

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE UNO DE LOS
METALES PRESENTES EN LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS**

JUAN FELIPE VILLALOBOS MORA

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

**EVALUACIÓN DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE UNO DE LOS
METALES PRESENTES EN LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS**

JUAN FELIPE VILLALOBOS MORA

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director:
FELIPE CORREA MAHECHA
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

Nota de Aceptación

Ing. Sandra Liliana Mesa Espitia

Ing. Elizabeth Torres Gámez

Ing. Diego Nicolás Rodríguez
Serrano

Bogotá D.C. Noviembre, 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE)	19
1.2 TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS	20
1.2.1 Tipos de tarjetas de circuitos impresos	20
1.2.2 Composición química de las tarjetas de circuitos impresos	21
1.3 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE METALES PRESENTES EN LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS	24
1.3.1 Procesos pirometalúrgicos	24
1.3.1.1 Recuperación de cobre por carbonización	24
1.3.1.2 Calcinación de las TCI para la recuperación de oro	25
1.3.2 Métodos hidrometalúrgicos	25
1.3.2.1 Extracción de cobre usando H_2SO_4 y H_2O_2	26
1.3.2.2 Recuperación de cobre usando un sistema redox	27
1.3.2.3 Recuperación de cobre mediante lixiviación y adsorción	27
1.3.2.4 Recuperación de cobre usando sales de amonio	28
1.3.2.5 Extracción de cobre usando dióxido de carbono supercrítico	29
1.3.2.6 Lixiviación de oro con cianuro de sodio	30
1.3.2.7 Lixiviación de oro con agua regia	30
1.3.3 Procesos biohidrometalúrgicos	31
1.3.3.1 Recuperación de cobre por biolixiviación	31
1.3.3.2 Método de bioadsorbentes	32
1.4 MARCO LEGAL	32
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS	34
2.1 TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS	34
2.2 REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	35
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE PARTIDA	39
3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECUPERACION DE METALES	41
3.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO	41
4. DESARROLLO DEL MÉTODO SELECCIONADO A ESCALA LABORATORIO	46
4.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROCESO EXPERIMENTAL	46
4.1.1 Preparación de la solución ácida	47
4.1.2 Preparación de la muestra sólida	47
4.2 MODELO A	49
4.3 MODELO B	52

4.4 RESULTADOS	54
4.4.1 Modelo A	55
4.4.2 Modelo B	58
4.5 BALANCES DE MATERIA	66
4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
5. CONCLUSIONES	83
6. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama general del proceso de fabricación de una TCI	20
Figura 2. Tarjetas de circuitos impresos aportadas por la empresa Patrix Technology	34
Figura 3. Partículas de tarjetas de circuitos impresos	35
Figura 4. Curva granulométrica A	36
Figura 5. Curva granulométrica B	38
Figura 6. Espectrómetro usado para la prueba de XRF	39
Figura 7. Balanza digital	49
Figura 8. Diagrama de bloques del modelo A	49
Figura 9. Lixiviación	50
Figura 10. Montaje de filtración	51
Figura 11. Estufa usada para el secado	51
Figura 12. Desecador de vidrio	52
Figura 13. Diagrama de bloques del modelo B	53
Figura 14. Diagrama de bloques del modelo A	55
Figura 15. Diagrama de bloques, modelo B	59
Figura 16. Lixiviación, modelo A	67
Figura 17. Filtración y lavado, modelo A	68
Figura 18. Secado, modelo A	69
Figura 19. Lixiviación de la etapa 1, modelo B	70
Figura 20. Filtración de la etapa 1, modelo B	71
Figura 21. Lavado de la etapa 1, modelo B	72
Figura 22. Lavado de la etapa 1, modelo B	73
Figura 23. Lixiviación de la etapa 2, modelo B	73
Figura 24. Filtración de la etapa 2, modelo B	74
Figura 25. Lavado de la etapa 2, modelo B	75
Figura 26. Secado de la etapa 2 del modelo B	76
Figura 27. Comparación de resultados	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición del contenido metálico de las TCI en general	22
Tabla 2. Composición metálica de las TCI de celulares	23
Tabla 3. Granulometría A	36
Tabla 4. Granulometría B	37
Tabla 5. Resultados de las pruebas granulométricas A y B	38
Tabla 6. Composición de las TCI mediante XRF	40
Tabla 7. Comparación de los resultados del análisis de XRF y los teóricos	40
Tabla 8. Valores de calificación, C4.	44
Tabla 9. Calificación de cada método en cada criterio	44
Tabla 10. Sumas ponderadas de cada alternativa	45
Tabla 11. Propiedades de las sustancias del proceso de lixiviación	46
Tabla 12. Características de los reactivos utilizados	47
Tabla 13. Requerimientos teóricos de la reacción	47
Tabla 14. Preparación de la solución ácida	47
Tabla 15. Composición de las muestras sólidas	48
Tabla 16. Datos de las corrientes, modelo A	55
Tabla 17. Resultados análisis de absorción atómica por llama del modelo A.	56
Tabla 18. Masa de CuSO_4 en la corriente 6, modelo A	57
Tabla 19. Fracciones máxicas del CuSO_4 en la corriente 6, modelo A	57
Tabla 20. Porcentajes de recuperación de cobre, modelo A	58
Tabla 21. Datos de las corrientes, modelo B	60
Tabla 22. Resultados análisis de absorción atómica por llama para el modelo B	61
Tabla 23. Masa de CuSO_4 de las corrientes 4 y 14, modelo B	61
Tabla 24. Fracción máxica de CuSO_4 en las corrientes 4 y 14, modelo B	62
Tabla 25. Masa de CuSO_4 en las corrientes 7 y 14, modelo B	64
Tabla 26. Fracción máxica de CuSO_4 en las corrientes 7 y 16, modelo B.	64
Tabla 27. Masa total de CuSO_4 recuperada en cada etapa, modelo B	65
Tabla 28. Porcentaje de recuperación de Cu de la primera etapa, modelo B	65
Tabla 29. Porcentajes de recuperación de Cu de la etapa 2, modelo B	66
Tabla 30. Porcentaje global de recuperación de Cu, modelo B	66
Tabla 31. Balances de masa en la lixiviación, modelo A	67
Tabla 32. Balances de masa en la filtración y lavado, modelo A	68
Tabla 33. Balances de masa en el secado, modelo A	69
Tabla 34. Balances de masa en la lixiviación de la etapa 1, modelo B	70
Tabla 35. Balances de masa de la filtración de la etapa 1, modelo B	71
Tabla 36. Balances de masa del lavado de la etapa 1, modelo B	72
Tabla 37. Balances de masa del lavado de la etapa 1, modelo B.	73
Tabla 38. Balances de masa en la lixiviación de la etapa 2, modelo B	74
Tabla 39. Balances de masa de la filtración de la etapa 2, modelo B	74
Tabla 40. Balances de masa del lavado de la etapa 2, modelo B	75
Tabla 41. Balances de masa del secado de la etapa 2, modelo B	76

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Ventajas y desventajas de cada método	41
Cuadro 2. Valores de calificación, C1	42
Cuadro 3. Valores de calificación, C2	43
Cuadro 4. Valores de calificación, C3	43

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultados de la prueba XRF	90
Anexo B. Resultados granulometría A	92
Anexo C. Cálculo de los requerimientos teóricos de la lixiviación	95
Anexo D. Cálculos para la preparación de la solución lixivante	97
Anexo E. Resultados de las pruebas EAA	98
Anexo F. Muestra de cálculo de los balances de masa para el modelo A	99
Anexo G. Muestra de cálculo de los balances de masa para el modelo B	106

LISTA DE ABREVIATURAS

AEE: Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

BM: Balance de masa

EAA: Espectrofotometría de Absorción Atómica.

EPR: Por sus siglas en inglés, *Extended Producer Responsibility*.

LCA: Por sus siglas en inglés, *Life Cycle Assessment*.

LCD: Por sus siglas en inglés, *Liquid Crystal Display*.

LED: Por sus siglas en inglés, *Light-Emitting Diode*.

MCA: Por sus siglas en inglés, *Multi Criteria Analysis*.

MFA: Por sus siglas en inglés, *Material Flow Assessment*.

RAEE: Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

TCI: Tarjetas de circuitos impresos.

XRF: Fluorescencia de rayos x.

GLOSARIO

ADSORCIÓN: proceso mediante el cual se pone en contacto un sólido (adsorbente) y un fluido, con el objetivo de que uno o más componentes del fluido sean atraídos por la superficie del sólido, separándolos de la fase fluida.

AGUA REGIA: mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado generalmente en la proporción de uno a tres.

BIOLIXIVIACIÓN: metodología que utiliza microorganismos para producir las sustancias lixiviantes en procesos de extracción de metales.

ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA: técnica analítica que permite determinar cuantitativamente gran cantidad de elementos.

FILTRACIÓN: proceso en el que se pasa una mezcla solida-líquida por un medio poroso, el cual, permite el paso de la fase líquida y retiene la masa sólida.

FLUORESCENCIA DE RAYOS X: técnica analítica cuantitativa y cualitativa que utiliza las emisiones que genera un material al ser bombardeado con rayos X.

GRADO DE AVANCE: parámetro usado para expresar el consumo o la generación de las sustancias involucradas en una reacción química

GRADOS DE LIBERTAD: diferencia entre el número de variables desconocidas de un proceso y el número de ecuaciones que relacionan estas variables

HIDROMETALURGÍA: son los procesos mediante los cuales se realiza la extracción de metales utilizando disolventes líquidos, los cuales pueden ser ácidos o básicos.

LIXIVIACIÓN: operación unitaria mediante la cual se realiza la disolución de uno o más componentes de un material sólido por el contacto con un disolvente líquido.

PIROMETALURGÍA: procesos en los que se utilizan altas temperaturas para la obtención y refinación de metales.

RAEE: sigla por la que se hace referencia a los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos, sus materiales, y componentes.

RESIDUO PELIGROSO: es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas puede causar riesgo o daño a la salud humana y al ambiente

SECADO: proceso en el cual un sólido húmedo se calienta, provocando que todo o parte del líquido que lo conforma se evapore

SOLUCIÓN LIXIVIANTE: mezcla líquida ácida o básica que se usa como disolvente del material sólido de interés en los procesos de lixiviación.

TARJETA DE CIRCUITO IMPRESO: placa electrónica usada para dar el soporte mecánico y permitir las conexiones eléctricas de un dispositivo electrónico

TAMIZADO: método de separación de partículas sólidas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas

RESUMEN

Aproximadamente 60 tarjetas de circuitos impresos fueron aportadas por la empresa Patrix Technology, para el desarrollo de este trabajo de grado; estas tarjetas, fueron sometidas, en primer lugar, a un proceso de limpieza y de desensamble de los componentes electrónicos que se encontraban conectados a cada una de ellas; posterior a esto, se realizó la reducción del tamaño de partícula de las tarjetas, obteniendo así un material particulado de aproximadamente 690 g.

Mediante una serie de ensayos granulométricos, se logró conocer la distribución del tamaño de partícula de material particulado obtenido, a una muestra representativa de partículas de circuitos impresos, se le realizó la prueba de fluorescencia de rayos x, en la empresa Xamtec S.A.S. Conociendo así, la composición metálica del material.

Luego de una amplia revisión bibliográfica de distintos métodos de recuperación de algunos de los metales presentes en las tarjetas de circuitos impresos, se seleccionó la alternativa a emplear, usando el método de selección de alternativas por sumas ponderadas, se escogió que el método de recuperación de cobre a desarrollar es el que consiste en una lixiviación ácida usando H_2SO_4 y H_2O_2 .

Se plantearon dos modelos experimentales para llevar a cabo la recuperación del cobre presente en las tarjetas de circuitos impresos; el primer modelo experimental, consistió en una lixiviación en una sola etapa denominado modelo A y el segundo, fue un proceso de lixiviación en etapas múltiples, nombrado modelo B. Las soluciones líquidas fueron analizadas por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en la empresa Quimia LTDA. De este análisis, se pudo determinar que en el modelo A se obtuvo un porcentaje promedio de extracción del 21,09 %, en cuanto al modelo B se logró un porcentaje global promedio del 88,71 %.

Por último, se realizaron los balances de materia por cada uno de los componentes que intervienen en el proceso de lixiviación para cada uno de los modelos experimentales desarrollados.

Palabras claves: Tarjetas de circuitos impresos, Cobre, Fluorescencia de rayos x, Lixiviación, Espectrofotometría de absorción atómica.

INTRODUCCIÓN

Debido al gran crecimiento de la tecnología en los últimos años se han generado importantes avances en la ciencia, el desarrollo y la innovación de las naciones; dada la gran cantidad y variedad de aparatos electrónicos disponibles en el mercado y su fácil adquisición; sin embargo, gracias al acelerado crecimiento de este sector, estos aparatos tecnológicos tienen cada vez menos tiempo de vida útil ya que son reemplazados rápidamente por productos más avanzados y mejor desarrollados tecnológicamente. Por lo anterior, se ha generado un nuevo inconveniente en el ámbito social y ambiental por la inmensa cantidad de residuos electrónicos que se generan y acumulan anualmente. Una muestra de esto es que en Colombia para el año 2015 se generaron aproximadamente 349 mil toneladas de residuos electrónicos, siendo así el cuarto país de América Latina con mayor cantidad de RAEE detrás de Argentina, México y Brasil¹.

Los RAEE, contienen diversos materiales, como metales (metales pesados y metales preciosos), plásticos, materiales cerámicos y en algunos casos, compuestos tóxicos. Generalmente el destino de los residuos electrónicos es la disposición en rellenos sanitarios o la incineración. Por ello, estos residuos representan una fuente muy importante de contaminación a fuentes hídricas, el suelo y el aire, por ejemplo, cuando se utiliza la incineración de estos residuos, se liberan gases muy tóxicos como furanos polibromados, dioxinas y gran cantidad de óxidos².

De la gran variedad de RAEE que existen, se puede destacar a las tarjetas de circuitos impresos, ya que ellas, se encuentran en la mayoría de los aparatos electrónicos, al ser el soporte de las conexiones electrónicas de dichos aparatos; las tarjetas de circuitos impresos son utilizadas para la fabricación de aproximadamente 1 trillón de aparatos eléctricos y electrónicos³. Además, en ellas se pueden encontrar materiales muy valiosos como: Cobre, Hierro, Aluminio, Oro, Plata, Platino entre otros.

Es por lo anterior, que la empresa Patrix Technology ubicada en la ciudad de Bogotá, está interesada en encontrar algún procedimiento mediante el cual se pueda aprovechar, reutilizar o reciclar alguno de los componentes o materiales valiosos que se encuentran en estos residuos, con enfoque especial en los metales que se encuentran en las tarjetas de circuitos impresos de celulares, ya que este es

¹ ASOCIACION GSM. E-waste en Colombia. [En Línea]. <http://bit.ly/2ewastecolombia>. Recuperado, 18 de Septiembre del 2017.

² EMPA MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY. Gestión de residuos electrónicos en Colombia, diagnóstico de computadores y teléfonos celulares. Swiss e-waste programme. 31 de Marzo de 2008. p. 36.

³ PHILIPS CORPORATION. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. Primera edición. Cambridge. 2012. p. 288.

el principal producto que comercializan, para de esta forma, ayudar a subsanar el problema ambiental generado por los RAEE y aportar al cumplimiento de las distintas leyes que involucran a la empresa por el manejo de los residuos que se generan por su actividad comercial.

Es por esta razón, que este proyecto de grado, representa un primer acercamiento para la empresa Patrix Technology de poder cumplir con esta meta de la compañía; este estudio preliminar, se enfocara en evaluar un proceso de recuperación de uno de los metales presentes en las tarjetas de circuitos impresos, para ello, se llevó a cabo, en primer lugar, una amplia revisión bibliográfica de las diversas alternativas por las que se pueden extraer ciertos metales como el cobre de este material (TCI). Mediante el uso de criterios de selección, se escogió el método de recuperación de cobre, el cual, posteriormente se desarrolló a escala laboratorio; para luego analizar los resultados obtenidos.

En general, lo presentado en este trabajo de grado, será a escala de laboratorio, por lo cual, no se tendrá en cuenta el dimensionamiento a escalas superiores ni tampoco procesos de separación y purificación del material extraído.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la recuperación de uno de los metales disponibles en las tarjetas de circuitos impresos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar de forma teórica y/o experimental las tarjetas de circuitos impresos
- Seleccionar el proceso de recuperación más adecuado del metal presente en las tarjetas de circuitos impresos
- Llevar a cabo el método de recuperación escogido de uno de los metales a nivel laboratorio
- Realizar balances de materia teóricos aproximados para los demás componentes del proceso experimental

1. MARCO TEÓRICO

1.1 RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE)

La industria de la tecnología es una de las más importantes en el mundo, la cual ha tenido un constante crecimiento en la últimas décadas generando una gran cantidad de empleos, desarrollo industrial, tecnológico e intelectual⁴, debido a los continuos avances e innovaciones en este campo, los dispositivos tecnológicos tienen una vida útil muy corta, lo cual lleva a una alta producción de residuos de estos aparatos. Los residuos electrónicos pueden provenir de diversos tipos de aparatos eléctricos o electrónicos (AEE), en general los AEE se clasifican en 10 grandes grupos⁵.

- Grandes electrodomésticos (lavadoras, secadoras, refrigeradores, aire acondicionado, estufas eléctricas, etc.).
- Pequeños electrodomésticos (teléfonos, planchas, etc.).
- Aparatos y tecnología de comunicaciones (Faxes, antenas de alta y baja frecuencia, etc.).
- Electrodomésticos de consumo (televisores, computadoras, equipos de sonido, etc.).
- Equipos de iluminación (lámparas, tubos fluorescentes, etc.).
- Herramientas eléctricas y electrónicas (cuchillos eléctricos, molinos eléctricos, centrifugadoras, etc.).
- Dispositivos de deporte y ocio (juguetes, consolas de videojuegos, pequeños reproductores de audio y video, etc.)
- Dispositivos médicos (marcapasos, equipos de diálisis, equipos de rayos x, etc.).
- Dispositivos de monitoreo y control (sensores, alarmas, PLCs, etc.).
- Dispensadoras automáticas (máquinas de refrescos, máquinas tragamonedas, etc.).

La incorrecta disposición de estos residuos puede generar serias problemáticas ambientales, como la contaminación del aire, fuentes hídricas y suelos con sustancias como el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el arsénico (As). Estos contaminantes, se acumulan en el medio ambiente y pueden entrar en la cadena alimenticia poniendo en riesgo la vida animal y humana⁶.

Debido a las evidentes problemáticas ambientales que generan estos residuos, han surgido distintas herramientas para mitigar el impacto ambiental que estos generan, dentro de estos planes se encuentran: LCA (*Life Cycle Assessment*); MCA (*Multi Criteria Analysis*); MFA (*Material Flow Assessment*); EPR (*Extended Producer*

⁴ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. *Electronic Waste Recycling Techniques: WEEE management*. Primera edición. Porto Alegre. 2015. p. 7.

⁵ PHILIPS CORPORATION. Op cit., p. 96 – 98.

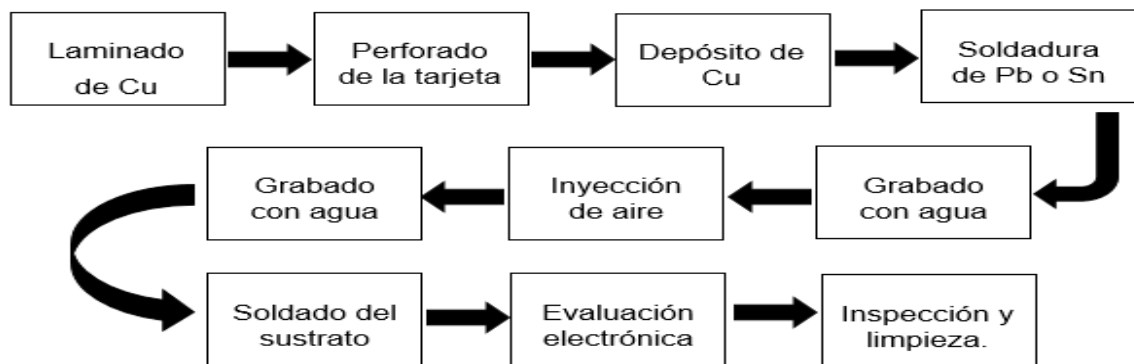
⁶ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. op. cit., p. 96.

Responsability), estas herramientas, combinadas con las diferentes leyes locales de cada país pueden ayudar a reducir el impacto ambiental generado por los RAEE⁷.

1.2 TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Las tarjetas de circuitos impresos son parte fundamental de todos los aparatos eléctricos y electrónicos, ya que en ellas se ensambla todas las conexiones electrónicas de los dispositivos, además, da el soporte mecánico a los dispositivos de consumo más pequeños como: Celulares, Tablet, etc. Las tarjetas de circuitos impresos, constituyen al menos el 3% (en peso) del total de los residuos electrónicos⁸, y en dispositivos electrónicos tales como los teléfonos celulares, las TCI constituyen aproximadamente el 7% del peso total del dispositivo⁹

Figura 1. Diagrama general del proceso de fabricación de una TCI



Fuente: Adaptado de. *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. p. 288.

A las tarjetas de circuitos impresos se ensamblan una serie de componentes eléctricos para completar el circuito que se desee fabricar, de estos componentes los más comúnmente encontrados son: diodos de emisión de luz (LEDs), procesadores, tarjetas de almacenamiento (memorias), resistencias, semiconductores, capacitores, etc¹⁰.

1.2.1 Tipos de tarjetas de circuitos impresos. Las tarjetas de circuitos electrónicos no son fabricadas siguiendo un patrón definido, sino que, cada TCI es fabricada según su uso o aplicación. De acuerdo a su tecnología, las tarjetas de circuitos impresos se pueden clasificar como: de un solo lado (con circuitos conductivos en solo un lado del sustrato), de doble lado (con circuitos conductivos

⁷ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. op. cit. p. 7.

⁸ KAYA, Muammer. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste management*. Agosto, 2016, p. 6.

⁹ CHRIS, Y. *et al.* Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board. 2006. p. 658

¹⁰ PHILIPS CORPORATION. Op. cit., p. 294.

a ambos lados del sustrato) y de múltiples capas (con circuitos entre las capas de sustrato, deben ser entre 4 y 16 capas)¹¹.

Otra forma de clasificar las tarjetas de circuitos impresos es según el material con el que se fabrica el sustrato, existen principalmente dos tipos de tarjetas de circuitos impresos usadas en computadoras y teléfonos celulares (FR-4 y FR-2), las tarjetas de circuitos impresos del tipo FR-4 están compuestas de múltiples capas de una resina epóxica y fibra de vidrio recubiertas por una capa de Cu, usualmente son de color verde o azul y tienen un alto valor, estas tarjetas son usualmente usadas en dispositivos pequeños como: teléfonos celulares, tabletas, etc. Las de tipo FR-2 consisten en una única capa de fibra de vidrio o papel fenólico de celulosa cubierta por una capa de Cu, generalmente son de color amarillo o café y tienen un valor menor que las tarjeta tipo FR-4, se pueden encontrar en grandes dispositivos como: televisores, computadoras, pantallas LED y LCD, etc¹²

1.2.2 Composición química de las tarjetas de circuitos impresos. La composición general de las tarjetas de circuitos impresos está dada por Metales (40%), materiales cerámicos (30%), plásticos (30%)¹³.

1.2.2.1 Metales. En la **Tabla 1**, se presenta la composición metálica de las TCI en general según varios autores.

¹¹ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. op. cit., p. 96.

¹² KAYA, Muammer. Op. cit., p.7.

¹³ KAYA, Muammer. Op. cit., p.7.

Tabla 1. Composición del contenido metálico de las TCI en general

	KAYA, M ¹⁴	Shuey and Taylor ¹⁵	Kim, B. et al ¹⁶	Park and Fray ¹⁷	Ewaste guide ¹⁸	Hino. et al ¹⁹	Yang, H ²⁰
Metal	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.
Cu	(6–27) %	20 %	15,6 %	16 %	6,9 %	14,6 %	(12,2–22,8) %
Fe	(1,2–8,0) %	8 %	1,4 %	5 %	20,5 %	4,79 %	0,15 %
Al	(2,0–7,2) %	2 %	NR	5 %	14,2 %	NR	NR
Sn	(1,0–5,6) %	4 %	3,24 %	3 %	1 %	5,6 %	0,33 %
Pb	(1,0–4,2) %	2 %	1,35 %	2 %	6,3 %	2,96 %	0,14 %
Ni	(0,3–5,4) %	2 %	0,28 %	1 %	0,85 %	1,65 %	0,02 %
Zn	(0,2–2,2) %	1 %	0,16 %	1 %	2,2 %	NR	NR
Sb	(0,1–0,4) %	0,4 %	NR	NR	NR	NR	NR
Au	(250–2050) ppm	1000 ppm	420 ppm	0,025 %	20 ppm	205 ppm	0,01 %
Ag	(110–4500) ppm	2000 ppm	1240 ppm	0,1 %	200 ppm	450 ppm	0,001 %
Pd	(50–4000) ppm	50 ppm	10 ppm	0,01 %	NR	220 ppm	NR

NR: No reporta.

El contenido metálico de las tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares en específico, se presenta a continuación (**Tabla 2**).

¹⁴ KAYA, Muammer. Op. cit., p.7.

¹⁵ SHUEY, S.A, TAYLOR, P. A review of a pyrometallurgical treatment of electronic scrap. 2004. p. 3.

¹⁶ KIM, B.S. *et al.* A process for extracting precious metals from spent printed circuit boards and automobile catalysts.2004. p. 55

¹⁷ PARK, Young. FRAY, Derek. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards, Journal of hazardous materials. 2008. p. 1153

¹⁸ KHALIQ, Abdul, AKBAR, Muhammad. Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: A review an Australian perspective, 2014. p. 155.

¹⁹ HINO, T. *et al.* Techniques to separate metal from waste printed circuit boards from discarded personal computers. J mater cycles waste Management. 2009. p. 44

²⁰ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. Journal of hazardous materials. Enero, 2011. p. 393.

Tabla 2. Composición metálica de las TCI de celulares

	Yamane. et al ²¹	Camelino. et al ²²	Calgaro. et al ²³	Ha. et al ²⁴	Hanafi. et al ²⁵	Kasper. et al ²⁶	Zhao. et al ²⁷
	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.	Cant.
Cu	34,49 %	65,74 %	31,95 %	35,1 %	(6,9-29,4) %	(37,8–39,5) %	(2,2-43,9)%
Fe	10,57 %	1,51 %	1,94 %	NR	NR	(1,4-6,5) %	(0,15-0,7) %
Al	0,26 %	NR	11,11 %	NR	(40,8-50,5) %	(0,3-1) %	(0,9-2,4) %
Sn	3,39 %	5,22 %	1,78 %	4 %	(3,7-4,4) %	(2,1-3,1) %	(0,1-4,5) %
Pb	1,87 %	1,07 %	NR	2,7 %	NR	(1,2-1,3) %	(0,4-3,2) %
Ni	2,63 %	1,98 %	2,71 %	NR	NR	(1,7-3,4) %	(0,03-0,1) %
Zn	5,92 %	0,22%	1,19 %	NR	NR	(1-3,4)%	(0,02-0,04) %
Au	NR	0,02 %	NR	0,12 %	NR	(0,06-0,1)%	5,5 ppm
Ag	0,21%	0,03 %	0,34 %	NR	NR	0,06 %	0,002 %
Pd	NR	0,01 %	NR	NR	NR	220 ppm	NR

NR: No Reporta

²¹ YAMANE, Luciana Harue. *et al.* Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*. 2011. p. 2557.

²² CAMELINO, Sebastian. *et al.* Initial studies about gold leaching from printed circuit boards (PCB's) of waste cell phones. 2015. p. 107.

²³ CALGARO, C.O. *et al.* Fast cooper extraction from printed circuit boards using supercritical carbon dioxide. *Waste Management*, Mayo, 2015. p. 4

²⁴ HA, Vinh. *et al.* Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phone. *Journal of hazardous materials*. 2010. p. 1116.

²⁵ HANAFI, Jessica. *et al.* Material recovery and characterization of PCB from electronic waste. 2012. p. 335

²⁶ KASPER, Angela. *et al.* Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste management*. 2011. p. 2541

²⁷ ZHAO, C. *et al.* Study on recovery of valuable metals from waste mobile phone PCB particles using liquid-solid fluidization technique. *Chemical Engineering Journal*. 2016. p. 221.

1.2.2.2 Materiales cerámicos. Los materiales cerámicos más comúnmente encontrados en las tarjetas de circuitos impresos son: SiO₂ (15 – 30%), Al₂O₃ (6.0 – 9.4%), Óxidos alcalinos (6.0%), titanatos (3.0%)²⁸.

1.2.2.3 Plásticos. A continuación se describe la composición plástica de las tarjetas de circuitos impresos: PE (10 – 16%), PP (4.8%), PS (4.8%), resina epóxica (4,8%), PVC (2,4%), PTPE (2,4%), Nylon (0,9%)²⁹.

1.3 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE METALES PRESENTES EN LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los métodos de recuperación de metales encontrados en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas.

1.3.1 Procesos pirometalúrgicos. Los procesos pirometalúrgicos tienen como objetivo principal la separación de los metales de los demás componentes mediante procesos a altas temperaturas en los que se produce una concentración de los elementos metálicos y los demás componentes son expulsados en corrientes gaseosas³⁰.

Esta alternativa, presentan ciertas ventajas como: no requieren tratamientos previos, se puede aplicar a una amplia variedad de RAEE. Sin embargo presentan otras grandes desventajas como: se genera una gran cantidad de contaminantes del aire por la formación de óxidos, dióxidos y furanos; la recuperación de metales (Sn, Pb, Zn, Al) es muy baja; los materiales cerámicos y la fibra de vidrio presentes en los RAEE aumenta la cantidad de escoria en el horno e incrementa las pérdidas de los metales³¹.

1.3.1.1 Recuperación de cobre por carbonización. La carbonización, es un proceso de pirolisis de sólidos en un ambiente con poca cantidad de aire, al realizar este proceso a las tarjetas de circuitos impresos, se busca eliminar los materiales cerámicos como la fibra de vidrio para posteriormente recuperar el cobre, en el proceso de carbonización se oxidan estos metales³².

Inicialmente, se remueven las partes montadas en la superficie de las tarjetas de circuitos impresos, se realiza una reducción de tamaño de partícula (< 4 mm), luego de esto, las partículas de las tarjetas de circuitos impresos son precalentadas, para

²⁸ KAYA, Muammer. Op. cit., p.7.

²⁹ KAYA, Muammer. Op. cit., p.7.

³⁰ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. op. cit., p. 16.

³¹ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. Op. cit., p. 16.

³² TOYOHISA, Fuhita. *et al.* Copper recovery from printed circuit board of e-waste. The minerals, metals & materials society. 2011. p. 1.

posteriormente realizar la carbonización, el proceso de carbonización se realiza en un horno a temperaturas de 673, 873 y 1073 K durante una hora, a este horno, se le inyecta N₂ a razón de 15 L/min, con el fin de mantener una concentración del 2,5% de O₂ dentro del horno, una vez realizado el proceso de carbonización, se dejan enfriar las partículas de las TCI a temperatura ambiente, estas partículas se pulverizan haciendo uso de un mortero, para obtener partículas de un tamaño aproximado de 150 μm, una vez obtenido el polvo, se procede a hacer un proceso de flotación en una celda de 200 cm³, se usa hidróxido de sodio y ácido sulfúrico para controlar el pH del proceso, los reactivos usados en el proceso de flotación son: Sulfuro de sodio e hidrógeno (NaHS) 70% de pureza como surfactante, xilato de amino potásico (PAX) 90% de pureza como colector y metil isobutilcarbinol (MIBC) como agente espumante; la celda debe contar con un agitador magnético que gira a 350 rpm. La espuma resultante del proceso de flotación es filtrada y secada a 363 K por 12 horas obteniéndose un porcentaje de recuperación de Cu máximo del 80%³³.

1.3.1.2 Calcinación de las TCI para la recuperación de oro. Las tarjetas electrónicas se deben precalentar en un horno a una temperatura de 100 °C; posteriormente, la tarjeta se introduce en una mufla a una temperatura aproximada de 450 °C por aproximadamente 4 horas; este proceso se realiza con el fin de degradar la base polimérica de la tarjeta; para que posteriormente los metales se puedan separar con facilidad³⁴.

Según (RAMÍREZ PELCASTRE). Este método, no suele presentar buenos resultados, ya que la parte polimérica de la tarjeta no se separan físicamente, por el contrario, el polímero se derrite sobre la parte metálica, lo que genera que los metales de interés queden atrapados en el polímero, lo que dificulta aún más la separación de estas dos partes; además de lo anterior, este método genera una gran cantidad de vapores debido a la calcinación del material³⁵.

1.3.2 Métodos hidrometalúrgicos. Los procesos hidrometalúrgicos representan la forma más antigua de tratamiento de metales, sus orígenes se remontan a la época de los alquimistas; estos procesos consisten en ataques con disolventes ácidos y/o básicos del material sólido con contenido metálico³⁶.

³³ Ibid., p. 2-5.

³⁴ RAMÍREZ PELCASTRE, Juan Manuel. Recuperación de oro a partir de chatarra electrónica. Tesis de ingeniería en ciencias de los materiales. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Área académica de materiales y metalurgia., p. 24. [En Línea] <http://bit.ly/2uaeh>. Recuperado, 11 de Febrero de 2017.

³⁵ Ibid., p. 33.

³⁶ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. Op. cit., p. 16.

1.3.2.1 Extracción de cobre usando H₂SO₄ y H₂O₂. La lixiviación ácida es generalmente usada para la extracción de metales bases como el cobre; se emplean ácidos fuertes como el ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico, al combinar el peróxido de hidrogeno como agente oxidante con el ácido mejora el desempeño del proceso de lixiviación³⁷.

En la metodología propuesta por (YANG) se desarrolla un proceso de lixiviación usando ácido sulfúrico junto con peróxido de hidrógeno como agente oxidante. Para realizar la extracción de cobre, mediante este tratamiento, en primer lugar, se debe realizar la reducción del tamaño de partícula de las tarjetas de circuitos impresos con el fin de mejorar la transferencia de masa entre las partículas y la fase líquida, una vez reducido el tamaño de partícula de las tarjetas de circuitos impresos se lleva a cabo el proceso de lixiviación, en el cual los sólidos se sumergen en una solución ácida (H₂SO₄ y H₂O₂) de 100 mL, en este proceso, el Cu presente en las partículas sólidas reacciona con la solución ácida para generar sulfato de cobre (CuSO₄)³⁸.

Se han estudiado los efectos de las diferentes variables que intervienen en este proceso de lixiviación como lo son: la concentración de H₂SO₄ en la solución ácida (%); volumen de H₂O₂ en la solución (mL), relación sólido/líquido, la temperatura a la que se realiza la extracción (°C) y el tiempo (min); llegándose a la conclusión de que, según la fuente consultada, las mejores condiciones para realizar este proceso son: 100 mL de solución ácida, 15% (peso) de H₂SO₄, 10 mL de H₂O₂, relación solido/liquido 1/10, temperatura ambiente y por 3 horas; bajo estos parámetros, según YANG³⁹ se puede llegar a recuperar más del 95% para muestras sólidas menores a 0,5 mm. La reacción que tiene lugar en la lixiviación es⁴⁰:



A partir de la solución de sulfato de cobre (CuSO₄) obtenida, es posible realizar un proceso de electroobtención del cobre en la fase líquida, según (CHAVERRA Y RESTREPO) al usar una celda electrolítica en acrílico con un volumen de 270 cm³, se utilizó como cátodo una placa de acero comercial con un área de 36 cm² y como ánodos, dos placas de plomo comercial, esta prueba se realiza durante aproximadamente 1 hora, usando una densidad de corriente fija de 222 A/m², en este proceso de electroobtención se obtiene una placa de cobre de 99,3% de pureza⁴¹.

³⁷ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andrea. Op. cit., p. 42.

³⁸ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. Journal of hazardous materials. Enero, 2011. p. 393.

³⁹ Ibid., p. 395-307.

⁴⁰ Ibid., p. 395-397.

⁴¹ CHAVERRA, Dario. RESTREPO, Oscar. Extracción de cobre a partir de residuos de tarjetas de circuitos impresos. Revista Colombiana de materiales. No. 5. p. 234 - 235.

1.3.2.2 Recuperación de cobre usando un sistema redox. Un proceso innovador y amigable con el medio ambiente para la recuperación del cobre presente en las tarjetas de circuitos impresos, propone usar una serie de cámaras electroquímicas conectadas con un reactor químico⁴².

En primer lugar, se realiza una reducción del tamaño de partícula de las tarjetas de circuitos impresos hasta obtener piezas de un área superficial de 40 – 100 cm², para asegurar una buena transferencia de masa entre la sustancia lixivante y las muestras de tarjetas de circuitos impresos; la sustancia lixivante consiste en una solución de HCl al 0,5 M y FeCl₃ al 0,3 M; el FeCl₃ se usa como agente oxidante, este proceso involucra tres cámaras electroquímicas, un reactor químico de 2000 mL equipado con un tambor rotatorio perforado y tres bombas que se usan para: asegurar el flujo necesario de la sustancia lixivante, bombear el electrolito rico en iones de hierro y metales disueltos desde el reactor químico al cátodo, bombear el electrolito rico en iones de hierro pero con bajo contenido de cobre al ánodo. El cátodo está hecho de una placa de cobre con un área total de 570 cm², también, hay dos ánodos formados por 40 barras de grafito a cada lado del cátodo. La velocidad de rotación del tambor del reactor químico es de 30 rpm, la relación sólido líquido 1:8, la densidad de corriente de 4 mA/cm², el proceso fue realizado por 24 h. En este proceso se logró una extracción máxima del 83% del Cu presente en las TCI, el cobre obtenido en el cátodo es de una pureza del 99%. Según los resultados obtenidos por el estudio realizado por (FOGARASI, y otros, 2015); Las reacciones que ocurren en este proceso son⁴³:



1.3.2.3 Recuperación de cobre mediante lixiviación y adsorción. Esta metodología, consiste en una combinación de los métodos de lixiviación por cianuración en columna y una posterior adsorción con carbón activado en columna. A continuación se describe el proceso presentado por MONTERO BERMUDEZ⁴⁴, La materia prima usada en este estudio son tarjetas de circuitos impresos y procesadores de computadoras descartadas, estos materiales, son inicialmente molidos para reducir el tamaño de partícula de los mismos, posteriormente, se someten a un proceso de tostación oxidante en una mufla a una temperatura de 800 °C por 2 horas, este proceso de tostación oxidante se realiza con el fin de eliminar

⁴² FOGARASI, Szabolcs. *et al.* Eco-friendly copper recovery process from waste printed circuit boards using Fe³⁺/Fe²⁺ redox system. Waste management, Febrero, 2015. p. 1

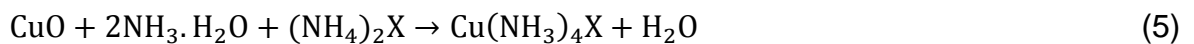
⁴³ *Ibid.*, p. 1-3.

⁴⁴ MONTERO BERMÚDEZ, Ricardo Andrés. Diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna. Proyecto para la obtención de título de ingeniero químico. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustrial. p. 46. [En Línea]. <http://bit.ly/2tesisepn>. Recuperado, 11 de Febrero de 2017.

el contenido plástico de las muestras, una vez realizado este pretratamiento, se procede a realizar la lixiviación en una columna de vidrio de 5 cm de diámetro y 22 cm de longitud, en la cual, se deposita una muestra de 50 g del material previamente tratado, por la parte superior de la columna, se suministra la solución lixivante cianuro de sodio (NaCN) 4 g/L con flujos de 1 L/d y 3 L/d con un pH 11; la solución efluente, rica en metales de esta columna, se pasa a otra columna de vidrio con un lecho de carbón activado con el fin de que los metales presentes en la solución emergentes de la columna de lixiviación con cianuro de sodio sean adsorbidos en el carbón activado, este proceso se realiza durante 15 días; los resultados obtenidos muestran que se logra obtener un porcentaje de recuperación de Cu del 56% cuando el flujo de Cianuro de sodio es de 1 L/d, del 74% cuando el flujo de cianuro de sodio es de 3 L/d⁴⁵.

1.3.2.4 Recuperación de cobre usando sales de amonio. En el proceso de lixiviación para la recuperar cobre de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), se pueden usar diversas sustancias para llevar a cabo la extracción del metal, actualmente, se está investigando el efecto de diferentes sales de amonio como: (NH₄)₂CO₃ (carbonato de amonio), (NH₄)₂SO₄ (sulfato de amonio) y NH₄Cl (cloruro de amonio), en el proceso antes mencionado.

Inicialmente, se realiza una reducción del tamaño del partícula a un tamaño menor a 8 mm, el proceso de extracción del cobre se realiza en un reactor de vidrio con un agitador magnético que gira a aproximadamente 600 rpm, al cual se le inyecta aire desde el fondo a razón de 50 L/h, este reactor debe estar sometido a baño maría, con el fin de regular los cambios de temperatura que se dan debido a las reacciones exotérmicas que tienen lugar. Cada sal de amonio se disuelve en una solución de agua desmineralizada y amoniaco con una relación sólido: líquido de 1:5 de la sal en la solución líquida; las reacciones que ocurren en este proceso son⁴⁶:



Donde X representa un anión de la solución de amonio (carbonato, sulfato o cloruro).

Según SUN⁴⁷ de las tres sales estudiadas, la que presento una peor capacidad para lixiviar el cobre presente en la muestra fue el cloruro de amonio, mientras que la sal que presento un mejor desempeño fue el carbonato de amonio, usando el carbonato de amonio, se logró obtener una composición metálica en la solución del 96%. El

⁴⁵ Ibid., p. 46-54, 79.

⁴⁶ SUN, Z. An effective process to selectively recovery copper with solutions containing different ammonium salts. Waste management. p. 1-3.

⁴⁷ Ibid., p. 3-5.

proceso de electroobtención del cobre se realiza haciendo uso de un cilindro de cobre de 10 mm de altura y de 10 mm de diámetro como cátodo, un cilindro de grafito de 10 mm de altura y 40 mm de diámetro como ánodo⁴⁸.

1.3.2.5 Extracción de cobre usando dióxido de carbono supercrítico. El uso de fluidos supercríticos se considera hoy como una técnica no convencional muy prometedora para la recuperación de metales en matriz sólido: líquido. Los fluidos supercríticos son sustancias que se son sometidas a condiciones de presión y temperatura que exceden sus puntos críticos, los fluidos supercríticos tienen un gran poder como solvente y son fáciles de separar de los solutos por simple expansión a presión atmosférica, con el uso de fluidos supercríticos se logra una mayor transferencia de masa entre el soluto y el solvente que con el uso de solventes típicos. El dióxido de carbono es uno de los solventes supercríticos más utilizados debido a sus bajas condiciones supercríticas (30,9 °C y 73,8 bares); por su gran difusividad y su baja viscosidad del CO₂ supercrítico permiten la extracción directa de solutos de matrices sólidas⁴⁹.

En primer lugar se seleccionan las tarjetas de circuitos impresos, posteriormente, se les reduce el tamaño de partícula, a un tamaño menor a 2 mm, en este método, se propone realizar una lixiviación ácida usando ácido sulfúrico (H₂SO₄) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂), al reactor de lixiviación ácida se le inyecta el dióxido de carbono (CO₂) a condiciones supercríticas, para alcanzar dichas condiciones el sistema debe contar con una bomba de alta presión; además de esto, el reactor de la lixiviación debe contar con una válvula de extracción para separar la fase líquida de la fase sólida, el CO₂ es separado de la fase acuosa por expansión⁵⁰.

Según los resultados presentados por CALGARO, y otros⁵¹. En la lixiviación ácida, se pueden alcanzar recuperaciones cercanas a el 45% del cobre presente en las muestras de las TCI, luego de 180 min y usando una relación sólido/líquido de 1/10; sin embargo, cuando la relación sólido/líquido es de 1/20, se recupera cerca del 78% de cobre al pasar los 120 min. En la lixiviación con dióxido de carbono supercrítico, cuando la relación sólido/líquido es de 1/10, se extrae aproximadamente el 48,5% del cobre en tan solo 20 min; cuando la relación sólido/líquido es de 1/20 el porcentaje de extracción de cobre fue de 83,1% en 20 min. Por lo cual, el uso del dióxido de carbono supercrítico, garantiza una recuperación similar a la que se obtiene mediante la lixiviación ácida en un periodo de tiempo mucho menor⁵².

⁴⁸ Ibid., p. 3-5.

⁴⁹ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. Op. cit., p. 46 - 48.

⁵⁰ CALGARO, C.O. *et al.* Op. cit., p. 2 – 3.

⁵¹ CALGARO, C.O. *et al.* Op. cit., p. 2 – 3.

⁵² Ibid., p. 3-4.

1.3.2.6 Lixiviación de oro con cianuro de sodio. Más de la mitad del total de las minas de oro y plata en el mundo usan la cianuración como método de extracción de estos metales, en el que en primer lugar se realiza un proceso de lixiviación en el que el oro es disuelto en medio acuoso, el oro es un metal poco soluble en agua, por lo cual, se usa cianuro de sodio o potasio junto con oxígeno para disolver el oro⁵³.

Este método se usa para extraer el oro y plata de las tarjetas de circuitos impresos, para ello, primero, se reduce el tamaño de partícula de las tarjetas, a un tamaño de partícula menor a 1 mm, este material se somete a una separación magnética y otro separación electrostática, para de esta manera separar la fracción no conductora del material, se toma una muestra de aproximadamente 60 gramos del material conductor y esta se somete a una serie de lixiviación ácidas y básicas usando sustancias como cianuro de sodio, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y cloruro de sodio, una vez terminadas las lixiviaciones, se analiza el licor resultante para determinar el contenido metálico del mismo, el análisis de este licor indica que tras las seis lixiviaciones propuestas por (OLIVEROS GÓMEZ), se logró extraer el 97% de la plata y el 95% de el oro presente en la muestra utilizada⁵⁴.

Cabe resaltar que la extracción de oro en la minería se ha realizado durante muchos años usando el cianuro de sodio, por lo tanto, el uso de esta sustancia garantizaría una extracción muy efectiva del oro presente en las tarjetas de circuitos impresos; sin embargo, esta sustancia es demasiado tóxica para la salud y para el medio ambiente⁵⁵, lo cual es un parámetro muy importante a tener en cuenta.

1.3.2.7 Lixiviación de oro con agua regia. Otra sustancia con la cual se puede llevar a cabo el proceso de lixiviación para la extracción de oro es la denominada agua regia, la cual es una mezcla de ácido clorhídrico (HCl) concentrado y ácido nítrico (HNO₃) concentrado, generalmente en una relación de 3:1, esta sustancia tiene la particularidad de ser uno de los pocos reactivos capaces de disolver el oro⁵⁶.

Para desarrollar el método de extracción de oro por medio del proceso de lixiviación con agua regia, las tarjetas de circuitos impresos deben ser molidas para obtener un tamaño de partícula menor a 0,1 mm, una muestra de aproximadamente 5 gr son sumergidas en ácido nítrico en intervalos de 5 minutos, para remover la plata, cobre

⁵³ COMMITTEE ON THE ENVIRONMENT, PUBLIC HEALTH AND FOOD SAFETY. Background note on cyanide in gold mining. Septiembre, 2013, p. 1. [En Línea]. <http://bit.ly/2cyanidemining>. Recuperado, 11 de Febrero de 2017.

⁵⁴ OLIVEROS GÓMEZ, Honorio. Metodología para recuperar metales preciosos: Oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos. Magister en ingeniería de materiales y procesos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. p. 49 – 57. [En línea]. <http://bit.ly/2unaloliveros>. Recuperado, 11 de Febrero de 2017.

⁵⁵ GRUPO TRANSMERQUIM. Hoja de datos de seguridad del cianuro de sodio. p. 2 ,5. [En Línea]. http://bit.ly/hojadeseguridad_cianurodesodio. Recuperado, 23 de Septiembre de 2017.

⁵⁶ DICKERSON, Gray. Principios de química. Tercera Edición. California. 1992. p. 386.

y otros metales bases que retardan la extracción del oro, la solución resultante es filtrado para separar la fase líquida de la fase sólida, posteriormente se sumerge la fase sólida en una solución de 1:10 de HNO₃ concentrado en HCl concentrado (agua regia), para disolver el oro; luego de este proceso, se realiza filtración de la solución, para separar la fase líquida de la fase sólida, La fase líquida se trata con tres reactivos diferentes, FeSO₄, N₂H₄, C₂H₂O₄, con el fin de precipitar el oro extraído de las tarjetas electrónicas, para ello, 20 mL de una solución con 2% de C₂H₂O₄ se agrega a la solución líquida producto de la lixiviación con agua regia de las TCI, esta mezcla es calentada y agitada a 60 °C y 50 rpm durante 17 horas, posteriormente el oro precipitado se filtra, este procedimiento se repite para evaluar el comportamiento de cada uno de los reactivos propuestos; la reacción química que se produce al poner en contacto el oro con el agua regia es⁵⁷:



1.3.3 Procesos biohidrometalúrgicos. Estos procesos son novedosos para la extracción o refinación de metales, tienen un muy alto potencial debido a las crecientes investigaciones que se han realizado en los últimos 20 años y el interés que han mostrado las grandes compañías mineras en el desarrollo de estas metodologías⁵⁸.

1.3.3.1 Recuperación de cobre por biolixiviación. Con el fin de encontrar nuevos métodos para realizar el reciclaje de los metales presentes en los residuos electrónicos, se han adelantado algunas investigaciones relacionadas al uso de procesos microbiológicos como una alternativa a los procesos químicos, uno de dichos procesos es la biolixiviación, la cual se puede aplicar a una gran cantidad de metales como: Cu, Ni, Zn, Au, Ag⁵⁹.

El proceso de biolixiviación es en esencia un proceso hidrometalúrgico que usa microorganismos que se caracterizan por consumir el sustrato orgánico o inorgánico y generan el agente lixivante para llevar a cabo la disolución del metal, algunos de los microorganismos estudiados para la recuperación de metales son: *Acidithiobacillus ferroxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *leptospirillum ferrooxidans* y *sulfobacillus thermosulfidooxidans*⁶⁰; los cuales son capaces de generar iones de cianuro, estos iones son los encargados de la disolución de los metales. En un proceso típico de biolixiviación, se usan columnas de lixiviación, las cuales, se llenan con las tarjetas de circuitos impresos previamente molidas, en la columna de agrega un poco de ácido sulfúrico para controlar el pH (2) del proceso,

⁵⁷ SAADATJO, Naghi. HEYDARI, Hadi. ABDULLAHI, Amhad. BEHZAD, Mahdi. Recovery of gold from computer circuit board scraps: the study of the effect of different reductants. Journal of applied Chemistry. Septiembre, 2013, Vol. 8, No. 27., p. 55 – 59.

⁵⁸ SYED, Sabir. Recovery of gold from secondary sources – A review. Hidrometallurgy. 2011. p. 33.

⁵⁹ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. Op. cit., p. 104.

⁶⁰ VEIT, Hugo Marcelo, BERNARDES MOURA, Andréa. Op. cit., p. 104.

también se agrega una solución que contenga nutrientes (N, P, K) para los microorganismos, el aire se bombea desde el fondo de la columna con el fin de suplir los requerimientos de O₂ y CO₂ del sistema, estas investigaciones han mostrado que usando estos microorganismos (*sulfobacillus thermosulfidooxidans*) se puede obtener una lixiviación máxima del 89% de Cu⁶¹.

1.3.3.2 Método de bioadsorbentes. En los últimos tiempos se ha considerado la adsorción en fase sólida para la remoción y/o recuperación de iones de metales presentes en soluciones líquidas como una tecnología muy prometedora, un ejemplo de ello es el amplio uso del carbón activado como adsorbente en diferentes procesos de remoción de materia orgánica e inorgánica en soluciones acuosas; en este caso, se encontró un método en el cual usan huesos de dátiles como bioadsorbentes para la recuperación de iones de oro (III); en investigaciones previas se ha estudiado el uso de polvo de huesos de dátiles para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos en soluciones acuosas obteniendo buenos resultados⁶².

Para llevar a cabo la recuperación del oro presente en las tarjetas de circuitos impresos por este método, según el autor consultado, primero se debe extraer el oro de las TCI y preparar una solución de 1000 mg/L iones de oro (III) en HCl, se usan huesos de dátiles como bioadsorbentes, a los cuales se les realiza la prueba de adsorción de azul de metileno para determinar el área superficial del material, los huesos deben ser secados en un horno de secado a una temperatura de 70 °C por un día, estos huesos son pulverizados hasta un tamaño de partícula menor de 250 µm y luego se introducen a una mufla en donde son incinerados a 650 °C por 2 horas, la ceniza obtenida se deja enfriar a temperatura ambiente, una vez fría, la ceniza se agrega a 100 mL de la solución de oro, esta mezcla se lleva a un agitador hasta alcanzar el equilibrio, posteriormente se filtra la solución para separar la fase sólida de la fase líquida. Por último se mide la cantidad de iones de oro (III) en la ceniza de huesos de dátiles y la cantidad de iones de oro (III) remanente en la solución acuosa por difracción de rayos x. Las cenizas de los huesos de dátiles alcanzaron a adsorber aproximadamente el 90% de los iones de oro (III)⁶³.

1.4 MARCO LEGAL

A continuación se describen de manera muy breve las principales leyes que tratan el tema del manejo de los residuos peligrosos en Colombia.

⁶¹ VEIT, Hugo Marcelo. BERNARDES MOURA, Andrea. Op cit., p. 104

⁶² AL-SAIDI, H. M. The fast recovery of gold (III) ions from aqueous solutions using raw date pits: Kinetics, thermodynamic and equilibrium studies. Journal of Saudi Chemical Society. Junio, 2013, p. 2.

⁶³ Ibid., p. 2-4.

- Ley 1672 del 19 de Julio del 2013: Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones. En esta ley, se indica que las empresas productoras de estos dispositivos deben: Implementar sistemas de recolección y de gestión ambientales para los residuos que generen su mercancía, siendo el responsable de la administración y la financiación de dichos sistemas; apoyar iniciativas de reaprovechamiento o valorización de los RAEE; incentivar el reciclaje de los diversos materiales que contienen los RAEE para de esta manera evitar la contaminación ambiental que estos generan; entre otros. Las empresas comercializadoras de este tipo de productos deben apoyar a los productores al cumplimiento de estos lineamientos⁶⁴.
- El decreto 4741 de 2005: Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. En este decreto se dictan las obligaciones del fabricante o importador de productos que contengan sustancias químicas peligrosas; entre estas obligaciones se encuentran: asegurar un manejo seguro de los residuos que contienen las sustancias químicas peligrosas, elaborar planes integrales de gestión ambiental para minimizar la cantidad y la peligrosidad de los residuos que se generan, contar con servicios, sean propios o de terceros, de almacenamiento, tratamiento, recuperación y disposición final de los desechos⁶⁵.
- La ley 430 de 1998: Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. En el artículo 6 de esta ley, se establece que los productores e importadores de producto con sustancias peligrosas se deben responsabilizar de los desechos se generen a raíz de estos productos; por lo cual es su obligación el manejo y disposición final de estos residuos⁶⁶.

⁶⁴ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1672. (19, Julio, 2013). Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., 2013. p. 5-6.

⁶⁵ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DE DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4741. (30, Diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá, D.C., 2005. p. 5-7

⁶⁶ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 430. (16, Enero, 1998). Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., 1998. p. 3.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS.

En esta sección se presentan los diferentes procesos y pretratamientos a los que fue sometido el material de partida, con el fin de conocer la composición química del mismo, adicional a esto, se reportaran los resultados de cada técnica y la comparación de dichos resultados con los encontrados en la bibliografía consultada.

2.1 TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se decidió usar tarjetas de circuitos impresos de celulares debido a que los celulares es la principal mercancía de aparatos electrónicos de la empresa Patrix Technology. Por lo cual, la empresa esa interesada en encontrar un proceso de reutilización de los residuos de estos productos, para de esta forma comenzar a establecer un posible proceso de reciclaje de estos residuos electrónicos.

Aproximadamente 60 tarjetas de circuitos impresos (930 g) de celulares obsoletos de diferentes marcas comerciales, entre ellas: Samsung, Huawei, Sony ericsson, Avvio, etc. (ver la **Figura 2**). Fueron obtenidas de la empresa Patrix Technology; estas tarjetas fueron sometidas a un proceso de limpieza, haciendo uso de herramientas básicas como pinzas y destornilladores; en este proceso se retiraron algunas de sus partes como: puertos, conectores, protectores de ranuras para memorias, etc. Los cuales no serán tenidos en cuenta en este estudio, el peso total de las tarjetas de circuitos impresos luego del proceso de limpieza es de 710 g.

Figura 2. Tarjetas de circuitos impresos aportadas por la empresa Patrix Technology



2.2 REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

Debido a los altos costos energéticos asociados con el funcionamiento del equipo que conlleva realizar las operaciones de molienda, por ser una de las operaciones unitarias básicas menos eficaz⁶⁷ y la no disponibilidad de un molino apto para procesar este tipo de material, se optó por realizar la reducción del tamaño de partícula de las tarjetas de circuitos impresos de forma manual, haciendo uso de herramientas como tijeras industriales para corte de lámina de distinto tamaño.

Al realizar el corte de las tarjetas de circuitos electrónicos, se obtuvo un material particulado (693,42 g), las pérdidas de material en la reducción manual del tamaño de partícula, se atribuyen a que algunas de las partículas más finas, luego del corte, se dispersaban y debido a su tamaño se perdían con gran facilidad. El material particulado obtenido, se puede observar en la **Figura 3**. Este material, presenta diversos tamaños de partícula, por lo cual, se realizó el tamizado del mismo, por medio de esta técnica se puede conocer la distribución del tamaño de partícula de este material particulado, así mismo, se realizó el cuarteo manual del material particulado, con el fin de obtener una muestra representativa del mismo, la cual se sometió a una prueba de fluorescencia de rayos x, para de esta manera conocer la composición metálica del material.

Figura 3. Partículas de tarjetas de circuitos impresos



⁶⁷ McCABE, Warren, SMITH, Julian, HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. Cuarta edición. p. 921.

En primer lugar, se llevó a cabo, el tamizado del material usando mallas de abertura pequeña, para separar las fracciones más finas del material, el resultado de esta prueba se encuentra en la **Tabla 3**.

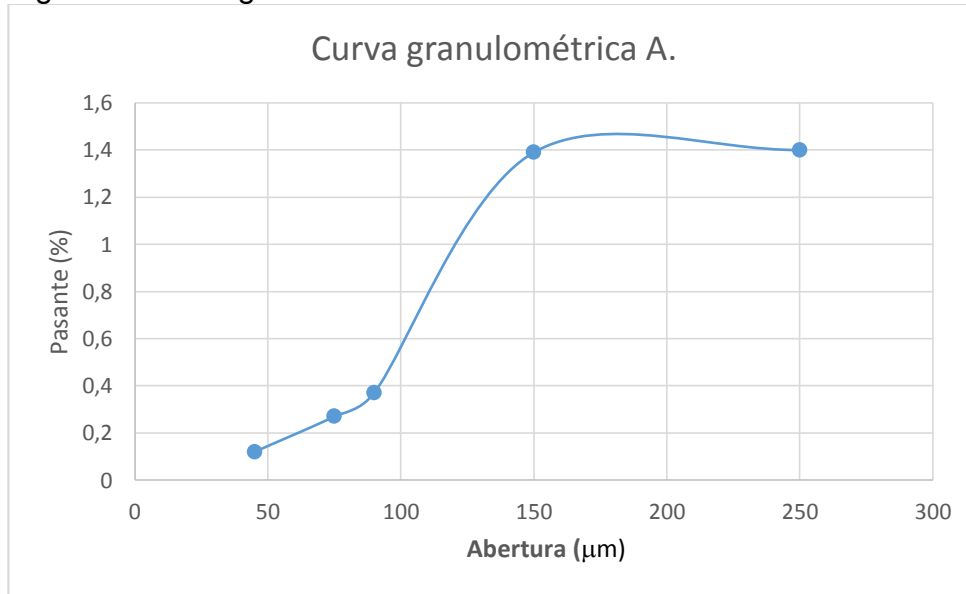
Tabla 3. Granulometría A

TAMAÑO			RETENIDO		ACUMULADO (%)	
MALLA	Abertura (μm)	Abertura (mm)	g	%	RETENIDO	PASANTE
60	250	0,25	683,74	98,6	98,6	1,4
100	150	0,15	0,01	0	98,61	1,39
170	90	0,09	7,11	1,03	99,63	0,37
200	75	0,075	0,66	0,09	99,73	0,27
325	45	0,045	1,08	0,16	99,88	0,12
COLECTOR	-	-	0,82	0,12	100	0
TOTAL			693,42	100		

Fuente: Xamtec S.A.S.

En la **Figura 4**, se presenta la curva granulométrica correspondiente a los datos presentados en la **Tabla 3**.

Figura 4. Curva granulométrica A



Fuente: Xamtec S.A.S.

Al observar la **Tabla 3**. Granulometría A; se puede ver que los resultados obtenidos de este primer tamizado, son deficientes debido a que se usaron mallas con una abertura muy pequeña para este material, por lo cual, la mayoría del material (98,6%) quedó retenido en la primer malla usada (malla 60) y no se puede conocer

con certeza el tamaño de partícula de la mayoría del material, porque con estos resultados solo se logra conocer que el 98,6% del material particulado obtenido tiene un tamaño de partícula >0,25 mm.

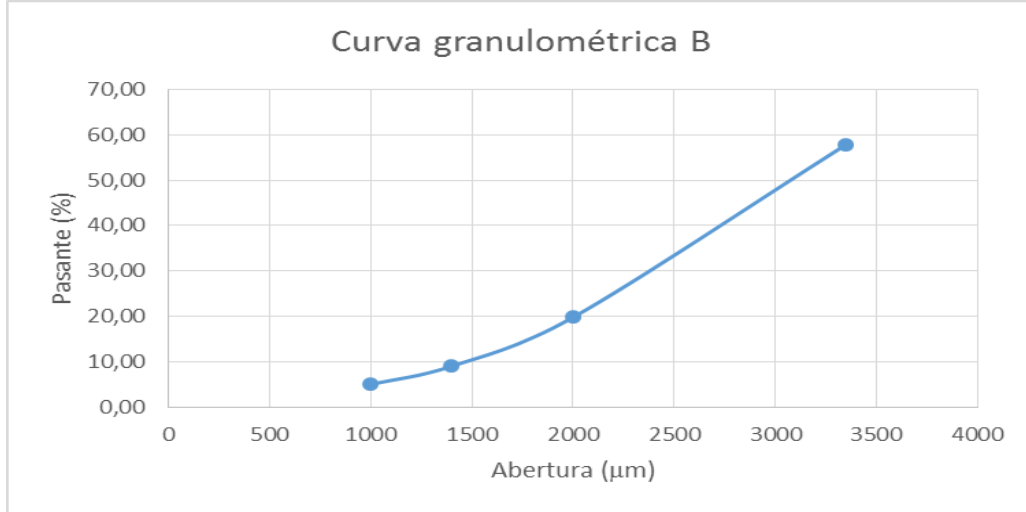
Debido a lo anterior, se realizó una segunda prueba de tamizado usando mallas de mayor abertura, con el fin de separar y conocer el tamaño de partícula de las fracciones gruesas del material particulado; para ello se tomó la fracción del material particulado (98,6%) retenido en la primera de las mallas usadas el ensayo anterior (malla 60),

Para llevar a cabo el segundo ensayo granulométrico, en primer lugar, se seleccionaron 4 mallas de una abertura mayor a las utilizadas en la primera prueba, posteriormente se ubicaron las mallas de mayor a menor abertura en el soporte para tamizado, se introdujo el material particulado por la parte superior de las mallas, se realizó el tamizado por un tiempo de 15 minutos; una vez transcurrido el tiempo, se pesó la masa del material retenido en cada una de las mallas en una balanza digital. En la **Tabla 4**, se presentan los resultados de este ensayo.

Tabla 4. Granulometría B

Malla	TAMAÑO		RETENIDO		ACUMULADO (%)	
	Abertura (μm)	abertura (mm)	g	%	Retenido	Pasante
6	3350	3,35	287,7	42,17	42,17	57,83
10	2000	2	259,3	38,01	80,18	19,82
14	1400	1,4	73,3	10,74	90,93	9,07
18	1000	1	27,5	4,03	94,96	5,04
Colector	-	-	34,4	5,04	100	0
TOTAL			682,2	100		

Figura 5. Curva granulométrica B



Los resultados obtenidos de la prueba granulométrica B permiten tener un mejor conocimiento del tamaño de partícula del material, como se puede ver en la **Tabla 4**, se logró una buena distribución del tamaño de partícula en las mallas escogidas para este ensayo; el material retenido en la malla 6, fue descartado, debido a que esta porción del material es la de mayor tamaño, por lo que descartarla, puede representar una mejoría en el proceso de lixiviación, ya que el tamaño de partícula tiene una relación inversamente proporcional a la efectividad de la lixiviación⁶⁸. Para finalizar se presentan los resultados obtenidos en las dos pruebas granulométricas del material particulado; el cual se reporta en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Resultados de las pruebas granulométricas A y B

Malla	TAMAÑO		RETENIDO		ACUMULADO (%)	
	Abertura (µm)	apertura (mm)	g	%	Retenido	pasante
10	2000	2	259,3	64,16	64,16	35,84
14	1400	1,4	73,3	18,14	82,29	17,71
18	1000	1	27,5	6,80	89,10	10,90
Colector B	-	-	34,4	8,51	97,61	2,39
170	90	0,09	7,11	1,76	99,37	0,63
200	75	0,075	0,66	0,16	99,53	0,47
325	45	0,045	1,08	0,27	99,80	0,20
Colector A	-	-	0,82	0,20	100	0
TOTAL			404,17	100		

⁶⁸ TREYBAL, Robert. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. p. 793.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE PARTIDA

A pesar de contar con amplia información de la composición teórica de las TCI, se decidió que para este trabajo de grado resulta más conveniente contar con la composición específica del material con el que se trabajará, para de esta manera, tener, certeza de los tipos de metales y las cantidades de los mismos en las TCI.

La caracterización de las tarjetas de circuitos impresos, se realizó mediante la prueba analítica de fluorescencia de rayos x (XRF), la cual, es una técnica cuantitativa y cualitativa que se usa para la detección de gran cantidad de elementos químicos con número atómico superior a 5, especialmente metales y cerámicos⁶⁹.

La prueba de fluorescencia de rayos x de la muestra representativa de las partículas de las tarjetas de circuitos impresos fue realizada por el método de pastilla prensada y haciendo uso de un espectrómetro de rayos x modelo 9900 series marca ARL, este equipo se puede visualizar en la **Figura 6**.

Figura 6. Espectrómetro usado para la prueba de XRF



Fuente: Xamtec S.A.S.

En la **Tabla 6** se encuentran consignados los resultados obtenidos en la prueba de XRF, para determinar la composición metálica de las tarjetas de circuitos impresos el informe completo de resultados se puede ver en el **Anexo A**.

⁶⁹ BECKHOFF, Burkhard. WENDELL, Reiner. Handbook of practical x-ray fluorescence analysis. Nueva York. 1965.

Tabla 6. Composición de las TCI mediante XRF

Elemento	Resultado (% en peso)
Si	21,50
Cu	9,97
Al	4,16
Sn	3,34
Fe	2,75
Ni	1,38
Ti	0,70
Zn	0,47
Sr	0,12
Cr	0,06

Fuente: Xamtec S.A.S.

El límite de detección de elementos del equipo utilizado para la prueba de XRF es de 100 ppm, por esto, es posible que metales preciosos como, Au, Ag, Pt, estén en el material en concentraciones menores a 100 ppm (Ver **Anexo A**). Como se puede verificar en las **Tablas 1 y 2**, estos elementos están en muy bajas concentraciones en las TCI.

Al comparar, los resultados obtenidos de la caracterización de las TCI con los reportados en la bibliografía (**Tabla 1 y 2**), dicho paralelo, se expone en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Comparación de los resultados del análisis de XRF y los teóricos

	Resultados XRF	TCI en general			TCI de celulares		
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Cu	9,97 %	6 %	22,8 %	15,67 %	2,2 %	65,74 %	32,69 %
Al	4,16 %	2 %	14,2 %	6,08 %	0,26 %	50,5 %	13,41 %
Sn	3,34 %	0,33 %	5,6 %	2,97 %	0,1 %	4,5 %	3,23 %
Fe	2,75 %	0,15 %	20,5 %	6,13 %	0,15 %	10,57 %	3,25 %
Ni	1,38 %	0,02 %	5,4 %	1,44 %	0,03 %	3,4 %	1,79 %
Zn	0,47 %	0,2 %	2,2 %	1,18 %	0,02 %	5,92 %	1,68 %

Se puede evidenciar que todos los componentes comparados en la **Tabla 7** se encuentran dentro de los rangos teóricos de composición a pesar de que las tarjetas de circuitos impresos en general, como las utilizadas en los teléfonos celulares a pesar de que las TCI, tienen una muy variada composición dependiendo del fabricante y la aplicación de las mismas.

3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECUPERACION DE METALES

En este capítulo, se seleccionó el método de recuperación del metal presente en las tarjetas de circuitos impresos, luego de una amplia revisión bibliográfica de los mismos, la decisión del método a ejecutar se hizo bajo el uso de criterios de selección del mismo, basados en la dificultad técnica, económica y práctica de cada método considerado.

3.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO

Con base en a la composición de las tarjetas de circuitos electrónicos obtenida luego de realizar la prueba de fluorescencia de rayos x (Ver **Tabla 6**), se decidió que el metal a extraer sería el cobre, debido a que es el metal que se encuentra en mayor cantidad (9,97%) en la muestra de tarjetas de circuitos impresos. Por esta razón, solo se tuvieron en cuenta para la selección de la mejor alternativa, los métodos de extracción de cobre consultados.

A continuación se presenta un cuadro comparativo en el cual se pueden ver algunas de las ventajas y desventajas de los métodos de recuperación de cobre consultados.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de cada método.

Método	Ventajas	Desventajas
Extracción de cobre usando CO ₂ supercrítico	El uso del CO ₂ supercrítico, mejora la lixiviación	Equipos usados
	Tiempo corto de reacción	Proceso poco estudiado
	Porcentajes de recuperación (> 80%)	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)
Extracción de cobre usando H ₂ SO ₄ y H ₂ O ₂	Porcentajes de recuperación (> 90 %)	Uso de reactivos corrosivos (H ₂ SO ₄)
	Se usan equipos básicos de laboratorio	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)
	Método hidrometalúrgico muy estudiado	El tamaño de partícula condiciona la lixiviación
Recuperación de Cu usando un sistema redox	Proceso amigable con el medio ambiente	Equipos usados
	Electroobtención del cobre en simultaneo con la extracción	Uso de reactivos corrosivos (HCl)
	Porcentajes de recuperación (> 83 %)	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)
Recuperación de cobre usando sales de amonio	Altos porcentajes de recuperación (> 90 %)	Equipos de laboratorio usados
	Reactivos no peligrosos	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)

Cuadro 1. (Continuación).

Recuperación de cobre por biolixiviación	Proceso amigable con el medio ambiente	Proceso novedoso (poco estudiado)
	Porcentajes de recuperación (> 85 %)	Uso de cepas y laboratorios aptos para microorganismos
	Se pueden disolver varios metales a la vez	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)
Recuperación de cobre por carbonización	Porcentajes de recuperación (> 70%)	Proceso pirometalúrgico que genera emisiones de gases
	Se obtiene un concentrado de varios metales	Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)
Recuperación de Cu mediante lixiviación y absorción	Porcentaje de recuperación (> 75 %)	Uso de reactivos muy peligrosos (NaCN)
		Equipos de utilizados
		Pretratamiento (Reducción del tamaño de partícula)

Para seleccionar el método de recuperación más adecuado, se usará un método de análisis multicriterio para la toma de decisiones llamado método de sumas ponderadas⁷⁰. A continuación se describen cada uno de los criterios que se tendrán en cuenta.

- **Riesgo de los reactivos o sustancias usadas (C1):** En este campo se tendrá en cuenta la peligrosidad de los reactivos y sustancias que se usan en el proceso de extracción. Se da una calificación de 0 a 4, siendo 0 la calificación dada al conjunto de reactivos y sustancias más peligrosas y 4 la calificación dada a las menos peligrosas, por lo que se da prioridad a los métodos que usen sustancias menos peligrosas. A continuación se presenta un cuadro donde se indica que representa cada valor. Para cada valor, se tomó como referencia los diamantes NFPA de las sustancias más peligrosos de cada método

Cuadro 2. Valores de calificación, C1

Valor	Peligrosidad	Descripción
0	Mortal	Altamente tóxico
1	Muy peligroso	Tóxico
2	Peligroso	Corrosivo
3	Poco riesgo	Irritante
4	Sin riesgo	No genera efectos a la salud

- **Equipos usados (C2):** En este criterio se tiene en cuenta la cantidad de equipos y la facilidad con la que se podría conseguir un laboratorio que cuente con dichos equipos. Se da una calificación de 0 a 4, siendo 0 la calificación dada al método

⁷⁰ ARCE, Enrique. Introducción al diseño básico de procesos químicos. México D.F. 2011. p. 136 – 138.

que use una mayor cantidad de equipos que puedan ser difíciles de encontrar en un laboratorio convencional y 4 al método que use equipos básicos de laboratorio. De esta manera, se dará una mayor importancia a aquellos métodos que usan equipos comunes en cualquier laboratorio químico.

Cuadro 3. Valores de calificación, C2.

Valor	Equipos usados
0	Reactores grandes y biorreactores
1	Columnas empacadas
2	Bombas
3	Hornos y muflas
4	Equipos básicos de laboratorio

- **Costo y disponibilidad de los reactivos y sustancias usadas (C3):** En esta parte de la matriz se tendrá en cuenta el costo de los reactivos y sustancias que se usarán en cada uno de los métodos de recuperación investigados, también se tendrá en cuenta la facilidad de conseguir dichos reactivos y sustancias. Se dará una calificación de 0 a 3, siendo 0 la calificación para los reactivos y las sustancias más costosas y difíciles de conseguir y 3 para los más económicos y fáciles de conseguir. Por lo cual, se da mayor favorabilidad a los métodos más económicos.

Cuadro 4. Valores de calificación, C3,

Valor	Disponibilidad de las sustancias	Descripción
0	Importaciones	Sustancias que no se producen en el país
1	Mercados especializados	Materiales de sectores especializados (Microorganismos)
2	Sustancias restringidas	Reactivos que requieren permisos especiales para su compra
3	Sustancias de venta libre	Sustancias que pueden ser adquiridas por cualquier persona

- **Rendimiento o % de recuperación (C4):** En esta columna de la matriz se analizarán los distintos porcentajes de recuperación reportados en la bibliografía de cada uno de los métodos consultados. Se dará una calificación de 0 a 5, como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 8. Valores de calificación, C4.

Valor	Porcentaje de recuperación
0	< 50 %
1	> 50 %
2	> 60 %
3	> 70 %
4	> 80 %
5	> 90 %

A cada criterio se les asigna un valor numérico o peso, que representa la importancia relativa de cada criterio frente a los demás, el valor que se le da al peso de cada criterio va de 0 a 1 y la suma de estos valores debe ser igual a 1⁷¹.

En la **tabla 9** se muestran las calificaciones dadas a cada método y el peso dado a cada criterio, de acuerdo a la teoría del método de sumas ponderadas, la alternativa con un valor mayor en la suma ponderada, será la escogida.

Tabla 9. Calificación de cada método en cada criterio

Método.	C1	C2	C3	C4
Extracción de cobre usando carbono supercrítico.	2	1	2	4
Extracción de cobre usando H ₂ SO ₄ y H ₂ O ₂ .	2	5	2	5
Recuperación de cobre usando un sistema redox.	2	1	2	4
Recuperación de cobre usando sales de amonio.	4	1	3	5
Recuperación de cobre por biolixiviación.	0	1	1	4
Recuperación de cobre por carbonización.	3	4	2	3
Recuperación de cobre mediante lixiviación y adsorción.	0	2	2	3
Peso, w	0,2	0,25	0,25	0,3

Como se puede ver en la tabla anterior, al criterio que se le dio un mayor peso fue al C4 (Rendimiento o porcentaje de recuperación), debido a que el objetivo principal de este estudio, es la evaluación de un método de recuperación de Cu, por lo que el rendimiento o porcentaje de recuperación del mismo es la variable determinante para este fin. Los siguientes criterios a los que se les dio mayor peso, fueron el C2 (Equipos) y C3 (costo y disponibilidad de los reactivos y sustancias usadas), porque

⁷¹ Ibid., p. 137. (ARCE)

es muy importante que el método a desarrollar, requiera de equipos que se puedan encontrar con facilidad en un laboratorio convencional y use reactivos o sustancias fáciles de adquirir, ya que esto, se traducirá en menores costos para llevar a cabo el proceso. Por último, el criterio al que se le dio un menor peso fue el C1 (Riesgo de los reactivos), pues, a pesar de ser un parámetro muy importante, se desarrolló por personal apto para el manejo de reactivos, utilizando los elementos de protección personal pertinentes.

Una vez asignada la calificación de cada método y el peso (w) de cada criterio, se procede a calcular la suma de los productos de las calificaciones de los métodos en los diferentes criterios, multiplicadas por el peso de ponderación de los criterios, así⁷².

$$Mi = \sum_{j=1}^m a_{i,j} * w_j \tag{7}$$

Siendo:

Mi = Calificación ponderada de la alternativa i .

$a_{i,j}$ = Calificación de la alternativa i en el criterio j .

w_j = Peso de ponderación del criterio j .

Posteriormente, se ordenan las calificaciones ponderadas de mayor a menor tal y como se puede ver en la **Tabla 10** y se selecciona la alternativa con un valor más alto en la suma ponderada⁷³.

Tabla 10. Sumas ponderadas de cada alternativa

Método	Calificación
Extracción de cobre usando H_2SO_4 y H_2O_2 .	3,65
Recuperación de cobre usando sales de amonio.	3,30
Recuperación de cobre por carbonización	3,00
Recuperación de cobre usando un sistema redox.	2,35
Extracción de cobre usando carbono supercrítico.	2,35
Recuperación de cobre mediante lixiviación y adsorción.	1,90
Recuperación de cobre por biolixiviación.	1,70

De acuerdo al resultado obtenido del método de sumas ponderadas, el proceso de recuperación seleccionado para llevar a cabo de forma experimental es el método de extracción de cobre usando H_2SO_4 y H_2O_2 .

⁷² Ibid., p. 137.

⁷³ Ibid., p. 137.

4. DESARROLLO DEL MÉTODO SELECCIONADO A ESCALA LABORATORIO

En el proceso de lixiviación del cobre con H_2SO_4 y H_2O_2 se busca extraer el cobre presente en las tarjetas de circuitos impresos llevándolo a la solución líquida en forma de sulfato de cobre por medio de la siguiente reacción⁷⁴:



4.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROCESO EXPERIMENTAL

Para este trabajo de grado, se decidió realizar dos procesos de lixiviación de las tarjetas de circuitos impresos utilizando H_2SO_4 y H_2O_2 , el primero, un proceso de lixiviación en una sola etapa y el segundo, una lixiviación con dos etapas; se decidió realizar estos dos experimentos con el fin de evaluar el que efecto genera cada planteamiento en la efectividad de la lixiviación, y de esta manera, analizar los resultados obtenidos en cada experimento y ver con cuál de ellos se logró una mejor recuperación del cobre; dichos procedimientos se realizaron bajo las siguientes condiciones óptimas propuestas por YANG⁷⁵.

- Volumen de la solución ácida (H_2SO_4 y H_2O_2): 100 mL
- Concentración de H_2SO_4 en la solución ácida (p/v): 15 %
- Exceso de H_2O_2 : 147%
- Masa de cobre en la muestra sólida: 2,53 g
- Tiempo de lixiviación: 3 horas
- Temperatura Ambiente.

En la **Tabla 11** se muestran las propiedades de las sustancias involucradas en el proceso de lixiviación.

Tabla 11. Propiedades de las sustancias del proceso de lixiviación

Masa molecular de H_2O_2 (g/mol)	34
Masa molecular de H_2SO_4 (g/mol)	98
Masa molecular de Cu (g/mol)	63,55
Masa molecular de H_2O (g/mol)	18
Masa molecular de $CuSO_4$ (g/mol)	159,55
Densidad de H_2SO_4 (g/mL)	1,84
Densidad de H_2O (g/mL)	0,99
Densidad de H_2O_2 (g/mL)	1,1966

Fuente: PERRY, Robert, GREEN, Den, MALONEY, James. Manual del ingeniero químico. Tercera edición en español, Tomo 1. p. 3, 3-101, 3-108.

⁷⁴ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 396.

⁷⁵ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 396.

Los reactivos que se usaron en el desarrollo experimental, fueron de grado técnico, las características de los mismos se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Características de los reactivos utilizados

Concentración del H ₂ SO ₄ (% en peso)	97%
Concentración de H ₂ O ₂ (% en peso)	50%

Fuente: Autor.

En la **Tabla 13**. Se presentan los requerimientos teóricos de los reactivos para llevar a cabo la lixiviación del cobre presente en la muestra sólida; los cálculos que respaldan la información de esta tabla se encuentran en el **Anexo C**.

Tabla 13. Requerimientos teóricos de la reacción

Cobre en la muestra (g)	2,53
Moles de Cu en la muestra (mol)	0,04
Masa estequiométrica de H ₂ SO ₄ (g)	4,02
Masa estequiométrica H ₂ O ₂ (g)	2,71
Volumen estequiométrico de H ₂ SO ₄ (mL)	2,19
Volumen estequiométrico de H ₂ O ₂ (mL)	2,26

4.1.1 Preparación de la solución ácida. Para la preparación de las soluciones ácidas de H₂SO₄ y H₂O₂ se utilizó un balón aforado de 100 mL; se añadió agua hasta aproximadamente la mitad del balón y luego se agregaron las cantidades de H₂SO₄ y H₂O₂; en la **Tabla 14** se presentan las características de la solución ácida, los cálculos referentes a esta información se encuentran en el **Anexo D**.

Tabla 14. Preparación de la solución ácida

Volumen de la solución lixivante	100
densidad de solución lixivante	1,05
concentración de H ₂ SO ₄ en la solución lixivante	15%
concentración de H ₂ O ₂ en la solución lixivante	6%
masa de H ₂ SO ₄ en la solución lixivante	15,8
volumen de H ₂ SO ₄ en la solución lixivante	8,6
volumen de H ₂ O ₂ en la solución lixivante	5,6
Exceso de H ₂ SO ₄	293%
Exceso de H ₂ O ₂	147%

4.1.2 Preparación de la muestra sólida. Conociendo la cantidad de cobre que debe tener cada una de las muestras sólidas a procesar (YANG) y la composición de las tarjetas de circuitos impresos dadas por el análisis de fluorescencia de rayos x presentados la **Tabla 6** se calculó la masa total de partículas de tarjetas de circuitos impresos así:

$$\text{Masa de la muestra s\u00f3lida} = \frac{\text{Masa de Cu en las TCI}}{\text{porcentaje de cobre en las TCI}}$$

$$\text{Masa de la muestra s\u00f3lida} = \frac{2,53 \text{ g}}{9,97 \%} = 25,4 \text{ g}$$

Para cada una de las muestras s\u00f3lidas a procesar, se tom\u00f3 una muestra representativa de los tama\u00f1os de part\u00edcula obtenidos en los ensayos granulom\u00e9tricos realizados; en la **Tabla 15** se encuentra la composici\u00f3n de las muestras s\u00f3lidas con respecto a cada uno de los tama\u00f1os de part\u00edcula.

Tabla 15. Composici\u00f3n de las muestras s\u00f3lidas

Malla	Abertura (mm)	g	%
10	2	16,30	64,16
14	1,4	4,61	18,14
18	1	1,73	6,80
Colector B	-	2,16	8,51
170	0,09	0,45	1,76
200	0,075	0,04	0,16
325	0,045	0,07	0,27
Colector A	-	0,05	0,20

Cabe resaltar que a pesar de que se tomaron muestras iguales para cada proceso de lixiviaci\u00f3n, no se puede asegurar que la cantidad de cobre en cada muestra es exactamente la misma, debido a que las TCI es un material heterog\u00e9neo.

Al conocer la masa de muestra s\u00f3lida a procesar y el volumen de soluci\u00f3n lixivante a usar, la relaci\u00f3n s\u00f3lido:l\u00edquido con la que se llev\u00f3 a cabo cada lixiviaci\u00f3n es de aproximadamente 1:4

Para realizar este proceso de medida de la masa de cada una de las muestras a procesar, se hizo uso de una balanza digital marca Lexus de dos cifras decimales la cual se puede observar en la **figura 7**.

Figura 7. Balanza digital

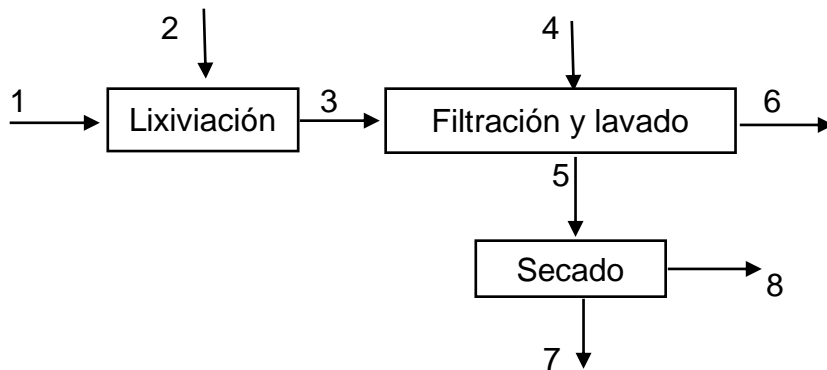


A continuación se describen los dos procesos experimentales planteados, los cuales se denominan modelo A y modelo B.

4.2 MODELO A

En primer lugar, se planteó un proceso de lixiviación en una sola etapa, similar al propuesto por YANG⁷⁶; en el cual se usaron las condiciones de operación anteriormente señaladas; este modelo se realizó por triplicado para cumplir con el principio de la replicación del desarrollo experimental. En la **Figura 8** se muestra el proceso desarrollado para este primer modelo en forma de diagrama de bloques.

Figura 8. Diagrama de bloques del modelo A



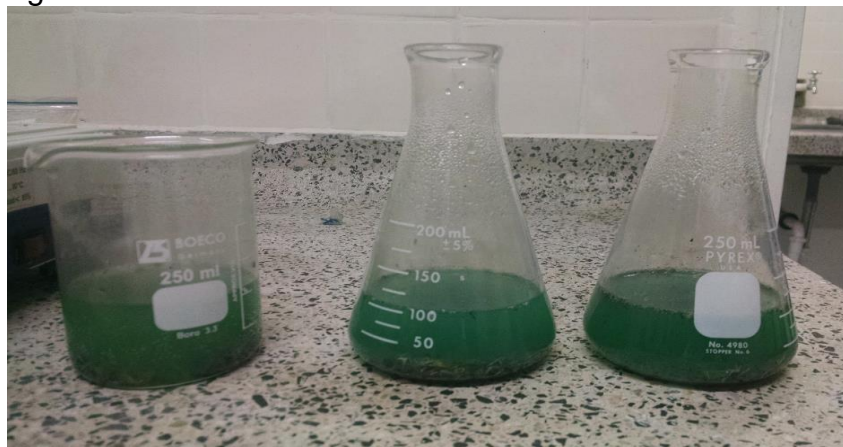
⁷⁶ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 395 - 399.

Donde:

1. Solución de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$.
2. Muestra sólida.
3. Producto de la lixiviación.
4. Agua.
5. Fase sólida.
6. Fase líquida.
7. Residuo Sólido.
8. Humedad evaporada

La lixiviación se realizó utilizando beakers y Erlenmeyers de 200 y 250 mL, durante este proceso se realizaron algunas observaciones relevantes; al añadir la solución ácida al recipiente que contiene la muestra sólida se presenta efervescencia debida principalmente al peróxido de hidrógeno, lo cual es un indicador claro de la reacción química que está sucediendo, junto con la efervescencia se evidencia un aumento significativo de la temperatura del recipiente debido al carácter exotérmico de la reacción; lo anterior acompañado por un cambio en el color de la solución hasta alcanzar un color entre verde y azul típico del sulfato de cobre. Dicha efervescencia finaliza una vez transcurrida la primera hora de la reacción; a su vez, la temperatura del recipiente disminuye lentamente hasta volver a la temperatura ambiente. En la **Figura 9** se muestra el proceso de lixiviación llevado a cabo en el modelo A.

Figura 9. Lixiviación



Una vez finalizado el tiempo de la lixiviación (3 horas) se realizó la filtración de la solución la cual se hizo mediante un montaje básico de filtración por gravedad con un embudo de filtración y papel filtro No. 5 tal y como se puede observar en la **Figura 10**. Se lavó la fracción sólida resultante de la etapa única de lixiviación con agua con el fin de terminar de retirar cualquier excedente de la solución de sulfato de cobre obtenida de la lixiviación en la fase sólida; se tomó una alícuota de 30 mL de la fase líquida para realizar el análisis de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de cobre presente en dicha solución.

Figura 10. Montaje de filtración



Por último, la fracción sólida resultante del lavado, se pesó en la balanza digital y posteriormente se secó en una estufa a una temperatura de aproximadamente 100 °C por aproximadamente 1 hora, como se puede observar en la **Figura 11**.

Figura 11. Estufa usada para el secado



Una vez transcurrido el tiempo de secado en la estufa; se pesó el material sólido; se repitió el proceso de secado hasta tener peso constante del material y se dejó enfriar en un desecador de vidrio con cloruro de calcio como se puede ver en la **Figura 12**.

Figura 12. Desecador de vidrio



4.3 MODELO B

Adicionalmente, se planteó un modelo de extracción de cobre en múltiples etapas, denominado modelo B; el cual tiene similitud a un proceso de lixiviación de un mineral de cobre propuesto por XU⁷⁷. En el procedimiento propuesto en este trabajo de grado se realizaron dos etapas de lixiviación; para este modelo, se realizaron 2 réplicas.

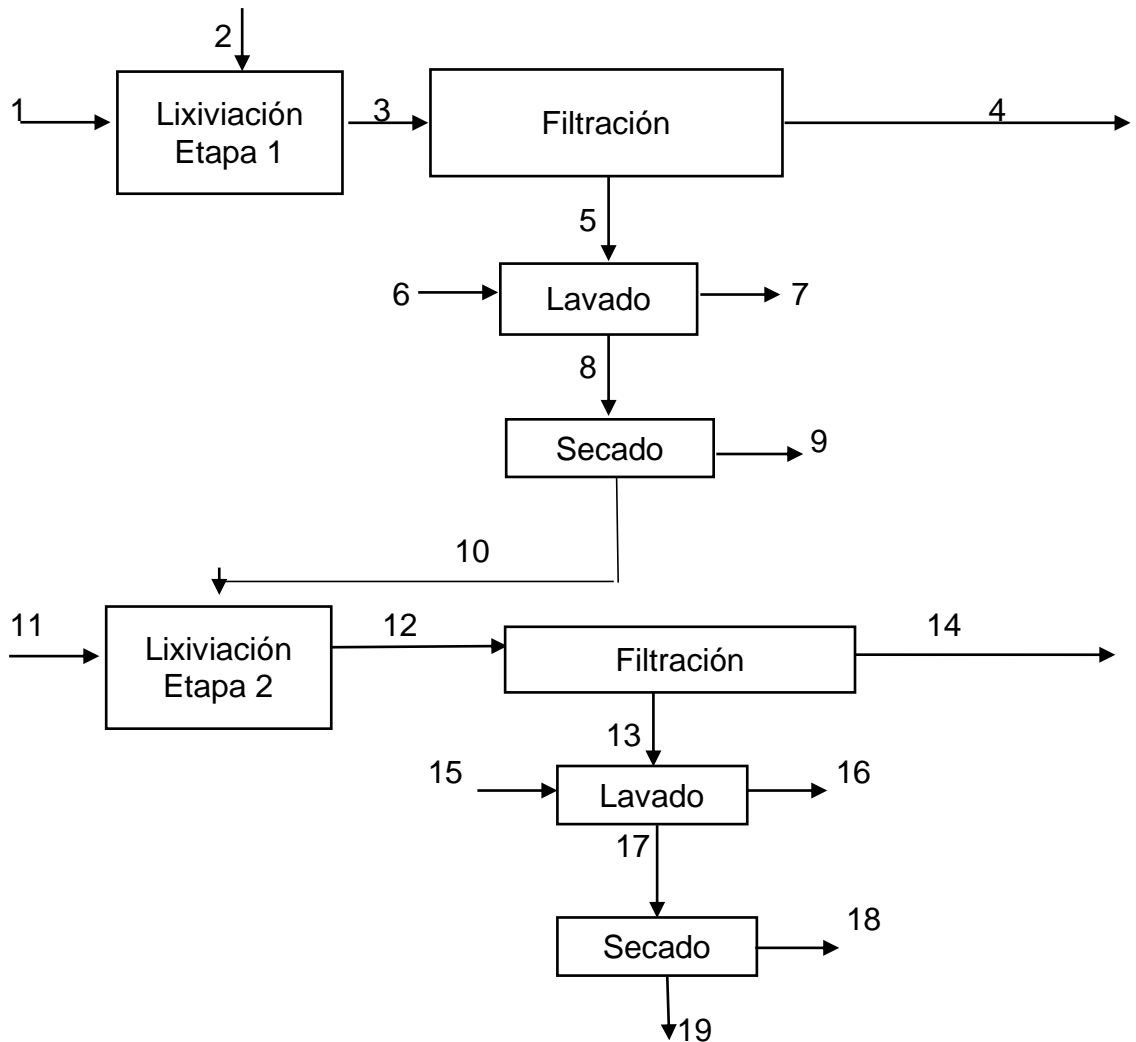
La primera etapa consistió en una lixiviación inicial de una muestra sólida de tarjetas de circuitos impresos, utilizando como agente lixivante la solución ácida anteriormente descrita (**Tabla 14**), esta prueba se llevó a cabo durante 3 horas, una vez finalizado el tiempo de reacción de esta etapa se realizó la filtración del material emergente usando un montaje de filtración igual al usado en el modelo A (**Figura 10**), de la fase líquida efluente de la filtración se tomó una alícuota de 30 mL para analizarla por espectrofotometría absorción atómica; la fase sólida resultante de la filtración se lavó con 30 mL de agua y se secó de la misma manera que la fase sólida del modelo A.

El residuo sólido seco de la etapa 1 fue llevado a la segunda etapa de lixiviación con una solución lixivante, esta etapa al igual que la anterior se realizó durante 3 horas; una vez culminadas las 3 horas, se realizó la filtración de la materia resultante de la segunda etapa de lixiviación mediante un montaje de filtración por gravedad igual al usado en la etapa anterior y en el modelo A, mediante el cual se separó la fase líquida de la fase sólida; de la fase líquida se tomaron 30 mL para realizar la prueba de EAA; a la fase sólida efluente de la filtración se le realizó un lavado con

⁷⁷ XU, Bin, ZHONG, Hong, JIANG, Tao. Recovery of a value metals from Gacum complex copper concentrate by two-stages countercurrent oxygen pressure acid leaching process. *Materials Engineering*. Abril, 2011. p. 1083.

30 mL de agua para quitar la solución líquida que haya quedado empapando la fase sólida; posteriormente se secó de la misma manera que se realizó en la etapa 1 y en el modelo A. en la **Figura 13**, se ve el diagrama de bloques para el modelo B.

Figura 13. Diagrama de bloques del modelo B



Donde:

1. Solución de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ para la etapa 1.
2. Muestra sólida para la etapa 1.
3. Producto de la lixiviación etapa 1.
4. Fase líquida de la etapa 1.

5. Fase sólida de la etapa 1.
6. Agua.
7. Agua de lavado de la etapa 1.
8. Residuo sólido húmedo de la etapa 1.
9. Humedad evaporada en la fase 1.
10. Residuo sólido seco de la etapa 1.
11. Solución de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ para la etapa 2.
12. Producto de la lixiviación de la etapa 2.
13. Residuo sólido de la etapa 2.
14. Fase líquida de la etapa 2.
15. Agua.
16. Agua de lavado de la etapa 2.
17. Residuo sólido húmedo de la etapa 2.
18. Humedad evaporada en la etapa 2.
19. Residuo sólido seco de la etapa 2.

Cabe resaltar que en todas las etapas de lixiviación del modelo B se observaron los mismos fenómenos de efervescencia, cambio de color de la solución y aumento de la temperatura del recipiente en el que ocurre la reacción que se describieron en la sección 4.2.

4.4 RESULTADOS

En esta sección se presentaran los resultados de las propiedades de las sustancias, los datos tomados durante la experimentación y del análisis para la determinación de cobre tanto del modelo A como del modelo B.

Para conocer la composición de las alícuotas tomadas en el laboratorio de cada una de las etapas de lixiviación de los modelos A y B se analizaron dichas alícuotas mediante las pruebas de espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de cobre.

4.4.1 Modelo A. A continuación se presentan los datos de las corrientes del primer modelo experimental planteado, tomados en el laboratorio. En la **Tabla 16**, se encuentran diligenciados los datos de dichas corrientes de cada una de las réplicas. Recordando el diagrama de bloques del modelo A

Figura 14. Diagrama de bloques del modelo A

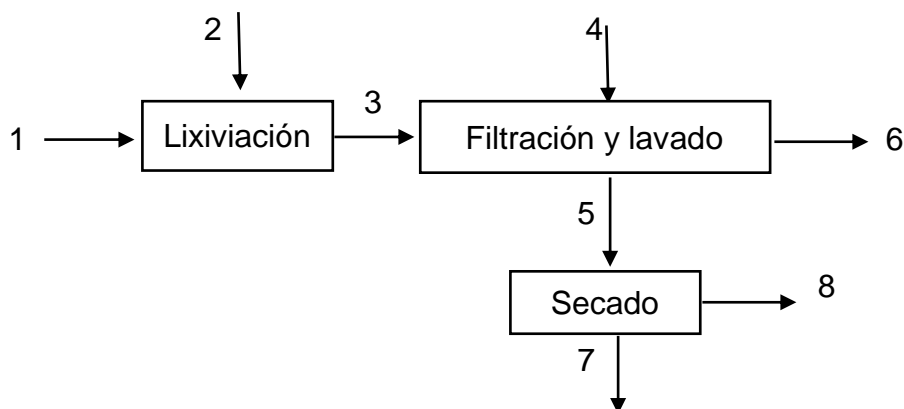


Tabla 16. Datos de las corrientes, modelo A

		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
Corriente 1. Solución de H₂SO₄ + H₂O₂.				
Masa	g	105,48	105,48	105,48
Volumen	mL	100	100	100
Densidad	g/mL	1,05	1,05	1,05
Corriente 2. Muestra sólida				
Masa	g	25,4	25,4	25,4
Corriente 3. Producto de la lixiviación				
Masa	g	130,88	130,88	130,88
Corriente 4. Agua				
Volumen	mL	48	34	36
Masa	g	47,52	33,66	35,64
Corriente 5. Fase sólida húmeda				
Masa Húmeda	g	41,20	36,27	39,30
Corriente 6. Fase líquida				
Volumen	mL	140	130	130
Masa	g	137,2	128,27	127,22
Densidad	g/mL	0,98	0,99	0,98

Tabla 16. (Continuación).

Corriente 7. Residuo sólido seco				
Masa seca	g	23,76	24,16	23,25
Corriente 8. Humedad evaporada				
Masa evaporada	g	17,44	12,11	16,05

La información correspondiente al producto de la lixiviación (corriente 3) y a la masa evaporada (corriente 8) no se midieron directamente en el laboratorio; sin embargo, estos valores se calcularon como la suma de las masas de las corrientes 1 y 2 para el caso de la corriente 3. Y mediante la diferencia de las masas de la corriente 5 y 7 para la corriente 8.

En la **Tabla 17**, se muestran los resultados obtenidos por la espectrofotometría de absorción atómica para la determinación de cobre realizado a las alícuotas tomadas de la corriente 6. Estos resultados son emitidos por la empresa Química LTDA. El reporte original de los resultados se puede ver en el **Anexo E**.

Tabla 17. Resultados análisis de absorción atómica por llama del modelo A.

MUESTRA	Cu (g/100 mL)
Réplica 1	0,29
Réplica 2	0,52
Réplica 3	0,40

Fuente: Química LTDA

Recordando la reacción química que ocurre en el proceso de lixiviación, se sabe que el cobre (Cu) presente en la solución líquida se encuentra en forma de sulfato de cobre (CuSO₄).



Utilizando la información del análisis de espectrofotometría de absorción atómica mostrada en la **Tabla 17**, se calculó la masa de sulfato de cobre recuperada en cada una de las réplicas (corriente 6), así:

$$m_6^{CuSO_4} = \frac{\text{Masa de Cu dada por análisis EAA}}{100 \text{ mL}} * \text{Vol de solución} * \frac{1}{Mm \text{ Cu}} * \text{relación esteq de } CuSO_4 \text{ a Cu} * \frac{Mm \text{ CuSO}_4}{1} \quad (8)$$

Entonces, para la réplica 1:

$$m_6^{CuSO_4} = \frac{0,29 \text{ g Cu}}{100 \text{ mL}} * 48 \text{ mL} * \frac{1 \text{ mol Cu}}{63,55 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol de CuSO}_4}{1 \text{ mol de Cu}} * \frac{159,55 \text{ g CuSO}_4}{1 \text{ mol de CuSO}_4}$$

$$= 1,019 \text{ g CuSO}_4$$

Por lo cual, realizando este cálculo para las demás réplicas, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 18. Masa de CuSO₄ en la corriente 6, modelo A

		Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
$m_6^{CuSO_4}$	(g)	1,019	1,697	1,306

Con la información anterior, se calculó la fracción másica de sulfato de cobre para la corriente 6, así:

$$X_6^{CuSO_4} = \frac{m_6^{CuSO_4}}{m_6}$$

(9)

Entonces, para la réplica 1:

$$X_6^{CuSO_4} = \frac{1,019 \text{ g}}{137,2 \text{ g}} = 0,0074$$

En la **Tabla 19**, se presentan los resultados de las fracciones másicas del sulfato de cobre de la corriente 6

Tabla 19. Fracciones másicas del CuSO₄ en la corriente 6, modelo A

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
$X_6^{CuSO_4}$	0,0074	0,0132	0,0103

Utilizando las masas de sulfato de cobre recuperadas en cada una de las réplicas, se calculó el porcentaje de recuperación obtenido en cada una de ellas, aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ recuperación} = \frac{m_6^{CuSO_4} * \frac{1}{Mm \text{ CuSO}_4} * \text{rel esteq de Cu a CuSO}_4 * Mm \text{ Cu}}{m_2^{Cu}} * 100\%$$

(10)

Entonces, para la réplica 1:

% de recuperación

$$= \frac{1,019 \text{ g CuSO}_4 * \frac{1 \text{ mol CuSO}_4}{159,55 \text{ g CuSO}_4} * \frac{1 \text{ mol Cu}}{1 \text{ mol CuSO}_4} * \frac{63,55 \text{ g Cu}}{1 \text{ mol Cu}}}{2,53 \text{ g Cu}}$$

$$* 100\% = 16,03 \%$$

En la **Tabla 20**, se muestran los resultados de los porcentajes de recuperación de cobre para cada una de las réplicas.

Tabla 20. Porcentajes de recuperación de cobre, modelo A

	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio
% de recuperación de Cu	16,03	26,49	20,53	21,09

4.4.2 Modelo B. Ahora se presentan los resultados de los experimentos realizados en la extracción por etapas múltiples; empezando con los datos de las corrientes medidos en el laboratorio. En la **Tabla 21** se encuentra consignada dicha información. A continuación se vuelve a presentar el diagrama de bloque para este modelo experimental.

Figura 15. Diagrama de bloques, modelo B

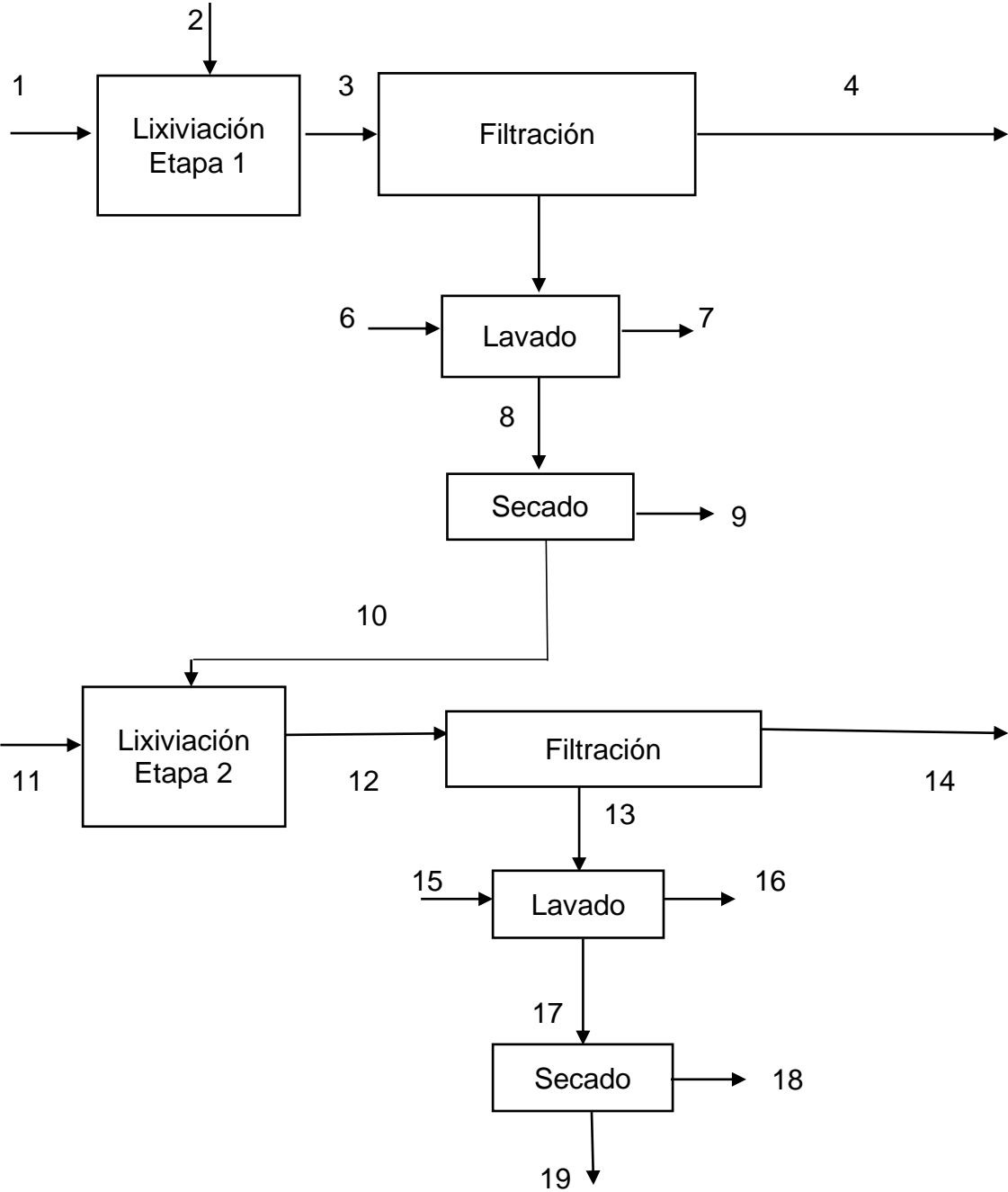


Tabla 21. Datos de las corrientes, modelo B

		Réplica 1	Réplica 2
Corriente 1. Solución de H₂SO₄ + H₂O₂ para la etapa 1			
Masa	g	105,48	105,48
Volumen	mL	100	100
Densidad	g/mL	1,05	1,05
Corriente 2. Muestra sólida para la etapa 1			
Masa	g	25,4	25,4
Corriente 3. Producto de la lixiviación etapa 1			
Masa	g	130,88	130,88
Corriente 4. Fase líquida de la etapa 1			
Masa	g	103,45	105,27
Volumen	mL	90	90
Densidad	g/mL	1,15	1,17
Corriente 5. Fase sólida de la etapa 1			
Masa	g	27,43	25,61
Corriente 6. Agua			
Volumen	mL	30	30
Densidad	g/mL	0,99	0,99
Masa	g	29,7	29,7
Corriente 8. Fase sólida húmeda de la etapa 1			
Masa húmeda	g	35,54	38,32
Corriente 9. Humedad evaporada en la etapa 1			
Masa	g	12,37	14,56
Corriente 10. Residuo sólido seco de la etapa 1			
Masa	g	23,17	23,76
Corriente 11. Solución de H₂SO₄ + H₂O₂ para la etapa 2			
Masa	g	105,48	105,48
Volumen	mL	100	100
Densidad	g/mL	1,05	1,05
Corriente 12. Producto de la lixiviación de la etapa 2			
Masa	g	128,65	129,24
Corriente 13. Fase sólida de la etapa 2			
Masa	g	30,52	27,57
Corriente 14. Fase líquida de la etapa 2			
Masa	g	98,13	101,67
Volumen	mL	92	86
Densidad	g/mL	1,07	1,18
Corriente 15. Agua			
Volumen	mL	30	30
Densidad	g/mL	0,99	0,99
Masa	g	29,7	29,7
Corriente 17. Residuo sólido húmedo de la etapa 2			
Masa	g	31,44	36,49
Corriente 18. Humedad evaporada en la etapa 2			
Masa	g	9,82	13,56
Corriente 19. Residuo sólido seco de la etapa 2			
Masa	g	21,62	22,93

Es necesario aclarar que de la información presentada anteriormente en la **Tabla 21**; los datos del producto de la lixiviación correspondientes a las corrientes 3 y 12 y de la humedad evaporada correspondiente a las corrientes 9, 18 y 26 se calcularon tal cual como se hizo con el modelo A.

En la **Tabla 22** se muestran los resultados de la espectrofotometría de absorción atómica para las alícuotas tomadas de este modelo experimental, el informe original de estos resultados se encuentran en el **Anexo E**.

Tabla 22. Resultados análisis de absorción atómica por llama para el modelo B

MUESTRA	Cu (g/100 mL)
Fase líquida de la etapa 1, réplica 1	0,52
Fase líquida de la etapa 1, réplica 2	0,63
Fase líquida de la etapa 2, réplica 1	1,49
Fase líquida de la etapa 2, réplica 2	2,15

Fuente: Química LTDA

Haciendo uso de la información de la tabla anterior, se procede a calcular la cantidad de cobre recuperada en estas corrientes, como se presenta a continuación.

Para la etapa 1, réplica 1:

$$m_4^{CuSO_4} = \frac{0,52 \text{ g } CuSO_4}{100 \text{ mL}} * 90 \text{ mL} * \frac{1 \text{ mol } Cu}{63,55 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol de } CuSO_4}{1 \text{ mol de } Cu} * \frac{159,55 \text{ g } CuSO_4}{1 \text{ mol de } CuSO_4}$$

$$= 1,175 \text{ g de } CuSO_4$$

En la **Tabla 23**, se encuentran los resultados del cálculo anterior para las réplicas de cada etapa

Tabla 23. Masa de $CuSO_4$ de las corrientes 4 y 14, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2
Etap 1		
$m_4^{CuSO_4}$	1,175 g	1,4335 g
Etap 2		
$m_{14}^{CuSO_4}$	3,4416 g	4,6421 g

Ahora se calcularán las fracciones másicas de sulfato de cobre correspondientes a las corrientes 4, 14, para esto se divide la masa de $CuSO_4$ de cada una de estas corrientes entre la masa total de la corriente correspondiente, así:

Para la réplica 1 de la primera etapa:

$$X_4^{CuSO_4} = \frac{m_4^{CuSO_4}}{m_4} = \frac{1,175 \text{ g}}{103,45 \text{ g}} = 0,0114$$

En la siguiente tabla, se encuentran los datos de la fracción másica de sulfato de cobre para las réplicas de cada etapa.

Tabla 24. Fracción másica de CuSO_4 en las corrientes 4 y 14, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2
Etapas 1		
$X_4^{\text{CuSO}_4}$	0,0114	0,0135
Etapas 2		
$X_{14}^{\text{CuSO}_4}$	0,0351	0,0457

Sin embargo, como se puede evidenciar en la **Figura 13**, en las etapas de lixiviación 1 y 2 del modelo B, las operaciones de filtración y lavado se realizaron por separado a diferencia de como se hizo en el modelo A; los resultados de presentados en la **Tabla 22** del análisis de espectrofotometría absorción atómica para el modelo B, en el caso de las etapas 1 y 2 (corrientes 4 y 14) representan el contenido de cobre de las corrientes luego de la filtración, por lo cual, en las etapas de lavado posteriores, se retiró la cantidad remanente de solución líquida de sulfato de cobre que se encuentra en equilibrio con las corrientes 4 y 14, es decir, que tienen la misma composición de sulfato de cobre que dichas corrientes; este remanente es el que se obtiene luego del lavado del sólido emergente de la etapa de filtración (corrientes 8 y 17). Las masas de las corrientes 7 y 16 (agua de lavado), se calcularon así:

Para la etapa 1:

$$m_5 + m_6 = m_7 + m_8 \quad (11)$$

De la ecuación anterior, la única incógnita es la masa de la corriente 7 (m_7); entonces despejando la incógnita y calculando, se tiene que:

Para la réplica 1:

$$m_7 = 27,43 \text{ g} + 29,7 \text{ g} - 35,54 \text{ g} = 21,59 \text{ g}$$

Para la réplica 2:

$$m_7 = 16,99 \text{ g}$$

Realizando este mismo procedimiento para la etapa 2:

$$m_{13} + m_{15} = m_{16} + m_{17} \quad (12)$$

En este caso el valor a calcular es en correspondiente a la masa de la corriente 16 (m_{16}) entonces, despejando y calculando.

Para la réplica 1:

$$m_{16} = 30,52 \text{ g} + 29,7 \text{ g} - 31,44 \text{ g} = 28,78 \text{ g}$$

Para la réplica 2:

$$m_{16} = 20,78 \text{ g}$$

Las masas calculadas en el paso anterior corresponden a las masas totales de las corrientes 7 y 16, por lo tanto se debe calcular que porción de esas masas corresponden a las masas de soluciones de CuSO_4 ; esta porción se calculó con la diferencia de masas entre el las fases sólidas (corrientes 5 y 13) y los residuos sólidos secos (corrientes 10 y 19), así:

Para la etapa 1, réplica 1:

$$m_7^{\text{sln de CuSO}_4} = m_5 - m_{10} = 27,43 \text{ g} - 23,17 \text{ g} = 4,26 \text{ g}$$

Para la réplica 2:

$$m_7^{\text{sln de CuSO}_4} = 1,85 \text{ g}$$

Entonces, realizando la misma operación para la etapa 2, réplica 1:

$$m_{16}^{\text{sln de CuSO}_4} = m_{13} - m_{19} = 30,52 \text{ g} - 21,62 \text{ g} = 8,90 \text{ g}$$

Para la réplica 2:

$$m_{16}^{\text{sln de CuSO}_4} = 4,64 \text{ g}$$

Luego de calcular las masas de la solución de CuSO_4 extraída en el lavado, se procede a calcular la masas de sulfato de cobre en las corrientes 7 y 16, utilizando las fracciones másicas de sulfato de cobre calculadas para las corrientes 4 y 14, respectivamente, ya que, como se explicó anteriormente la solución de CuSO_4 extraída en el lavado, tiene la misma composición que las soluciones líquidas emergentes de las unidades de filtración, entonces:

Para la etapa 1, réplica 1:

$$m_7^{\text{CuSO}_4} = m_7^{\text{sln de CuSO}_4} * X_4^{\text{CuSO}_4} = 4,26 \text{ g} * 0,0114 = 0,0484 \text{ g}$$

En la **Tabla 25**, se encuentran diligenciado los resultados del cálculo anterior para las réplicas de la etapa 1 y 2.

Tabla 25. Masa de CuSO_4 en las corrientes 7 y 14, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2
Etapas 1		
$m_7^{\text{CuSO}_4}$	0,0484 g	0,0250 g
Etapas 2		
$m_{16}^{\text{CuSO}_4}$	0,3121 g	0,2119 g

Con la información anterior es posible calcular la fracción másica del sulfato de cobre en las corrientes 7 y 16; esto se realiza al dividir la masa de sulfato de cobre de una de estas corrientes entre la masa total de la misma corriente, como se muestra a continuación:

Para la etapa 1 replica 1:

$$X_7^{\text{CuSO}_4} = \frac{m_7^{\text{CuSO}_4}}{m_7} = \frac{0,0484 \text{ g}}{21,59 \text{ g}} = 0,0022$$

En la **Tabla 26**, se encuentran reportadas las fracciones másicas de sulfato de cobre (CuSO_4) de cada réplica de las etapas 1 y 2.

Tabla 26. Fracción másica de CuSO_4 en las corrientes 7 y 16, modelo B.

	Réplica 1	Réplica 2
Etapas 1		
$m_7^{\text{CuSO}_4}$	0,0022	0,0015
Etapas 2		
$m_{16}^{\text{CuSO}_4}$	0,0109	0,0102

Ahora, es posible calcular la cantidad total de cobre que se recuperó en cada una de las etapas al sumar las masas de cobre recuperadas en las corrientes 4 y 14 con las masas calculadas de las corrientes 7 y 16. A continuación se presentan estos cálculos.

Para la etapa 1, replica 1:

$$\begin{aligned} m_{\text{CuSO}_4, \text{total}} &= m_4^{\text{CuSO}_4} + m_7^{\text{CuSO}_4} = 1,175 \text{ g de CuSO}_4 + 0,0484 \text{ g de CuSO}_4 \\ &= 1,2234 \text{ g de CuSO}_4 \end{aligned}$$

Realizando este cálculo para cada etapa se obtienen los valores registrados en la **Tabla 27**.

Tabla 27. Masa total de CuSO₄ recuperada en cada etapa, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2
Etapas		
Etapas 1		
$m_{CuSO_4, total}$	1,2234 g	1,4458 g
Etapas 2		
$m_{CuSO_4, total}$	3,7537 g	4,8540 g

Los datos anteriores también pueden ser expresados como porcentajes de recuperación, relacionando la masa de sulfato de cobre recuperada en cada etapa con la masa de cobre de la muestra con la que se llevó a cabo la lixiviación de las etapas respectivas; este procedimiento se muestra a continuación:

% recuperación

$$= \frac{m_{CuSO_4, recuperada} * \left(\frac{1}{Mm CuSO_4} \right) * relación esteq * Mm Cu}{m_{Cu}^2} * 100\% \quad (13)$$

Resolviendo la ecuación anterior para la primera etapa en cada réplica se tienen los siguientes resultados

Tabla 28. Porcentaje de recuperación de Cu de la primera etapa, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2	Promedio
Porcentaje de recuperación de Cu	19,24 %	22,78 %	21,01 %

Con los datos del % de recuperación de la etapa 1 se puede calcular la masa de cobre remanente en el sólido luego de la etapa 1 (corriente 10), es importante conocer este valor ya que se debe usar para calcular el % de recuperación de la segunda etapa del modelo B, esta masa se calcula así:

$$m_{10}^{Cu} = m_2^{Cu} * (100\% - \% recuperación) \quad (14)$$

Para la réplica 1

$$m_{10}^{Cu} = 2,53 g Cu * (100\% - 19,24\%) = 2,53 g Cu * 80,76\% = 2,053 g Cu$$

Para la réplica 2

$$m_{10}^{Cu} = 2,53 g Cu * (100\% - 22,78\%) = 2,53 g Cu * 77,22\% = 1,96 g Cu$$

Entonces, los porcentajes de recuperación de la segunda etapa son:

Tabla 29. Porcentajes de recuperación de Cu de la etapa 2, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2	Promedio
Porcentaje de recuperación de Cu	72,83 %	98,58 %	85,71 %

Por último, se calculó el % global de recuperación para el modelo B, usando las masas de CuSO₄ extraídas por las corrientes 4, 7, 14 y 16, y comparando esta masa con la masa de cobre usada en la etapa 1. Este cálculo se muestra a continuación.

$$\% \text{ recuperación} = \frac{\sum m^{CuSO_4} * \left(\frac{1}{Mm \text{ CuSO}_4} \right) * \text{relación esteq} * Mm \text{ Cu}}{m_{Cu}^2} * 100 \% \quad (15)$$

Al aplicar la ecuación anterior, se obtienen los resultados reportados en la **Tabla 30**.

Tabla 30. Porcentaje global de recuperación de Cu, modelo B

	Réplica 1	Réplica 2	Promedio
Porcentaje global de recuperación de Cu	78,28 %	99,13 %	88,71 %

4.5 BALANCES DE MATERIA

En esta sección se presentan los resultados de los balances de masa de los compuestos involucrados en los modelos experimentales; en el **Anexo F** y en el **Anexo G** se pueden encontrar las muestras de cálculo de los balances de masa para el modelo A y el modelo B respectivamente.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos del balance de masa para el modelo A por cada operación unitaria. Comenzando por la lixiviación (**Figura 16**), en la **Tabla 31**. Se encuentran diligenciados los resultados del balance de materia de esta operación.

Es importante aclarar que para la resolución de este balance de materia fue necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones iniciales.

- En la etapa de secado se retiró toda el agua que tenía el sólido húmedo (corriente 5), por lo tanto, la fracción másica de agua en la corriente 8 es igual a 1.
- Por lo anterior, es posible calcular la fracción másica de la corriente 5 así:

$$X_5^{H_2O} = \frac{m_8 * X_8^{H_2O}}{m_5} = \frac{17,44 \text{ g} * 1}{41,20 \text{ g}} = 0,4233$$

- En cuanto a los otros componentes de la muestra sólida, en el balance de masa de este modelo experimental, se consideraron como inertes

Figura 16. Lixiviación, modelo A

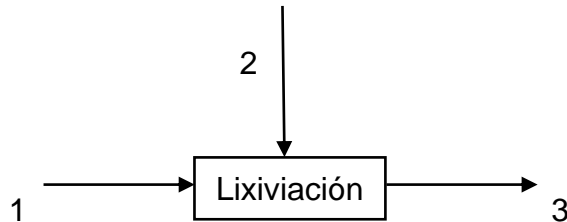


Tabla 31. Balances de masa en la lixiviación, modelo A

	R1	R2	R3	Promedio
1. Solución de H₂SO₄ + H₂O₂				
m ₁ , (g)	105,48	105,48	105,48	105,48
X ₁ ^{H₂SO₄}	0,1455	0,1455	0,1455	0,1455
X ₁ ^{H₂O₂}	0,0318	0,0318	0,0318	0,0318
X ₁ ^{H₂O}	0,8227	0,8227	0,8227	0,8227
2. Muestra sólida				
m ₂ , (g)	25,4	25,4	25,4	25,4
X ₂ ^{Cu}	0,0997	0,0997	0,0997	0,0997
X ₂ ^{Otros}	0,9003	0,9003	0,9003	0,9003
3. Producto de la lixiviación				
m ₃ , (g)	130,88	130,88	130,88	130,8800
X ₃ ^{H₂SO₄}	0,1178	0,1085	0,1102	0,1101
X ₃ ^{H₂O₂}	0,0237	0,0225	0,0232	0,0231
X ₃ ^{H₂O}	0,6651	0,6663	0,6656	0,6657
X ₃ ^{CuSO₄}	0,0089	0,0144	0,0115	0,0116
X ₃ ^{Cu}	0,0158	0,0136	0,0148	0,0147
X ₃ ^{Otros}	0,1747	0,1747	0,1747	0,1747
ξ ₁ , (mol)	0,0073	0,0118	0,0094	0,0095

Fuente: Autor

Donde:

ξ₁: Grado de avance de la reacción 1 (lixiviación).

La siguiente operación unitaria del modelo A es la filtración y el lavado (**Figura 17**). Los resultados del balance de masa para las corrientes que intervienen en la filtración y el lavado se encuentran en la **Tabla 32**.

Figura 17. Filtración y lavado, modelo A

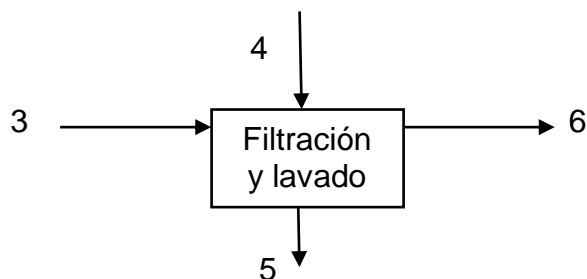


Tabla 32. Balances de masa en la filtración y lavado, modelo A

	R1	R2	R3	Promedio
4, Agua				
$m_4, (g)$	47,52	33,66	35,64	38,94
$X_4^{H_2O}$	1	1	1	1
5. Sólido húmedo				
$m_5, (g)$	41,20	36,27	39,30	38,92
$X_5^{H_2SO_4}$	0,046	0,0392	0,048	0,0444
$X_5^{H_2O_2}$	0,0098	0,0082	0,0101	0,0093
$X_5^{H_2O}$	0,4233	0,3339	0,4084	0,3885
$X_5^{CuSO_4}$	0,0037	0,0052	0,005	0,0046
X_5^{Cu}	0,0501	0,0491	0,0492	0,0495
X_5^{Otros}	0,4671	0,5645	0,4793	0,5036
6. Fase líquida				
$m_6, (g)$	137,20	128,27	127,22	130,90
$X_6^{H_2SO_4}$	0,0928	0,0995	0,0986	0,097
$X_6^{H_2O_2}$	0,0197	0,0207	0,0207	0,0204
$X_6^{H_2O}$	0,8537	0,8479	0,8388	0,8468
$X_6^{CuSO_4}$	0,0074	0,0132	0,0103	0,0103
X_6^{Otros}	0,0264	0,0187	0,0317	0,0256

Para terminar el modelo A, se muestran los resultados del balance de masa (**Tabla 33**) para la operación de secado.

Figura 18. Secado, modelo A

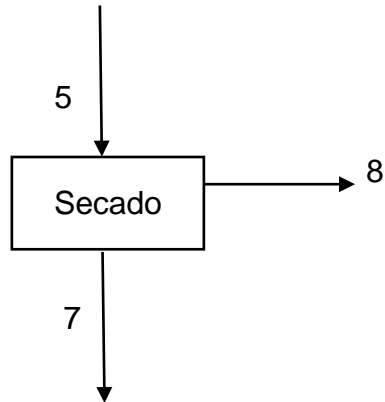


Tabla 33. Balances de masa en el secado, modelo A

	R1	R2	R3	Promedio
7. solido seco				
m_7 (g)	23,76	24,16	23,25	23,72
X_7^{Cu}	0,087	0,0737	0,0832	0,0813
$X_7^{CuSO_4}$	0,0064	0,0078	0,0085	0,0076
$X_7^{H_2SO_4}$	0,0798	0,0589	0,0811	0,0733
X_7^{Otros}	0,8099	0,8474	0,8101	0,8225
8. Humedad evaporada				
m_8' , (g)	17,44	12,11	16,05	15,20
$X_8^{H_2O,l}$	0,9770	0,9756	0,9753	0,976
$X_8^{H_2O,gen}$	0,0122	0,0129	0,0131	0,0127
$X_8^{O_2}$	0,0108	0,0115	0,0116	0,0113
ξ_2 , (mol)	0,0059	0,0043	0,0058	0,0054

Donde:

ξ_2 : Grado de avance de la reacción 2

Para completar el balance de masa de la operación de secado, se consideró la siguiente reacción de descomposición del peróxido de hidrógeno (reacción 2).



Posteriormente se presentarán los resultados de los balances de masa del modelo B, iniciando con la lixiviación en la etapa 1 (**Figura 19**), los resultados de la misma, se muestran en la **Tabla 34**.

Figura 19. Lixiviación de la etapa 1, modelo B

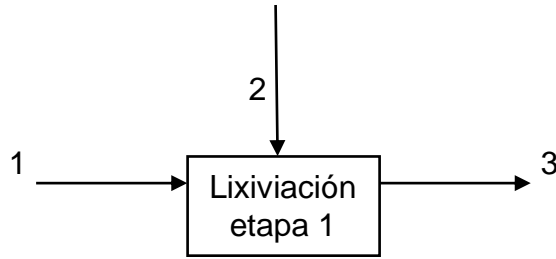


Tabla 34. Balances de masa en la lixiviación de la etapa 1, modelo B

	R1	R2	Promedio
1. Solución de H₂SO₄ + H₂O₂ para la etapa 1			
m ₁ , (g)	105,48	105,48	105,48
X ₁ ^{H₂SO₄}	0,1455	0,1455	0,1455
X ₁ ^{H₂O₂}	0,0318	0,0318	0,0318
X ₁ ^{H₂O}	0,8227	0,8227	0,8227
2. Muestra sólida para la etapa 1			
m ₂ , (g)	25,4	25,4	25,4
X ₂ ^{Cu}	0,0997	0,0997	0,0997
X ₂ ^{Otros}	0,9003	0,9003	0,9003
3. Producto de la lixiviación			
m ₃ , (g)	130,88	130,88	130,88
X ₃ ^{H₂SO₄}	0,1116	0,1106	0,111
X ₃ ^{H₂O₂}	0,0236	0,0233	0,0235
X ₃ ^{H₂O}	0,6651	0,6655	0,6653
X ₃ ^{CuSO₄}	0,0092	0,0110	0,0101
X ₃ ^{Cu}	0,0157	0,0150	0,0153
X ₃ ^{Otros}	0,1747	0,1747	0,1747
ξ ₁ , (mol)	0,0075	0,009	0,0083

La siguiente operación unitaria es la filtración (**Figura 20**) y los resultados del balance de masa para esta operación se muestran en la **Tabla 35**.

Figura 20. Filtración de la etapa 1, modelo B

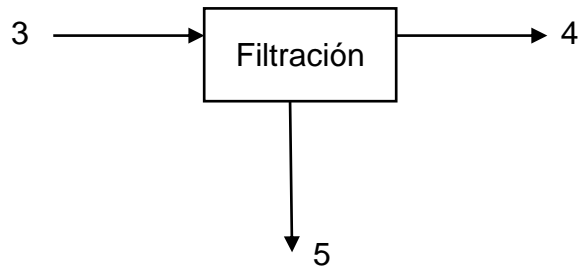


Tabla 35. Balances de masa de la filtración de la etapa 1, modelo B

	R1	R2	Promedio
4. Fase líquida de la etapa 1			
$m_4, (g)$	103,45	105,27	104,36
$X_4^{H_2SO_4}$	0,1379	0,1364	0,1372
$X_4^{H_2O_2}$	0,0292	0,0287	0,029
$X_4^{H_2O}$	0,8216	0,8213	0,8214
$X_4^{CuSO_4}$	0,0114	0,0135	0,0124
5. Fase sólida de la etapa 1			
$m_5, (g)$	27,43	25,61	26,52
$X_5^{H_2SO_4}$	0,0126	0,0042	0,0084
$X_5^{H_2O_2}$	0,0027	0,0009	0,0018
$X_5^{H_2O}$	0,0752	0,0251	0,0501
$X_5^{CuSO_4}$	0,001	0,0004	0,0007
X_5^{Cu}	0,0748	0,0766	0,0757
X_5^{Otros}	0,8337	0,8929	0,8633

Luego de la filtración, la etapa que sigue en el modelo B es el lavado (**Figura 21**), los valores correspondientes a esta parte del proceso, se reportan en la **Tabla 36**.

Figura 21. Lavado de la etapa 1, modelo B

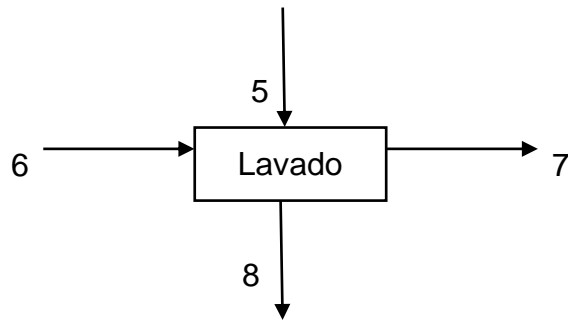
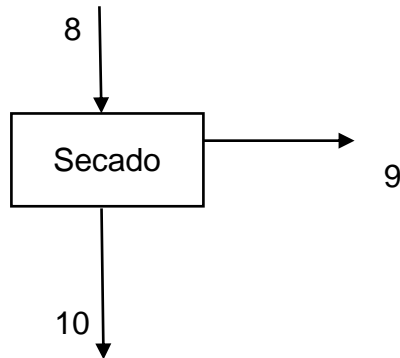


Tabla 36. Balances de masa del lavado de la etapa 1, modelo B

	R1	R2	Promedio
6. Agua			
$m_6, (g)$	29,7	29,7	29,7
$X_6^{H_2O}$	1	1	1
7. Agua de lavado			
$m_7, (g)$	21,59	16,99	19,29
$X_7^{H_2O_2}$	0,0034	0,0013	0,0024
$X_7^{H_2O}$	0,8982	0,9289	0,9135
$X_7^{CuSO_4}$	0,0022	0,0015	0,0019
$X_7^{H_2SO_4}$	0,016	0,0063	0,111
8. Fase sólida húmeda de la etapa 1			
$m_8, (g)$	35,54	38,32	36,93
$X_8^{H_2O}$	0,3481	0,38	0,364
X_8^{Cu}	0,0578	0,0512	0,0545
X_8^{Otros}	0,6434	0,5968	0,6201

Para finalizar la etapa 1, en la **Figura 22**, se puede ver la última parte de esta etapa, la cual corresponde al secado.

Figura 22. Lavado de la etapa 1, modelo B



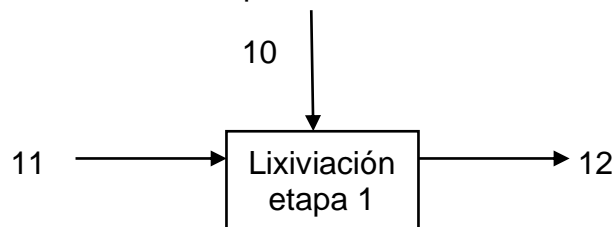
En la **Tabla 37**, se presentan los resultados del balance de materia del lavado de la etapa 1 del modelo B

Tabla 37. Balances de masa del lavado de la etapa 1, modelo B.

	R1	R2	Promedio
9. Humedad evaporada			
m_9 (g)	12,37	14,56	13,465
$X_9^{H_2O}$	1	1	1
10. Sólido seco de la etapa 1			
m_{10} (g)	23,17	23,76	23,47
X_{10}^{Cu}	0,0886	0,0825	0,086
X_{10}^{Otros}	0,9869	0,9624	0,9747

Ahora, se presentarán los resultados de los balances de masa de la etapa 2 del modelo B; comenzando con la lixiviación (**Figura 23**) de esta etapa.

Figura 23. Lixiviación de la etapa 2, modelo B



En la **Tabla 38**, se muestran los resultados del balance de masa de la lixiviación de la etapa 2.

Tabla 38. Balances de masa en la lixiviación de la etapa 2, modelo B

	R1	R2	Promedio
11. Solución ácida de la etapa 2			
m_{11} , (g)	105,48	105,48	105,48
$X_{11}^{H_2SO_4}$	0,1455	0,1455	0,1455
$X_{11}^{H_2O_2}$	0,0318	0,0318	0,0318
$X_{11}^{H_2O}$	0,8227	0,8227	0,8227
12. Producto de la lixiviación de la etapa 2			
m_{12} (g)	128,65	129,24	128,95
$X_{12}^{H_2SO_4}$	0,1014	0,0955	0,0984
$X_{12}^{H_2O_2}$	0,0198	0,0178	0,0188
$X_{12}^{H_2O}$	0,6811	0,68	0,6806
$X_{12}^{CuSO_4}$	0,0292	0,038	0,0336
X_{12}^{Cu}	0,0043	0,0001	0,0022
X_{12}^{Otros}	0,1641	0,1687	0,1664
ξ_2 , (mol)	0,0235	0,0307	0,0271

En la **Tabla 39**, se muestran los resultados del balance de masa de la filtración de la etapa 2 del modelo B (**Figura 24**)

Figura 24. Filtración de la etapa 2, modelo B

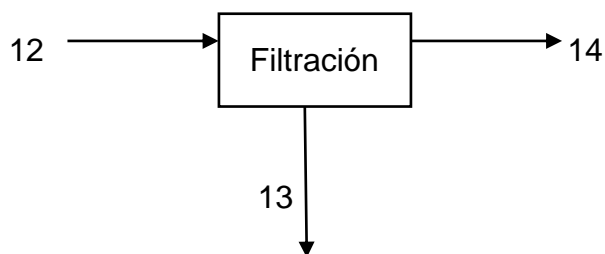


Tabla 39. Balances de masa de la filtración de la etapa 2, modelo B

	R1	R2	Promedio
13. Fase sólida de la etapa 2			
m_{13} (g)	30,52	27,57	29,05
$X_{13}^{H_2SO_4}$	0,0353	0,0240	0,0297
$X_{13}^{H_2O_2}$	0,0069	0,0045	0,0057
$X_{13}^{H_2O}$	0,2374	0,171	0,2042
$X_{13}^{CuSO_4}$	0,0102	0,0095	0,0099
X_{13}^{Cu}	0,0183	0,0003	0,0093
X_{13}^{Otros}	0,6919	0,7907	0,7413

Tabla 39. (Continuación).

14. Fase líquida de la etapa 2			
m_{14} (g)	98,13	101,67	99,9
$X_{14}^{H_2SO_4}$	0,1219	0,1148	0,1184
$X_{14}^{H_2O_2}$	0,0239	0,0215	0,0227
$X_{14}^{H_2O}$	0,8191	0,8181	0,8186
$X_{14}^{CuSO_4}$	0,0351	0,0457	0,0404

La etapa siguiente, es el lavado, el cual se puede ver en la **Figura 25**, los resultados de esta, se encuentran en la **Tabla 40**.

Figura 25. Lavado de la etapa 2, modelo B

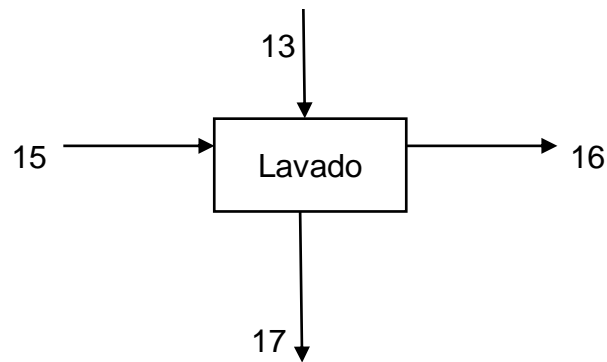


Tabla 40. Balances de masa del lavado de la etapa 2, modelo B

	R1	R2	Promedio
15. Agua			
m_{15} (g)	29,7	29,7	29,7
$X_{15}^{H_2O}$	1	1	1
16. Agua de lavado de la etapa 2			
m_{16} (g)	28,78	20,78	24,78
$X_{16}^{H_2O_2}$	0,0073	0,006	0,0066
$X_{16}^{H_2O}$	0,9426	0,9520	0,9472
$X_{16}^{CuSO_4}$	0,0109	0,0102	0,0105
$X_{16}^{H_2SO_4}$	0,0375	0,0318	0,0347
17. Fase sólida húmeda de la etapa 2			
m_{17} (g)	31,44	36,49	33,965
$X_{17}^{H_2O}$	0,3123	0,3716	0,342
X_{17}^{Cu}	0,0178	0,0002	0,009
X_{17}^{Otros}	0,6717	0,5974	0,6345

La última parte de la segunda etapa del modelo B, corresponde al secado (**Figura 26**) y los resultados de esta operación unitaria, se encuentran consignados en la **Tabla 41**.

Figura 26. Secado de la etapa 2 del modelo B

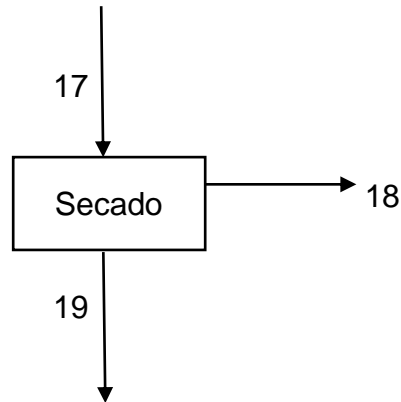


Tabla 41. Balances de masa del secado de la etapa 2, modelo B

	R1	R2	Promedio
18. Humedad evaporada			
m_{18} (g)	12,37	14,56	13,465
$X_{18}^{H_2O}$	1	1	1
19. Sólido seco de la etapa 1			
m_{19} (g)	21,62	22,93	22,28
X_{19}^{Cu}	0,0258	0,0003	0,0131
X_{19}^{Otros}	0,9767	0,9507	0,9637

4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentará el análisis y discusión de los resultados obtenidos en los dos modelos experimentales de extracción de cobre por medio de una solución ácida de H_2SO_4 y H_2O_2 ejecutados durante este trabajo.

En primer lugar se realizará el análisis de los datos de las corrientes de ambos modelos presentados en las **Tabla 16** (modelo A) y **Tabla 21** (modelo B); de la información registrada en estas tablas; se puede evidenciar que la densidad de la fase líquida en las tres réplicas del modelo A (corriente 6) es inferior a la densidad de la solución ácida reportada en la **Tabla 14**, es decir después de los respectivos procesos de lixiviación de las tarjetas de circuitos impresos, se dio una disminución en la densidad de la fase líquida efluente de dicha lixiviación con respecto a la solución de H_2SO_4 y H_2O_2 ; mientras que en la fase líquida de la etapa 1 y 2 en las dos réplicas del modelo B la densidad aumentó con respecto a la densidad de la solución ácida.

Este comportamiento se debe a que en el caso en el que se registró la disminución de la densidad (modelo A) se realizó la filtración y el lavado en el mismo paso, es decir la solución líquida filtrada y la fracción líquida sustraída en el lavado con agua se mezclaron, mientras que en el caso en el que se presentó el aumento en la densidad (etapa 1 y 2 del modelo B) se hizo la filtración y el lavado por separado, por lo tanto, las fases líquidas resultantes de cada proceso no se mezclaron, por ello, en este caso la densidad aumentó con respecto a la densidad de la solución lixivante.

Ahora se realizará el análisis de los datos de la prueba de espectrofotometría de absorción atómica y de los valores de recuperación de cobre obtenidos, en primer lugar se llevará a cabo un análisis de la desviación estándar de estos valores con el fin de conocer que tan alejado está cada valor con respecto al promedio de los mismos; para obtener la desviación estándar de cada dato se aplica la siguiente ecuación

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (17)$$

Donde:

S = Desviación estándar

\bar{x} = Promedio de los datos

X_i = datos de la muestra

n = número de datos

Entonces para calcular la desviación estándar de los resultados del análisis de absorción atómica es necesario, en primer lugar hallar el promedio de los mismos; entonces:

Para el modelo A:

$$\bar{x} = \frac{0,29 + 0,52 + 0,4}{3} = 0,4$$

Para la etapa 1 del modelo B:

$$\bar{x} = \frac{0,52 + 0,63}{2} = 0,575$$

Para la etapa 2 del modelo B:

$$\bar{x} = \frac{1,49 + 2,15}{2} = 1,82$$

Al obtener los promedios de cada grupo de datos se procederá a calcular la desviación estándar de cada grupo; de la siguiente manera:

Para el modelo A

$$S = \sqrt{\frac{(0,29 - 0,4)^2 + (0,52 - 0,4)^2 + (0,4 - 0,4)^2}{3 - 1}} = 0,115$$

Para la etapa 1 del modelo B:

$$S = \sqrt{\frac{(0,52 - 0,575)^2 + (0,63 - 0,575)^2}{2 - 1}} = 0,078$$

Para la etapa 2 del modelo B:

$$S = \sqrt{\frac{(1,49 - 1,82)^2 + (2,15 - 1,82)^2}{2 - 1}} = 0,467$$

Luego de calcular las desviaciones estándar de cada grupo de datos se puede afirmar que los resultados de la etapa 1 del modelo B, comparados con los datos de desviación estándar del modelo A, son menores, por lo cual, el grupo de valores de la etapa 1 del modelo B son los datos que tienen una menor dispersión con respecto a la media aritmética de los mismos, lo cual también puede ser interpretado como que es el grupo de datos de mayor precisión puesto que la diferencia entre el promedio de los datos y cada dato es el menor

Las diferencias presentadas en los resultados del porcentaje de recuperación de las réplicas de cada modelo y las variaciones en los resultados de las pruebas de espectrofotometría de absorción atómica, guardan una relación directa, ya que, como se puede verificar en la sección 4.4, el cálculo del porcentaje de recuperación de Cu parte de los datos de las pruebas de EAA. Estas fluctuaciones se pueden deber a diversos factores, tales como:

- A pesar de que todas las muestras sólidas se prepararon de la misma manera manteniendo la proporción de la distribución del tamaño de partícula con respecto al total de la masa de las tarjetas y con una masa igual entre cada

muestra, resulta prácticamente imposible el asegurar que cada muestra procesada sea exactamente igual a otra muestra puesto que la distribución del cobre en la tarjeta no es uniforme.

- Al tratarse de un de un procedimiento novedoso, sin un estándar o protocolo bien definido para llevarlo a cabo y ser un primer estudio de por parte del autor se incrementa el error inherente a cada proceso experimental que se ejecuta.

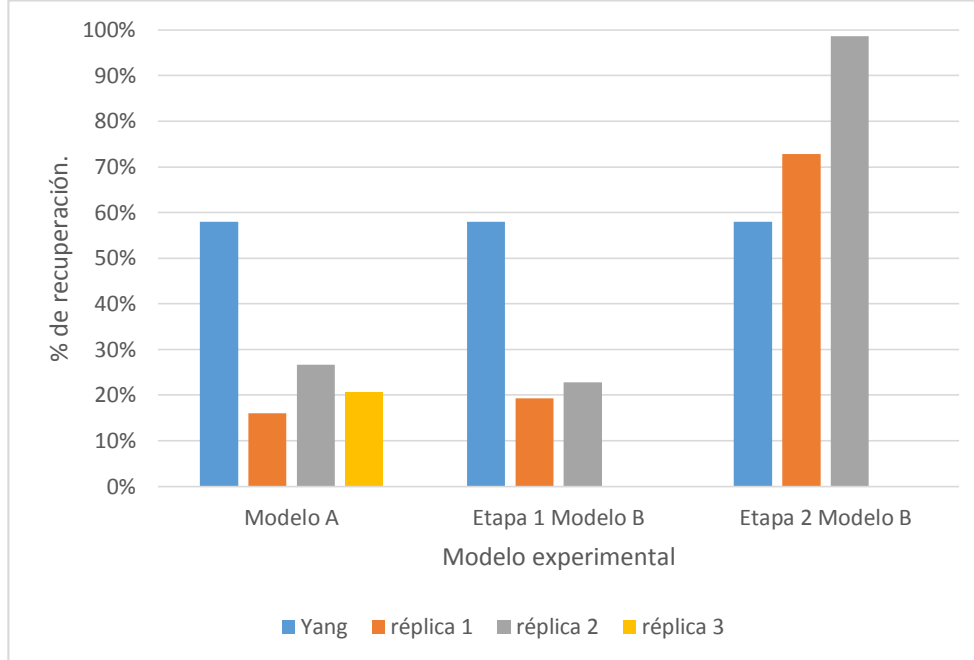
También resulta pertinente realizar la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con respecto a los encontrados en la literatura; para esto se tomaron los datos reportados por (YANG)⁷⁸ de la recuperación de cobre para partículas entre 2 y 4 mm al cabo de 3 horas de reacción. Se compararon frente a los resultados de ese tamaño de partícula (2 – 4 mm) puesto a que el tamaño máximo que se manejó dentro de las muestras sólidas de este trabajo de grado se encuentran dentro de este intervalo, y la porción de la muestra dentro de este intervalo, corresponde al 64,16 % del total de las muestra (**Tabla 15**)

En la **Figura 27**, se presenta un gráfico en el que se puede ver con claridad la comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los resultados encontrados en la bibliografía; cabe aclarar que los resultados reportados por YANG⁷⁹, corresponden a un solo proceso de extracción en una sola etapa y se usó para comparar con los resultados obtenidos de los dos modelos planteados en este trabajo.

⁷⁸ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 398.

⁷⁹ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 398

Figura 27. Comparación de resultados



Como se evidenciar en la **Figura 27**, los datos obtenidos en el modelo A, en la etapa 1 del modelo B son menores a los encontrados en la literatura, mientras que los resultados de la etapa 2 del modelo B superan a los reportados en el referente bibliográfico, en base a lo anterior, se pueden plantear dos hipótesis.

La primera es que el tiempo de reacción transcurrido en cada etapa no es suficiente para que se logre una buena extracción del cobre presente en las tarjetas de circuitos impresos pues se puede evidenciar un gran diferencia en las muestras del modelo A y la etapa 1 del modelo B con respecto a la de la etapa 2 del modelo B pues esta última se vio sometida al proceso de lixiviación por 6 h (3 horas de la etapa 1 y 3 horas de la etapa 2).

La segunda hipótesis se basa en que resulta muy efectivo realizar un segundo ataque con solución ácida fresca sobre una muestra sólida pasada previamente por una etapa inicial de lixiviación pues al realizar este procedimiento se registraron valores muy superiores a los demás incluyendo al del referente en el cual no se efectuó este segundo ataque o segunda etapa de lixiviación con solución ácida fresca.

Sin embargo al revisar el referente (YANG)⁸⁰ se encontró que, como se mencionó anteriormente el tiempo óptimo de lixiviación allí propuesto es el de 3 horas, puesto que, después de transcurrido este tiempo, no se evidencia un aumento significativo en el porcentaje de recuperación de cobre. Por lo cual la segunda hipótesis

⁸⁰ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 398.

planteada en el párrafo anterior es la que parece explicar mejor el incremento significativo de la extracción en la segunda etapa del modelo B.

Los resultados obtenidos del modelo B muestran que al realizar una lixiviación en etapas múltiples, en la cual el sólido se someta a dos ataques ácidos, se logra un porcentaje de recuperación de Cu mucho mayor que el de una lixiviación en una sola etapa; esto se puede evidenciar al comparar el porcentaje de recuperación de Cu promedio del modelo A (21,09%) con el porcentaje de recuperación global promedio del modelo B (88,71%).

Al comparar los resultados obtenidos en el modelo B con respecto a los resultados presentados por (XU)⁸¹, quien plantea un proceso de lixiviación en etapas múltiples de un mineral con un contenido de Cu del 15,25 %, similar al desarrollado en el modelo B, se evidenció que se los resultados reportados en este referente del porcentaje global de extracción de Cu (96,2 %) es cercano al porcentaje de recuperación de Cu obtenidos en el modelo B (88,71 %).

De los resultados de la técnica de EAA presentados en las **Tablas 16 y 22**, se puede determinar la concentración del Cu en cada una de las soluciones líquidas analizadas. Obteniendo que para el modelo A la concentración promedio de Cu en la solución es de 4 g/L, mientras que para la primera etapa del modelo B es del 5,75 g/L y para la segunda etapa es de 18,2 g/L. Al comparar estos valores con los reportados por (CHAVERRA Y RESTREPO)⁸², se puede evidenciar que se las soluciones líquidas obtenidas presentan una menor concentración de cobre a las logradas por el referente (25 g/L), esto se debe a que, en el caso del modelo A y en la primera etapa del modelo B se obtuvieron porcentajes de recuperación menores a los del referente (promedio 79 %), y para el caso de la segunda etapa del modelo B, la diferencia entre la concentración de las soluciones líquidas se debe a que, a pesar de lograr un mejor porcentaje de recuperación con respecto al referente, la muestra sólida usada por este último tenía una mayor cantidad de Cu (44 g de Cu) a la utilizado en este trabajo (2,53 g de Cu).

A continuación, se presenta el cálculo del total de cobre que se podría recuperar si se procesara la totalidad del material particulado de las TCI generado (693,42 g); utilizando el modelo B, debido a que este es el modelo en el que se obtuvieron mayores porcentajes de extracción.

Calculando la masa total de Cu en el material particulado

$$m_{Cu} = 693,42 \text{ g} * 9,97 \% = 69,13 \text{ g de Cu}$$

⁸¹ XU, Bin, ZHONG, Hong, JIANG, Tao. Op cit., p 1082-1083.

⁸² CHAVERRA, Dario. RESTREPO, Oscar. Op. cit., p. 236

Con el valor anterior, se calcula la masa de cobre recuperada según el porcentaje promedio de recuperación del modelo B (88,71 %).

$$m_{Cu,recuperada} = 69,13 \text{ g de Cu} * 88,71 \% = 61,33 \text{ g de Cu}$$

Por último, para una empresa comercializadora de aparatos electrónicos, principalmente de celulares como lo es Patrix Technology la implementación de la alternativa de recuperación de cobre estudiada en este trabajo de grado, representaría un gran beneficio al aportar al cumplimiento de la normativa existente en el país para el manejo de residuos peligrosos como la ley 1672 del 2013, la ley 430 de 1998 y el decreto 4741 de 2005.

5. CONCLUSIONES

- Luego de someter las TCI utilizadas para el desarrollo de este trabajo de grado a una prueba de fluorescencia de rayos x, se encontró que el contenido metálico de estas es: Cu = 9,97 %; Al = 4,16 %; Sn = 3,34 %; Fe = 2,75%; Ni = 1,38%; Zn = 0,47 %; entre otros. Del mismo modo, al comparar estos resultados con los hallados en la bibliografía consultada de la composición de las TCI en general y las TCI de teléfonos celulares se pudo comprobar que, para ambos casos, los valores de estos metales se encuentran dentro de los rangos de composición reportados por otros autores (Ver **Tabla 7**).
- Al hacer la revisión bibliográfica de los posibles métodos de recuperación de metales presentes en las TCI, se generó un amplio abanico de posibilidades, de las cuales, bajo los criterios de selección utilizados en este trabajo de grado para la selección de la alternativa y los recursos disponibles, se pudo determinar que la lixiviación ácida de las TCI con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) representa la alternativa más adecuada para llevar a cabo recuperación del cobre presente en las TCI. Bajo esta decisión, se plantearon dos procesos experimentales a ejecutar; el primero de ellos, consistió en una extracción en una sola etapa, denominado modelo A; el segundo, una extracción en etapas múltiples nombrado modelo B.
- De los procesos de lixiviación desarrollados, se obtuvo un porcentaje promedio de extracción de cobre del 21,09 % para el modelo A; del 21,01 % para la primera etapa del modelo B; del 85,71 % para la segunda etapa del modelo B y el porcentaje global promedio de recuperación de Cu en el modelo B fue del 88,71 %. Al comparar estos resultados con los obtenidos por los autores referentes, se halló que, al analizar cada lixiviación como un solo proceso, en el caso del modelo A y la primera etapa del modelo B, se lograron porcentajes menores a los reportados en la bibliografía (porcentaje de extracción de Cu cercano al 58 %) mientras que en la segunda etapa del modelo B, se consiguió un mayor porcentaje de recuperación. Por lo cual, se puede concluir que el realizar un segundo ataque ácido a una muestra sólida resulta muy beneficioso ya que esto genera un incremento muy considerable en el porcentaje de extracción del metal.
- De los balances de materia realizados, se encontró que las soluciones líquidas efluentes de los procesos de lixiviación, están constituidas esencialmente por agua y ácido sulfúrico y estas tienen un concentración promedio de Cu de 4 g/L para el modelo A, de 5,75 g/L para la primera etapa del modelo B y de 18,2 g/L. Lo cual es una concentración menor a las encontradas en la bibliografía. Conocer esta información es de vital importancia a la hora de plantear los procesos de separación y purificación estas soluciones.

6. RECOMENDACIONES

- El desarrollo de este proyecto de grado, deja varias líneas de investigación abiertas en las que se puede profundizar para determinar si estas pueden ayudar a mejorar los resultados obtenidos.
- Revisar los métodos de recuperación para cobre que no hayan sido tenidos en cuenta en este estudio, entre los que se pueden destacar, procesos de lixiviación con bases fuertes, lixiviación ácida (H_2SO_4) con oxígeno (O_2) como agente oxidante, lixiviación usando agua regia, entre otros, analizar la posibilidad de combinar los diferentes procesos, con el fin de ampliar el abanico de opciones para brindar alternativas diferentes a la lixiviación ácida desarrollada.
- Incluir más etapas de pretratamientos de las muestras sólidas entre ellas las separaciones magnéticas y electrostáticas propuestas por CHAVERRA Y RESTREPO⁸³. Al realizar estas separaciones, se puede concentrar el contenido metálico de las muestras al eliminar especies ferrosas y no conductoras.
- Desarrollar el proceso experimental con varias fracciones de material sólido con diferente tamaño de partícula, para de esta manera, determinar cuál es el tamaño óptimo para obtener un mayor porcentaje de recuperación de cobre.
- Estudiar el equilibrio químico entre la solución lixivante y las partículas de tarjetas de circuitos impresos, para poder establecer factores importantes como los límites de extracción que se pueden obtener, así mismo, controlar la solubilidad del sulfato de cobre en la solución líquida para no dar lugar a posibles pérdidas por precipitación del sulfato de cobre.
- Realizar el dimensionamiento de la alternativa a escala piloto o semi-industrial para determinar las cantidades de cobre que se podrían recuperar por semana, mes o año, de igual manera los equipos y costos que se requieren para realizar el montaje de la alternativa en una empresa como Patrix Technology.
- A partir de las soluciones de sulfato de cobre obtenidas luego de los procesos de lixiviación realizados, estudiar las diferentes alternativas de purificación o separación del cobre, con el fin de obtener un producto con mayor valor en el mercado para obtener beneficios económicos a partir de él.

⁸³ CHAVERRA, Dario. RESTREPO, Oscar. Op cit., p. 234.

BIBLIOGRAFÍA

AL-SAIDI, H, M. The fast recovery of gold (III) ions from aqueous solutions using raw date pits: Kinetics, thermodynamic and equilibrium studies. *Journal of Saudi chemical society*, Junio, 2013. p. 2

ARCE, Enrique. *Introducción al diseño básico de procesos químicos*. Mexico D.F. : s.n., 2011.

ASOCIACION GSM. GSMA latin America. *Ewaste en Colombia*. [En línea] [Citado el: 18 de Septiembre de 2017.] <http://bit.ly/2ewastecolombia>.

BECKHOFF, Burkhard. y WENDELL, Reiner. 1965. *Handbook of practical x-ray fluorescence analysis*. Nueva York : s.n., 1965.

CALGARO, C. et al. Fast copper extraction from printed circuit boards using supercritical carbon dioxide. *Waste Management*, Mayo, 2015. p. 2-3

CAMELINO, Sebastian. et al. Initial studies about gold leaching from printed circuit boards (PCB's) of waste cell phones. 2015. p 107.

CHAVERRA, Dario y RESTREPO, Oscar. *Extracción de cobre a partir de residuos de tarjetas de circuitos impresos*. 5, Medellín : s.n., 2013.

CHRIS, Y. *et al*. Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board. 2006.p. 658

CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1672 de 2013. Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. : s.n., 19 de Julio de 2013.

CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 430. Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. : s.n., 16 de Enero de 1998.

COMMITTEE ON THE ENVIRONMENT, PUBLIC HEALTH AND FOOD SAFETY. Background note on cyanide in gold mining. Septiembre, 2013, p. 1. [En Línea]. [Citado el: 11 de Febrero de 2017]. <http://bit.ly/2cyanidemining>.

DICKERSON. Gray. *Principios de química*. Tercera edición. California. 1992. p. 386.

EMPA MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY. Gestión de residuos electrónicos en Colombia, diagnóstico de computadores y telefonos celulares. Swiss e-waste programme. Medellín : s.n., 2008,

FOGARASI, *et al.* Eco-friendly cooper recovery process from waste printed circuit boards using Fe³⁺/Fe²⁺ redox system. Cluj-Napoca : s.n., 2015.

GRUPO TRANSMERQUIM. Hoja de datos de seguridad del cianuro de sodio. p. 2 ,5. [En Linea] [Citado el: 23 de Septiembre de 2017]. http://bit.ly/hojadeseguridad_cianurodesodio

HA, Vinh. *et al.* Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phone. Journal of hazardous materials. 2010. p. 1116.

HANAFI, Jessica. *et al.* Material recovery and characterization of PCB from electric waste . 2012. p. 332

HINO, T. *et al.* Techniques to separate metal from waste printed circuit board from discarded personal computers. J mater cycles waste management. 2009. p. 44

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación: Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. 6 ed. Bogotá D.C.: ICONTEC., 2008. 36p

_____. Referencias bibliográficas: Contenido, forma y estructura. NTC 5613. 6 ed. Bogotá D.C.: El instituto., 2008. 33p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. 6 ed. Bogotá D.C.: El instituto., 2008. 23p.

KASPER, Angela. *et al.* Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. Waste management. 2011. p. 2541.

KAYA, Muammer. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. Eskisehir : Elsevier, 2016.

KHALIQ, Abdul y AKBAR, Muhammad. Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: A review an Australian perspective. Melbourne : s.n., 2014.

KIM, B.S. *et al.* A process for extracting precious metals from spent printed circuit boards and automobile catalysts. 2004. p. 55

McCABE, WARREN, SMITH, Julian y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. s.l. : McGraw-Hill.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. 2005. Decreto 4741. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá D.C. : s.n., 30 de Diciembre de 2005.

MONTERO BERMÚDEZ, Ricardo Andrés. Biblioteca digital de la escuela politécnica nacional. [En línea] [Citado el: 5 de Marzo de 2017.] <http://bit.ly/2tesisepn>

OLIVEROS GÓMEZ, Honorio. Universidad Nacional de Colombia. [En línea] [Citado el: 11 de Febrero de 2017.] <http://bit.ly/2unaloliveros>

PARK, Young. FRAY, Derek. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. Journal of hazardous materials. 2008. p. 1153

PERRY, Robert, GREEN, Den y MALONEY, James. Manual del ingeniero químico. Tercera edición en español. s.l. : McGraw-Hill. págs. 3, 3-101, 3-108.

PHILIPS CORPORATION. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. Cambridge : Woodhead publishing, 2012.

RAMÍREZ PELCASTRE, Juan Manuel. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. [En línea] [Citado el: 11 de Febrero de 2017.] <http://bit.ly/2uaeh>

SAADATJO, Naghi, y otros. Recovery of gold from computer circuit board scraps: the study of the effect of different reductants. 27, Semnan : s.n., 2013, Vol. 8.

SCHLEMMER, D. F., y otros. Fast copper extraction from printed circuit boards using supercritical carbon dioxide. 2015. 2015.

SHUEY, S.A, TAYLOR, P. A review of a pyrometallurgical treatment of electronic scrap. 2004. p. 3.

SUN, Z. An effective process to selectively recovery copper with solutions containing different ammonium salts. Delft : s.n., 2016.

SYED, Sabir. Recovery of gold from secondary sources - A review. Riyadh : s.n., 2011.

TOYOHISA, Fuhita. et al. Copper recovery from printed circuit boards of e-waste. The minerals, metals & materials society. 2011. p. 1

TREYBAL, Robert. Operaciones de transferencia de masa. s.l. : McGraw-Hill.

Veit, Hugo Marcelo y Moura Bernardes, Andréa. Electronic Waste Recycling Techniques. Porto Alegre : Springer, 2015.

YAMANE, Luciana Harue. et al. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phone and computers. Waste management. 2011. p. 2557.

YANG, Haiyu, LIU, Jingyang y YANG, Jiakuan. Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. Wuhan : s.n., 2011.

XU, Bin. ZHONG, Hong. JIANG, Tao. Recovery of a value metals from Gacum complex copper concentrate by two-stages countercurrent oxygen pressure acid leaching process. Material Engineering. Abril, 2011. p. 1083

ZHAO, C. et al. Study on recovery of valuable metals from waste mobile phone PCB particles using Liquid-solid fluidization technique. Chemical Engineering Journal. 2016. p. 221.

ANEXOS

ANEXO A.
RESULTADOS DE LA PRUEBA XRF



REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Reporte Ensayo No 51415

Fecha de reporte: 2017-04-12

Cliente: Sr. Juan Felipe Villalobos
Carrera 78p BIS No. 6-24 sur
7530330

Proyecto: No Aplica.

Contacto: Sr. Juan Felipe Villalobos

Solicitado por: Sr. Juan Felipe Villalobos

ID muestra - cliente Tarjetas de circuitos impresos

Tipo de material: De proceso

Fecha recibido: 2017-04-04

Proyecto Xamtec: XAMENS 2017

Prof. proy. Xamtec: Andres Pedraza

Analizado por: *Andres B* Cargo: Analista de Laboratorio

Aprobado por: *Franco P* Cargo: Lider de Laboratorio

Fecha de análisis: 2017-04-12

Observaciones

1. Los resultados analíticos presentes corresponden EXCLUSIVAMENTE a la(s) muestra(s) recibida(s) y no a otro material de la misma procedencia. Xamtec S.A.S no es responsable del origen o fuente de dónde ha(n) sido extraída(s) la(s) muestra(s).
2. Este reporte es único para esta(s) muestra(s).
3. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 3 meses posteriores a la entrega del informe.
4. La disposición de contramuestras y sobrantes se realiza de acuerdo con lo aprobado y establecido por el cliente en la cadena de custodia para muestras.
5. Xamtec S.A.S no emite juicios ni interpretaciones sobre el resultado emitido en este informe; así mismo, no se hace responsable por el uso y disposición que le dé el cliente a la copia enviada electrónicamente.
6. El informe impreso, será sólo válido con los sellos de Xamtec S.A.S y con las firmas manuales en todas las paginas.

Análisis solicitados:

AN-01 Análisis cuantitativo sobre pastilla por FRX por longitud de onda.

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio Xamtec S.A.S.

Cliente:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Proyecto Xamtec:	XAMENS 2017
Proyecto:	No Aplica.	Prof. Proy. Xamtec:	Andres Pedraza
Contacto:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Analizado por:	<i>Jonathan B. Franco Lopez P.</i>
Solicitado por:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Aprobado por:	<i>Jonathan B. Franco Lopez P.</i>
Fecha recibido:	2017-04-04	Fecha de análisis:	2017-04-12
		Fecha de reporte:	2017-04-12

REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

ID muestra - cliente: Tarjetas de circuitos impresos
Tipo de material: De proceso
ID muestra - Xamtec: 91417

Análito	Unidades	Resultado	Análito	Unidades	Resultado
Si	%	21.50	Sr	%	0.12
Cu	%	9.97	Mn	%	0.09
Ba	%	4.93	Na	%	0.07
Ca	%	4.31	Cr	%	0.06
Al	%	4.16	As	%	0.03
Sn	%	3.34	CH _n	%	42.6
Fe	%	2.75	Total		100.0
Ni	%	1.38			
Br	%	1.10			
S	%	0.97			
Ti	%	0.70			
Zn	%	0.47			
Mg	%	0.44			
Px	%	0.41			
Zr	%	0.29			
Cl	%	0.17			
K	%	0.14			

- Notas:** 1 . Preparación de muestra por pastilla prensada.
 2 . Análisis cuantitativo de óxidos generales realizado por espectrometría de fluorescencia de rayos X por longitud de onda.
 3 . Concentraciones calculadas por UniQuant®
 4 . N.D. : NO Detectable
 5 . Los valores pueden estar sobre estimados ya que se toma como base de calculo una cadena de CHn.
 6 . Esta técnica de análisis no descarta presencia de elementos NO reportados en concentraciones menores a 100 ppm

- FIN DEL REPORTE -

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio Xamtec S.A.S.

ANEXO B.
RESULTADOS GRANULOMETRÍA A



REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Reporte Ensayo No 91416

Fecha de reporte: 2016-04-10

Cliente: Sr. Juan Felipe Villalobos
Carrera 78p Bis No. 6-24 sur
7530330

Proyecto: No Aplica.

Contacto: Sr. Juan Felipe Villalobos

Solicitado por: Sr. Juan Felipe Villalobos

ID muestra: Tarjetas de circuitos impresos

Tipo de material: De proceso

Fecha recibido: 2017-04-04

Proyecto Xamtec: XAMENS 2016

Prof. proy. Xamtec: Andres Pedraza

Analizado por:  Cargo: Analista de Laboratorio

Aprobado por:  Cargo: Líder de Laboratorio

Fecha de análisis: 2017-04-10

Observaciones

1. Los resultados analíticos presentes corresponden EXCLUSIVAMENTE a la(s) muestra(s) recibida(s) y no a otro material de la misma procedencia. Xamtec S.A.S no es responsable del origen o fuente de dónde ha(n) sido extraída(s) la(s) muestra(s).

2. Este reporte es único para esta(s) muestra(s).

3. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 3 meses posteriores a la entrega del informe.

4. La disposición de contramuestras y sobrantes se realiza de acuerdo con lo aprobado y establecido por el cliente en la cadena de custodia para muestras.

5. Xamtec S.A.S no emite juicios ni interpretaciones sobre el resultado emitido en este informe; así mismo, no se hace responsable por el uso y disposición que le dé el cliente a la copia enviada electrónicamente.

6. El informe impreso, será sólo válido con los sellos de Xamtec S.A.S y con las firmas manuales en todas las paginas.

Análisis solicitados:

AN-12 Servicios de análisis Sub-contratado

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio Xamtec S.A.S.

Cliete:	Sr. Juan Felipe Vilalobos	Proyecto Xamtec:	XAMENS 2016
Proyecto:	No Aplica.	Prof. Proy. Xamtec:	Andres Pedraza
Contaoto:	Sr. Juan Felipe Vilalobos	Analizado por:	<i>Juan Felipe B</i>
Sollitado por:	Sr. Juan Felipe Vilalobos	Aprobado por:	<i>Fernando P</i>
Fecha recibido:	2017-04-04	Fecha de análisis:	2017-04-10
		Fecha de reporte:	2016-04-10

REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

ID muestra - cliente: Tarjetas de circuitos impresos
 Tipo de material: De proceso
 ID muestra - Xamtec: 91417

Peso Inicial 693.42 g

TAMAÑO		RETENIDO		ACUMULADO (%)	
MALLA	µm	g	%	RETENIDO	PASANT E
Malla 60	250	683.74	98.60	98.60	1.40
Malla 100	150	0.01	0.00	98.61	1.39
Malla 170	90	7.11	1.03	99.63	0.37
Malla 200	75	0.66	0.09	99.73	0.27
Malla 325	45	1.08	0.16	99.88	0.12
Colector	-	0.82	0.12	100.00	0.00
Total		693.42	100.0		

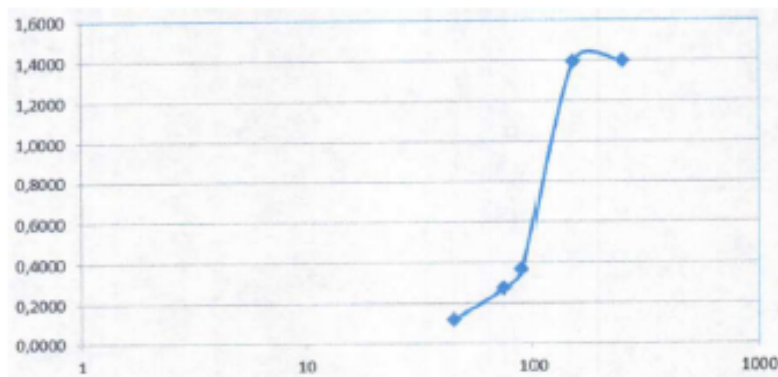
- Notas:** 1 .El análisis de Granulometría se realizó con la colaboración de un laboratorio externo y es una fiel copia del informe: R280-17
 2 .Normas y Procedimientos de ensayos utilizados: Granulometría.

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio Xamtec S.A.S.

Cliente:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Proyecto Xamtec:	XAMENS 2016
Proyecto:	No Aplica.	Prof. Proy. Xamtec:	Andres Pedraza
Contacto:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Analizado por:	Juan Felipe B.
Solicitado por:	Sr. Juan Felipe Villalobos	Aprobado por:	Fredy Villalobos P.
Fecha recibido:	2017-04-04	Fecha de análisis:	2017-04-10
		Fecha de reporte:	2016-04-10

REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

ID muestra - cliente: Tarjetas de circuitos impresos
Tipo de material: De proceso
ID muestra - Xamtec: 91417



- Notas:
- 1 .El análisis de Granulometría se realizó con la colaboración de un laboratorio externo y es una fiel copia del informe: R280-17
 - 2 .Normas y Procedimientos de ensayos utilizados: Granulometría.

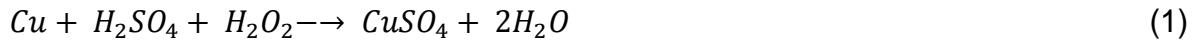
- FIN DEL REPORTE -

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio Xamtec S.A.S.

ANEXO C.

CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS TEÓRICOS DE LA LIXIVIACIÓN

En este anexo, se presentarán los cálculos de los requerimientos teóricos necesarios para llevar a cabo la reacción de lixiviación (1). Estos cálculos, servirán de soporte a la información diligenciada en la **Tabla 13**.



En primer lugar se calculan los moles de Cu presentes en cada una de las muestras sólidas usadas, así.

$$\text{moles de Cu en la muestra} = \frac{\text{masa de Cu en la muestra (g)}}{\text{masa molecular de Cu } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)}$$

$$\text{moles de Cu en la muestra} = \frac{2,53 \text{ g}}{63,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$\text{moles de Cu en la muestra} = 0,04 \text{ mol}$$

Ahora se calcula la masa estequiométrica de H_2SO_4 que debe reaccionar con los moles de Cu calculados

*masa esteq. H_2SO_4 (g) = moles de Cu en la muestra * masa molecular de H_2SO_4 * relación esteq. de Cu y H_2SO_4*

$$\text{masa esteq. } \text{H}_2\text{SO}_4 = 0,04 \text{ mol Cu} * 98 \frac{\text{g } \text{H}_2\text{SO}_4}{\text{mol } \text{H}_2\text{SO}_4} * 1 \frac{\text{mol } \text{H}_2\text{SO}_4}{\text{mol Cu}} = 3,90 \text{ g } \text{H}_2\text{SO}_4$$

Como el H_2SO_4 es del 97% en peso, entonces:

$$\text{masa esteq. } \text{H}_2\text{SO}_4 = \frac{3,90 \text{ g } \text{H}_2\text{SO}_4}{97 \%}$$

$$\text{masa esteq. } \text{H}_2\text{SO}_4 = 4,02 \text{ g}$$

Usando la densidad del H_2SO_4 se calcula el volumen estequiométrico, así.

$$\text{Vol esteq. } \text{H}_2\text{SO}_4 = \frac{\text{masa esteq de } \text{H}_2\text{SO}_4}{\text{densidad de } \text{H}_2\text{SO}_4}$$

$$\text{Vol esteq. } H_2SO_4 = \frac{4,02 \text{ g}}{1,84 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 2,19 \text{ mL}$$

Ahora se calculan los requerimientos teóricos de H_2O_2 , como se muestra a continuación.

*Masa esteq. H_2O_2 (g) = moles de Cu en la muestra * masa molecular de H_2O_2 * relación esteq. de Cu y H_2O_2*

$$\text{Masa esteq. } H_2O_2 = 0,04 \text{ mol Cu} * 34 \frac{\text{g } H_2O_2}{\text{mol } H_2O_2} * 1 \frac{\text{mol } H_2O_2}{\text{mol Cu}} = 1,35 \text{ g } H_2O_2$$

Teniendo en cuenta que el H_2O_2 es del 50 %

$$\text{masa esteq. } H_2O_2 = \frac{1,35 \text{ g}}{50 \%} = 2,71 \text{ g}$$

$$\text{Vol esteq. } H_2O_2 = \frac{\text{masa esteq. } H_2O_2}{\text{densidad de } H_2O_2}$$

$$\text{Vol esteq. } H_2O_2 = \frac{2,71 \text{ g}}{1,1966 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 2,26 \text{ mL}$$

ANEXO D.

CÁLCULOS PARA LA PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN LIXIVIANTE.

Utilizando los requerimientos teóricos de la reacción, explicados en el anexo anterior, se procede a hallar los valores para la preparación de la solución lixivante, de forma tal que se mantengan algunos parámetros iguales a los usados por el referente (YANG)⁸⁴, como lo son, la concentración (% en peso) del H₂SO₄ y el exceso de H₂O₂ en la solución ácida.

Iniciando con el ácido sulfúrico (H₂SO₄), calculando la masa de H₂SO₄ en la solución ácida con base en la concentración de este reactivo en la solución, se tiene que:

*masa de H₂SO₄ en la sln lixiviate = % de H₂SO₄ * Vol de la sln lixiviate * densidad de la sln lixiviate*

$$\text{masa de H}_2\text{SO}_4 \text{ en la sln lixiviate} = 15\% * 100 \text{ ml} * 1,05 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 15,75 \text{ g}$$

Entonces el volumen del H₂SO₄ en la solución lixivante es:

$$\text{Vol de H}_2\text{SO}_4 \text{ en la sln lixiviate} = \frac{\text{masa de H}_2\text{SO}_4 \text{ en la sln lixiviate}}{\text{densidad de H}_2\text{SO}_4}$$

$$\text{Vol de H}_2\text{SO}_4 \text{ en la sln lixiviate} = \frac{15,75 \text{ g}}{1,84 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 8,6 \text{ mL}$$

Ahora se calcula el volumen de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en la solución lixivante, a partir del exceso, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Vol de H}_2\text{O}_2 \text{ en la sln lixiviate} \\ = (\text{Vol esteq. H}_2\text{O}_2 * \text{Exceso de H}_2\text{O}_2) + \text{Vol esteq. H}_2\text{O}_2 \end{aligned}$$

$$\text{Vol de H}_2\text{O}_2 \text{ en la sln lixiviate} = (2,26 \text{ mL} * 147\%) + 2,26 \text{ mL} = 5,6 \text{ mL}$$

⁸⁴ YANG, Haiyu, LIU, Jingyang, YANG, Jiakuan. Op. cit., p. 396.

ANEXO E.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE EAA.



QUIMIA LTDA.

NIT 830.055.341-4

INFORME DE LABORATORIO		
Fecha : Bogotá, Julio 28 de 2017	RQUÍ No : 17-10042	Página 1 de 1
Remitente :		
Nombre : Sr. JUAN FELIPE VILLALOBOS MORA		
Dirección : Bogotá D. C.		
Teléfono : 310 695 44 68 - 753 03 30		E-mail: jufcvilla@hotmail.com
Muestreo por : Cliente	Procedencia : Cliente	No. Muestras : 9

No. QUI-	Su Referencia	Fecha de recepción	Descripción de la muestra	Cobre en Cu g/100mL
17-10050	Solución de Cobre REF: Sln A1	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,29
17-10051	Solución de Cobre REF: Sln A2	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,52
17-10052	Solución de Cobre REF: Sln A3	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,40
17-10053	Solución de Cobre REF: E1 B1	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,52
17-10054	Solución de Cobre REF: E1 B2	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,63
17-10055	Solución de Cobre REF: E2 B1	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	1,49
17-10056	Solución de Cobre REF: E2 B2	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	2,15
17-10057	Solución de Cobre REF: E3 B1	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,52
17-10058	Solución de Cobre REF: E3 B2	19-07-2017	Líquido envasado en frasco plástico ámbar con tapa plástica	0,89

Método de Análisis:

Cu: Absorción Atómica con Llama

Observaciones:

Los resultados aquí presentados se refieren a la muestra analizada y no a otro material de la misma procedencia. QUIMIA S.A.S., no se hace responsable de los resultados a consecuencia de la reproducción parcial del presente informe.

Nataly Angel Rincón
Qca. NATALY ANGEL RINCÓN
MPQ- 4497

Vo.Bo. *Sara Eucía Sánchez Alayón*
Qca. SARA EUCÍA SÁNCHEZ ALAYÓN
MPQ-1456
Directora Técnica

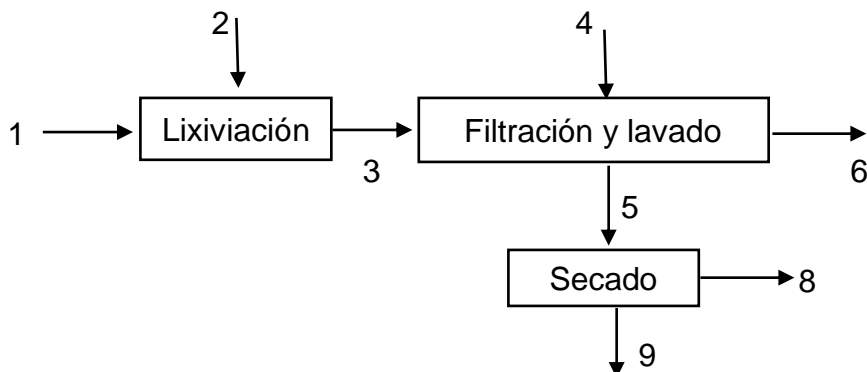
Ljt
FIN DEL INFORME

Del reporte anterior, hay que aclarar que los dos últimos resultados que allí se muestran, corresponden a pruebas adicionales que no fueron tenidas en cuenta en este trabajo de grado.

ANEXO F.

MUESTRA DE CÁLCULO DE LOS BALANCES DE MASA PARA EL MODELO A

En este anexo, se mostrará la muestra de cálculo con la réplica 1, del procedimiento con el que se realizó el balance de materia del modelo A, para recordar el proceso, el diagrama de bloques del mismo, se presenta a continuación.



Para comenzar, se realizó el balance de masa sobre las etapas de lixiviación y de filtración y lavado; por lo cual, se tiene que dentro del volumen de control planteado las corrientes que entran son la 1, 2 y 4 y las que salen son las 5 y 6. Entonces, se calculan las fracciones másicas de las corrientes de entrada así.

Para la corriente 1, solución de $H_2SO_4 + H_2O_2$ (Ver **Tablas 11 y 14**).

$$X_1^{H_2SO_4} = \frac{Vol_1^{H_2SO_4} * Densidad\ del\ H_2SO_4 * Concentracion\ del\ H_2SO_4}{m_1}$$

$$X_1^{H_2SO_4} = \frac{8,6\ mL * 1,84\ \frac{g}{mL} * 97\%}{105,48\ g} = 0,1455$$

$$X_1^{H_2O_2} = \frac{Vol_1^{H_2O_2} * Densidad\ del\ H_2O_2 * Concentracion\ del\ H_2O_2}{m_1}$$

$$X_1^{H_2O_2} = \frac{5,6\ mL * 1,1966\ \frac{g}{mL} * 50\%}{105,48\ g} = 0,0318$$

$$X_1^{H_2O} = 1 - X_1^{H_2SO_4} - X_1^{H_2O_2}$$

$$X_1^{H_2O} = 1 - 0,1455 - 0,0318 = 0,8227$$

Para la corriente 2, muestra sólida.

$$X_2^{Cu} = 0,0997$$

El dato anterior corresponde al porcentaje de cobre en las TCI dado por la prueba de XRF (**Tabla 6**).

También se calculó la fracción másica de los demás componentes en la muestra sólida de la siguiente manera:

$$X_2^{Otros} = 1 - X_2^{Cu} = 1 - 0,0997 = 0,9003$$

Para la corriente 4, Agua.

$$X_4^{H_2O} = 1$$

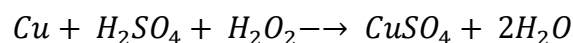
Una vez descritas las corrientes de entrada, se procede a describir las corrientes de salida del volumen de control propuesto. Iniciando con la corriente 5

$$X_5^{H_2O} = \frac{m_8 * X_8^{H_2O}}{m_5} = \frac{17,44 \text{ g} * 1}{41,20 \text{ g}} = 0,4233$$

Ahora, de la corriente 6 se conoce la fracción másica del sulfato de cobre (calculada en la sección 4.4.1)

$$X_6^{CuSO_4} = 0,0074$$

Una vez conocida la información de las corrientes que salen y entran del volumen de control propuesto, se escriben las ecuaciones de balance de materia por componentes, recordando que dentro del volumen de control propuesto, se encuentra la lixiviación por lo que se debe tener en cuenta la reacción química que ocurre allí, esta reacción es la siguiente:



El balance se realizó por el método del grado de avance de la reacción, por lo cual las ecuaciones de balance por componente deben ser:

$$m_{in}^i + v_i * \xi * Mm i = m_{out}^i$$

Donde:

m_{in}^i = Masa que entra del componente i

v_i = Coeficiente estequiométrico del componente i (es negativo si i es reactivo, es positivo si i es producto)

ξ = Grado de avance de la reacción

$Mm i$ = Masa molecular del componente i

m_{out}^i = Masa que sale del componente i

Entonces las ecuaciones de balance de cada componente son:

$$1. \text{ BM Cu} \quad m_2 * X_2^{Cu} - 1 * \xi_1 * Mm Cu = m_5 * X_5^{Cu}$$

$$2. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_1 * X_1^{H_2SO_4} - 1 * \xi_1 * Mm H_2SO_4 = m_5 * X_5^{H_2SO_4} + m_6 * X_6^{H_2SO_4}$$

$$3. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_1 * X_1^{H_2O_2} - 1 * \xi_1 * Mm H_2O_2 = m_5 * X_5^{H_2O_2} + m_6 * X_6^{H_2O_2}$$

$$4. \text{ BM CuSO}_4 \quad 1 * \xi_1 * Mm CuSO_4 = m_5 * X_5^{CuSO_4} + m_6 * X_6^{CuSO_4}$$

$$5. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_1 * X_1^{H_2O} + m_4 * X_4^{H_2O} + 2 * \xi_1 * Mm H_2O = m_5 * X_5^{H_2O} + m_6 * X_6^{H_2O}$$

De las ecuaciones anteriores se tiene un total de 8 incógnitas (ξ_1 , X_5^{Cu} , $X_5^{H_2SO_4}$, $X_6^{H_2SO_4}$, $X_5^{H_2O_2}$, $X_6^{H_2O_2}$, $X_5^{CuSO_4}$, $X_6^{H_2O}$).

Como la fase líquida (corriente 6) efluente de la etapa de filtración y lavado se encuentra en equilibrio con la solución remanente en la fase sólida (corriente 5), es posible escribir las siguientes relaciones específicas.

a.

$$\frac{X_5^{H_2SO_4}}{X_5^{H_2O}} = \frac{X_6^{H_2SO_4}}{X_6^{H_2O}}$$

b.

$$\frac{X_5^{H_2O_2}}{X_5^{H_2O}} = \frac{X_6^{H_2O_2}}{X_6^{H_2O}}$$

c.

$$\frac{X_5^{CuSO_4}}{X_5^{H_2O}} = \frac{X_6^{CuSO_4}}{X_6^{H_2O}}$$

Ahora, se realiza el análisis de grados de libertad para este sistema, así:

(+) Incógnitas = 8

(-) Ecuaciones de balance de masa = 5

(-) Otras ecuaciones = 3

Grados de libertad = 0

Por lo tanto, este sistema de 8 ecuaciones con 8 incógnitas tiene solución, este sistema se reemplazando las variables conocidas y haciendo uso de la herramienta de Solver en Excel, obteniendo los siguientes resultados:

$$\xi_1 = 0,0073 \text{ mol}$$

$$X_5^{Cu} = 0,0501$$

$$X_5^{H_2SO_4} = 0,046$$

$$X_6^{H_2SO_4} = 0,0928$$

$$X_5^{H_2O_2} = 0,0098$$

$$X_6^{H_2O_2} = 0,0197$$

$$X_5^{CuSO_4} = 0,0037$$

$$X_6^{H_2O} = 0,8537$$

La composición de otros en la corriente 5 corresponde a:

$$X_5^{otros} = 1 - X_5^{Cu} - X_5^{H_2SO_4} - X_5^{H_2O_2} - X_5^{H_2O} - X_5^{CuSO_4} = 0,4671$$

Calculando la composición de los otros componentes en la corriente 6:

$$X_6^{otros} = 1 - X_6^{H_2SO_4} - X_6^{H_2O_2} - X_6^{H_2O} - X_6^{CuSO_4} = 0,0264$$

Una vez conocidas las composiciones de la corriente 4 y el grado de avance de la reacción que ocurre en la lixiviación, es posible calcular las fracciones másicas de la corriente 3 realizando un balance sobre la etapa de lixiviación, las ecuaciones de balance quedan así:

$$6. \text{ BM Cu} \quad m_2 * X_2^{Cu} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ Cu} = m_3 * X_3^{Cu}$$

$$7. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_1 * X_1^{H_2SO_4} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{SO}_4 = m_3 * X_3^{H_2SO_4}$$

$$8. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_1 * X_1^{H_2O_2} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{O}_2 = m_3 * X_3^{H_2O_2}$$

$$9. \text{ BM CuSO}_4 \quad 1 * \xi_1 * Mm \text{ CuSO}_4 = m_3 * X_3^{CuSO_4}$$

$$10. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_1 * X_1^{H_2O} + 2 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{O} = m_3 * X_3^{H_2O}$$

Las incógnitas de las ecuaciones anteriores, se pueden solucionar de forma directa, así:

$$X_3^{Cu} = \frac{(25,4 \text{ g} * 0,0997) - (0,0073 \text{ mol} * 63,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0158$$

$$X_3^{H_2SO_4} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,1455) - (0,0073 \text{ mol} * 98 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88} = 0,1117$$

$$X_3^{H_2O_2} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,0318) - (0,0073 \text{ mol} * 34 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0237$$

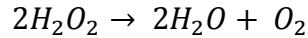
$$X_3^{CuSO_4} = \frac{(0,0073 \text{ mol} * 159,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0089$$

$$X_3^{H_2O} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,8227) + 2(0,0073 \text{ mol} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,6651$$

La composición de los otros componentes en la corriente 3 se calculó como sigue:

$$X_3^{Otros} = \frac{m_2 * X_2^{Otros}}{m_3} = \frac{25,4 \text{ g} * 0,9003}{130,88 \text{ g}} = 0,1747$$

Para completar el balance de masa del modelo A, se hizo el balance de la operación de secado, en la cual, se consideró la reacción de descomposición del peróxido de hidrógeno que entra a el secado (corriente 5). Esta reacción se muestra a continuación.



Por lo tanto, las ecuaciones de balance de masa para el secado quedan de la siguiente manera.

$$11. \text{ BM Cu} \quad m_5 * X_5^{Cu} = m_7 * X_7^{Cu}$$

$$12. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_5 * X_5^{H_2SO_4} = m_7 * X_7^{H_2SO_4}$$

$$13. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_5 * X_5^{H_2O_2} - 2 * \xi_2 * Mm \text{ H}_2\text{O}_2 = 0$$

$$14. \text{ BM CuSO}_4 \quad m_5 * X_5^{CuSO_4} = m_7 * X_7^{CuSO_4}$$

$$15. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_5 * X_5^{H_2O} + 2 * \xi_2 * Mm \text{ H}_2\text{O} = m_8 * X_8^{H_2O}$$

$$16. \text{ BM O}_2 \quad \xi_2 * Mm \text{ O}_2 = m_8 * X_8^{O_2}$$

Las ecuaciones del balance de la operación del secado, se pueden solucionar de forma directa, por lo cual, despejando las incógnitas y reemplazando los valores conocidos:

$$X_7^{Cu} = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,0501)}{23,76 \text{ g}} = 0,087$$

$$X_7^{H_2SO_4} = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,046)}{23,76 \text{ g}} = 0,0798$$

$$\xi_2 = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,0098)}{2 * (34 \frac{\text{g}}{\text{mol}})} = 0,0059 \text{ mol}$$

$$X_7^{CuSO_4} = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,0037)}{23,76 \text{ g}} = 0,0064$$

$$X_8^{H_2O} = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,4233) + 2(0,0059 \text{ mol} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{17,44 \text{ g}} = 1,0122$$

$$X_8^{O_2} = \frac{(0,0050 \text{ mol} * 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{17,44} = 0,0108$$

La fracción másica de agua en la corriente 8 calculada anteriormente, corresponde al agua que se evaporó del sólido húmedo más el agua generada por la reacción, esta agua generada por la reacción corresponde a:

$$X_8^{H_2O,gen} = 1 - X_8^{H_2O} = 1 - 1,0122 = 0,0122$$

Recalculando la fracción másica de agua en la corriente 8.

$$X_8^{H_2O'} = 1 - X_8^{H_2O,gen} - X_8^{O_2} = 1 - 0,0123 - 0,0109 = 0,9769$$

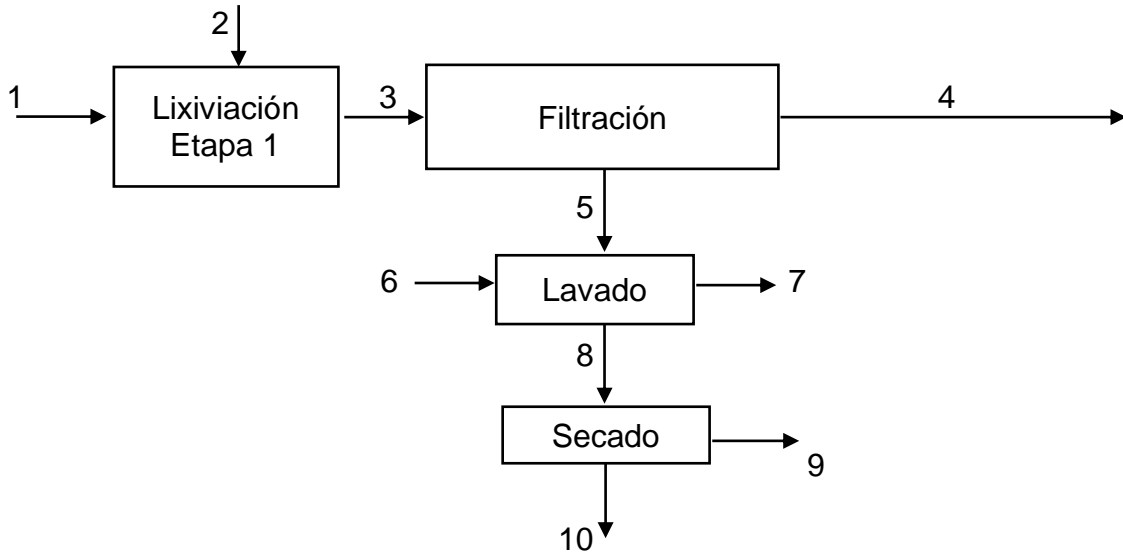
Por último se calculó la fracción másica de los otros componentes en la corriente 7.

$$X_7^{Otros} = \frac{m_5 * X_5^{Otros}}{m_7} = \frac{(41,20 \text{ g} * 0,4671)}{23,76 \text{ g}} = 0,8099$$

ANEXO G.

MUESTRA DE CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA DEL MODELO B

A continuación se presentará una muestra de los cálculos que se hicieron para completar el balance de masa del modelo B, utilizando la réplica 1, dicho balance de masa se desarrolló por etapas, por lo cual, se empezará con la etapa 1 del modelo B. la cual se expone en seguida.



Para la solución de este balance de materia, se tomaron las operaciones de lixiviación y filtración dentro del volumen de control, es decir, las corrientes de entrada a este volumen de control son la 1 y la 2; las corrientes de salida son la 4 y 5.

Las fracciones másicas de las corrientes de entradas son las mismas que se calcularon en el anexo inmediatamente anterior.

De las corrientes de salida, solo se conoce la composición del sulfato de cobre en la corriente 4, la cual fue calculada en la sección 4.4.2

$$X_4^{CuSO_4} = 0,0114$$

El otro dato que se conoce es la composición de los otros componentes en la corriente 5.

$$X_5^{Otros} = \frac{(m_2 * X_2^{Otros})}{m_5} = \frac{25,4 \text{ g} * 0,9003}{27,43 \text{ g}} = 0,8337$$

.A continuación se encuentran las ecuaciones de balance para el volumen de control manejado, aclarando que la fracción de agua en la corriente 4 se tomó como 1 menos las fracciones de las demás especies.

1. BM Cu $m_2 * X_2^{Cu} - 1 * \xi_1 * Mm Cu = m_5 * X_5^{Cu}$
2. BM H₂SO₄ $m_1 * X_1^{H_2SO_4} - 1 * \xi_1 * Mm H_2SO_4 = m_4 * X_4^{H_2SO_4} + m_5 * X_5^{H_2SO_4}$
3. BM H₂O₂ $m_1 * X_1^{H_2O_2} - 1 * \xi_1 * Mm H_2O_2 = m_4 * X_4^{H_2O_2} + m_5 * X_5^{H_2O_2}$
4. BM CuSO₄ $1 * \xi_1 * Mm CuSO_4 = m_4 * X_4^{CuSO_4} + m_5 * X_5^{CuSO_4}$
5. BM H₂O $m_1 * X_1^{H_2O} + 2 * \xi_1 * Mm H_2O = m_4 * (1 - X_4^{H_2SO_4} - X_4^{H_2O_2} - X_4^{CuSO_4}) + m_5 * X_5^{H_2O}$

Para este caso también se pueden escribir las relaciones en base de agua de las especies que se encuentran tanto en la corriente 4 como en la corriente 5.

a.

$$\frac{X_4^{H_2SO_4}}{(1 - X_4^{H_2SO_4} - X_4^{H_2O_2} - X_4^{CuSO_4})} = \frac{X_5^{H_2SO_4}}{X_5^{H_2O}}$$

b.

$$\frac{X_4^{H_2O_2}}{(1 - X_4^{H_2SO_4} - X_4^{H_2O_2} - X_4^{CuSO_4})} = \frac{X_5^{H_2O_2}}{X_5^{H_2O}}$$

c.

$$\frac{X_4^{CuSO_4}}{(1 - X_4^{H_2SO_4} - X_4^{H_2O_2} - X_4^{CuSO_4})} = \frac{X_5^{CuSO_4}}{X_5^{H_2O}}$$

De las ecuaciones anteriores, se tienen 8 incógnitas ($\xi_1, X_5^{Cu}, X_4^{H_2SO_4}, X_5^{H_2SO_4}, X_4^{H_2O_2}, X_5^{H_2O_2}, X_5^{CuSO_4}, X_5^{H_2O}$).

El análisis de grados de libertad para este sistema queda.

- | | |
|-----------------------------------|-----|
| (+) Incógnitas | = 8 |
| (-) Ecuaciones de balance de masa | = 5 |
| (-) Otras ecuaciones | = 3 |
| Grados de libertad | = 0 |

Este sistema se solucionó mediante la herramienta de solver en Excel, encontrando los siguientes valores de las incógnitas descritas anteriormente.

$$\xi_1 = 0,0075 \text{ mol}$$

$$X_5^{Cu} = 0,0748$$

$$X_4^{H_2SO_4} = 0,1379$$

$$X_5^{H_2SO_4} = 0,0126$$

$$X_4^{H_2O_2} = 0,0292$$

$$X_5^{H_2O_2} = 0,0027$$

$$X_5^{CuSO_4} = 0,001$$

$$X_5^{H_2O} = 0,0752$$

Calculando la fracción másica de agua en la corriente 4.

$$X_4^{H_2O} = 1 - X_4^{H_2SO_4} - X_4^{H_2O_2} - X_4^{CuSO_4} = 0,8216$$

Luego de conocer todas las composiciones de las corrientes 4 y 5, y el grado de avance de la reacción de lixiviación, se realizó el balance de masa sobre la etapa de lixiviación. Las ecuaciones de balance de dicha etapa son:

$$6. \text{ BM Cu} \quad m_2 * X_2^{Cu} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ Cu} = m_3 * X_3^{Cu}$$

$$7. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_1 * X_1^{H_2SO_4} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{SO}_4 = m_3 * X_3^{H_2SO_4}$$

$$8. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_1 * X_1^{H_2O_2} - 1 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{O}_2 = m_3 * X_3^{H_2O_2}$$

$$9. \text{ BM CuSO}_4 \quad 1 * \xi_1 * Mm \text{ CuSO}_4 = m_3 * X_3^{CuSO_4}$$

$$10. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_1 * X_1^{H_2O} + 2 * \xi_1 * Mm \text{ H}_2\text{O} = m_3 * X_3^{H_2O}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden solucionar directamente, teniendo los siguientes resultados:

$$X_3^{Cu} = \frac{(25,4 \text{ g} * 0,0997) - (0,0075 \text{ mol} * 63,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0157$$

$$X_3^{H_2SO_4} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,1455) - (0,0075 \text{ mol} * 98 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88} = 0,1116$$

$$X_3^{H_2O_2} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,0318) - (0,0075 \text{ mol} * 34 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0236$$

$$X_3^{CuSO_4} = \frac{(0,0075 \text{ mol} * 159,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,0092$$

$$X_3^{H_2O} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,8227) + 2(0,0075 \text{ mol} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{130,88 \text{ g}} = 0,6651$$

La fracción de los otros componentes en la corriente 3 corresponde a:

$$X_3^{Otros} = \frac{m_2 * X_2^{Otros}}{m_3} = \frac{25,4 \text{ g} * 0,9003}{130,88 \text{ g}} = 0,1747$$

Se continua el cálculo, realizando el balance en el lavado, en el cual, las corrientes de entrada son las corrientes 5 y 6, de las cuales se conocen toda la información, y las corrientes de salida son la 7 y la 8; de la corriente 7 se conoce la composición de sulfato de cobre (calculada en la sección 4.4.2).

Para la resolución del este balance, fue necesario asumir que por la corriente 7 (agua de lavado), se logran retirar todas las especies solubles (H_2SO_4 , H_2O_2 , $CuSO_4$). Por lo tanto, las ecuaciones de balance para esta unidad quedarían.

$$11. \text{ BM Cu} \quad m_5 * X_5^{Cu} = m_8 * X_8^{Cu}$$

$$12. \text{ BM } H_2SO_4 \quad m_5 * X_5^{H_2SO_4} = m_7 * X_7^{H_2SO_4}$$

$$13. \text{ BM } H_2O_2 \quad m_5 * X_5^{H_2O_2} = m_7 * X_7^{H_2O_2}$$

$$14. \text{ BM } H_2O \quad m_5 * X_5^{H_2O} + m_6 * X_6^{H_2O} = m_7 * X_7^{H_2O} + m_8 * X_8^{H_2O}$$

Solucionando las ecuaciones anteriores:

$$X_8^{Cu} = \frac{27,43 \text{ g} * 0,0748}{35,54 \text{ g}} = 0,0578$$

$$X_7^{H_2SO_4} = \frac{27,43 \text{ g} * 0,0126}{21,59 \text{ g}} = 0,016$$

$$X_7^{H_2O_2} = \frac{27,43 \text{ g} * 0,0027}{21,59 \text{ g}} = 0,0034$$

Por la corriente 9 (humedad evaporada), se considera que se evapora toda el agua que se encuentra en la corriente 8, por lo tanto, la fracción de agua de la corriente 9 es igual a 1, por lo tanto, la fracción de agua en la en la corriente 8 es

$$X_8^{H_2O} = \frac{m_9 * X_9^{H_2O}}{m_8} = \frac{12,37 \text{ g} * 1}{35,54 \text{ g}} = 0,3481$$

Entonces de la ecuación 14:

$$X_7^{H_2O} = \frac{27,43 \text{ g} * 0,0752 + 29,7 \text{ g} * 1 - 35,54 \text{ g} * 0,3481}{21,59 \text{ g}} = 0,8982$$

La composición de los otros componentes en la corriente 8 se calculó así:

$$X_8^{Otros} = \frac{m_5 * X_5^{Otros}}{m_8} = \frac{27,43 \text{ g} * 0,8337}{35,54 \text{ g}} = 0,6434$$

Por último, se realizó el balance de Cu en la etapa de secado, la ecuación de balance correspondiente es la siguiente:

$$15. \text{ BM Cu} \quad m_8 * X_8^{Cu} = m_{10} * X_{10}^{Cu}$$

Despejando la incógnita.

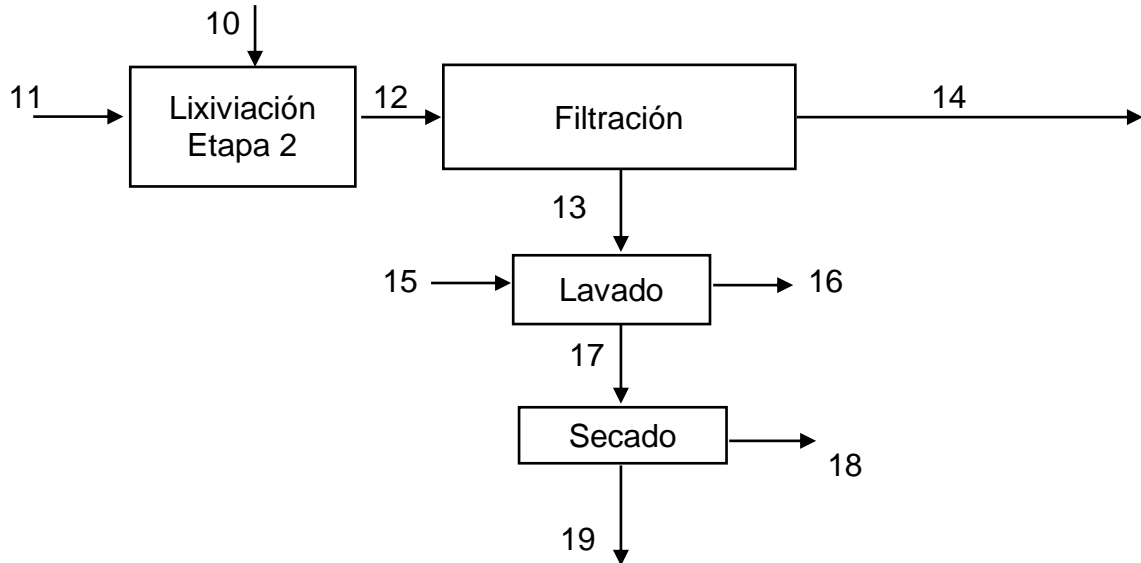
$$X_{10}^{Cu} = \frac{35,54 \text{ g} * 0,0578}{23,17 \text{ g}} = 0,0886$$

La fracción másica de los otros componentes en la corriente 10, corresponde a:

$$X_{10}^{Otros} = \frac{m_8 * X_8^{Otros}}{m_{10}} = \frac{35,54 \text{ g} * 0,6434}{23,17 \text{ g}} = 0,9869$$

Para la etapa 2

Recordando el diagrama de bloques de la etapa 2.



Para la solución del balance de materia de esta etapa, se tomó el mismo volumen inicial que se utilizó para la etapa 1, y teniendo en cuenta las mismas consideraciones; teniendo así, las corrientes 10 y 11 como entradas y las corrientes 14 y 13 como salidas.

Las composiciones de las corrientes de entrada son conocidas, sin embargo, se recalcularán los otros componentes en la corriente 10 de la siguiente manera.

$$X_{10}^{Otros} = 1 - X_{10}^{Cu} = 1 - 0,0886 = 0,9114$$

De las corrientes de salida, la composición de sulfato de cobre en la corriente 14 es conocida (sección 4.4.2).

$$X_4^{CuSO_4} = 0,0351$$

También se puede conocer la fracción másica de los otros componentes en la corriente 13, así.

$$X_{13}^{Otros} = \frac{(m_{10} * X_{10}^{Otros})}{m_{13}} = \frac{23,17 \text{ g} * 0,9114}{30,52 \text{ g}} = 0,6919$$

Las ecuaciones de balance de masa de las corrientes que intervienen dentro del volumen de control son:

1. BM Cu $m_{10} * X_{10}^{Cu} - 1 * \xi_2 * Mm Cu = m_{13} * X_{13}^{Cu}$
2. BM H₂SO₄ $m_{11} * X_{11}^{H_2SO_4} - 1 * \xi_2 * Mm H_2SO_4 = m_{13} * X_{13}^{H_2SO_4} + m_{14} * X_{14}^{H_2SO_4}$
3. BM H₂O₂ $m_{11} * X_{11}^{H_2O_2} - 1 * \xi_2 * Mm H_2O_2 = m_{13} * X_{13}^{H_2O_2} + m_{14} * X_{14}^{H_2O_2}$
4. BM CuSO₄ $1 * \xi_2 * Mm CuSO_4 = m_{13} * X_{13}^{CuSO_4} + m_{14} * X_{14}^{CuSO_4}$
5. BM H₂O $m_{11} * X_{11}^{H_2O} + 2 * \xi_2 * Mm H_2O = m_{13} * X_{13}^{H_2O} + m_{14} * (1 - X_{14}^{H_2SO_4} - X_{14}^{H_2O_2} - X_{14}^{CuSO_4})$

Las relaciones especificadas son

a.

$$\frac{X_{13}^{H_2SO_4}}{X_{13}^{H_2O}} = \frac{X_{14}^{H_2SO_4}}{(1 - X_{14}^{H_2SO_4} - X_{14}^{H_2O_2} - X_{14}^{CuSO_4})}$$

b.

$$\frac{X_{13}^{H_2O_2}}{X_{13}^{H_2O}} = \frac{X_{14}^{H_2O_2}}{(1 - X_{14}^{H_2SO_4} - X_{14}^{H_2O_2} - X_{14}^{CuSO_4})}$$

c.

$$\frac{X_{13}^{CuSO_4}}{X_{13}^{H_2O}} = \frac{X_{14}^{CuSO_4}}{(1 - X_{14}^{H_2SO_4} - X_{14}^{H_2O_2} - X_{14}^{CuSO_4})}$$

Se tiene un total de 8 incógnitas ($\xi_2, X_{13}^{Cu}, X_{13}^{H_2SO_4}, X_{14}^{H_2SO_4}, X_{13}^{H_2O_2}, X_{14}^{H_2O_2}, X_{13}^{CuSO_4}, X_{13}^{H_2O}$).

El análisis de grados de libertad para este caso es.

(+) Incógnitas = 8

(-) Ecuaciones de balance de masa = 5

(-) Otras ecuaciones = 3

Grados de libertad = 0

Resolviendo el sistema de 8 ecuaciones con 8 incógnitas con la herramienta de solver en Excel, se hallaron los siguientes resultados.

$\xi_2 = 0,0235 \text{ mol}$

$$X_{13}^{Cu} = 0,0183$$

$$X_{13}^{H_2SO_4} = 0,0353$$

$$X_{14}^{H_2SO_4} = 0,1219$$

$$X_{13}^{H_2O_2} = 0,0069$$

$$X_{14}^{H_2O_2} = 0,0239$$

$$X_{13}^{CuSO_4} = 0,0102$$

$$X_{13}^{H_2O} = 0,2374$$

Calculando la fracción másica de agua en la corriente 14.

$$X_{14}^{H_2O} = 1 - X_{14}^{H_2SO_4} - X_{14}^{H_2O_2} - X_{14}^{CuSO_4} = 0,8191$$

Ahora, se plantean las ecuaciones de balance para la lixiviación.

$$6. \text{ BM Cu} \quad m_{10} * X_{10}^{Cu} - 1 * \xi_2 * Mm \text{ Cu} = m_{12} * X_{12}^{Cu}$$

$$7. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_{11} * X_{11}^{H_2SO_4} - 1 * \xi_2 * Mm \text{ H}_2\text{SO}_4 = m_{12} * X_{12}^{H_2SO_4}$$

$$8. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_{11} * X_{11}^{H_2O_2} - 1 * \xi_2 * Mm \text{ H}_2\text{O}_2 = m_{12} * X_{12}^{H_2O_2}$$

$$9. \text{ BM CuSO}_4 \quad 1 * \xi_2 * Mm \text{ CuSO}_4 = m_{12} * X_{12}^{CuSO_4}$$

$$10. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_{11} * X_{11}^{H_2O} + 2 * \xi_2 * Mm \text{ H}_2\text{O} = m_{12} * X_{12}^{H_2O}$$

Estas ecuaciones se pueden solucionar de forma directa, así:

$$X_{12}^{Cu} = \frac{(23,17 \text{ g} * 0,0886) - (0,0235 \text{ mol} * 63,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{128,65 \text{ g}} = 0,0043$$

$$X_{12}^{H_2SO_4} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,1455) - (0,0235 \text{ mol} * 98 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{128,65} = 0,1014$$

$$X_{12}^{H_2O_2} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,1455) - (0,0235 \text{ mol} * 34 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{128,65} = 0,0198$$

$$X_{12}^{CuSO_4} = \frac{(0,0235 \text{ mol} * 159,55 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{128,65} = 0,0292$$

$$X_{12}^{H_2O} = \frac{(105,48 \text{ g} * 0,8227) + 2(0,0235 \text{ mol} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}})}{128,65 \text{ g}} = 0,6811$$

La fracción de los otros componentes en la corriente 12 se calculó de la siguiente manera:

$$X_{12}^{Otros} = \frac{m_{10} * X_{10}^{Otros}}{m_{12}} = \frac{23,17 \text{ g} * 0,9114}{128,65 \text{ g}} = 0,1641$$

Ahora, se plantean las ecuaciones de balance en el lavado, de igual forma a como se escribieron el balance de la etapa 1, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$11. \text{ BM Cu} \quad m_{13} * X_{13}^{Cu} = m_{17} * X_{17}^{Cu}$$

$$12. \text{ BM H}_2\text{SO}_4 \quad m_{13} * X_{13}^{H_2SO_4} = m_{16} * X_{16}^{H_2SO_4}$$

$$13. \text{ BM H}_2\text{O}_2 \quad m_{13} * X_{13}^{H_2O_2} = m_{16} * X_{16}^{H_2O_2}$$

$$14. \text{ BM H}_2\text{O} \quad m_{13} * X_{13}^{H_2O} + m_{15} * X_{15}^{H_2O} = m_{16} * X_{16}^{H_2O} + m_{17} * X_{17}^{H_2O}$$

Solucionando las ecuaciones:

$$X_{17}^{Cu} = \frac{30,52 \text{ g} * 0,0183}{31,44 \text{ g}} = 0,0178$$

$$X_{16}^{H_2SO_4} = \frac{30,52 \text{ g} * 0,0353}{28,78 \text{ g}} = 0,0375$$

$$X_{16}^{H_2O_2} = \frac{30,52 \text{ g} * 0,0069}{28,78 \text{ g}} = 0,0073$$

Calculando la fracción de agua en la corriente 17

$$X_{17}^{H_2O} = \frac{m_{18} * X_{18}^{H_2O}}{m_{17}} = \frac{9,82g * 1}{31,44 g} = 0,3123$$

De la ecuación 14:

$$X_{16}^{H_2O} = \frac{30,52 g * 0,2374 + 29,7g * 1 - 31,44 g * 0,3123}{28,78 g} = 0,9426$$

La fracción másica de los otros componentes en la corriente 17 es:


$$X_{17}^{Otros} = \frac{m_{13} * X_{13}^{Otros}}{m_{17}} = \frac{30,52 g * 0,6919}{31,44 g} = 0,6717$$

Por último, del balance de masa en la etapa final (secado), se calcula la composición de cobre en la corriente 19

$$X_{19}^{Cu} = \frac{m_{17} * X_{17}^{Cu}}{m_{19}} = \frac{31,44 g * 0,0178}{21,62 g} = 0,0258$$

La fracción en masa de los otros componentes en esta corriente, corresponde a:

$$X_{19}^{Otros} = \frac{m_{17} * X_{17}^{Otros}}{m_{19}} = \frac{31,44 g * 0,6717}{21,62 g} = 0,9767$$

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Yo **Juan Felipe Villalobos Mora** en calidad de titular de la obra **Evaluación de un proceso de recuperación de uno de los metales presentes en las tarjetas de circuitos impresos**, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 3 días del mes de Noviembre del año 2017.

EL AUTOR:

Nombres	Apellidos
Juan Felipe	Villalobos Mora
Documento de identificación No	Firma
1.030'652.984	