot H_s}{4} = \frac{1,5 \cdot \pi \cdot D_i^3}{4} \quad [\text{AVII.4}]$$

$$D_i = 0,69 \text{ m}$$

$$H_s = 1,04 \text{ m}$$

La fórmula del espesor del cilindro está dada por la ecuación AVII.5.

$$t_s = \frac{P_H \cdot R_i}{2 \cdot S \cdot E - 0,6 \cdot P_H} + CA \quad [\text{AVII.5}]$$

Donde:

P_H : presión dentro del tanque agitado (psi)

R_i : radio del tanque agitado (m)

S : resistencia de diseño del material (psi)

E : eficiencia en la soldadura

CA : factor de seguridad por corrosión (mm)

La presión dentro del tanque está determinada por la presión hidrostática, definida por la ecuación AVII.6.

$$P_H = g \cdot \rho \cdot H_s \quad [\text{AVII.6}]$$

Donde:

H_s : altura del tanque (m)

g : gravedad (m^2/s)

ρ : densidad (kg/m^3)

$$P_H = 9,8 \times 1085,62 \times 1,04 \times \frac{14,7 \text{ psi}}{101325 \text{ Pa}}$$

$$P_H = 1,60 \text{ psi}$$

El material elegido para las condiciones de lixiviación es el acero AISI 316 cuya resistencia de diseño es 25 381,60 psi. La eficiencia de la soldadura, generalmente es 0,85. El factor de seguridad por las condiciones altamente corrosivas es de 4 mm. Con estos datos se calcula el espesor del cilindro del tanque agitado.

$$t_s = \frac{1,60 \times (0,69 \times 0,5)}{2 \times 25\,381,60 \times 0,85 - 0,6 \times 1,60} \times \frac{1\,000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} + 4 \text{ mm}$$

$$t_s = 4,01 \text{ mm}$$

Como el diámetro del tanque es 0,69 m, aproximadamente 1 m, se debe utilizar un espesor mínimo de 5 mm, con base en los espesores mínimos de diseño que se muestran en la Tabla AVII.1:

Tabla AVII.1. Espesores mínimos requeridos en función del diámetro del tanque

| Diámetro del tanque (m) | Espesor mínimo (mm) |
|-------------------------|---------------------|
| 1,0 | 5 |
| 1,0 – 2,0 | 7 |
| 2,0 – 2,5 | 9 |
| 2,5 – 3,0 | 10 |
| 3,0 – 3,5 | 12 |

(Sinnott, 2005, p. 456)

Se selecciona una tapa toriesférica para el tanque, por lo que la altura de la tapa se define con la ecuación AVII.7.

$$h_T = D_i - \sqrt{(r_k + r_i - D_i) \cdot (r_k - r_i - D_i)} \quad [\text{AVII.7}]$$

Donde:

r_k : radio del nudillo

r_i : radio del tanque

D_i : diámetro del tanque

$$rk = 0,06 \cdot Di \quad \text{[AVII.8]}$$

$$rk = 0,06 \times 0,69 \text{ m} = 0,042 \text{ m}$$

Al sustituir los datos calculados en la ecuación AVII.7 se obtiene la altura de la tapa desde la base del cilindro:

$$h_T = 0,14 \text{ m}$$

El volumen de la tapa está dado por la ecuación AVII.9.

$$V_T = 0,0809 \times Di^3 \quad \text{[AVII.9]}$$

$$V_T = 0,0809 \times 0,69^3 = 0,027 \text{ m}^3$$

El espesor de la tapa está dado por la ecuación AVII.10.

$$t_T = \frac{0,885 \times P_H \times L}{S \times E - 0,1 \times P_H} + CA \quad \text{[AVII.10]}$$

Donde:

P_H : presión dentro del tanque agitado (psi)

L : diámetro del tanque agitado (m)

S : resistencia de diseño del material (psi)

E : eficiencia en la soldadura

CA : factor de seguridad por corrosión (mm)

Con estos datos se calcula el espesor de la tapa, que son los mismos que se utilizaron para calcular el espesor del tanque. Debido a las condiciones altamente corrosivas se utilizará un CA de 4 mm.

$$t_T = \frac{0,885 \times 1,60 \times 0,69}{25\,381,60 \times 0,85 - 0,1 \times 1,60} \cdot \frac{1\,000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} + 4 \text{ mm}$$

$$t_T = 4,05 \text{ mm}$$

De igual manera que en el caso del espesor del tanque, se toma el espesor mínimo de diseño requerido de 5 mm, en referencia a la Tabla AVII.1.

El volumen total del tanque está dado por la suma del volumen del cilindro y el volumen de la tapa toriesférica:

$$V_{Tot} = V_S + V_T \quad \text{[AVII.11]}$$

$$V_{Tot} = 0,42 \text{ m}^3$$

El porcentaje de sobredimensionamiento está dado por la formula AVII.12:

$$\% SD = \frac{V_{Tot} - V_I}{V_{Tot}} \cdot 100 \% \quad \text{[AVII.12]}$$

$$\% SD = \frac{0,42 \text{ m}^3 - 0,28 \text{ m}^3}{0,42 \text{ m}^3} \cdot 100 \%$$

$$SD = 33,16 \%$$

Diseño del impulsor

Para el sistema de agitación se necesita mantener los sólidos en suspensión para que se dé una disolución apropiada, por lo tanto, se necesita un impulsor de turbina marina, tal como se muestra en la Figura AVII.1, donde se detallan los diferentes tipos de servicios que ofrecen los impulsores y la relación del diámetro del tanque (D_i) y diámetro del impulsor (d), así como la relación altura del impulsor (H_i) y diámetro del impulsor (d). En este caso dichas relaciones son de 2 a 1 y de 1 a 1 respectivamente, tal como se muestra en la ecuación [AVII.12].

$$\frac{D_i}{d} = 2 \quad \text{[AVII.13]}$$

$$d = 0,35 m$$

| Selection Chart | | | | Shape Relationships for Turbine Designs | | |
|--|---------------|----------------------|---|---|---|--|
| Service | Mixing Device | Range | Criteria | Tank Diameter to Impeller Dia. Ratio | Tank Height to Diameter Ratio | Impellers and Position |
| Blending | Turbine | ██████████ | 1. Volume Circulation | 3:1 to 6:1 | Unlimited | Single or Multiple |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Tank Vol. | → 1,000,000 Gals. | | | | |
| Dispersion (Immiscible Systems) | Turbine | ██████████ | 1. Drop Size Control 2. Re-Circulation | 3.0:1 to 3.5:1 | 1:1 to 1:2 in Staged Mixers | At/ or Below Center Line of Liquid Charge |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Flow | → 1,000 Gals./Min. | | | | |
| Reactions in Solution (Miscible Systems) | Turbine | ██████████ | 1. Intensity 2. Volume Circulation | 2.5:1 to 3.5:1 | 1:1 to 3:1 | Single or Multiple |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Charge Vol. | → 20,000 Gals. | | | | |
| Dissolution | Turbine | ██████████ | 1. Shear 2. Volume Circulation | 1.6:1 to 3.2:1 | 1:2 to 2:1 | At/ or Below Center Line of Liquid Charge |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Charge Vol. | → 10,000 Gals. | | | | |
| Solids Suspension | Turbine | ██████████ | 1. Circulation 2. Velocity | 2.0:1 to 3.5:1 | 1:1 to 1:2 | Depending on Particle Size 1. In Dia. Diameter Off Bottom 2. On Bottom |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | % Solids | → 100% | | | | |
| Gas Applications | Turbine | ██████████ | 1. Controlled Shear 2. Circulation 3. High Velocity | 2.5:1 to 4.0:1 | 4:1 to 1:1 | 1. Multiple Lowest One Impeller Diameter Off Bottom 2. Self-Induce, Just Below Liquid Level |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Gas Vol. | → 5,000 cu. ft./min. | | | | |
| High Viscosity Applications | Turbine | ██████████ | 1. Volume Circulation 2. Low Velocity | 1.5:1 to 2.5:1 | 1:2 to 2:1 | Single or Multiple |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Vis. | → 1,000,000 cps | | | | |
| Heat Transfer | Turbine | ██████████ | 1. Volume Circulation 2. High Veloc. Across Transfer Surface | Related to Other Services | Depends on Other Services Being Performed | Single or Multiple, Impeller Opposite Transfer Surface when using Coils |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Charge Vol. | → 20,000 Gals. | | | | |
| Crystallization or Precipitation | Turbine | ██████████ | 1. Circulation 2. Low Velocity 3. Shear Control | 2.0:1 to 3.2:1 | 2:1 to 1:1 | Single At/ or Below Center Line of Liquid Charge |
| | Propeller | ██████████ | | | | |
| | Paddle | ██████████ | | | | |
| | Charge Vol. | → 20,000 Gals. | | | | |

Figura AVII.1. Resumen de parámetros para la selección del tipo de impulsor a utilizar (Walas, 2009, p. 289)

La altura del impulsor respecto a la base del tanque (H_i) se define en base a la relación:

$$\frac{H_i}{d} = 1 \quad \text{[AVII.14]}$$

$$H_i = 0,35 m$$

Por parámetro de diseño se deben utilizar 4 deflectores, cuyo ancho (W_b), se determina con la ecuación AVII.15:

$$\frac{W_b}{D_i} = 0,1 \quad \text{[AVII.15]}$$

$$W_b = 0,07 \text{ m}$$

La agitación del impulsor se determina mediante una iteración gráfica para la cual se asume una potencia (P) y un Ni con el cual se calcula el número de Reynolds (Rei) acorde a la ecuación AVII.16, con este dato se determina gráficamente el Número de potencia (N_P) mediante la Figura AVII.2 y después se calcula el Ni con la fórmula AVII.17, la iteración continua hasta obtener el mismo Ni tanto gráficamente como calculado.

A continuación, se muestran los cálculos con los datos que cumplen con la iteración, la cual dio como resultado un Ni de 1,13 (s⁻¹) y una potencia de 7 kW.

$$Rei = \frac{\rho \times Ni \times d^2}{\mu} \quad [AVII.16]$$

Donde:

N_i: agitación del impulsor (s⁻¹)

d: diámetro del impulsor (m)

ρ: densidad (kg/m³)

μ: viscosidad (Pa.s)

$$Rei = \frac{1\,085,62 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0,35 \text{ m})^2 \cdot 1,42 \frac{1}{\text{s}}}{0,0012 \text{ Pa.s}}$$

$$Rei = 1,54 \times 10^5$$

$$Rei = 1,54 \times 10^5 \rightarrow Np = 0,45$$

Se debe tener en cuenta que para Rei mayores a 10 000 (régimen turbulento) el N_p se mantiene constante.

$$Ni = \sqrt[3]{\frac{P}{Np \times \rho \times d^5}} \quad [AVII.17]$$

$$Ni = \sqrt[3]{\frac{7 \text{ kW}}{0,45 \times 1085,62 \text{ kg/m}^3 \times (0,35 \text{ m})^5}} = 1,42 \text{ s}^{-1}$$

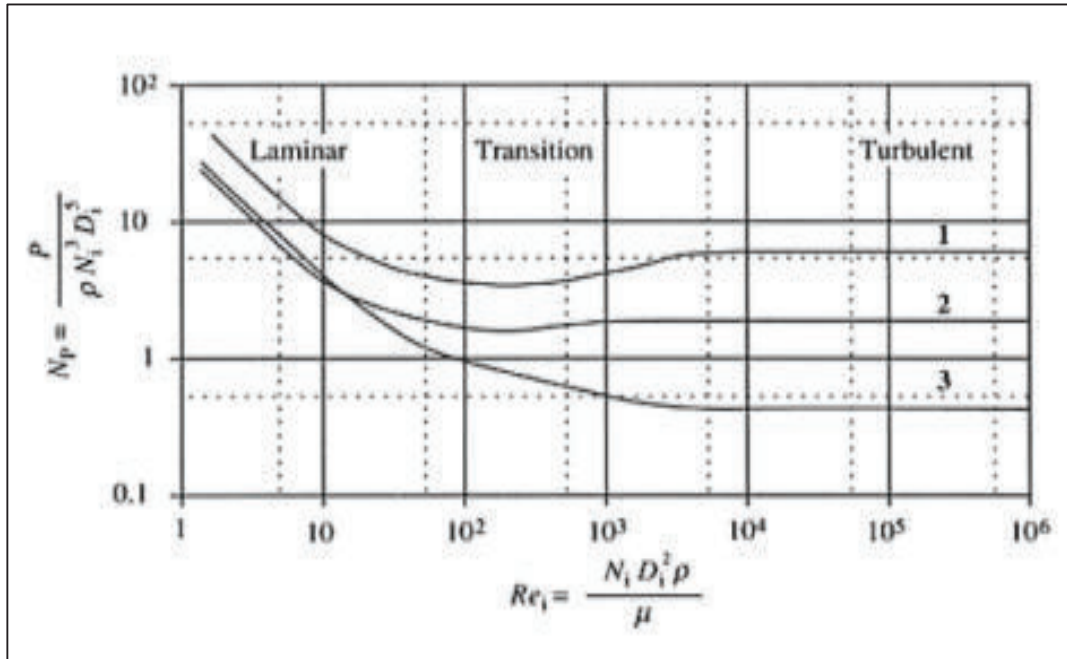


Figura AVII.2. Relación entre el número de Potencia (N_p) y el número de Reynolds (Re) para sistemas de agitación (Sinnott, 2005, p. 474)

Posteriormente se debe determinar el Número de Caudal (N_Q) con la Figura AVII.3 y con ese dato el caudal que mueve el impulsor (Q) mediante la ecuación AVII.18.

$$Q = N_Q \times Ni \times d^3 \quad \text{[AVII.18]}$$

La relación diámetro del impulsor a diámetro del tanque, para este caso, es de 0,5. Con ese valor y el Re_i se determina que el N_Q es 0,6.

$$Q = 0,60 \times 1,42 \frac{1}{s} \times (0,35 \text{ m})^3 = 0,035 \text{ m}^3/\text{s}$$

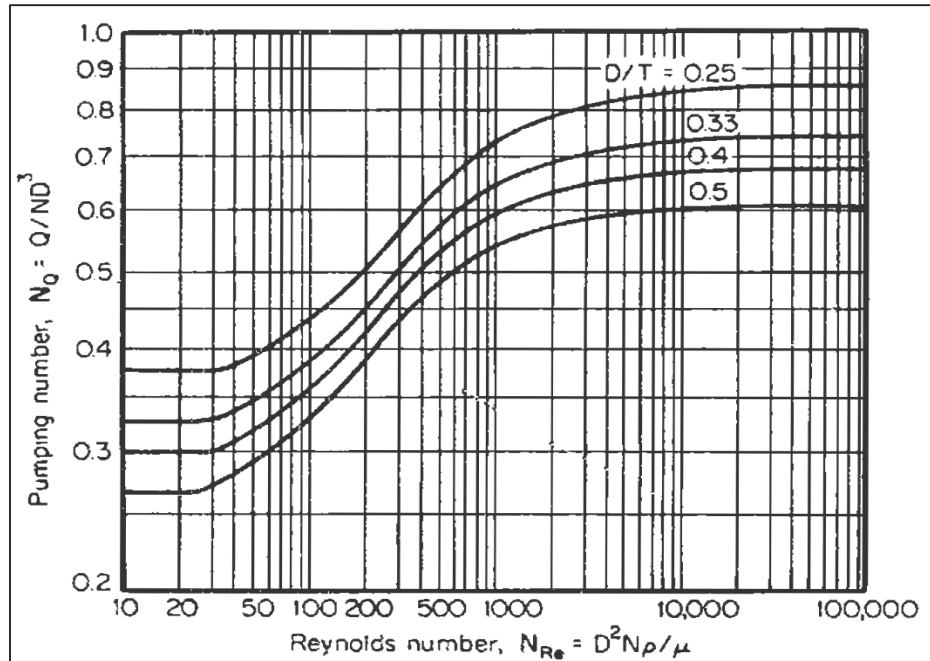


Figura AVII.3. Relación entre el número de Caudal (N_Q) y el número de Reynolds (Re) para sistemas de agitación (Walas, 2009, p. 293)

Para determinar si el impulsor está correctamente diseñado se debe determinar la velocidad superficial específica con la fórmula AVII.19, y se debe cumplir que para obtener un buen sistema de agitación para la disolución de sólidos debe obtenerse una velocidad entre 0,3 y 0,4 pie/s:

$$v_s = Q/A_t \quad \text{[AVII.18]}$$

Donde:

v_s : velocidad superficial específica

Q : caudal

A_t : área trasversal del tanque expuesta a la agitación (perímetro del tanque)

$$A_t = \pi r^2 = \frac{\pi \times (0,69 \text{ m})^2}{4} = 0,38 \text{ m}^2$$

$$v_s = \frac{0,035 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,38 \text{ m}^2} = 0,094 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{3,28 \text{ pie}}{1 \text{ m}} = 0,308 \text{ pie/s}$$

ANEXO VIII

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS

PLANTA DE CAPACIDAD DE 1 T/MES

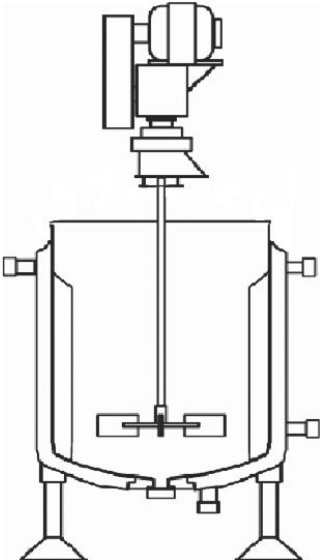
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 1

| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Nombre del equipo: Trituradora de cable de cobre (TC-101) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| SILMISA | FENIX 65/55 | Acero soldado |
| | | Número de equipos en planta: |
| | | 1 |
| Dimensiones: | Parámetros de diseño: | |
| Altura: 2,20 m | Capacidad: 150 kg/h | |
| Longitud: 0,85 m | Tecnología: Cuchillas de corte con sistema de tamizado y bandas transportadoras | |
| Ancho: 0,65 m | Nro cuchillas: 4 fijas y 6 móviles | |
| | Potencia motor principal: 30 kW (todo el sistema) | |
| | Tamaño de corte: 8 mm | |
| Principio de funcionamiento: | | |
| El cable reciclado de cobre se alimenta por bandas transportadoras a la tolva de alimentación donde se realiza el corte mediante una serie de cuchillas fijas y móviles. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p>Figura A.VIII.1. Esquema de la trituradora de cable de cobre para la producción de 1 t/mes de oxiclорuro de cobre.</p> | | |

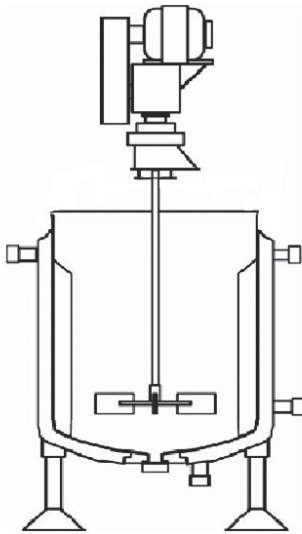
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 1.1

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Nombre del equipo: Tamiz vibratorio (TV-102) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| SILMISA | FENIX 65/55 | Acero soldado |
| | | Número de equipos en planta: |
| | | 1 |
| Dimensiones: Altura: 2,20 m Longitud: 0,60 m Ancho: 0,55 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 150 kg/h Tecnología: tamiz vibratorio parte de la trituradora de cobre Tamaño de malla del tamiz: 8 mm Potencia motor principal: 30 kW (todo el sistema) | |
| Principio de funcionamiento: El cable cortado se alimenta a una tolva de alimentación la cual ingresa luego al tamiz vibratorio donde se separan cuatro corrientes, cobre de primera, segunda y tercera clase, y una cuarta corriente con impurezas menores. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p>Figura A.VIII.2. Esquema del tamiz vibratorio para la producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre.</p> | | |

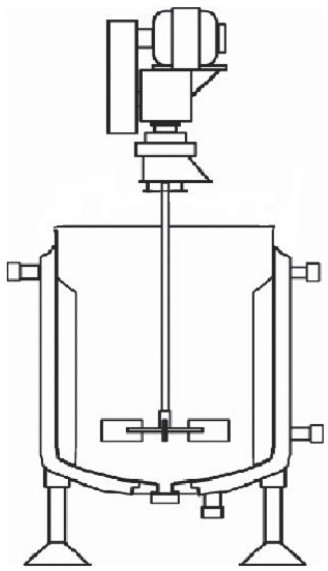
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 2

| | | |
|--|---|---|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de lixiviación (TK-201) | | |
| Fabricante: N/A | Modelo: N/A | Material de construcción: AISI 316 |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 0,69 m Altura: 1,04 m | Parámetros de diseño: | |
| | Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 0,42 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,14 m Resistencia de diseño: 175 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 85 rpm Diámetro impulsor: 0,35 m Potencia: 7 kW Altura impulsor: 0,35 m Longitud deflectores: 0,07 m Número de deflectores: 4 |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa el cobre triturado, la solución de HCl y el peróxido de hidrógeno; mediante agitación constante se produce la lixiviación del cobre y al final del proceso se descarga la pulpa por la parte inferior del tanque. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p>Figura A.VIII.3. Esquema del tanque agitado de lixiviación para la producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre.</p> | | |

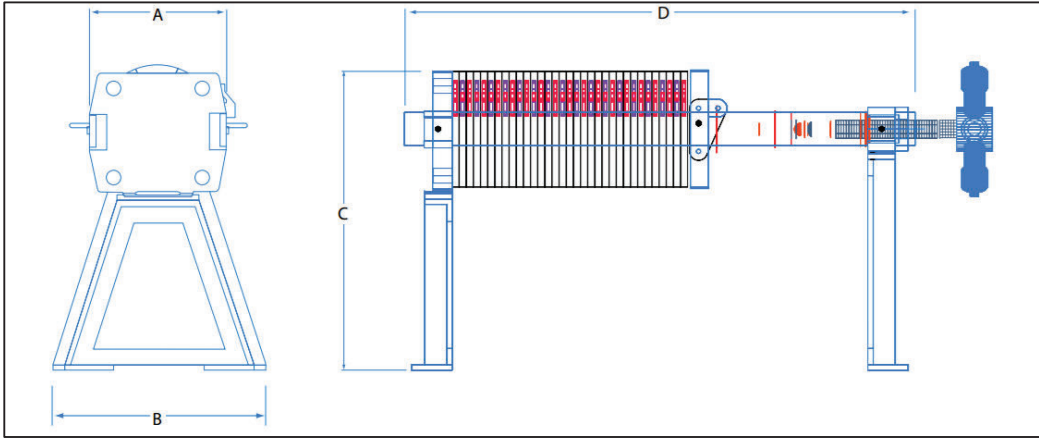
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 3

| | | |
|---|---|--|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de neutralización (TK-202) | | |
| Fabricante: N/A | Modelo: N/A | Material de construcción: AISI 316 |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 0,73 m Altura: 1,09 m | Parámetros de diseño: Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 0,49 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,15 m Resistencia de diseño: 175 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | |
| Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 80 rpm Diámetro impulsor: 0,36 m Potencia: 7,5 kW Altura impulsor: 0,36 m Longitud deflectores: 0,07 m Número de deflectores: 4 | | |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa la pulpa lixiviada y el hidróxido de sodio. Mediante agitación constante se da la reacción de neutralización. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p>Figura A.VIII.4. Esquema del tanque agitado de neutralización para la producción de 1 t/mes de oxicloruro de cobre.</p> | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 4

| | | |
|--|---|--|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de lavado (TK-203) | | |
| Fabricante: N/A | Modelo: N/A | Material de construcción: Acero al carbono |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 0,46 m Altura: 0,69 m | Parámetros de diseño: | |
| | Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 0,12 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,09 m Resistencia de diseño: 135 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 129 rpm Diámetro impulsor: 0,23 m Potencia: 4 kW Altura impulsor: 0,09 m Longitud deflectores: 0,05 m Número de deflectores: 4 |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa la pulpa filtrada de neutralización con el oxiclورو de cobre y la cantidad necesaria de agua para disolver el cloruro de sodio que se encuentra como contaminante en el producto. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| Figura A.VIII.5. Esquema del tanque agitado de lavado para la producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre. | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 5

| | | |
|--|---|---------------------------------------|
| Nombre del equipo: Filtro prensa para la lixiviación, neutralización y lavado (FP-201, FP-202, FP-203) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| Corel y CIA. S. A. | D 12/12 | Polímero Durapol |
| | | Número de equipos en planta: 3 |
| Dimensiones: Altura: 0,65 m Longitud: 0,65 m Ancho: 0,30 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 0,1 a 0,4 m ³ /h (depende de la cantidad de sólidos) Área de filtración: 0,9 m ² Presión: 20 psi Potencia: 1,1 kW | |
| Principio de funcionamiento: La pulpa es alimentada al filtro, por presión la solución pasa a través de las placas filtrantes mientras que el sólido se retiene en las mismas. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  <p>The diagram illustrates the mechanical components of the filter press. On the left is a front view of the upper frame, showing a trapezoidal structure with four mounting points, labeled with dimensions A (width at the top) and B (width at the bottom). To the right is a side view of the entire assembly, including the filter plates, the frame, and a motor. Dimension C indicates the height of the frame, and dimension D indicates the total length of the filter press assembly.</p> | | |
| <p>Figura A.VIII.6. Esquema de los filtros para la producción de 1 t/mes de oxiclورو de cobre</p> | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 6

| | | |
|--|---|--|
| Nombre del equipo: Estufa de secado (E-201) | | |
| Fabricante: Tamprinter | Modelo: TM-H35 | Material de construcción: Acero inoxidable |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Altura: 0,60 m Longitud: 0,57 m Ancho: 0,55 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 50 kg Temperatura de operación: 0 – 300 °C Potencia: 0,08 kW | |
| Principio de funcionamiento: El oxiclورو obtenido después del lavado y filtrado, debe ser secado en una estufa a 110 °C durante 8 h. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
| | | |
| Figura A.VIII.7. Esquema de la estufa para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | | |

PLANTA DE CAPACIDAD DE 3 T/MES

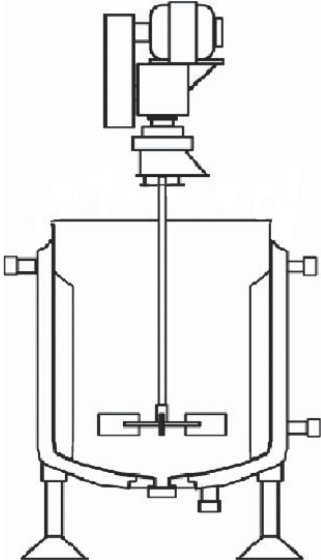
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 7

| | | |
|--|---|-------------------------------------|
| Nombre del equipo: Trituradora de cable de cobre (TC-101) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| SILMISA | FENIX 65/55 | Acero soldado |
| | | Número de equipos en planta: |
| | | 1 |
| Dimensiones: | Parámetros de diseño: | |
| Altura: 2,20 m | Capacidad: 150 kg/h | |
| Longitud: 0,85 m | Tecnología: Cuchillas de corte con sistema de tamizado y bandas transportadoras | |
| Ancho: 0,65 m | No cuchillas: 4 fijas y 6 móviles | |
| | Potencia motor principal: 30 kW (todo el sistema) | |
| | Tamaño de corte: 8 mm | |
| Principio de funcionamiento: | | |
| El cable reciclado de cobre se alimenta por bandas transportadoras a la tolva de alimentación donde se realiza el corte mediante una serie de cuchillas fijas y móviles. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p align="center">Figura A.VIII.8. Esquema de la trituradora de cable de cobre para la producción de 3 t/mes de oxiclорuro de cobre.</p> | | |

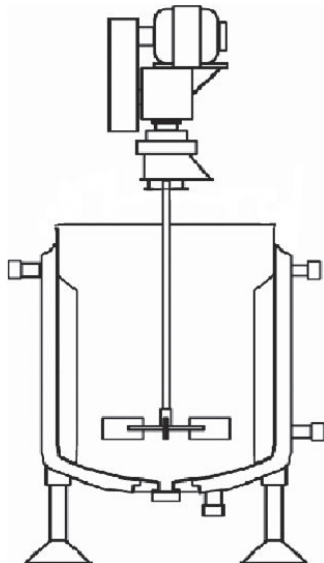
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 7.1

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Nombre del equipo: Tamiz vibratorio (TV-102) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| SILMISA | FENIX 65/55 | Acero soldado |
| | | Número de equipos en planta: |
| | | 1 |
| Dimensiones: Altura: 2,20 m Longitud: 0,60 m Ancho: 0,55 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 150 kg/h Tecnología: tamiz vibratorio parte de la trituradora de cobre Tamaño de malla del tamiz: 8 mm Potencia motor principal: 30 kW (todo el sistema) | |
| Principio de funcionamiento: El cable cortado se alimenta a una tolva de alimentación la cual ingresa luego al tamiz vibratorio donde se separan cuatro corrientes, cobre de primera, segunda y tercera clase, y una cuarta corriente con impurezas menores. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| <p>Figura A.VIII.9. Esquema del tamiz vibratorio para la producción de 3 t/mes de oxiclорuro de cobre.</p> | | |

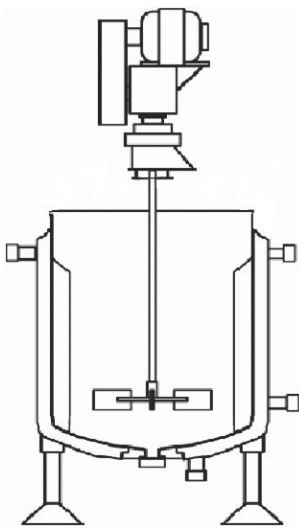
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 8

| | | |
|--|--|--|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de lixiviación (TK-201) | | |
| Fabricante: N/A | Modelo: N/A | Material de construcción: AISI 316 |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 1,00 m Altura: 1,50 m | Parámetros de diseño: | |
| | Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 1,26 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,20m Resistencia de diseño: 175 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 58 rpm Diámetro impulsor: 0,50 m Potencia: 14 kW Altura impulsor: 0,50 m Longitud deflectores: 0,10 m Número de deflectores: 4 |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa el cobre triturado, la solución de HCl y el peróxido de hidrógeno; mediante agitación constante se produce la lixiviación del cobre y al final del proceso se descarga la pulpa por la parte inferior del tanque. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| Figura A.VIII.10. Esquema del tanque agitado de lixiviación para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre. | | |

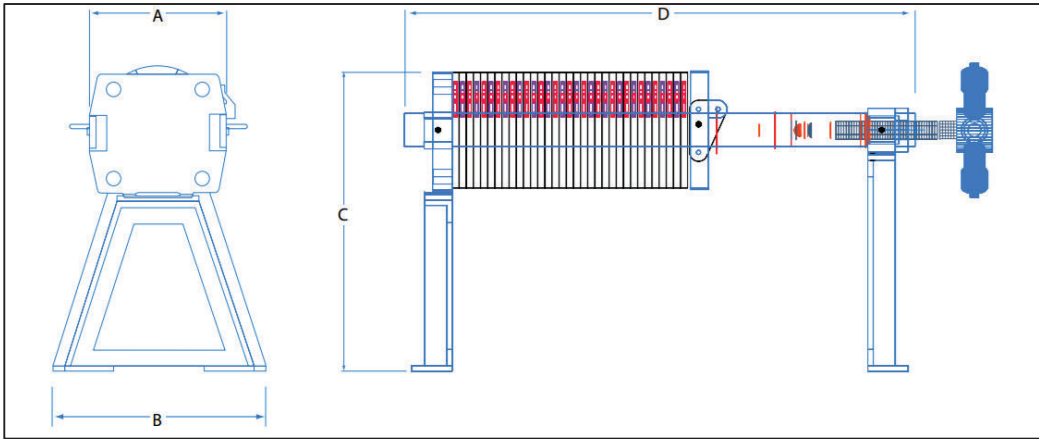
FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 9

| | | |
|--|---|--|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de neutralización (TK-202) | | |
| Fabricante: N/A | Modelo: N/A | Material de construcción: AISI 316 |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 1,05 m Altura: 1,58 m | Parámetros de diseño: | |
| | Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 1,46 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,21 m Resistencia de diseño: 175 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 55 rpm Diámetro impulsor: 0,53 m Potencia: 15 kW Altura impulsor: 0,53 m Longitud deflectores: 0,11 m Número de deflectores: 4 |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa la pulpa lixiviada y el hidróxido de sodio. Mediante agitación constante se da la reacción de neutralización. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| Figura A.VIII.11. Esquema del tanque agitado de neutralización para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre. | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 10

| | | |
|--|---|---|
| Nombre del equipo: Tanque agitado de lavado (TK-203) | | |
| Fabricante: | Modelo: | Material de construcción: |
| N/A | N/A | Acero al carbono |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Diámetro: 0,66 m Altura: 1,00 m | Parámetros de diseño: | |
| | Tanque: Tipo de tanque: Abierto Volumen: 0,37 m ³ Espesor: 5 mm Fondo: Toriesférico Altura fondo: 0,14 m Resistencia de diseño: 135 N/mm ² Eficiencia soldadura: 0,85 Sobredimensionamiento: 33,16 % | Agitador: Tipo de impulsor: Turbina marina Agitación: 88 rpm Diámetro impulsor: 0,33 m Potencia: 8 kW Altura impulsor: 0,33 m Longitud deflectores: 0,07 m Número de deflectores: 4 |
| Principio de funcionamiento: Al tanque ingresa la pulpa filtrada de neutralización con el oxiclورو de cobre y la cantidad necesaria de agua para disolver el cloruro de sodio que se encuentra como contaminante en el producto. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| Figura A.VIII.12. Esquema del tanque agitado de lavado para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre. | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 11

| | | |
|---|---|--|
| Nombre del equipo: Filtro prensa para la lixiviación, neutralización y lavado (FP-201, FP-202, F-203) | | |
| Fabricante: Corel y CIA. S. A. | Modelo: D 14/14 | Material de construcción: Polímero Durapol |
| | | Número de equipos en planta: 3 |
| Dimensiones: Altura: 0,92 m Longitud: 1,50 m Ancho: 0,70 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 0,3 a 1,0 m ³ /h (depende de la cantidad de sólidos) Área de filtración: 2,6 m ² Presión: 30 psi Potencia: 2,5 kW | |
| Principio de funcionamiento: La pulpa es alimentada al filtro, por presión la solución pasa a través de las placas filtrantes mientras que el sólido se retiene en las mismas. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  <p>The diagram illustrates the filter press equipment. On the left is a front view showing a trapezoidal frame with a top section, labeled with dimensions A (width), B (base width), and C (height). On the right is a side view showing the internal components, including a horizontal filter assembly with multiple plates, labeled with dimension D (length). The filter assembly is supported by vertical legs and connected to a motor or drive mechanism on the right.</p> | | |
| Figura A.VIII.13. Esquema de los filtros para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de cobre | | |

FICHA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS No. 12

| | | |
|--|--|--|
| Nombre del equipo: Estufa de secado (E-201) | | |
| Fabricante: Tamprinter | Modelo: TM-H50 | Material de construcción: Acero inoxidable |
| | | Número de equipos en planta: 1 |
| Dimensiones: Altura: 1,00 m Longitud: 0,75 m Ancho: 0,65 m | Parámetros de diseño: Capacidad: 120 kg Temperatura de operación: 0 – 300 °C Potencia: 0,45 kW | |
| Principio de funcionamiento: El oxiclورو obtenido después del lavado y filtrado, debe ser secado en una estufa a 110 °C durante 8 h. | | |
| Modalidad de operación: Batch | | |
| Esquema del equipo: | | |
|  | | |
| Figura A.VIII.14. Esquema de la estufa para la producción de 3 t/mes de oxiclورو de | | |