



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL
FOTOCONTROL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO
PÚBLICO A ESCALA LABORATORIO**

Inga. Adela María Marroquín González

Asesorado por la Ph.D Casta Petrona Zeceña Zeceña

Guatemala, noviembre 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL
FOTOCONTROL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO
PÚBLICO A ESCALA LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

ASESORADO POR LA Ph.D INGA. CASTA PETRONA ZECEÑA ZECEÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Inga. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Msc. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Msc. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIO	Msc. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL FOTOCONTROL
DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO PÚBLICO A ESCALA
LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Posgrado, con fecha 28 de noviembre de 2018.


Inga. Adela María Marroquín González

DTG. 612.2019.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL FOTOCONTROL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO PÚBLICO A ESCALA LABORATORIO**, presentado por la **Ingeniera Adela María Marroquín González**, **estudiante de la Maestría en Energía y Ambiente** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

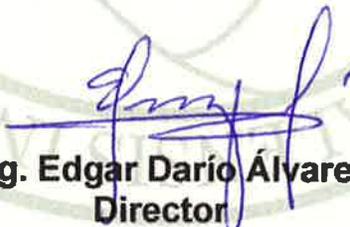
Guatemala, noviembre de 2019.
AAACE/asga

EEPTI-1203-2019

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL FOTOCONTROL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO PÚBLICO A ESCALA DE LABORATORIO”** presentado por la Ingeniera Química **Adela María Marroquín González** quien se identifica con Carné **100017629**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL FOTOCONTROL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO PÚBLICO A ESCALA DE LABORATORIO”** presentado por la Ingeniera Química **Adela María Marroquín González** quien se identifica con Carné **100017629**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, noviembre de 2019

Guatemala, noviembre de 2019

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
USAC – Facultad de Ingeniería
Presente.-

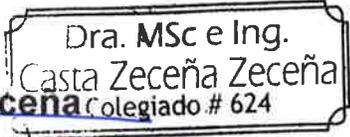
Estimado Mtro. Álvarez:

En mi calidad como Asesora de la Ingeniera Química **Adela María Marroquín González** quien se identifica con Carné **100017629** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“RECUPERACIÓN DE SALES DE COBRE DEL CIRCUITO IMPRESO DEL FOTOCENTRAL DE ENCENDIDO DE LAS LÁMPARAS DE ALUMBRADO PÚBLICO A ESCALA DE LABORATORIO”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña
Asesora


Dra. MSc e Ing.
Casta Zeceña Zeceña
Colegiado # 624

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el centro y guía de mi vida.
Virgen María	Por cubrirme con su manto.
Mis padres	José Ángel Marroquín y Elisa del Rosario González por todo su amor, apoyo incondicional para seguir adelante.
Mi esposo	Max Alfredo García por estar allí siempre con todo su amor, dedicación y por ser un excepcional compañero de vida.
Mi hija	Adela Mercedes García por ser el regalo de amor más grande que Dios me ha dado. Por ser la estrella que alumbra mis días y mi razón de perseverar y salir adelante siempre.
Mis hermanos	Alejandro, Haydee, Mariana, Luis José y José Ángel Marroquín, por ser mis compañeros con la misma esencia.
Mis sobrinos	Santiago Alejandro (q. e. p. d.), José Alejandro y María José Marroquín.

Mis suegros	Edgar García y Dora Mercedes Monterroso de García por todo su apoyo y cariño siempre.
Mis cuñados	César y Raúl por su apoyo y cariño.
Mis abuelos	Haydeé de Jesús Figueroa Contreras, José Ramiro González Fernández y Adelaida Marroquín Crispín, por ser mis ángeles guardianes y vaticinar mis éxitos (q. e. p. d.).
Mis cuñados	María René Coronado y Diego Valle Calderón por su cariño y momentos compartidos
Mis tíos	Maternos y paternos por todo su cariño.
Mis primos y primas	Por todo su cariño.
Familia Molina Pérez	Por su amistad y cariño y, en especial, a mi ahijada Antonella mi hija espiritual.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y lugar de trabajo.
Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería	Por ser la Facultad que me ha dado la oportunidad de superación.
Departamento de Química y Escuela de Ingeniería Química	Por ser el lugar donde desempeño mis labores.
Mis compañeros de la Facultad	A los amigos de siempre, a los jóvenes auxiliares. Por apoyarme y ser excelentes personas.
Mi asesora y familia Suntecún Zeceña	Ph.D. Casta Zeceña por su apoyo, cariño y confianza en todo momento. Por motivarme a seguir adelante. Por el cariño brindado.
Msc. Licda. Ingrid Benitez	Por todo su apoyo en el desarrollo experimental del presente trabajo.
Msc. Ing. Pablo De León	Por la amistad, cariño y consejos que me ha brindado siempre.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
FIGURAS.....	V
TABLAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
FORMULACIÓN DE PREGUNTAS.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
ANTECEDENTES.....	XXXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Alumbrado público.....	1
1.1.1. Lámparas de alumbrado público.....	2
1.1.2. Luminaria alumbrado público.....	3
1.1.3. Partes de una luminaria.....	3
1.1.4. Mantenimiento de alumbrado público en Guatemala.....	6
1.1.5. Fallas funcionales de sistemas y subsistemas del alumbrado público.....	6
1.1.6. Sistemas de encendido y apagado de las lámparas de alumbrado público.....	7

1.2.	Fotocontrol	8
1.2.1.	Tipos de fotocontroles según su fabricación	10
1.3.	Circuito impreso	15
1.3.1.	Materiales utilizados en un circuito impreso.....	15
1.3.2.	Tipos de circuitos impresos.....	16
1.4.	Reciclaje.....	17
1.4.1.	Renovables.....	18
1.4.2.	Metales ferrosos.....	18
1.4.3.	Materiales no ferrosos.....	18
1.5.	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	19
1.5.1.	Potencial de valorización	20
1.6.	Marco legal.....	26
1.7.	Reciclaje de metales	39
1.8.	Análisis elemental cualitativo de elementos por fluorescencia de rayos X	40
1.9.	Procesos hidrometalúrgicos y purificación	41
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	47
2.1.	Tipo de estudio.....	47
2.2	Fases	48
2.2.1	Fase preliminar de gabinete	48
2.2.2	Fase de Campo.....	48
2.2.3	Fase de laboratorio.....	49
2.2.3.1	Ciclo de reacciones realizadas para la obtención de cobre y sales de cobre	56
2.2.4	Fase final de gabinete	62
2.2.5	Resultados esperados.....	62

3.	RESULTADOS.....	63
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
4.1	Detección inicial de cobre por fluorescencia de rayos X.....	85
4.2	Lixiviación del circuito impreso con ácido nítrico.....	89
4.3	Redox con aluminio para obtención de cobre metálico.....	90
4.4	Lixiviación con agua regia del circuito impreso.....	91
4.5	Ciclo de reacciones para obtención de siete productos de cobre.....	92
4.6	Toxicidad y reutilización de las sales de cobre recuperadas.....	94
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	APÉNDICE.....	107

3.	RESULTADOS.....	63
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
4.1	Detección inicial de cobre por fluorescencia de rayos X.....	85
4.2	Lixiviación del circuito impreso con ácido nítrico.....	89
4.3	Redox con aluminio para obtención de cobre metálico.....	90
4.4	Lixiviación con agua regia del circuito impreso.....	91
4.5	Ciclo de reacciones para obtención de siete productos de cobre.....	92
4.6	Toxicidad y reutilización de las sales de cobre recuperadas.....	94
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES.....	99
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
	APÉNDICE.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Lámparas de vapor de sodio de 100 Watts y lámparas de vapor de mercurio de 175 Watts.....	2
2.	Luminaria y sus partes.....	4
3.	Lámpara de alumbrado público y los fotocontroles intercambiados. Vista anverso y reverso el fotocontrol de dos marcas comerciales.....	9
4.	Componentes Internos de focontrol de Lámpara de alumbrado público.....	11
5.	Placa de Circuito impreso con pista de cobre solo en un lateral.....	15
6.	Reciclaje de fotocontrol de las lámparas de alumbrado público.....	17
7.	Marco de legislación aplicable.....	26
8.	Propuesta del manejo de los desechos y residuos sólidos comunes por las municipalidades.....	26
9.	Marco legal nacional.....	29
10.	Esquema de proceso utilizado para el reciclaje del acero de hojalata.....	39

11.	Ciclo de reacciones realizadas para la obtención de cobre metálico y sus sales.....	54
12.	Ciclo de lixiviación con ácido nítrico de las tarjetas de circuito impreso recomendado para obtención de cobre metálico y sales de cobre.....	55
13.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la placa de circuito impreso.....	58
14.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la primera muestra.....	63
15.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la primera muestra.....	64
16.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la segunda muestra.....	65
17.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol encendido de la lámpara de alumbrado público para la segunda muestra.....	66
18.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la tercera muestra.....	67

19.	Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de lámpara de alumbrado público para la segunda muestra.....	68
20.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte alta del circuito impreso de las fotoceldas de alumbrado público.....	69
21.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la primera muestra.....	71
22.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la segunda muestras.....	72
23.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la tercera muestra.....	73
24.	Porcentaje de materiales obtenidos por cada circuito impreso de la lixiviación con ácido nítrico y redox con aluminio para obtener cobre metálico.....	77
25.	Productos de cobre recuperados a partir de lixiviación ácida con agua regia y lixiviación con tres sales alcalinas obtenidas sólidas por evaporación de cada circuito impreso.....	79

26.	Sales de cobre obtenidas por reacciones químicas según su espontaneidad para la obtención de sulfato de cobre pentahidratado por muestra de circuito impreso tratado.....	82
-----	---	----

TABLAS

I.	Sistema de luminaria pública.....	5
II.	Materiales presentes en los componentes de las fotoceldas de sensor fotoresistivo y su clasificación tóxicos y no tóxicos	12
III.	Materiales presentes en los componentes de las fotoceldas de comando electrónico y su clasificación tóxicos y no tóxicos	13
IV.	Materiales reciclables y no reciclables en los componentes de las fotoceldas.....	14
V.	Importancia de los criterios.....	21
VI.	Información de los criterios para los RAEE.....	22
VII.	Matriz de comparación de pares de alternativas.....	22
VIII.	Resultados de la evaluación de los RAEE.....	23
IX.	Clasificación de los RAEE según directiva europea 2002/96/ CE.....	24
X.	Clasificación de los RAEE desde una perspectiva de su gestión y manejo.....	25
XI.	Tratados y acuerdos internacionales.....	28
XII.	Constitución de la República de Guatemala.....	30
XIII.	Leyes nacionales.....	32
XIV.	Otros reglamentos y acuerdos gubernativos relevantes.....	37
XV.	Políticas vinculadas al manejo integrado de los desechos y residuos sólidos	38

XVI.	Ecuaciones propuestas	42
XVII.	Masa y área de las tarjetas de circuito impreso	47
XVIII.	Variables Independientes y dependientes	57
XIX.	Ácidos para la primera fase de lixiviación de extracción de cobre	58
XX.	Agente acomplejante y álcali para recuperación de cobre	59
XXI.	Ciclo de lixiviación con agua regia	59
XXII.	Ciclo de lixiviación del circuito impreso con ácido nítrico....	60
XXIII.	Ciclo de lixiviación del producto obtenido del circuito impreso con álcalis.....	60
XXIV.	Cuarta lixiviación del producto obtenido del circuito impreso con agente acomplejante.....	61
XXV.	Oxocloruro de sodio obtenido de la reacción secuencial con álcalis	61
XXVI.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en parte alta de energía del circuito impreso de los fotocontroles de alumbrado público.....	69
XXVII.	Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso de las fotoceldas de alumbrado público.....	70
XXVIII.	Volumen de solución de nitrato de cobre obtenida como producto del proceso de lixiviación con ácido nítrico al 65% después de veinticuatro horas.....	74

XXIX.	Masa de cobre metálico obtenido por diferencia de la masa inicial del circuito impreso y la masa final posterior a la lixiviación ácida y masa decobre obtenida por electrogravimetría y redox con aluminio	75
XXX.	Masa de cloruro de aluminio obtenido por evaporación posterior al filtrado de cobre metálico obtenido por lixiviación ácida y masa decobre obtenido por electrogravimetría y redox con aluminio.....	76
XXXI.	Masa de oxiclورو de cobre obtenido a partir de reacción con tres álcalis.....	78
XXXII.	Volumen obtenido de tres sales de cobre en solución acuosa del ciclo de reacciones del cobre	80
XXXIII.	Volumen y una masa de productos obtenidos por ciclo de reacción del cobre.....	81
XXXIV.	Características, aplicaciones y toxicidad de sales de cobre	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Cu	Cobre
°C	Grados Celsius
Kg	Kilogramo
m	Masa
mL	Mililitros
Q	Quetzales
W	Unidad de potencia en el Sistema Internacional
σ	Desviación estándar
pH	Potencial de hidrógeno
%	Porcentaje

GLOSARIO

Alumbrado público	Es un servicio que proporciona las condiciones de iluminación para el desplazamiento de peatones y vehículos en calles, avenidas y zonas de libre circulación.
Circuito impreso	Es un soporte de material aislante donde se conectan entre sí puntos de un circuito eléctrico mediante pistas conductoras adheridas a él. Este suele servir de soporte físico para la colocación y soldadura de los componentes.
Cobre	Elemento químico de número atómico 29. Metal de transición de color rojizo y brillo metálico. Mejor conductor de electricidad, conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad.
Electrogravimetría	Método de análisis cuantitativo que se basa en un sistema electroquímico, donde una muestra de elemento recuperado se deposita en los electrodos de la celda instalada.

Energía de Gibbs

La energía libre o entalpía libre de Gibbs se emplea en química para explicar si una reacción sucederá de manera espontánea o no. Esta energía se representa con la letra G. Es un potencial termodinámico. Considera solo las variables del medio. $G > 0$ equilibrio en dirección opuesta. $G < 0$ condición de espontaneidad. $G = 0$ condición de equilibrio.

Fotocontrol

Dispositivo que se utiliza para encender y apagar de manera automática las luminarias llamado también fotocelda.

Hidrometalurgia

Es la rama de la metalurgia que implica la extracción o recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas orgánicas como ácidos o base.

Lixiviación

Es la disolución preferente de uno o más componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente.

Luminaria

Es un aparato de alumbrado que reparte y transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte y la fijación de las mismas.

Maceración estática	Operación que consiste en sumergir un sólido en un líquido para extraer de él sus partes solubles.
Potencial estándar	Fuerza electromotriz o voltaje de una celda electroquímica. Ocurre por la pérdida o ganancia de electrones.
Principio de Le Chatelier	Cuando un sistema en equilibrio químico es perturbado por un cambio de temperatura, presión o concentración, el sistema modificará la composición en equilibrio de forma que tienda a contrarrestar este cambio de la variable.
Proceso espontáneo	Es un proceso que tiene lugar en un sistema que se deja evolucionar por sí mismo; una vez comienza, no es necesaria, ninguna acción desde fuera del sistema para hacer que el proceso continúe.
Protección	Conjunto de políticas y medidas para prevenir y controlar el deterioro del ambiente, así como procurar su mejoramiento.
Reciclar	Proceso mediante el cual ciertos materiales se separan, recogen, clasifican y almacenan a fin de reincorporarlos al ciclo productivo como materia prima.

Redox	Reacción química de oxidación y reducción. La oxidación es la pérdida de electrones y la reducción la ganancia de electrones.
Reducir	Persigue causar el menor daño posible al entorno, con este término se establece la máxima de la regla de las 3R, para poder cuidar al máximo el medio ambiente.
Residuo sólido	Es todo residuo que carece de valor para quien la genera, están comprendidos en la misma definición los desechos o residuos sólidos cenizas, elementos de barrido de calles residuos industriales, de hospitales y mercados.

RESUMEN

La finalidad de esta investigación fue recuperar sales de cobre, del circuito impreso del fotocontrol de encendido, de las lámparas de alumbrado público. Para ello se realizó procesos de lixiviación ácida y alcalina a nivel laboratorio. El objetivo fue verificar el potencial de uso, como componente activo de fertilizantes y otras aplicaciones para su reuso.

A través de un análisis de fluorescencia de rayos X, de la placa de circuito impreso, se determinó la cantidad de cobre que había. Se presentó los espectros de la parte baja, media y alta de energía. También gráficas donde se describió la distribución de los elementos químicos en la tarjeta de circuito impreso, según su porcentaje en masa localizado en la muestra. Con ello se decidió el orden de extracción de los tres ciclos de lixiviación.

En el primer ciclo, se obtuvo cobre metálico, en el segundo ciclo se produjo oxiclورو de cobre. Y en el tercer ciclo, se produjo nitrato de cobre en solución acuosa, un compuesto de coordinación de cobre, hidróxido de cobre, óxido de cobre y finalmente sulfato de cobre penta-hidratado. Para cada uno de los compuestos se presentó la masa o el volumen obtenido y se graficó la composición porcentual de los productos. Se llegó a confirmar la eficiencia y espontaneidad del ciclo del cobre y se recomienda su aplicación posterior a este tipo de minería urbana.

Con ello se propuso alternativas de aplicación o reuso de cada sal tomando en cuenta la toxicidad. La metodología experimental según cada ciclo, se trabajó en un rango de temperatura de 20 °C a 25 °C, según horario del día y a una presión atmosférica de 0.84 atm.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

Con la implementación de nuevas tecnologías y la sustitución de nuevos equipos electrónicos, se generan una cantidad significativa de dispositivos. Estos se vuelven desechos que contienen un número considerable de metales, que pueden ser reutilizados a través de una correcta recuperación y evitar que se oxiden o desgasten con el tiempo en vertederos que no son apropiados para este fin. Por ello se vuelve necesaria la implementación de una metodología de separación química de metales y así lograr un aprovechamiento o reutilización de los mismos. Otro factor importante es conocer el grado de toxicidad de metales e identificar la utilidad de los mismos como sales recuperadas que, posteriormente, puedan ser utilizadas como abono o reactivo complemento en prácticas de laboratorio.

Las tarjetas de circuito impreso son la base de la industria electrónica. Siendo una parte esencial de casi todos los aparatos electrónicos. Estas también son un medio para sostener mecánicamente y conectar eléctricamente componentes como chips, semiconductores y capacitores a través de pistas de material conductor grabadas, como las hojas de cobre laminadas sobre un sustrato no conductor. Uno de los metales más comunes en el circuito impreso es el cobre por lo que se convierte en un metal de interés comercial y que es viable recuperar, por ende, reciclar y reutilizar.

Delimitación del campo de estudio

El estudio fue realizado utilizando las tarjetas de circuito impreso que han sido separadas por medios mecánicos de los fotocontroles de las lámparas de alumbrado eléctrico. Las fotoceldas que se utilizaron fueron las que se reemplazaron en el municipio de San Diego Zacapa. El experimento se llevó a cabo a nivel laboratorio. Se realizó en el laboratorio de docencia del área de química general y en el laboratorio de análisis fisicoquímico del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Como primer tratamiento y preparación de las muestras que son las tarjetas de circuito impreso se determinó la masa junto con el área de las mismas. Luego, se redujo el tamaño de partícula lo que aumentó el área de contacto de las mismas y facilitó el proceso de extracción ácida. Inicialmente se realizó una detección con equipo de fluorescencia de rayos X para determinar la cantidad de cobre y aleación de cobre y estaño contenida en el circuito impreso. Luego, se realizó la lixiviación ácida y alcalina. Finalmente, se evaluó con un segundo análisis de fluorescencia de rayos X la cantidad de elementos presentes en las sales recuperadas.

El estudio se delimitó a recuperar el cobre por ser el elemento químico presente en mayor proporción en esta parte de la tarjeta de circuito impreso. Se propuso tres ciclos de reacciones para obtener las diferentes sales, también se desea confirmar la espontaneidad y el principio de Le Chatelier, adaptando las condiciones experimentales para que favorezcan la obtención de los productos.

FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

Pregunta principal

¿Constituye la separación química del cobre por lixiviación ácida y alcalina en el circuito impreso del fotocontrol de las lámparas de alumbrado público, almacenadas en la municipalidad de San Diego Zacapa un factor importante para determinar la utilidad y toxicidad de los mismos?

Preguntas auxiliares

1.- ¿Se puede detectar el porcentaje en masa de cobre y otros metales presentes como componentes del circuito impreso de los fotocontroles de encendido de las lámparas de alumbrado público por medio del equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X?

2.- ¿Es posible recuperar sales de cobre de las tarjetas del circuito impreso del fotocontrol por medio de lixiviación ácida y alcalina, estableciendo un ciclo de extracción del cobre espontáneo y eficiente?

3.- ¿Se podría identificar sales de cobre como el oxiclورو de cobre posterior al proceso de lixiviación ácida y alcalina con su potencial uso como componente de fertilizante o fungicida, realizando un análisis de fluorescencia de rayos X?

OBJETIVOS

Objetivo general

Recuperar sales de cobre del circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público por lixiviación ácida y alcalina a nivel laboratorio con potencial para ser utilizado como componente de fertilizantes siendo analizando previamente la presencia de cobre y otros metales traza por análisis de fluorescencia de rayos X.

Objetivos específicos

1. Realizar un análisis elemental cualitativo por el método de fluorescencia de rayos X para obtener el porcentaje en masa de cobre y otros metales traza en las tarjetas de circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público.
2. Realizar lixiviación ácida (ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido clorhídrico) y lixiviación alcalina (bicarbonato de sodio, carbonato de sodio e hidróxido de sodio) a las tarjetas de circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público para obtener sales de cobre.
3. Determinar la toxicidad, utilidad o la reutilización de las sales de cobre recuperadas como potencial componente de fertilizantes.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

El tipo de investigación es mixta, ya que incluye ambos enfoques, el enfoque cualitativo y el enfoque cuantitativo. En el estudio se pretende acotar intencionalmente la información, medir con precisión las variables del estudio.(Hernández Sampieri R. , 2014).

La primera idea de la investigación es recuperar cobre para producir sales y cobre metálico a partir del circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público. En cada una de las marchas analíticas establecidas se pretendió obtener productos químicos que evidenciaron un color definido que fue un parámetro visual. Dicha característica se enmarcó el estudio en el enfoque cualitativo de la investigación. Los colores de las sales obtenidas como productos se encuentran establecidos en la literatura y se comprobaron al llevarse a cabo las reacciones químicas.

Para cumplir la finalidad general de la investigación, que fue obtener las sales de cobre, se establecieron variables de control. Esto con el fin de tener la certeza que los productos recuperados son las sales que servirán como fertilizantes, fungicidas u otra aplicación que pueda ser aprovechada. Inicialmente se realizó un análisis de espectrometría de rayos X para determinar el porcentaje en masa de cobre metálico en la placa de circuito impreso. Una vez confirmado el valor alto del metal se procedió a hacer los cálculos de ácido a utilizar para hacer la separación por redox.

Las variables establecidas fueron la masa del circuito impreso, el volumen de ácido y sales o bases en solución acuosa que se utilizaron como lixiviantes. También la concentración a la que se utilizaron los mismos y el tiempo de lixiviación según la marcha analítica ejecutada. Tomando en cuenta que el proceso de extracción fue de maceraciones estáticas. Se confirmó la espontaneidad de las reacciones redox, el equilibrio de complejos, solubilidad y reacciones alcalinas.

Se realizó el ciclo del cobre, siendo la primera marcha analítica aplicada la de obtención de cobre metálico, para ello se realizó una lixiviación con ácido nítrico y una redox con aluminio metálico. La segunda marcha analítica realizada fue la lixiviación con agua regia. Después, se realizaron reacciones de doble desplazamiento con hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de potasio para obtener oxocloruro de cobre. Se realizó la determinación teórica por estequiometría para el cálculo de ácido a utilizar, pero experimentalmente hubo una producción de gases y pérdida de volumen; se dio la necesidad de utilizar 1/3 más del volumen establecido.

La última marcha analítica aplicada fue el ciclo del cobre con la finalidad de obtener sales de cobre en sucesión. Para ello se aprovechó el principio de Le Chatelier y la espontaneidad de los equilibrios debido al salto de electrones e hibridación de reempes. Los niveles que ocupen los electrones del metal de transición y el tipo de enlace que forme con los ligandos o aniones dio como resultado los colores experimentales obtenidos. Las sales obtenidas en este último proceso fueron nitrato de cobre, ion complejo hexaaqua de cobre, hidróxido de cobre, óxido de cobre y sulfato de cobre pentahidratado.

Cada una de las sales anteriores se obtuvo en solución acuosa y posteriormente se evaporaron para la obtención de la sal en estado sólido. Esto para realizar un segundo análisis de fluorescencia de rayos X y determinar la composición de elementos de las sales producidas.

Finalmente, se establecieron diseños con los ciclos de cobre comprobados experimentalmente y aplicados en la minería urbana. Se comprobó que las sales obtenidas en cada ciclo realizado contenían un alto porcentaje de los elementos esperados. Se enlistó la aplicación teórica de cada uno de los productos. También se hizo referencia del nivel de toxicidad teórica según las hojas de seguridad del cada producto. Por lo que se recomienda que se realizar pruebas experimentales pertinentes de cada producto y confirmar los usos propuestos.

INTRODUCCIÓN

La modernización y las tendencias a renovar, los componentes electrónicos de las luminarias de alumbrado público, se ha realizado en gran parte de municipios de Guatemala. La finalidad es disminuir los costos en la factura a nivel municipal y por ende reducir los cobros que se hace a cada consumidor. Según informes elaborados por (ENERGUATE, 2017), se están impulsando proyectos de eficiencia energética, en términos del alumbrado público. Esto se refiere a que las municipalidades inviertan en lámparas eficientes o que hagan los cambios respectivos, de las partes dañadas de las luminarias o el cambio total de la lámpara. Ya que van a consumir menos energía y producirán mejor iluminación.

El alumbrado público es uno de los principales servicios prestados por las municipalidades y cuenta con el apoyo de ENERGUATE en el oriente y occidente del país. Cuando la municipalidad inicia el proyecto de cambio de luminarias, uno de los factores a tomar en cuenta es la disposición de los desechos generados. En este caso las partes de las luminarias. Generalmente todos los componentes quedan almacenados en bodegas o sitios que disponen las autoridades municipales.

En esta investigación se contó con el apoyo de la Municipalidad de San Diego, Zacapa, que inició su proyecto de eficiencia energética, con el cambio de varias lámparas que se encontraban en mal estado y con el cambio del fotocontrol de encendido de lámparas. Se autorizó la recolección de una muestra significativa de fotocontroles de encendido de las lámparas de alumbrado público. Para realizar un tratamiento primario y secundario de los desechos que pueden ser reutilizados.

A raíz de estos proyectos, de la generación y disposición de las lámparas y sus partes, surgieron estudios de esta índole para dar un tratamiento primario a los componentes almacenados. Por ello, se conforman los antecedentes del trabajo de investigación. El primer proyecto de investigación en esta temática fue presentado en el año 2010.

Fue aquí, donde se iniciaron los estudios para la disposición y tratamiento primario de separación de las partes de las luminarias de alumbrado público. Se realizó una clasificación de los componentes como los metales, que se pueden reciclar vía reacciones químicas para que se puedan reutilizar.

En el año 2013, se generó una línea de investigación y por ello se planteó y ejecutó un proyecto de Investigación en la línea (FODECYT) en la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología y, posteriormente, se plantearon varios proyectos de trabajos de graduación a nivel de postgrado y pregrado.

El trabajo de investigación pretende dar continuidad a la disposición y tratamiento de los componentes que se generan del cambio de luminarias. Por esta razón, serán utilizadas las tarjetas de circuito impreso, que han sido separadas por medios mecánicos, del fotocontrol de encendido de las luminarias de alumbrado público. Estas fueron reemplazadas en el municipio de San Diego Zacapa.

El procedimiento experimental que se realizó fue una detección con equipo de fluorescencia de rayos X para determinar la cantidad de cobre y aleación de cobre y estaño contenida en el circuito impreso. Luego se realizó la lixiviación ácida utilizando ácido nítrico y agua regia. Posteriormente se realizó un tratamiento alcalino y, finalmente, se evaluó la eficiencia de la metodología establecida para obtención de sales de cobre.

El primer producto obtenido fue el cobre metálico y posteriormente sales como el oxiclورو de cobre. Este puede servir como fungicida preventivo y eficaz para combatir un gran número de enfermedades en diversos cultivos frutales, café, papa, tomate, tabaco y plátano. Con la obtención de las sales de cobre se pretende dar un aporte a la agricultura; ya que tienen baja toxicidad, gran eficacia preventiva de enfermedades. Esta sal se puede mezclar con facilidad y tiene buena solubilidad en agua al momento de ser aplicado en cultivos.

El contenido del informe final se presentó en capítulos. A continuación, se describe de manera breve cada uno. El primer capítulo es el resumen del trabajo realizado que indicó, qué se hizo, cómo se hizo y a qué se llegó. Luego, se presentó el planteamiento del problema que buscó dar continuidad al proceso de separación mecánica y se comprobó la metodología experimental para obtener sales de cobre del circuito impreso y utilizarlas como fungicidas.

El siguiente capítulo se presentan los objetivos que son las metas establecidas. Recuperar sales de cobre del circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público por lixiviación ácida y alcalina a nivel laboratorio con potencial para ser utilizado como componente de fertilizantes siendo analizando previamente la presencia de cobre y otros metales traza por análisis de fluorescencia de rayos X.

En el capítulo del marco teórico se desarrolló la temática o fundamento teórico de alumbrado público, clases de luminarias y las partes que las componen especialmente con los componentes de las fotoceldas.

Se desarrolló la temática de reciclaje, clasificación desechos sólidos y desechos eléctricos y electrónicos, materiales ferrosos y no ferrosos. También

se esquematizó el marco legal respectivo de acuerdo a la actualización y aprobación de acuerdos de ley que respaldan la temática. Posteriormente se definió los procesos de hidrometalurgia y procesos de minería urbana.

Para el desarrollo del capítulo dos se estableció la metodología. Se realizó un análisis de fluorescencia de rayos X para estimar el cobre presente. Se establecieron tres marchas analíticas de lixiviación ácida y alcalina y así obtener las sales de cobre del circuito impreso. Se utilizaron las fotoceldas proporcionadas por la municipalidad del municipio de San Diego Zacapa.

En este capítulo se presentó los resultados, con figuras de los espectros de fluorescencia de rayos X, de las tarjetas de circuito impreso. Gráficas de distribución donde se logró la interpretación de los elementos químicos detectados y las tablas con masas o volúmenes, de los productos recuperados en cada ciclo. También se elaboró gráficas donde se muestra la distribución porcentual de elementos químicos, obtenidos por tarjeta de circuito impreso.

En el capítulo cuatro se desarrolló la discusión de resultados de los productos obtenidos como sales, en los ciclos de reacción del cobre. Se comprobó que este metal fue recuperado satisfactoriamente. Por un segundo análisis de fluorescencia de rayos X y por los colores que presentaron los productos. Según las sales ternarias y binarias obtenidas existen posibilidades de ser aplicadas o utilizadas como fertilizante. También en el caso de nitrato de cobre puede ser utilizado en recubrimientos de materiales. El sulfato de cobre pentahidratado, puede servir de fungicida o plaguicida. En la desinfección de piscinas puede ayudar a combatir la aparición de hongos. Cada una de las sales de cobre puede regresar a la tierra en forma de fertilizante.

Se presentaron las conclusiones, las cuales dan respuesta a los objetivos específicos planteados. Son respuestas positivas de las metas alcanzadas. Están las recomendaciones donde se planteó la continuidad de la investigación. Por último, se enlistaron las referencias bibliográficas con las que se fundamentó teóricamente la investigación. También se presentó los apéndices donde se detallan reacciones y cálculos. Como complemento de los análisis se presentó un segundo bloque con los espectros de fluorescencia de rayos X de las sales sólidas obtenidas por evaporación. Evidenciando el porcentaje en masa de los elementos presentes. Así se cumplió con la finalidad de reutilización de los productos de la minería urbana. Se presentó un anexo de fotografías con los pasos de la metodología comprobada y de los productos químicos obtenidos en la investigación.

ANTECEDENTES

(Suntecún, 2010), presentó su trabajo de graduación de postgrado que lleva como título Tratamiento primario de desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala. Dicho estudio proporcionó un tratamiento primario para los desechos de las lámparas de vapor de mercurio y con base al estudio realizado estima que de la sustitución de lámparas según los informes de Gobierno de Guatemala 1,710,080 kg de desechos sólidos, de los cuales 27,520 kg corresponden a la fotocelda que es el sensor de encendido. Entre las recomendaciones que hace es que se evalúe la compatibilidad de los componentes de este dispositivo con los de otras fotoceldas, para evitar gastar en estos y así reducir el volumen de desechos, lo cual se puede hacer con el brazo de la lámpara, así como con el sensor de encendido.

(Zeceña, 2013), presentó el informe final del proyecto Determinación, Evaluación y Propuesta del Manejo de los Desechos Sólidos del Alumbrado Público en el Departamento de Guatemala, siendo la investigadora principal Dra. Casta Zeceña Zeceña. Dicho proyecto fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (–SENACYT –) y aprobado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (–CONCYT –) según la línea (–FODECYT-) siendo la contrapartida la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El proyecto tiene como finalidad proponer una metodología para el tratamiento de los desechos sólidos generados del alumbrado público, al realizar la sustitución de las lámparas de vapor de mercurio por lámparas de vapor de sodio por las municipalidades, para mejorar la eficiencia energética y disminuir los costos de energía eléctrica de la población usuaria.

Según (Zeceña, 2013) entre los desechos almacenados de las lámparas en la municipalidad se encuentran, luminarias, cabezote tipo canasta y cobra, reflector para ambos tipos, soportes de las lámparas y sensor de encendido. La cantidad de lámparas que se almacenó en Mixco se encuentra alrededor de las once mil doscientas treinta y dos sin que esta municipalidad les diera seguimiento a los aportes ofrecidos por el proyecto.

El cambio de lámparas que se realizó en la municipalidad de Mixco correspondió a la iniciativa que surgió por el Gobierno de Guatemala en función de la eficiencia energética, donde según la Revista Summa (2009) citada por Zeceña: las comunas sustituirían 300,000 lámparas de vapor de sodio. Dichas sustitución lograría un ahorro del 40% del consumo habitual de energía eléctrica. Pero es evidente que en este proyecto no se tomó en cuenta el aspecto ambiental que tiene que ver con la generación en gran volumen de desechos sólidos. Los logros obtenidos en el proyecto fueron establecer que el 98% de los desechos no tóxicos de las lámparas se consideraban material reciclable.

(De León, 2016), presentó su trabajo de graduación de posgrado titulado Tratamiento Primario De Los Residuos Sólidos Provenientes de las Fococeldas Utilizadas en los Sistemas De Alumbrado Público. Donde determinó que en las fococeldas de alumbrado público existen componentes que poseen sustancias tóxicas y materiales de valor que son cotizados para su reciclaje. Sin embargo,

los componentes electrónicos que posee la fotocelda, así como el fotocontrol, se pueden reutilizar hasta agotar su vida útil antes de destinarse para el reciclaje, obteniendo, de esta manera, una mejor gestión de los residuos electrónicos del alumbrado público. Dentro de las conclusiones de este estudio está una valorización de los materiales presentes en los componentes de la fotocelda, el cobre, el latón y bronce se encuentra con un porcentaje representativo en los tipos de fotocelda de sensor fotoresistivo-electromagnético y de fototransistor con comando electrónico y poseen un valor de comercialización por lo que se podría obtener un beneficio económico al reciclar este metal después del ciclo de vida de la fotocelda, utilizándolo como materia prima para otros procesos. De León (2016) recomienda cuantificar las sustancias tóxicas, tales como metales pesados presentes en las fotoceldas de alumbrado público y desarrollar una metodología para su tratamiento y disposición final como nuevo tema de investigación.

En Guatemala, recientemente, la sustitución de las luminarias tradicionales por las luminarias de tecnología Led se está dando de manera paulatina.

Según el artículo (PRENSA LIBRE, 2017) Iluminación con tecnología Led en espacios públicos se convierte en novedad, más de 60 municipios entre ellos Villa Nueva, Guatemala y San Lucas Sacatepéquez apuestan a la eficiencia, ahorro y duración de esa iluminación. Entre las ventajas o beneficios que se exponen se encuentra, la reducción de un 60% en el pago del servicio, así como la limpieza y mantenimiento de las mismas.

Por ello, es importante destacar que esta nueva adquisición de tecnología beneficia a la población, pero mientras este cambio se está generando también es trascendental conocer el destino o disposición final de los residuos generados de la antigua iluminación. Para sustentar este estudio a

continuación se presentarán los principales conceptos y definiciones entorno a la temática, además de profundizar mejor en el problema y proporcionar la mejor solución amigable con el ambiente, y adecuado al contexto nacional.

(Oliveros, 2011), presentó su trabajo final como requisito para optar por el título de Magíster en Ingeniería de Materiales y Procesos, de la Universidad de Colombia, Facultad de Minas, Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos sede Medellín. Titulado Metodología para Recuperar Metales Preciosos: Oro, Plata, y Grupo del Platino, presentes en Desechos Electrónicos. Según la metodología implementada se logró recuperar mediante lixiviaciones básicas y ácidas controladas a nivel de laboratorio, recuperaciones de metales como oro, plata y grupo del platino por encima del 95%.

(Chaverra, 2014), presentó su trabajo de investigación para optar al título de magister en Ingeniería de materiales y procesos en la línea de investigación de Metalurgia extractiva de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales Medellín, titulado Extracción de Cobre a partir de Tarjetas de Circuito Impreso de Residuos Electrónicos. Dicho estudio representa una alternativa viable para la recuperación de cobre a partir de residuos electrónicos, aportando a los problemas de manejo y disposición final, al cierre de ciclo de los metales y al desarrollo sostenible global. Obtuvo un concentrado de cobre en un rango del 63% al 85% máximo. Se logró una extracción de cobre superior al 95% en 100 mL de solución de 2.3 M de ácido sulfúrico con 18 mL de peróxido de hidrógeno, durante 60 minutos de proceso. Se obtuvo, además, cobre metálico con una pureza superior al 99% y oxiclورو de cobre como un subproducto con valor agregado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Alumbrado público

En la actualidad el alumbrado público es un servicio que proporciona las condiciones de iluminación para el desplazamiento de peatones y vehículos en calles, avenidas y zonas de libre circulación. Según el Boletín WEBSITE No,2 de Alumbrado Público el Decreto 12-2002 de Congreso de la República, Código municipal establece el abastecimiento y regulación de alumbrado público como competencia propia del municipio. Así también establece, en el artículo 72, que el municipio debe regular y prestar los servicios públicos municipales, mantenerlos, ampliarlos y mejorarlos, garantizando un funcionamiento eficaz, seguro y continuo. (Comisión Nacional De Energía Eléctrica, 2012).

El servicio de iluminación de vías y calles públicas de libre tránsito de personas y vehículos es prestado a los municipios, principalmente en centros urbanos y casi inexistente en el área rural, confiere seguridad en espacios públicos, previene accidentes, contribuye al ornato urbanístico nocturno y permite actividades productivas en horario nocturno.

El servicio de alumbrado público, según el artículo 68 del código municipal, debe ser prestado por la municipalidad, el servicio se presta a través de las redes de las distribuidoras y se recaudan en sus cajas el cobro que paga el vecino. La Comisión Nacional de Energía Eléctrica participa técnicamente en relación a la tarifa. (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Gerencia de

Proyectos Estratégicos, 2014). En Guatemala el parque de lámparas aproximado es de 440,000 lámparas.

Figura 1. **Lámparas de vapor de sodio de 100 watts y lámparas de vapor de mercurio de 175 watts**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2014). *Gerencial de Proyectos estratégicos*.

1.1.1. Lámparas de alumbrado público

Según (Escobar, 2012) por tipo de lámparas, los principales equipos que se pueden dar son:

- Lámparas fluorescentes
- Lámparas de vapor de mercurio a alta presión
- Lámparas de vapor de sodio a baja presión
- Lámparas de vapor de sodio a alta presión
- Lámparas de mercurio con halógenos metálicos
- Lámparas de descarga por inducción
- Ledes

1.1.2. Luminaria alumbrado público

Según (Gozalo, 2017) la luminaria es un aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas. En caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación. Las luminarias son los elementos encargados de contener y proteger de los agentes externos las lámparas generadoras de luz (Forjas Estilo Español, 2016).

Según (Escobar, 2012) las luminarias son aparatos que distribuyen, filtran o transforman la luz emitida por una o varias lámparas. Contienen todos los accesorios necesarios para fijarlas y protegerlas, cuando resulta necesario, disponen de los circuitos y dispositivos necesarios para conectarlas a la red de alimentación eléctrica.

La luminaria se compone de cuerpo o carcasa, bloque óptico y alojamiento de auxiliares, además de las juntas de hermeticidad y cierres.

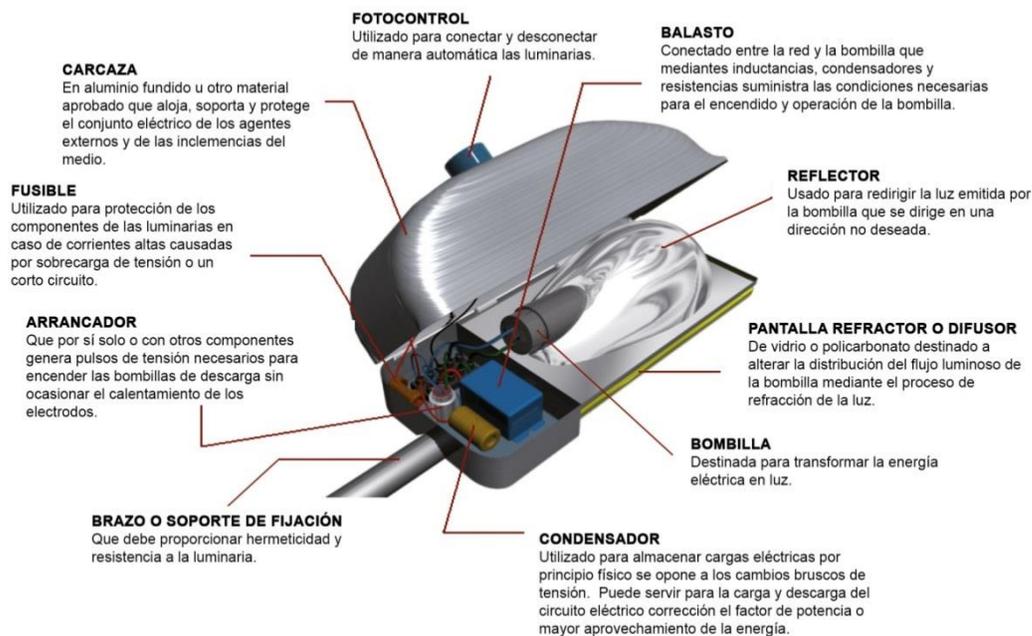
1.1.3. Partes de una luminaria

Según (Forjas Estilo Español, 2016) una luminaria de alumbrado público se compone fundamentalmente con las siguientes partes:

- Carcasa o armadura: elemento donde se integran los demás componentes de la luminaria. Fabricada en materiales resistentes como el acero o la chapa de aluminio.
- Equipo eléctrico: constituido por el portalámparas y los elementos de arranque y funcionamiento de la lámpara.

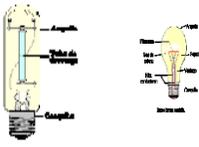
- Reflectores: superficies que reflejan el flujo de la lámpara en la dirección deseada y que suelen incorporar una pantalla para evitar deslumbramientos.
- Difusor: carcasa de cierre de la lámpara que difunde el haz de luz y evita deslumbramientos.
- Filtro: acopiado al difusor disminuye la distorsión visual producida por las radiaciones ultravioleta e infrarroja y la polarización de la luz. (Comisión Nacional De Energía Eléctrica, Gerencia De Proyectos Estratégicos, 2014)

Figura 2. Luminaria y sus partes



Fuente: Forjas Estilo Español. (2016). *Forjasestilo*. Recuperado de [www. Forjasestilo.Es/Noticias/Entry/Luminaria-Alumbrado-Publico-Componentes-y-tipos](http://www.Forjasestilo.Es/Noticias/Entry/Luminaria-Alumbrado-Publico-Componentes-y-tipos).

Tabla I. Sistema de luminaria pública

Parte de Luminaria	Subsistema	Fotografía
1. Seccionador		
2. Transformador	Convencional tipo poste (distribución) padmounted	
3. Control de encendido	fotocelda caja de control	
4. Luminaria	Viales ornamentales reflectores	
5. Poste	Brazo tipo látigo sencillo Brazo tipo látigo doble	
6. Lámpara	Lámpara de vapor de sodio Lámpara fluorescente Lámpara de luz Mixta Lámpara de vapor de Mercurio	

Fuente: Mogollón Vera, B. A. (2013). *Plan maestro de mantenimiento preventivo centrado*

en la confiabilidad para el sistema de alumbrado público del municipio de Maracaibo.

1.1.4. Mantenimiento de alumbrado público en Guatemala

De acuerdo al informe anual del EEGSA durante 2015, se repararon 9,329 lámparas encendidas de día, que hubiesen representado una pérdida total de 670,905 kWh al año. Se actualizó el registro de 212,268 lámparas de alumbrado público en el inventario correspondiente, actividad que redundó en la correcta facturación de energía suministrada bajo dicho concepto a las municipalidades ubicadas en el área de cobertura de EEGSA. (EEGSA Grupo-ep, Departamento de Comunicación Corporativa EEGSA).

Se llevó a cabo la construcción de 46 proyectos de alumbrado público para la Municipalidad de Guatemala con un costo de Q8.4 millones, mediante el cual se instalaron 1961 nuevas luminarias completas y 788 postes nuevos.

Para las municipalidades de Guatemala y Mixco se realizaron trabajos de mantenimiento al sistema de alumbrado público, atendiendo 19,502 avisos de luminarias en mal estado que generaron un ingreso para EEGSA DE Q. 11.3 millones. (EEGSA Grupo-ep, Departamento de Comunicación Corporativa EEGSA).

1.1.5. Fallas funcionales de sistemas y subsistemas del alumbrado público

Según (Mogollón, 2013) de las seis partes enlistadas anteriormente se pueden determinar fallas funcionales atribuidas al sistema y subsistema del alumbrado público dadas por las condiciones ambientales, el vandalismo, sabotaje, fallas de suministro de energía eléctrica, falla de elementos del sistema y la edad del equipo.

Para la fotocelda a nivel puntal en alumbrado residencial las condiciones ambientales que afectaron pudieron ser la exposición al sol, que haya desintegrado sus componentes por la elevada temperatura, o también que pueda estar recibiendo sombra de algún árbol. En la caja de control a nivel de avenidas y vías principales que el cableado dañado por conectores no herméticos fuese afectado por la humedad. Por vandalismo puede ser que la fotocelda fuera hurtada o faltaran tornillos, tuercas, también que fuera rota. Si el fallo fuera por el suministro de energía eléctrica puede ser que la fotocelda estuviera expuesta a tensiones mayores a la de diseño y se averiara. Por último, si hubo alguna falta de elementos del sistema pudo ser una pérdida de hermeticidad del empaque de la caja de control, contactos de carga dañados. Cableado dañado o calcomanía de identificación del diagrama eléctrico de conexiones de alimentación y control dañados. (Mogollón, 2013).

1.1.6. Sistemas de encendido y apagado de las lámparas de alumbrado público

Según (Monsalve, 2009) los ciclos de funcionamiento de las instalaciones de alumbrado público vienen determinados por el encendido y apagado de las instalaciones, así como por la reducción del nivel luminoso.

El encendido y apagado de las instalaciones debe efectuarse adecuadamente sin que se adelante el encendido ni se retrase el apagado, de forma que el consumo energético sea el estrictamente necesario. Además de los sistemas de gestión centralizada el encendido y apagado de la instalación, se puede llevar a cabo mediante un interruptor crepuscular y el interruptor horario astronómico. (Monsalve, 2009).

1.2. Fotocontrol

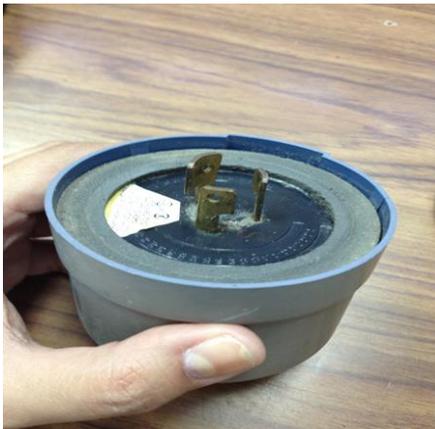
Según (De León, 2016) el fotocontrol es un dispositivo que cuenta con un sensor de encendido. El cual es utilizado como control automático para encender y apagar la lámpara en el alumbrado público. Está diseñada para activarse o desactivarse solamente con luz natural.

Los fotocontroles son dispositivos que se utilizan para encender y apagar de manera automática las luminarias de alumbrado público en función del nivel de iluminación del ambiente. Son también llamados fotoceldas. En el caso más común, el fotocontrol enciende la bombilla de noche y la apaga durante el día. La vida útil del fotocontrol debe sobrepasar las 3,600 operaciones, siendo cada operación el ciclo completo conexión y desconexión en condiciones normales de funcionamiento. (De León, 2016).

El interruptor crepuscular genera las órdenes de maniobra en función de la luminosidad ambiental, al estar constituido por una célula fotoeléctrica que detecta la cantidad de luz natural que existe en una determinada ubicación geográfica, transformando las variaciones de luminosidad en modificaciones de parámetros eléctricos, como pueden ser tensión, intensidad o resistencia. (De León, 2016).

Según (Monsalve, 2009), al comparar los parámetros eléctricos con un valor de referencia o umbral cuando el valor medio es diferente al de referencia, se acciona un contacto que enciende, bien el punto de luz o la instalación de alumbrado, apagándose, la misma, cuanto el valor medio es así mismo distinto al de referencia o umbral.

Figura 3. Lámpara de alumbrado público y los fotocontroles intercambiados.
Vista anverso y reverso el fotocontrol de dos marcas comerciales



Fuente: elaboración propia.

Los fotocontroles están fabricados de diversos materiales. Estos tienen funciones de protección, soporte, transmisión de la corriente eléctrica y funcionamiento de la fotocelda o fotocontrol. Los materiales pueden ser desde metales pesados hasta polímeros.

1.2.1. Tipos de fotocontroles según su fabricación

Según ha evolucionado la tecnología, hasta el momento se han fabricado tres tipos de fotocontrol. Esto se hizo según el funcionamiento, el primero es por sensor fotoresistivo, el segundo es por comando electrónico y el tercer es fotocontrol temporizado.

1.2.1.1. Fotocontrol por sensor fotoresistivo

Según (De León, 2016), el funcionamiento de este se basa en un sensor fotoresistor, cuya característica es cambiar su resistencia eléctrica en función de la luz del ambiente que impacta en su superficie. la disminución de la luz del ambiente se produce mayor corriente a través del circuito, esto se aprovecha con un fotocontrol electromagnético, que utilizan un relay como interruptor interno que se activa cuando ocurre la disminución de resistencia debido a la disminución de luz del ambiente. El fotocontrol térmico su funcionamiento se basa en la disminución de la resistencia que produce un aumento de corriente, lo que a su vez provoca una disipación de potencia, lo que genera un aumento de temperatura que actúa sobre un interruptor sensible al calor. Estos fotocontroles poseen algunas desventajas que van desde desgaste de los componentes mecánicos, variaciones en sus características eléctricas que producen gastos de energía por el corrimiento de los tiempos de operación así mismo los cambios de tensión en el servicio eléctrico producen variaciones en los parámetros de funcionamiento.

1.2.1.2. Fotocontrol por comando electrónico

Utilizan un fototransistor como sensor de los cambios luminosos. Es más preciso debido a que posee un semiconductor. Según (De León, 2016), el fotocontrol recibe la luz solar por medio del fototransistor que genera una corriente que activa los dispositivos electrónicos para activar el encendido de la lámpara. Entre las ventajas resaltan que no existe desgaste de los componentes mecánicos, poseen mayor vida útil respecto a los fotocontroles de sensor fotoresistivo. No le afectan los cambios de temperatura y realizan un ahorro de energía en comparación a los fotocontroles térmicos.

1.2.1.3. Fotocontrol temporizado

Estos fotocontroles poseen un principio de funcionamiento similar al de los convencionales según (De León, 2016). La desconexión de la lámpara se produce en un tiempo el cual puede ser fijo o ajustable, este se lleva a cabo por un timer interno electrónico. Estos pueden estar en funcionamiento intercalado produciendo ahorros en la energía en la desconexión en horarios que no es requerida la capacidad instalada de alumbrado.

Figura 4. **Componentes internos de fotocontrol de lámpara de alumbrado público**



Fuente: elaboración propia

Tabla II. **Materiales presentes en los componentes de las fotoceldas de sensor fotoresistivo y su clasificación tóxicos y no tóxicos**

Componentes		Materiales	Tóxico	No Tóxico
Cubierta		Propileno		X
Visor		Polímero o metil metacrilato (acrílico)		X
Base Negra		Polipropileno		X
Empaque		Polietileno		X
Conector		Bronce		X
Bobina		Baquelita		X
		Cobre Metálico		X
Sensor de luz		Vidrio, cerámico, Baquelita		X
		Sulfuro de Cadmio	X	
		Resina Sintética Transparente		X
		Cobre Metálico recubierto		X
Resistencia de película de carbón		Carbón		X
		Cerámico		X
		Cobre Metálico Recubierto		X
Resistencia de película de metal		Níquel		X
		Cerámica		X
		Cromo	X	
		Cobre Metálico Recubierto		X
Condensador		Cerámico		X
		Película Metálica		X
		Cobre Metálico Recubierto		X
Soportes, Base, Soporte y Sujetador de Bobina, Rendija de Sensor		Metales no magnéticos		X
Resorte, Bobina, Bases		Metales magnéticos		X
Tornillos, resortes, sujetadores		Acero		X
Soldador		Aleación de estaño plomo	X	X

Fuente: De León Morán, T. M. (2016). *Tratamiento primario de los residuos sólidos provenientes de las fotoceldas utilizadas en los sistemas de alumbrado público.*

Tabla III. **Materiales presentes en los componentes de las fotoceldas de comando electrónico y su clasificación tóxicos y no tóxicos**

Componente	Materiales	Tóxico	No Tóxico
Cubierta	Polipropileno		X
Visor	Polímero de metil metacrilato (acrílico)		X
Base Negra	Acrilonitrilo butadieno Estireno		X
	Polipropileno		X
Empaque	Polietileno		X
	Neopreno		X
Conector	Latón		X
	Bronce		X
Circuito Impreso	Baquelita		X
	Cobre Metálico		X
	Fibra de Vidrio		X
	Aleación Estaño Plomo	X	
Relé	Dióxido de estaño		X
	Cobre Metálico		X
	Aleación de Plata		X
	Polímero		X
	Óxido de Cadmio	X	
Condensador Cerámico	Tungsteno		X
	Cerámico		X
Condensador de Poliéster	Dieléctrico		X
	Poliéster		X
Capacitor	Aluminio		X
	Tantalio		X
	Polímero		X
Circuito Integrado	Silicio		X
	Arseniuro de Galio	X	
	Polímero		X
Diodo	Silicio		X
	Germanio		X
Sensor de Luz	Vidrio		X
	Cerámico		X
	Baquelita		X
	Sulfuro de Cadmio	X	
Sensor de luz	Resina Sintética Transparente		X
	Silicio		X
Resistencia de película de Carbón	Base epóxica		X
	Carbón		X
Resistencia de película de metal	Cerámico		X
	Níquel		X
	Cromo	X	
Terminales	Cerámico		X
	Cobre Metálico Recubierto		X

Fuente: De León Morán, T. M. (2016). *Tratamiento primario de los residuos sólidos provenientes de las fotoceldas utilizadas en los sistemas de alumbrado público.*

Tabla IV. **Materiales reciclables y no reciclables en los componentes de las fotoceldas**

Materiales	Reciclable	No Reciclable
Polipropileno	X	
Poliétileno	X	
Polímero de metil metacrilato (acrílico)	X	
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	X	
Neopreno	X	
Bronce	X	
Latón	X	
Cobre	X	
Acero	X	
Aleación Estaño Plomo	X	
Metales No Férricos	X	
Metales Ferrosos	X	
Baquelita		X
Arseniuro de Galio		X
Fibra de Vidrio		X
Tantalio	X	
Silicio	X	
Germanio	X	
Cerámico		X
Sulfuro de Cadmio		X
Resina Epóxica		X
Poliéster	X	
Aluminio	X	
Dióxido de Estaño		X
Aleación de Plata	X	
Oxido de Cadmio		X
Tungsteno	X	

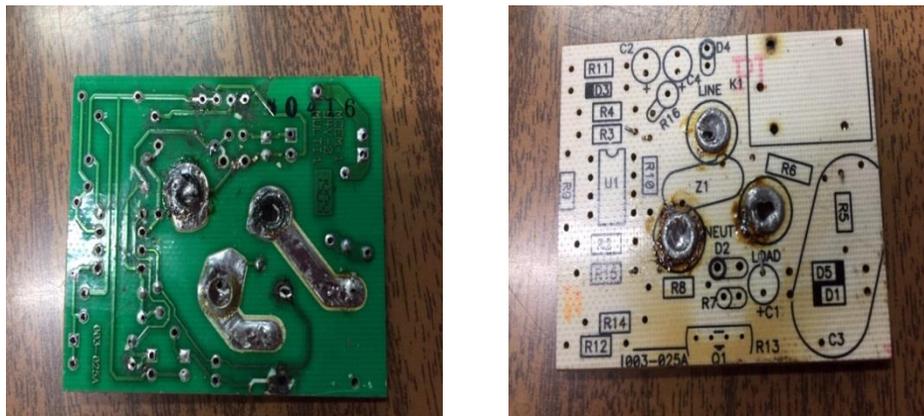
Fuente: De León Morán, T. M. (2016). *Tratamiento primario de los residuos sólidos provenientes de las fotoceldas utilizadas en los sistemas de alumbrado público.*

1.3. Circuito impreso

El circuito impreso es una parte medular de un fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público. Según (Gallardo, 2015) es un soporte de material aislante donde se conectan entre sí puntos de un circuito eléctrico mediante pistas conductoras adheridas a él. Este suele servir de soporte físico para la colocación y soldadura de los componentes.

El tamaño de los componentes electrónicos se ha reducido en forma considerable, lo que implica menor separación entre pines para circuitos integrados de alta densidad. Los circuitos impresos más sencillos corresponden a los que contienen pistas de cobre (wires) solamente por una de las superficies de la placa, como lo es en este caso para los fotocontroles.

Figura 5. Placa de circuito impreso con pista de cobre solo en un lateral



Fuente: elaboración propia

1.3.1. Materiales utilizados en un circuito impreso

El material conductor se utiliza el cobre metálico con una anchura de 35 μm y 60 μm . Y se tienen dos elementos diferentes, el conocido como PAD, en la zona de cobre donde se suelda la patilla del componente. Las pistas (Wires), son las tiras de cobre que se usan para unir entre sí las patillas de los distintos componentes. (Gallardo, 2015).

La placa es esencial que esté conformado de un buen aislante eléctrico, por lo que puede ser de fibra de vidrio, que regularmente tiene color verde claro y translúcido ya que soportan bien las altas temperaturas. El otro componente es Baquelita, que tiene un color marrón oscuro y opaco, absorben bien la humedad y son de bajo costo pero tienen poca resistencia al calor. También hay de teflón que tiene un color blanco y opaco, se usan para aplicaciones de muy alta frecuencia y tienen un elevado coste.

1.3.2. Tipos de circuitos impresos

Según (Gallardo, 2015) dependiendo del proceso de obtención de las pistas se tienen la placa normal, en donde se dibuja directamente la pista sobre el cobre. Se puede dibujar con un rotulador indeleble o bien mediante pegatinas adecuadas. Los de placa fotosensible, tienen un barniz que es sensible a la luz, que se impresiona mediante una insoladora o cualquier otro foco luminoso adecuado. Dependiendo de las caras y capas utilizadas se tendrán las placas de simple cara, que tienen pistas conductoras en una sola cara de soldadura y los componentes en la otra cara. La conexión de los componentes se realiza solamente en la cara de soldadura. En este caso, son las que presentan el fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público. (Gallardo, 2015).

1.4. Reciclaje

En Guatemala Según el artículo (Prensa Libre, 2015) el reciclaje ha dejado de considerarse una actividad que se dedica a recolectar desechos domiciliarios, para convertirse en una industria que transforma estas materias primas en nuevos productos para su exportación, generando ganancias millonarias. De todo el material que llega a los vertederos, se estima que el ochenta por ciento es reciclable, pero solamente se recupera el cinco por ciento, debido a la deficiente recolección. En Guatemala operan 16 empresas que se dedican al reciclaje y exportación, las cuales integran la Gremial de Recicladores.

Figura 6. Reciclaje de fotocontrol de las lámparas de alumbrado público



Fuente: elaboración propia

1.4.1. Renovables

Según el artículo (Prensa Libre, 2015) entre los productos que se reciclan en Guatemala están el papel, plástico, neumáticos, electrónicos, vidrio, metales, acumuladores, ácido sulfúrico y aceite. Los metales se clasifican en ferrosos y no ferrosos. Estos últimos son exportados e incluyen el aluminio, acero inoxidable, bronce y cobre, siendo este último embalado en tonelada y cotizado para exportación en tres mil quinientos veinte dólares. Entre los materiales que se reciclan en Guatemala se encuentra la chatarra de primera, chatarra de segunda, aluminio, cobre, bronce y latón.

1.4.2. Metales ferrosos

(Toledo, 2012) define a los metales ferrosos como residuos procedentes de la producción, transformación y uso del hierro y el acero que tienen la propiedad de ser magnéticos, lo que en las plantas de reciclaje se facilita su recuperación del resto de la basura por medio de imanes.

Las principales características del hierro puro son:

- Es un material magnético (ferromagnético)
- Color blanco azulado
- Punto de fusión aproximadamente 1500 °C
- Densidad alta 7,87g/cm³

1.4.3. Materiales no ferrosos

Según (Fernández, Arias Montoya , & Portilla, 2010), los materiales no ferrosos por regular tienen menor resistencia a la tensión y dureza que los metales ferrosos. Sin embargo, su resistencia a la corrosión es superior. Su costo es alto en comparación a los materiales ferrosos, pero con el aumento de su demanda y las nuevas técnicas de extracción y refinamiento se han logrado

abatir considerablemente los costos, con lo que su competitividad ha crecido notablemente en los últimos años. Los principales metales no ferrosos utilizados en la manufactura son: aluminio, cobre, magnesio, níquel, plomo, titanio y zinc. Los metales no ferrosos son utilizados en la manufactura como elementos complementarios de los metales ferrosos. También son muy útiles como materiales puros o aleados, los que por sus propiedades físicas y de ingeniería cubren determinadas exigencias o condiciones de trabajo.

1.5. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

Este término hace referencia a cualquier aparato que utilice un suministro de energía eléctrica para su funcionamiento y que haya alcanzado el fin de su vida útil. También comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en que se desecha. (Casas, Cerón, Vidal, Peña, & Osorio, 2015).

Debido a que los RAEE están compuestos por materiales peligrosos como el plomo, cadmio, mercurio y arsénico, el peligro en los destinos finales mencionados radica en que se liberan sustancias tóxicas que impactan negativamente la salud humana y el medio ambiente. Y lo más importante es que contienen componentes que pueden ser reparados y materiales valiosos, como oro, cobre y plata, que se pueden recuperar para reincorporarlos en los procesos productivos como materias primas. (Casas, Cerón, Vidal, Peña, & Osorio, 2015).

1.5.1. Potencial de valorización

Para la selección del RAEE se deben describir los criterios utilizados y a continuación se realizarán.

- **Potencial de reúso o reciclaje:** Se refiere a la tasa mínima, medida como el porcentaje del peso promedio de un RAEE, en que debe ser recuperado un residuo por medio del reúso o reciclaje de componentes, materiales y sustancias. Entendiéndose por reúso la acción de extraer un componente para volver a ser utilizado en un aparato nuevo, desempeñando la mismas funciones para las fue creado. (Casas, Cerón, Vidal, Peña, & Osorio, 2015).

- **Potencial de valorización:** se refiere al mínimo porcentaje, del peso promedio de un RAEE, en que debe ser recuperado un residuo por medio de una o varias de las siguientes opciones de valorización (Casas, Cerón, Vidal, Peña, & Osorio, 2015).
 - Usarlo como combustible o fuente de energía.
 - Generación o recuperación de disolventes.
 - Recuperación o reciclaje de sustancias orgánicas, las cuales no son usadas como disolventes.
 - Recuperación o reciclaje de metales o sus compuestos.
 - Recuperación de ácidos o bases.
 - Recuperación de componentes de catalizadores.
 - Refinación u otros usos de aceites.

- Potencial de contaminación: este se determina calculando la proporción del peso de los componentes peligrosos en el aparato, el cual se muestra en la sección de composición y peso de la caracterización de los RAEE seleccionados. (Casas, 2015).
- Unidades: hace referencia a la cantidad de RAEE generados en el país anualmente. (Casas, 2015).
- Peso RAEE: hace referencia a la cantidad en toneladas, de cada RAEE generadas anualmente en el país. (Casas, 2015).
- Disponibilidad de la información: es la cantidad y calidad de la información encontrada del RAEE requerida por el caso estudio; esta alternativa se califica de 1 a 5. Ya que 5 significa que hay suficiente información y 1 que hay poca. (Casas, 2015).

Tabla V. Importancia de los criterios

	Importancia
Potencial de reúso	16.42%
Potencial de valorización	10.90%
Potencial de contaminación	27.28%
Disponibilidad de información	18.45%
Unidades	12.44%
Peso de RAEE	14.41%

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. recuperado de [Https://www.Researchgate.Net/Publication/282648645](https://www.Researchgate.Net/Publication/282648645).

Tabla VI. Información de los criterios para los RAEE

	Peso RAEE	RAEE (unidades)	Potencial de contaminación	Disponibilidad de información	Potencial de valorización	Potencial de reúso y reciclaje
Neveras	34,595.6	479,867	11.40%	1	80%	75%
Televisores	32,811.1	2389.739	38.83%	3	75%	65%
Lavadoras	17,144.4	435,353	19.29%	1	80%	75%
Computadoras	3,478.3	1,183,091	34.34%	5	75%	65%
Celulares	2,998.0	11,992,110	1.53%	5	75%	65%

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/282648645>

Tabla VII. Matriz de comparación de pares de alternativas

	Potencia I de reúso y reciclaje	Potencial de valorización	Potencial de contaminación	Disponibilidad de información	Unidades	Peso
Neveras	33%	33%	16%	4%	8%	36%
Televisores	11%	11%	30%	18%	19%	35%
Lavadoras	33%	33%	21%	4%	7%	20%
Computadoras	11%	11%	28%	37%	13%	5%
Celulares	11%	11%	4%	37%	53%	4%

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/282648645>.

Tabla VIII. **Resultados de la evaluación de los RAEE**

Ranking	RAEE	Peso (%)
1	Televisores	22.00%
2	Neveras	20.43%
3	Computadoras	19.95%
4	Lavadoras	19.37%
5	Celulares	18.25%

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. Recuperado de <https://www.Researchgate.Net/Publication/282648645>

Tabla IX. **Clasificación de los RAEE según Directiva Europea 2002/96/ CE**

Categoría	Ejemplos
1. Grandes electrodomésticos	Lavadoras, neveras, lavaplatos, estufas.
2. Pequeños electrodomésticos	Planchas, tostadoras, secadoras de cabello, cafeteras.
3. Equipos de tecnologías de la información y telecomunicaciones.	Computadoras, impresoras, celulares, teléfonos.
4. Aparatos eléctricos de consumo	Televisores, radios, videocámaras.
5. Equipos de Iluminación	Luminarias, lámparas fluorescentes.
6. Herramientas eléctricas y electrónicas	Taladros, sierras, máquinas de coser.
7. Juegos y equipos deportivos	Trenes, carros consolas de videojuegos.
8. Equipos médicos	Aparatos de radioterapia, cardiología, diálisis, entre otros.
9. Instrumentos de monitoreo y control	Páneles de control, detectores de humo.
10. Máquinas dispensadoras	Máquinas dispensadoras de bebidas calientes, bebidas frías, latas y productos sólidos.

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/282648645-](https://www.researchgate.net/publication/282648645)

Tabla X. **Clasificación de los RAEE desde una perspectiva de su gestión y manejo**

Categoría	Ejemplos
1. Aparatos destinados a la refrigeración	Neveras, congeladores, otros refrigerantes
2. Electrodomésticos grandes y medianos	Todos los demás electrodomésticos grandes y medianos (menos equipos de categoría 1)
3. Aparatos de iluminación	Tubos fluorescentes, bombillos
4. Aparatos con monitores y pantallas	Televisores, monitores TRC, monitores LCD
5. Otros aparatos eléctricos y electrónicos	Equipos de informática, oficina, electrónicos de consumo (excepto los mencionados en categorías anteriores).

Fuente: Casas, J. D. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/282648645>

1.6. Marco legal

Los desechos sólidos constituyen un aspecto central en las condiciones sanitarias de la población y genera efectos sobre el medio ambiente en todos sus componentes (NATURALES, 2015). Realizar una gestión integral de residuos que incluya la estrategia de evitar, minimizar, tratar, disponer es la clave para lograr una gestión ambientalmente adecuada de los residuos. (PROATITLÁN, 2017).

El Código Municipal (Decreto 12-2002 del Congreso de la República y sus reformas) y el Código de Salud (Decreto 90-97 del Congreso de la República) establecen el marco institucional general para el manejo integral de los desechos y residuos sólidos. En el ámbito institucional municipal existen dos niveles en el abordaje de los asuntos relativos al manejo integrado de los desechos y residuos sólidos, uno político y otro técnico. (AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A., 2017).

Figura 7. **Marco de legislación aplicable**



Fuente: *MULTIPSA*. (2017). *Diagnóstico sobre el manejo de los residuos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán, realizado para el proyecto PROATITLÁN.*

Figura 8. **Propuesta del manejo de los desechos y residuos sólidos comunes por las municipalidades**



Fuente: MULTIPSA. (2017). *Diagnóstico sobre el manejo de los residuos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán, realizado, para el proyecto PROATITLÁN.*

Tabla No. XI. **Tratados y acuerdos internacionales**

Nombre	Instrumento de aprobación / ratificación
Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.	Aprobado por Decreto 3-95 del Congreso de la República ratificado el 25/4/95
Acuerdo Regional sobre los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos	Aprobado por Decreto 6-94 del Congreso de la República. Ratificado el 24/2/94
Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes	Aprobado por 60-2007 del Congreso de la República.
Convenio sobre la protección del Patrimonio Subacuático.	Aprobado por Decreto 64-2007. Ratificado el 15/12/2007
Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático	Aprobado por Decreto 15-95 del Congreso de la República. Ratificado el 3/8/95
Convenio Centroamericano sobre Cambio Climático	Aprobado por el Decreto 30-95 del Congreso de la República. Ratificado el 07/02/96
Convenio para la Conservación de la Biodiversidad y Protección de Áreas Silvestres Prioritarias en América Central.	Ratificado el 10/9/93
Convenio sobre Diversidad Biológica	Aprobado, Decreto 5-95 del Congreso de la República. Ratificado el 14/6/95.
Protocolo de Montreal, relativo a las sustancias agotadoras de la Capa de Ozono, suscrito en Montreal el 16 de septiembre del 1987.	Aprobado, Decreto 34-89 del Congreso de la República.

Fuente: Proatitlan / Multipsa. (2017). *Diagnóstico sobre el manejo de los desechos sólidos en la cuenca del Lago Atitlán*. Panajachel, Sololá, S.A.: Proatitlán.

Figura 9. **Marco legal nacional**



Fuente: MULTIPSA. (2017). *Diagnóstico sobre el manejo de los residuos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán*, realizado, para el proyecto PROATITLÁN.

Tabla XII Constitución de la República de Guatemala

<p>Constitución Política de la República de Guatemala</p>	<p>Artículo 1 Protección a la persona. El Estado de Guatemala se organiza para proteger a la persona humana y a la familia y su fin supremo es la realización del bien común.</p>
	<p>Artículo 2. Deberes del Estado. Es deber del Estado garantizarles a los habitantes de la República la vida, la libertad la justicia, la seguridad, la paz y el desarrollo integral de la persona.</p>
	<p>Artículo 44 Derechos inherentes a la persona humana. El interés social a la Constitución Política de la República de Guatemala predomina sobre el interés particular.</p>
	<p>Artículo 64. Patrimonio Natural. Declara de interés nacional la conservación y protección y mejoramiento del patrimonio natural de la Nación.</p>
	<p>Artículo 93. Derecho a la salud. El goce de la salud es derecho fundamental del ser humano, sin discriminación alguna.</p>
	<p>Artículo 94. Obligación del Estado, sobre salud y asistencia social. El Estado velará por la salud y la asistencia social de todos los habitantes. Desarrollará a través de sus instituciones, acciones de prevención, promoción, recuperación, rehabilitación, coordinación y las complementarias pertinentes a fin de procurarles el más completo bienestar físico, mental y social.</p>
	<p>Artículo 95. La salud, bien público. La salud de los habitantes de la Nación es un bien público. Todas la personas e instituciones están obligadas a velar por su conservación restablecimiento.</p>
	<p>Artículo 97. Medio ambiente y equilibrio ecológico. El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación.</p>
<p>Artículo 98. Participación de las comunidades en programas de salud. Las comunidades tienen el derecho y el deber de participar activamente en la planificación ejecución y evaluación de los programas de salud.</p>	

Continuación tabla XII.

	<p>Artículo 119. Obligaciones del Estado. En los incisos a), c) y d) se refiere a promover actividades productivas y servicios como el turismo, aprovechando los recursos naturales, tomando las medidas para su conservación y velando por la calidad de vida y el bienestar de los habitantes del país.</p>
	<p>Artículo 225 Consejo Nacional de Desarrollo Urbano y Rural. Para la organización y coordinación de la administración pública, se crea el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano y rural coordinado por el presidente de la República e integrado en la forma que la ley establezca. Este Consejo tendrá a su cargo la formulación de las políticas de desarrollo urbano y rural, así como la de ordenamiento territorial.</p> <p>Artículo 253 Autonomía Municipal. Los Municipios de la República de Guatemala, son instituciones autónomas. Entre otras funciones les corresponde:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Elegir a sus propias autoridades. b. obtener y disponer de sus recursos. c. Atender los servicios públicos locales, el ordenamiento territorial de su jurisdicción y el cumplimiento de sus fines propios. <p>Para los efectos correspondientes emitirán las ordenanzas y reglamentos respectivos.</p>
	<p>Artículo 257. Asignación para las municipalidades. El Organismo Ejecutivo incluirá anualmente en el Presupuesto General de Ingresos Ordinarios del Estado, un diez por ciento del mismo para las Municipalidades del país. Este porcentaje deberá ser distribuido en la forma que la ley determine, y destinado por lo menos en un noventa por ciento para programas y proyectos de educación, salud preventiva, obras de infraestructura y servicios públicos que mejore la calidad de vida de los habitantes. El diez por ciento restante podrá utilizarlo para financiar gastos de funcionamiento. Queda prohibida toda asignación adicional dentro del Presupuesto General de Ingresos y Egresos del Estado para las municipalidades que no provenga de la distribución de los porcentajes que por ley les corresponda sobre impuestos específicos.</p>

Fuente: AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A. (2017). *Proyecto fortalecimiento del sistema de gestión de los desechos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán Atn-Me-Gu14314- Pro Atitlan-*.

Tabla XIII. **Leyes nacionales**

	Nombre	Resumen	Entidad responsable
1	<p>Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente Decreto 68-86 del Congreso de la República Reforma No. 75-91 el 23-11-1991; Adición Decreto No. 1-93 el 05-03-1993</p>	<p>El objetivo es velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente para mejorar la calidad de vida de los habitantes del país.</p> <p>Artículo 6. El suelo, subsuelo y límites de aguas nacionales no podrán servir de reservorio de desperdicios contaminantes del medio ambiente o radiactivos. Aquellos materiales y productos que esté prohibida su utilización en su país de origen no podrán ser introducidos en el territorio nacional.</p> <p>Artículo 7. Se prohíbe la introducción al país, por cualquier vía, de excrementos humanos o animales, basuras domiciliarias o municipales y sus derivados, cienos o lodos cloacales, tratados o no, así como desechos tóxicos provenientes de procesos industriales, que contengan sustancias que puedan infectar, contaminar y/o degradar al medio ambiente y poner en peligro la vida y la salud de los habitantes, incluyendo entre él las mezclas o combinaciones químicas, restos de metales pesados, residuos de materiales radiactivos, ácidos y álcalis no determinados, bacterias, virus, huevos, larvas, esporas y hongos zoo y fitopatógenos.</p> <p>Artículo 8. Para todo proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad que por sus características pueda producir deterioro a los recursos naturales renovable es o no, al ambiente o introducir modificaciones nocivas o notorias al paisaje y a los recursos culturales del patrimonio nacional, será necesario previamente a su desarrollo un estudio de evaluación del impacto ambiental, realizado por técnicos en la materia y aprobado por la Comisión de Medio Ambiente.</p> <p>Capítulo III, DE LOS SISTEMAS LÍTICO Y EDÁFICO Artículo 16 El Organismo Ejecutivo emitirá los reglamentos relacionados con:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Los procesos capaces de producir deterioro en los sistemas lítico o de las rocas y minerales y edáfico que provengan de las actividades industriales b. La descarga de cualquier tipo de sustancias que puedan alterar la calidad física, química o mineralógica del suelo o del subsuelo que le sean nocivas a la salud o a la vida humana, la flora, fauna y a los recursos o bienes. 	MARN y Municipidades

Continuación tabla XIII.

2	Reglamento de evaluación, control y seguimiento Ambiental Acuerdo Gubernativo Número 137-2016	Artículo 1 Contenido y objeto. El presente Reglamento contiene los lineamientos, estructura y procedimientos necesarios para apoyar el desarrollo sostenible del país en el tema ambiental, estableciendo reglas para el uso de instrumentos y guías que faciliten la evaluación, control y seguimiento ambiental de los proyectos, obras, industrias o actividades, que se desarrollan y los que se pretenden desarrollar en el país. Lo anterior facilitará la determinación de las características y los posibles impactos ambientales, para orientar su desarrollo en armonía con la protección del ambiente y los recursos naturales.	
3	Código Municipal Decreto No. 12-2002 del Congreso de la República	<p>Artículo 68. Competencias propias del municipio</p> <p>Incisos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Se refiere específicamente a la recolección, tratamiento y disposición de desechos sólidos, limpieza y ornato l) A la promoción y gestión ambiental de los recursos naturales del municipio. <p>Artículo 72. Servicios públicos municipales. Indica el papel regulador de la municipalidad, para establecer, mantener, ampliar y manejar los servicios públicos.</p>	Municipalidades, ANAM
4	Código de Salud, 1997, Decreto No. 90-97 del Congreso de la República	<p>El código de salud reconoce que la salud es un derecho fundamental de las personas.</p> <p>Artículo 1: Del Derecho a la Salud. Todos los habitantes de la República tienen derecho a la prevención, promoción, recuperación y rehabilitación de su salud, sin discriminación alguna.</p> <p>Artículo 5: Participación de la comunidad</p> <ul style="list-style-type: none"> b) En relación con el ambiente, las acciones de promoción y prevención buscarán el acceso de la población con énfasis en la de mayor postergación a servicios de agua potable, adecuada eliminación y disposición de excretas, adecuada disposición de desechos sólidos, higiene de alimentos, disminución de la contaminación ambiental. <p>El Capítulo IV Salud y Ambiente, Sección I Calidad Ambiental.</p> <p>Artículo 68. Ambientes Saludables. El Ministerio de Salud, en colaboración con el Ministerio de ambiente y Recursos Naturales, las Municipalidades y la comunidad organizada. Promoverán un ambiente saludable que favorezca el desarrollo pleno de los individuos, familias y comunidades.</p>	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social

Continuación tabla XIII.

		<p>Artículo 70. Vigilancia de la calidad ambiental. El Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, las Municipalidades y la comunidad organizada con todas las otras instancias apropiadas, sean públicas o privadas, promoverán el desarrollo de programas de cuidado personal y de reducción de riesgos a la salud vinculados con desequilibrios ambientales u ocasionados por contaminantes químicos, físicos o biológicos el Ministerio de Salud velará por el cumplimiento de los acuerdos internacionales ratificados por Guatemala que prohíben el uso de sustancias dañinas al medio ambiente y en consecuencia al ser humano.</p> <p>Artículo 73. Importación de desechos. Se prohíbe la importación de desechos tóxicos, radiactivos y/o difícil degradación.</p> <p>Artículo 74 Evaluación de Impacto ambiental y salud. El Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y las Municipalidades establecerán los criterios para la realización de estudios de evaluación de impacto ambiental, orientados a determinar las medidas de prevención y de mitigación necesarias, para reducir riesgos potenciales a la salud derivados de desequilibrios en la calidad ambiental producto de la realización de obras o procesos de desarrollo industrial, urbanístico, agrícola, pecuarios, turístico, forestal y pesquero.</p> <p>Artículo 75. Sustancias y materiales peligrosos, El Ministerio de Salud y el Ministerio de ambiente y Recursos Naturales en coordinación con otras instancias del sector público y privado, establecerán los criterios o normas y estándares para la producción, importación, tráfico, distribución almacenamiento y venta de sustancias y materiales peligrosos para la salud; el ambiente y el bienestar individual colectivo.</p> <p>SECCIÓN IV, DESECHOS SÓLIDOS</p> <p>Artículo 102 Responsabilidad de las municipalidades. Corresponde a las Municipalidades la prestación de los servicios; de limpieza o recolección, tratamiento y disposición de los desechos sólidos de acuerdo con las leyes específicas y en cumplimiento de las normas continuación de la tabla sanitarias aplicables. Las municipalidades podrían utilizar lugares para la disposición de desechos sólidos o construcción de los respectivos rellenos sanitarios, previo dictamen del Ministerio de Salud y la Comisión Nacional del Medio Ambiente, el que deberá ser elaborado dentro del plazo</p>	
--	--	--	--

Continuación tabla XIII.

		<p>improrrogable de dos meses de solicitado. De no producirse el mismo será considerado emitido favorablemente, sin perjuicio de la responsabilidad posterior que se produjera, la que recaerá en el Continúa tabla XIII funcionario o empleado que no emitió el dictamen en el plazo estipulado.</p> <p>Artículo 104 Lugares inadecuados. Si el Ministerio de salud comprobara que existen lugares en donde se estén depositando desechos sólidos sin llenar los requisitos de la presente ley deberán ser transportados a otros lugares que cumplan con los requisitos sanitarios, con base a un programa que de común acuerdo establezcan las municipalidades respectivas y el Ministerio de Salud.</p> <p>Artículo 107 Desechos sólidos de la industria y comercio, Para el almacenamiento, transporte, reciclaje y disposición de residuos y desechos sólidos, así como de residuos industriales peligrosos, las empresas industriales o comerciales deberán contar con sistemas adecuados según la naturaleza de sus operaciones, especialmente cuando la peligrosidad y volumen de los desechos no permitan la utilización del servicio ordinario para la disposición de los desechos generales. El Ministerio de Salud y la Municipalidad correspondiente dictaminarán sobre la base del reglamento específico sobre esta materia</p>	
5	<p>Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la adaptación Obligatoria ante los Efectos de Cambio Climático y los efectos Gases de Efecto Invernadero Decreto No.7-2013 del Congreso de la República</p>	<p>En sus considerandos contempla la prevención de la contaminación del ambiente, el derecho humano a un ambiente saludable y ecológicamente equilibrado.</p> <p>Artículo 1 Objeto El objeto de la presente ley es establecer las regulaciones necesarias para prevenir, planificar y responder de manera urgente, adecuada, coordinada y sostenida a los impactos del cambio climático en el país.</p> <p>Artículo 2. Fin. La presente ley tiene como fin principal, que el Estado de Guatemala a través del gobierno Central, entidades descentralizadas, entidades autónomas, las municipalidades, la sociedad civil organizada y la población en general adopte prácticas que propicien condiciones para reducir la vulnerabilidad, mejoren las capacidades de adaptación y permitan desarrollar propuestas de mitigación de los efectos del cambio climático producto por las emisiones de gases de efecto invernadero.</p>	<p>MARN Apoyado por SEGEPLAN, funcionará como Secretaría del Consejo Nacional de Cambio Climático.</p>

Continuación tabla XIII.

6	Ley de los Consejos de Desarrollo Urbano y Rural Decreto Número 11-2002	Artículo 3. Objetivo. El objetivo del Sistema de Consejos de Desarrollo de políticas de desarrollo, planes y programas presupuestarios y el impulso de la coordinación interinstitucional, pública y privada.	Alcaldes, Gobernadores, Población, Civil, organizaciones del sector privado, Instituciones de Gobierno
7	Ley de Educación ambiental Decreto Número 38-2010	Artículo 1. Tiene por objeto incluir la educación ambiental permanente, en el sistema educativo nacional, en los diferentes niveles, ciclos, grados y etapas del sistema escolar, en sus distintas modalidades; en centros educativos públicos, privados y por cooperativas, en el entorno multilingüe, multiétnico y pluricultural.	MINEDUC
8	Listado Taxativo de Proyectos, Obras, Industrias o Actividades. Acuerdo Ministerial No. 199-2016	Este acuerdo que define el Listado Taxativo "Se establece dado que la correcta aplicación del Artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, requiere además del Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, la utilización complementaria de un instrumento que permita a la autoridad ambiental y por sus características, enumerar y categorizar los proyectos, obras, industrias o actividades como de Alto, Moderado y Bajo Impacto Ambiental Potencial. A continuación, lo relativo a recolección tratamiento y eliminación de desechos sólidos, recuperación de materiales (reciclaje) División 38, grupo 381,,382, 83: recolección, tratamiento y eliminación de desechos; recuperación de materiales (reciclaje). División 39, grupo 390: actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de desechos.	MARN

Fuente: AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A. (2017). *Proyecto fortalecimiento del sistema de gestión de los desechos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán Atn-Me-Gu14314- Pro Atitlan-*.

Tabla XIV. **Otros reglamentos y acuerdos gubernativos relevantes**

- Acuerdo Gubernativo Número 333-2011, Emitir la Disposición para Regular las Exportaciones de Desechos, desperdicios y Recortes de Plástico de Poli (Tereptalato de Etileno) (PET).
- Acuerdo Ministerial Número 431-2011 del Ministerio de Economía, Normativo del Procedimiento para la Administración de la Cuota y Otorgamiento de Licencia de Exportación de Desechos, Desperdicios y Recortes de Plásticos (Tereptalato de Etileno).
- (PET) de Conformidad con lo Establecido en el Acuerdo Gubernativo Número 333-2011.
- Acuerdo gubernativo Número 278-2008, Acuerda emitir las disposiciones para regular las exportaciones de desechos (chatarra) de metal.
- Acuerdo Gubernativo Número 332-2004, Prohibir la Quema Indiscriminada de Llantas en el Territorio Nacional.
- Acuerdo Gubernativo Número 351-96, Reglamento para Depósitos de Petróleos y Productos Petroleros.

Fuente: AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A. (2017). *Proyecto fortalecimiento del sistema de gestión de los desechos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán Atn-Me-Gu14314- Pro Atitlan-. Sololá.*

Tabla XV. **Políticas vinculadas al manejo Integrado de los desechos y residuos sólidos**

	Nombre	Resumen	Entidad rectora
	<p>Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos Acuerdo Gubernativo No. 281-2015</p>	<p>Objetivo general: Implementar y fortalecer la gestión integral de residuos y desechos sólidos con los actores y sectores involucrados a través de la participación social para propiciar un desarrollo sostenible en Guatemala.</p> <p>Objetivos Intermedios:</p> <p>A)Promover la creación y aplicación del marco jurídico y normativo idóneo que permita una efectiva gestión integral de los residuos y desechos sólidos con las instituciones e instancias responsables mediante el soporte necesario a las municipalidades y mancomunidades como entes operadores del manejo de los residuos y desechos sólidos, en coordinación con, y liderazgo del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social e Instituto de Fomento Municipal y la Secretaría de Coordinación Ejecutiva de la Presidencia</p> <p>La creación de planes sectoriales para la gestión integral y manejo a nivel municipal y mancomunal de residuos y desechos sólidos.</p> <p>b) Monitorear, controlar y evaluar las acciones e impactos que genera la gestión integral de los residuos y desechos sólidos mediante la implementación de un sistema de información ambiental a nivel nacional y local que facilite la generación de diagnósticos, planes, análisis u otros estudios territoriales que sirvan de apoyo en la búsqueda de financiamiento y favorezcan el fortalecimiento integral de las municipalidades y mancomunidades en esta materia.</p> <p>c)Fortalecer la capacidad técnica y administrativa en las instituciones e instancias responsables a través de su operatividad y asignación de recursos para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos.</p>	

Fuente: AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A. (2017). *Proyecto fortalecimiento del sistema de gestión de los desechos sólidos en la cuenca del Lago de Atitlán Atn-Me-Gu14314- Pro Atitlan-. Sololá.*

1.7. Reciclaje de metales

Es importante tomar en cuenta el proceso de separación y preparación de las piezas metálicas, previo al tratamiento de ataques ácidos o alcalinos. Por ello se presenta el siguiente esquema de tratamiento del acero.

Figura 10. **Esquema de proceso utilizado para el reciclaje del acero de hojalata**



Fuente: Toledo, R. D. (2012). *Reciclado O Recuperación De Metales Y Compuestos Metálicos Ferrosos*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/161056521/Reciclado-O-Recuperacion-N-De-Metales-Y-Compuestos-Metalicos-Ferrosos>

1.8. Análisis elemental cualitativo de elementos por fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica no destructiva, rápida, multielemental, de alta precisión y amigable con el ambiente en comparación a otros métodos de detección elemental. Según (Skoog, 2007). Se ha aplicado de forma extensiva en control de calidad de materias primas, monitoreo ambiental, estudios geológicos, inspección de alimentos entre otros ya que permite efectuar análisis elemental sobre muestras sólidos, líquidas e incluso gaseosas.

Las características mencionadas hacen de la fluorescencia de rayos X una de las mejores herramientas a disposición del químico para identificar o detectar elementos (análisis cualitativo) en diferentes muestras.

El análisis espectrométrico cualitativo consiste en obtener el espectro de rayos X de la muestra, identificar los picos/bandas correspondientes a los elementos presentes en la muestra y en algunas ocasiones clasificar cada elemento constituyente como mayoritario, minoritario o traza en función de la intensidad de los picos/bandas. Para obtener el espectro, la muestra se coloca en espectrómetro de rayos X, es irradiada con un haz primario de rayos X que produce fluorescencia de rayos X compuesta por líneas espectrales de los elementos que constituyen la muestra, estas líneas espectrales son características en energía por lo que resulta práctico tener a la mano una tabla con estos valores. (Skoog, 2007).

La identificación elemental es una actividad que se perfecciona con la práctica, la primera consideración que debe tomarse en cuenta trata de las líneas elementales K, en general las líneas $K\alpha$ son muy intensas y las líneas $K\beta$ presentan una intensidad de 1/5 respecto a la línea $K\beta$ (adicionalmente las últimas son más energéticas).

La segunda consideración es respecto a las líneas L, usualmente estas consisten de al menos tres líneas más o menos igualmente espaciadas hacia energías más altas. La más fuerte es la $L\alpha_1$, usualmente la $L\beta_1$ es ligeramente menos intensa y la LY_1 presenta una intensidad menor o igual a 0.4 respecto a la $L\alpha_1$. Si un elemento se encuentra en concentraciones muy altas se pueden observar más líneas L.

Por último, si una línea $K\alpha$ es muy débil la línea $K\beta$ puede que sea indistinguible del ruido de fondo. Por ejemplo, las líneas de $K\beta$ de los elementos 9-17 (del flúor al cloro) son muy débiles en relación a las líneas de $K\alpha$ por lo que pueden ser no detectables.

1.9. Procesos hidrometalúrgicos y purificación

Según (Chaverra, 2014), los procesos hidrometalúrgicos son quizá, los más estudiados para su aplicación en el tratamiento de residuos de tarjetas de circuito impreso. Son una opción prometedora debido a los costos de capital, de la reducción del impacto ambiental por el potencial de recuperación de metales y son métodos adecuados para su aplicación a pequeña escala.

Como los metales presentes en los residuos de las tarjetas de circuito impreso se encuentran en forma elemental o en aleaciones, es necesario un proceso de lixiviación oxidante para la extracción efectiva de los metales de interés. Las principales propuestas consisten en lixivitaciones ácidas de metales base seguidas de la lixiviación de metales preciosos.

La lixiviación por vía ácida de metales implica distintas reacciones químicas usando ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico y un agente o ligando acomplejante como el amoniaco en presentación acuosa como es el hidróxido de amonio.

Tabla XVI. **Ecuaciones propuestas**

Reacciones químicas	Energía de gibbs
$2\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CuSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-416.011 kJ
$2\text{Cu} + 2\text{HCl} + 1/2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$	-445.527 kJ
$2\text{Cu} + 4\text{HNO}_3 \longrightarrow 3\text{CuNO}_3 + \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	-227.242 kJ
$\text{Cu} + 2\text{NH}_3 + 1/2\text{O}_2 + 2\text{NH}_4 \longrightarrow \text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{+2} + \text{H}_2\text{O}$	

Fuente: Chaverra Arias, D. E. (2014). *Extracción De Cobre A Partir De Tarjetas De Circuito Impreso De Residuos Electrónicos.*

Según (Chaverra, 2014), para la extracción de cobre se han estudiado diferentes procesos en solución acuosa empleando ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno como oxidante, cloro, ácido nítrico y extracción por solventes; soluciones de amonio-sulfato de amonio, métodos electroquímicos, procesos de tratamiento previo con agua súper crítica combinado con lixiviación ácida. Posterior proceso electrocinético con ácido clorhídrico donde se degradan los polímeros y se oxida el cobre a óxido cuproso y óxido cúprico.

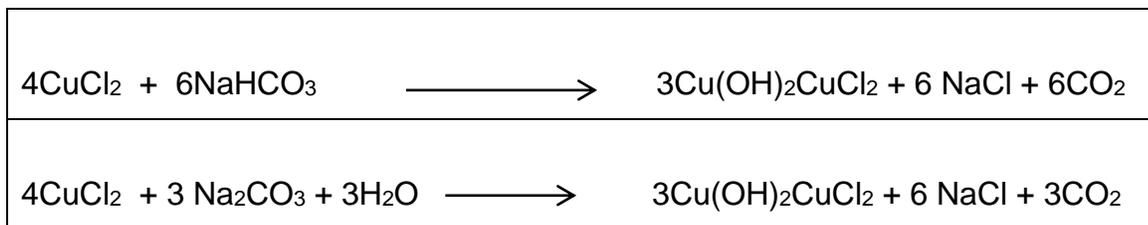
La importancia del cobre y sus aleaciones para la sociedad de hoy radica en la aplicación para procesos industriales y en la agricultura, ya que presenta baja toxicidad para las plantas y animales.

El oxiclорuro de cobre (II) $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ se escribe usualmente como $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. El nombre comercial es oxiclорuro de cobre o cloruro de cobre básico; el nombre (IUPAC) aceptado internacionalmente es trihidroxido cloruro de dicobre. El oxiclорuro de cobre se encuentra en la naturaleza como los minerales paratacamita, cristales hexagonales verdes, y atacamita, cristales rómbicos verdes. Es virtualmente insoluble en agua, disuelve en ácidos minerales o ácido acético caliente, y es soluble en amonio y soluciones de cianuro álcali-metal.

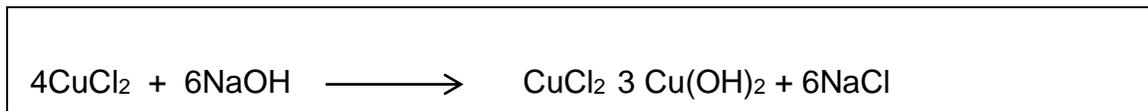
El oxiclорuro de cobre verde se convierte en hidróxido de cobre (II) azul en solución fría de hidróxido de sodio y en el óxido en solución caliente de hidróxido de sodio. El oxiclорuro de cobre verde según (Chaverra, 2014) es un fungicida concentrado en forma de polvo, que actúa de forma preventiva y curativa contra diversas enfermedades causadas por hongos. Efectivo, especialmente contra roya, mildiu, antracnosis, altemanria, bacteriosis, monila y repilo. Se presenta en forma de gránulos dispersables de fácil dosificación (sin

polvo) y rápida disolución (sin grumos), lo que permite una cobertura uniforme y duradera sobre la vegetación tratada.

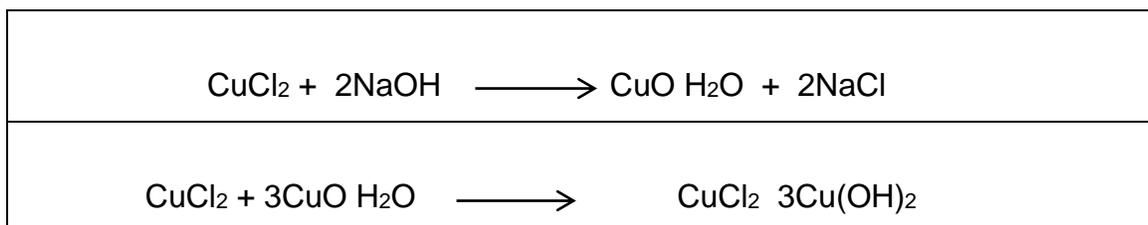
Se puede obtener oxiclورو de cobre ($\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$) a partir de una solución de cloruro de cobre (II) (sal ácido – CuCl_2) con solución de bicarbonato de sodio o con solución de carbonato de sodio, según las reacciones.



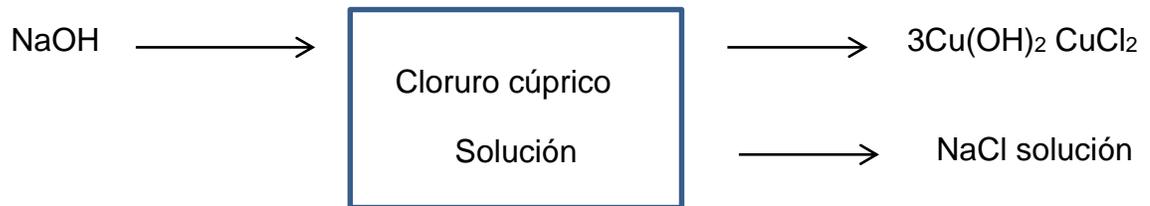
El oxiclورو de cobre se puede preparar también por la reacción de una solución de cloruro cúprico con hidróxido de sodio según la reacción:



Por reacción de una solución de cloruro cúprico con óxido de cobre (II) hidratado recién precipitado, según las ecuaciones:



Balance de masas para la obtención de oxiclорuro de cobre a partir de una solución de cloruro de cobre (II)



Fuente: Chaverra Arias, D. E. (2014). *Extracción De Cobre A Partir De Tarjetas De Circuito Impreso De Residuos Electrónicos*.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Tipo de estudio

El presente estudio es descriptivo en la primea etapa y será útil para establecer la implementación de una metodología de recuperación de cobre del circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público.

Tabla XVII **Variables independientes y dependientes**

No.	Variable	Dependiente	Independiente	Cualitativa	Cuantitativa
1	Dimensión del circuito impreso				
2	Porcentaje en masa de metales detectados por fluorescencia de rayos X				
3	Reactor de lixiviación				
4	Lixivante ácido				
5	Lixivante alcalino				
6	Agente acomplejante				
7	Concentración de ácido				
8	Potencial de Hidrógeno				
9	Temperatura				
10	Tiempo de Lixiviación ácido				
11	Concentración del metal extraído				

Fuente: elaboración propia.

2.2 Fases

El desarrollo de la investigación se realizó en cuatro fases como se describe a continuación.

2.2.1 Fase preliminar de gabinete

- Revisión de trabajos de investigación realizados para la generación de bibliografía y marco teórico referente a la temática de cambio de lámparas de alumbrado público. También se recopilará la bibliografía pertinente.
- Revisión de la información acerca de la recuperación de metales a partir de desechos eléctricos y electrónicos en Guatemala y a nivel internacional.

Investigación acerca del tratamiento de desechos eléctricos y electrónicos a nivel municipal.

2.2.2 Fase de Campo

- Se Visitó la Municipalidad de San Diego Zacapa para la recolección de muestras de fotocontroles de encendido de las lámparas de alumbrado público.
- Se realizó un muestreo al azar de fotocontrol que tenga tarjeta de circuito impreso para la extracción de cobre.
- Se separó mecánicamente los componentes de las fotoceldas y se determinó la masa del circuito impreso al cual se le hará la separación de cobre.

2.2.3 Fase de laboratorio

Esta fase fue realizada en el laboratorio de análisis físicoquímico del Centro de Investigaciones de Ingeniería y en el laboratorio de Química General edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería.

Separación mecánica de los componentes de las fotoceldas para obtener el circuito impreso:

- Se llevó a cabo la separación mecánica de los componentes de la fotocelda. Se separó la parte de polímero con desarmador.
- Se separó del circuito impreso las partes electrónicas con cautín y desarmador, y se retiró en mayor parte la soldadura de estaño con la misma técnica.
- Se midió la masa del circuito impreso, esto con la finalidad de determinar por electrogravimetría la cantidad de cobre o sales de cobre recuperadas por lixiviación.

Análisis de fluorescencia de rayos X

- Se cortó el circuito impreso los moldes circulares para realizar el análisis de cualitativo por Fluorescencia de rayos X, donde se detectó la cantidad de cobre distribuida en el circuito impreso.
- En el caso de análisis de sólidos, se redujo el tamaño de partícula con un mortero y se colocó la cantidad en el carrete circular para realizar el análisis.
- Se obtuvo los espectros de Fluorescencia de rayos X que indicaron la presencia del cobre y de otros metales.

Lixiviación ácida y electrogravimetría aplicada para la obtención de sales de cobre

- Se cortó el circuito impreso con una tijera para metales en forma de cuadros.
- Se utilizó la campana de extracción de gases exclusivamente para la lixiviación y primera redox de la obtención de cobre y sales de cobre.
- Se colocó el circuito impreso en las partes reducidas en un *beacker* de 250 mL., Luego se vertió una alícuota de 25 mL ácido nítrico al 65%. Se notó presencia de dióxido de nitrógeno.
- Se armó un equipo de balón de fondo plano conectado en la parte superior con un tubo de vidrio de forma de U, a un *earlenmeyer* con agua. Se tuvo el cuidado que la punta del tubo de vidrio tocara la superficie del agua.
- Se introdujo el circuito impreso cortado en cuadros reducidos dentro del balón de fondo plano y se vertieron 25 mL de ácido nítrico al 65%. Se colocó un tapón de hule en la boca del balón y rápidamente se revisó que estuviera bien conectado al *earlenmeyer* con agua, para poder recoger el dióxido de nitrógeno.
- Se dejó en lixiviación estática durante 24 h. Se observó la formación de una solución de color verde intensa, siendo el nitrato de cobre.
- Se filtró la solución verde de color intensa, quedando en el embudo las partes de la placa de bakelita de color amarillo donde se observó que ya no estaban adheridas las pistas de cobre.
- Se preparó una solución de bicarbonato de sodio 1M para verter las muestras de bakelita y neutralizarlas. Se dejaron por 24h hasta. Se filtró y se secaron a temperatura ambiente. Se midió la masa de los cuadros de bakelita secos.

Obtención de cobre metálico por redox con aluminio y nitrato de cobre

- Se trabajó en la campana de extracción. Se vertió en un *beacker* de 25mL la solución de nitrato de cobre y se vertió a esta solución 5 gramos de cloruro de sodio. Se homogenizó la solución con agitación magnética.
- Se midió 0.5 gramos de aluminio metálico en cuadros y se sumergió a la solución de nitrato de cobre. Se empezó a visualizar la reacción dos minutos después del contacto del aluminio.
- Se observó formación de gas, por lo que se mantuvo encendida la campana de extracción de gases todo el tiempo.
- Se dejó lixiviar y que evolucionara la redox durante 48 horas, donde se observó un cambio de color en la solución.
- Se visualizó la solución transparente y un electrodeposición de cobre en el fondo del *beacker*, que contra luz hacía que la solución se tornara café también.
- Se filtró la solución y se recuperó el cobre metálico de color café.
- Se secó el cobre metálico en un horno eléctrico entre 60 °C y 70 °C.
- Se homogenizó el tamaño de partícula del cobre metálico en un mortero.
- Se evaporó la solución que pasó el papel filtro obteniendo una sal de color amarilla y blanca, asumiendo por reacción química que era cloruro de aluminio y nitrato de aluminio.
- Se homogenizó el tamaño de partícula de las sales recuperadas con un mortero. Se midió la masa recuperada y se almacenó.

Obtención de oxiclорuro de cobre

- Se cortó el circuito impreso con una tijera para metales en forma de cuadros.
- Se colocó el circuito impreso en las partes reducidas en un *beacker* de 250 mL, luego se preparó agua regia de la siguiente manera. Se vertió una alícuota de 25 mL ácido nítrico al 65 % y 50 mL de ácido clorhídrico
- Se sumergió la tarjeta de circuito impreso y se notó presencia de dióxido de nitrógeno.
- Se dejó reposando por 24 h, hasta observar que la placa ya no tenía metal.
- Se filtró la solución obtenida de cloruro de cobre.
- Se separaron alícuotas de 25 mL por muestra y se vertió 25 mL de agua desmineralizada.
- Se vertió una cantidad estequiométrica proporcionada de hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de potasio en estado sólido, hasta ver el cambio de color a verde claro encendido.
- Se evaporó la solución homogénea, hasta obtener el sólido.
- Se pulverizó en un mortero cada sal obtenida hasta homogenizar el tamaño de partícula.
- Se midió la masa obtenida de las sales.

Obtención de sulfato de cobre

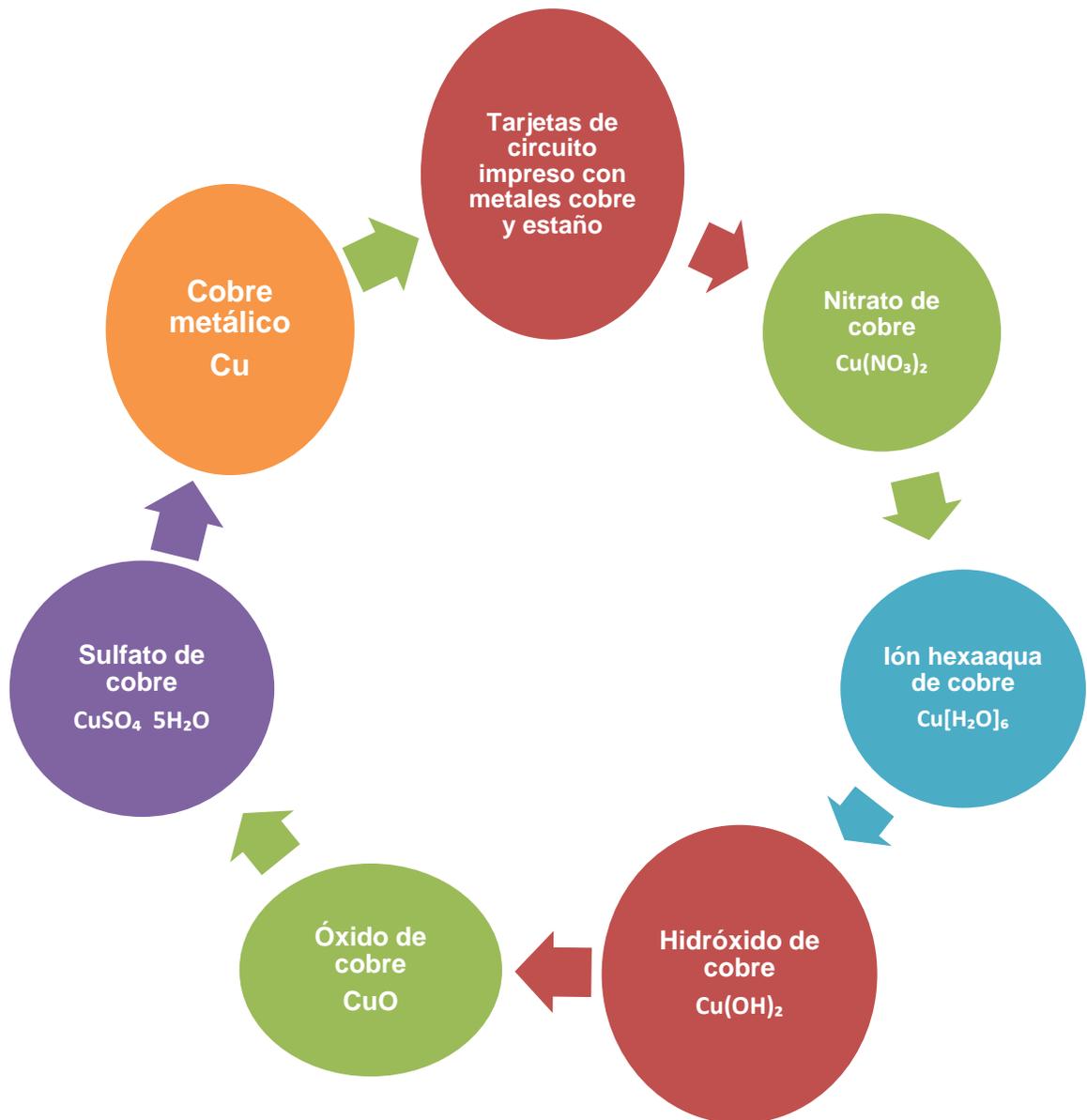
- Se cortó el circuito impreso con una tijera para metales en forma de cuadros.
- Se colocó el circuito impreso en las partes reducidas en un *beacker* de 250 mL, luego se vertió una alícuota de 25 mL ácido nítrico al 65%. Se notó presencia de dióxido de nitrógeno.
- Se vertió 200 mL de agua destilada para formar el complejo acuoso, se homogenizó la solución.
- Se agregó 65 mL de hidróxido de sodio 6M hasta ver un precipitado y un cambio de color celeste en el fondo y se mantuvo el verde en la parte de arriba.
- Se calentó la solución bifásica anterior a una temperatura mayor a 115⁰C hasta ver un cambio de color café oscuro a negro y formación de precipitado que fue el óxido de cobre.
- Se decantó el líquido sobrenadante y se lavó el precipitado tres veces con porciones de 50mL de agua destilada.
- Se añadió al precipitado o sólido 65 mL de ácido sulfúrico 6M, hasta que se disolvió todo el precipitado y se observó un color celeste homogéneo en toda la solución.

Figura 11. Ciclo de reacciones realizadas para la obtención de cobre metálico y sus sales



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Ciclo de lixiviación con ácido nítrico de las tarjetas de circuito impreso recomendado para obtención de cobre metálico y sales de cobre**



Fuente: elaboración propia.

2.2.3.1 Ciclo de reacciones realizadas para la obtención de cobre y sales de cobre

Se mostraron dos esquemas de proceso de extracción del cobre con las marchas analíticas aplicadas en el orden en que se corrieron en el laboratorio. Esto se sintetizó el trabajo realizado para obtener los productos según las marchas analíticas que se presentaron anteriormente. También se presentó el ciclo de lixiviación con ácido nítrico recomendado de acuerdo al orden del equilibrio y espontaneidad de las ecuaciones químicas. Y el orden de acuerdo a la efectividad es que se realizó la redox, con este ácido. Durante la experimentación se hizo de manera paralela, la lixiviación con ácido nítrico y agua regia. Luego se sugirió una dilución para formar un ion complejo de agua. Para los productos de ambos se realizó, debido a la facilidad de la ruptura del enlace del agua.

Para continuar el ciclo se llevó a cabo la reacción con hidróxido de sodio, para formar el hidróxido de cobre. Se realizó un calentamiento arriba de los 115 °C para obtener un precipitado de óxido de cobre. Se hace la aclaración que a partir del nitrato de cobre se puede obtener el óxido de cobre, pero al aplicar energía y una elevación de temperatura los productos gaseosos como el óxido de nitrógeno son muy tóxicos y se producen en una cantidad significativa. Por lo que se recomienda seguir el último ciclo ilustrado.

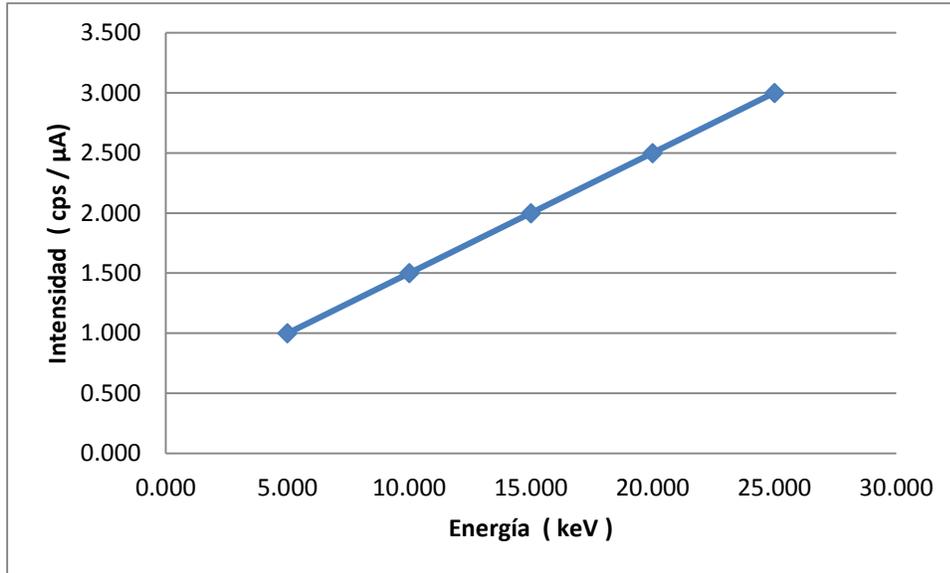
Al tener el óxido de cobre como un precipitado color negro se hizo reaccionar con ácido sulfúrico para obtener finalmente el sulfato de cobre pentahidratado. Una vez visualizada en solución el color celeste intenso se pudo observar la formación del mismo. En la presente investigación se realizó la obtención del cobre a partir del nitrato de cobre con aluminio, generando una fuerza electromotriz mayor y una confirmada espontaneidad.

Tabla XVIII. **Masa y área de las tarjetas de circuito impreso**

Muestra	Masa (Kg)	Área del circuito impreso m²
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Espectro de fluorescencia de rayos X de la placa de circuito impreso**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Ácidos para la primera fase de lixiviación de extracción de cobre**

Ácido	Concentración molar (mol /L)	Volumen (mL)
Acido Sulfúrico (H ₂ SO)		
Ácido Clorhídrico (HCl)		
Ácido Nitrico (HNO ₃)		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Agente acomplejante y álcali para recuperación de cobre**

Lixivante	Reactivo	Concentración molar (mol /L)
Agente acomplejante	Agua	
Álcali	Hidróxido de sodio	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Ciclo de lixiviación con agua regia**

muestra	Concentración de agua regia (M)	cloruro de cobre extraído (mL)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Ciclo de lixiviación del circuito impreso con ácido nítrico**

Muestra	Concentración de ácido nítrico (M)	Nitrato de cobre extraído (kg)
1		
2		
3		
4		
5		
.		
.		
12		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII **Ciclo de Lixiviación del producto obtenido del circuito impreso con álcalis**

muestra	Concentración de álcali (M)	Oxicloruro de cobre (kg)
1		
2		
3		
4		
5		
.		
.		
12		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Cuarta lixiviación del producto obtenido del circuito impreso con agente acomplejante**

Muestra	Concentración de ácido nítrico	Nitrato de cobre extraído
1		
2		
3		
4		
5		
.		
.		
12		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Oxicloruro de sodio obtenido de la reacción secuencial con álcalis**

muestra	Oxicloruro de cobre a partir de bicarbonato de sodio (kg)	Oxicloruro de cobre a partir de carbonato de sodio (kg)	Oxicloruro de cobre a partir de hidróxido de sodio (kg)
1			
2			
3			
4			
5			
.			
.			
12			

Fuente: elaboración propia.

2.2.4 Fase final de gabinete

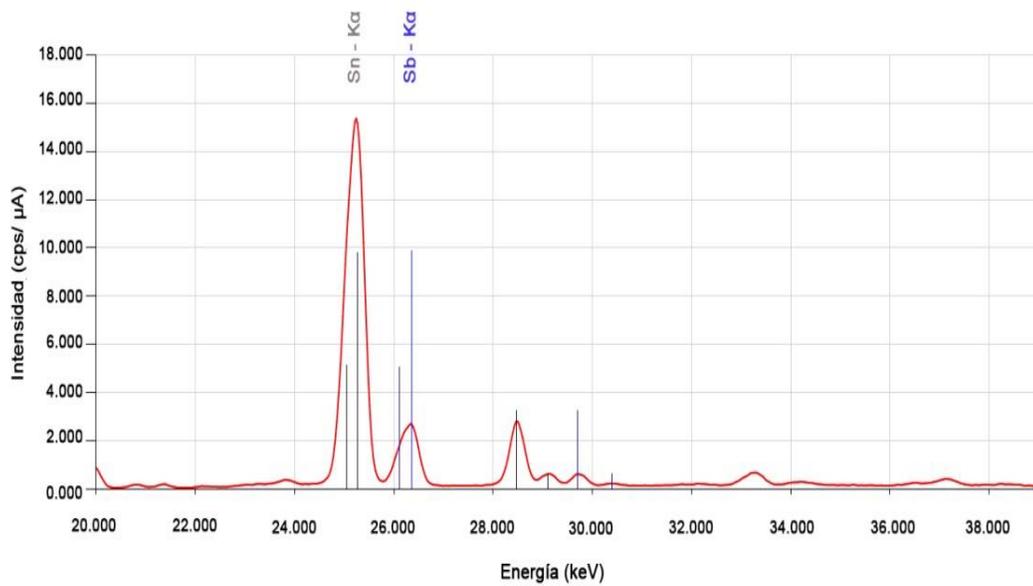
Con la fase de campo y experimental de laboratorio concluida, los datos se recopilaron y se realizó la evaluación e interpretación de los resultados. Se compilaron los resultados las tablas y gráficas para establecer relaciones o proporcionalidad y llegar a determinar el potencial del uso de las sales de cobre obtenidas y del cobre metálico.

2.2.5 Resultados esperados

El proceso de lixiviación ácida y alcalina es un tratamiento químico muy utilizado para la separación de metales de superficies de polímeros o de bakelita. Como fin principal de la investigación se recuperó cobre metálico y otras sales del circuito impreso de las fotoceldas de encendido de las lámparas de alumbrado público. Para posteriormente evaluar y presentar la propuesta del potencial uso de dichas sales recuperadas como abono, fungicida, bactericida preventivo eficaz para combatir un gran número de enfermedades criptógamas en diversos cultivos frutales, papa, tomate, café, tabaco y plátano.

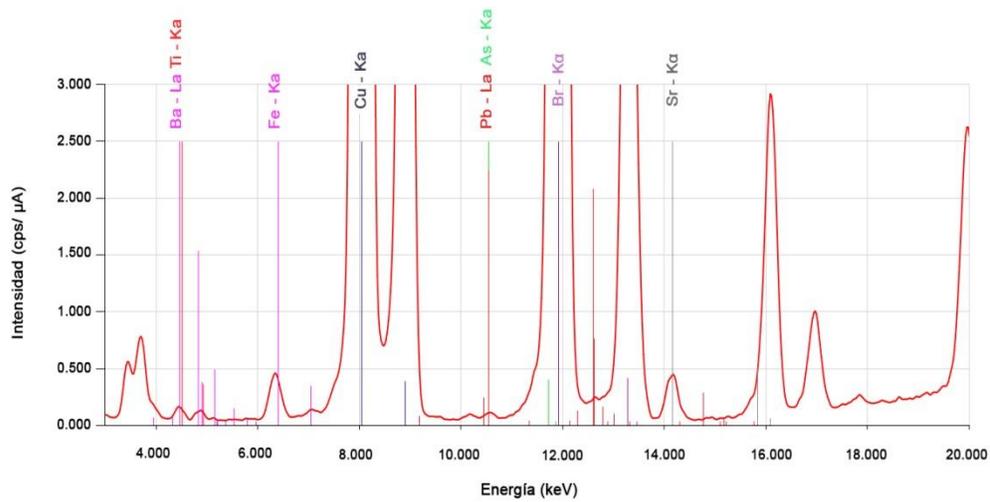
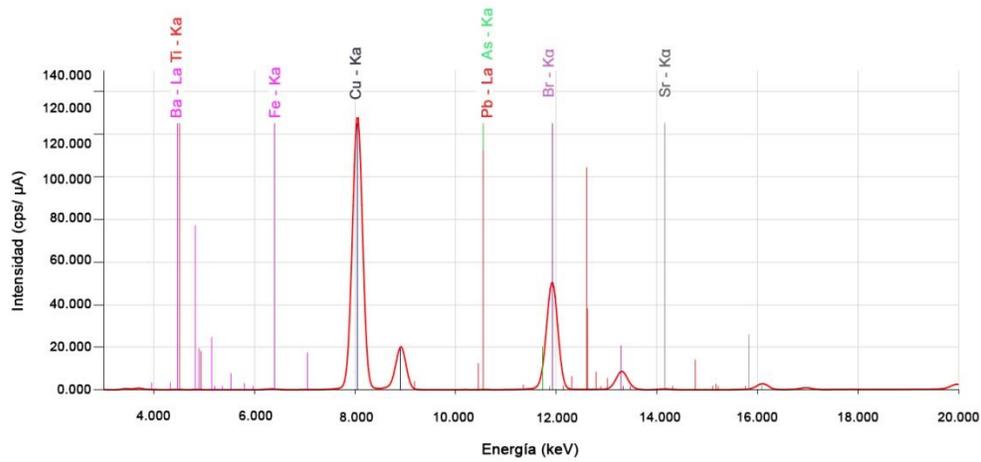
3. RESULTADOS

Figura 14. **Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol encendido de la lámpara de alumbrado público para la primera muestra**



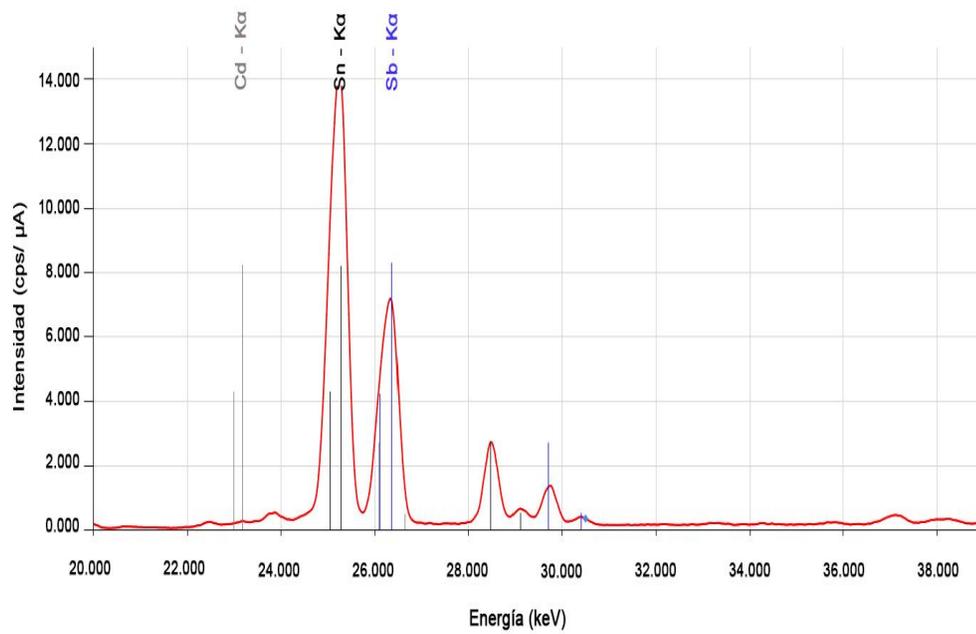
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la primera muestra



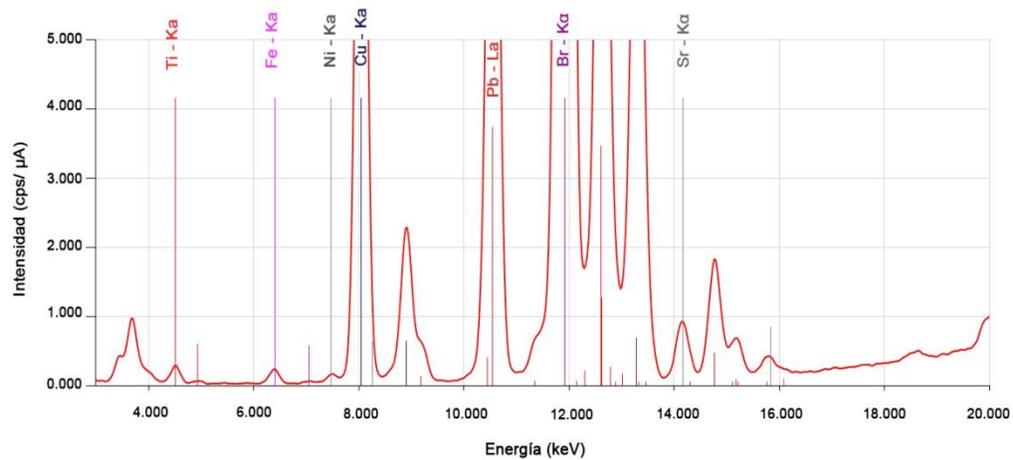
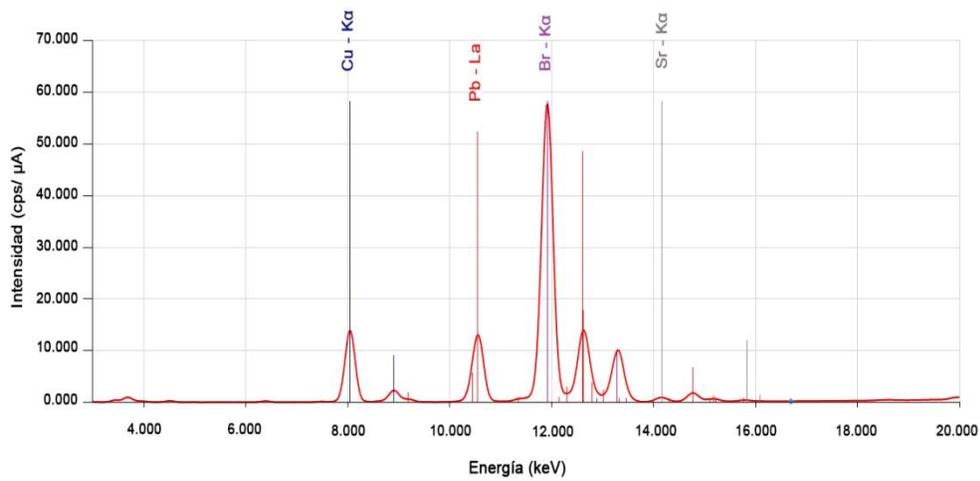
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la segunda muestra**



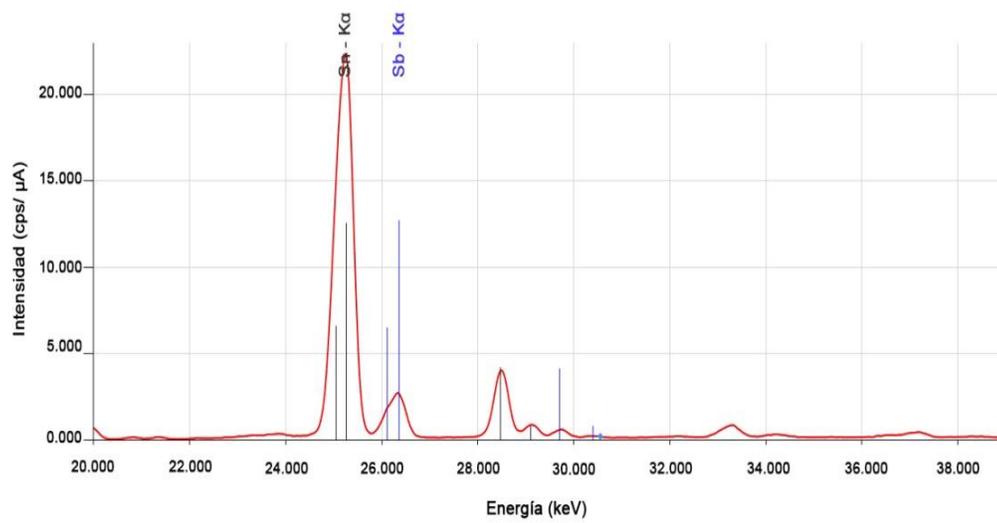
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la segunda muestra



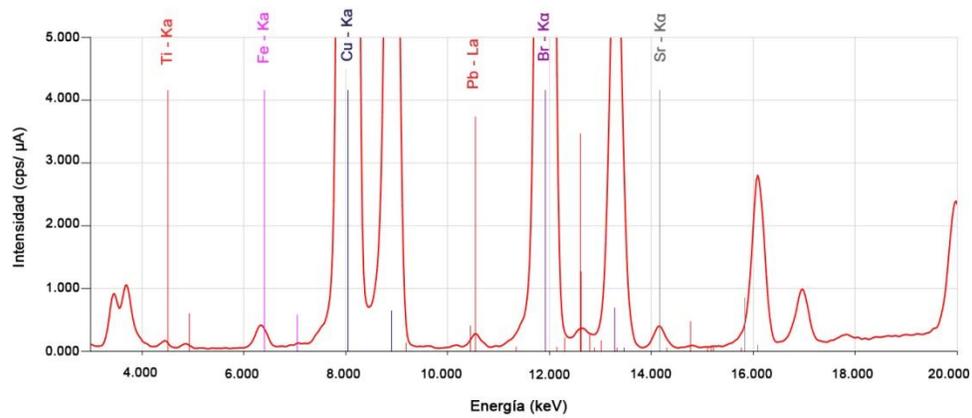
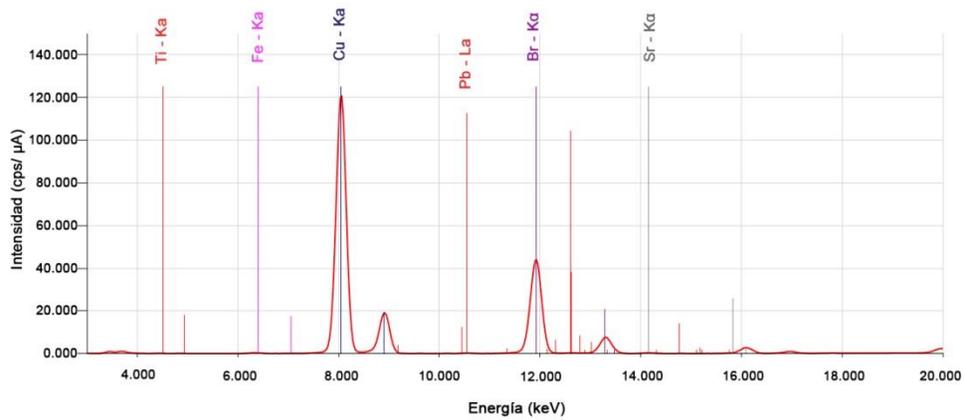
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la tercera muestra**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19 **Espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía en la placa de circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público para la segunda muestra**



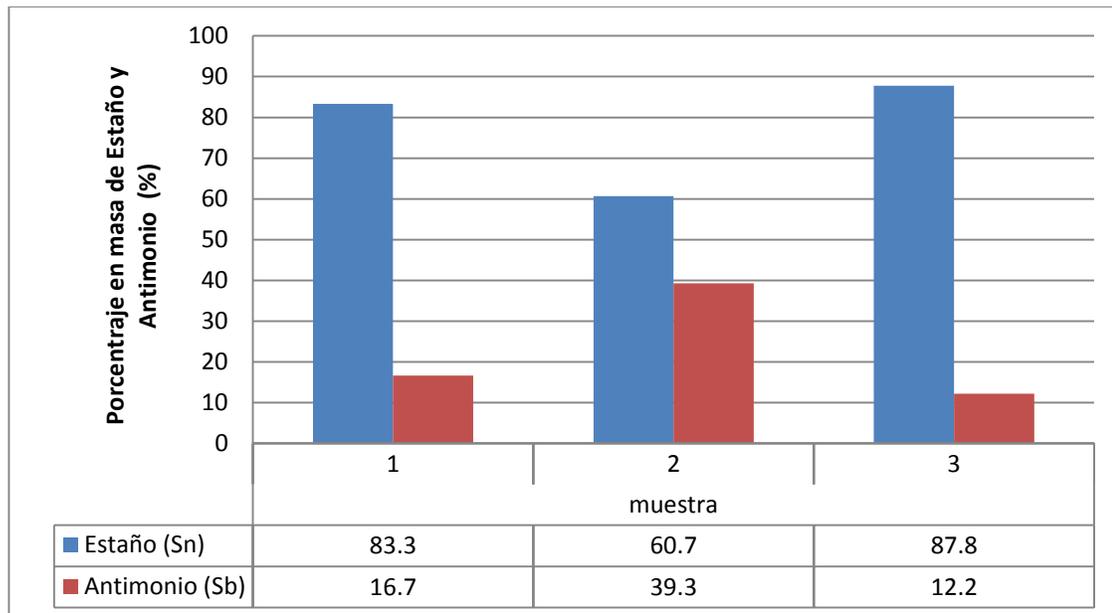
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en parte alta de energía del circuito impreso de los fotocontroles de alumbrado público**

muestra	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
1	Estaño (Sn)	83.3
	Antimonio (Sb)	16.7
2	Estaño (Sn)	60.7
	Antimonio (Sb)	39.3
3	Estaño (Sn)	87.8
	Antimonio (Sb)	12.2

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte alta del circuito impreso de las fotoceldas de alumbrado público**



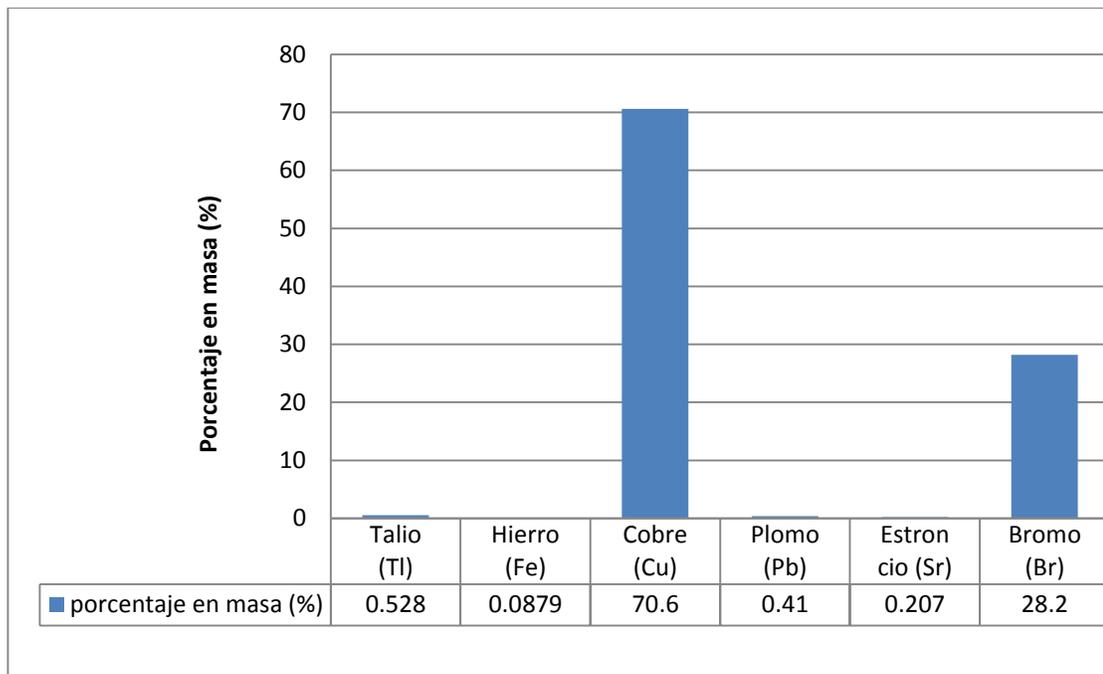
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso de las fotoceldas de alumbrado público**

muestra	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
1	Hierro (Fe)	0.0968
	Cobre (Cu)	69
	Bario (Ba)	2.02
	Plomo (Pb)	0.103
	Bromo (Br)	28.5
	Estroncio (Sr)	0.21
	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
2	Talio (Tl)	5.71
	Hierro (Fe)	0.614
	Níquel (Ni)	0.176
	Cobre (Cu)	16.6
	Plomo (Pb)	27.5
	Bromo (Br)	48.3
	Estroncio (Sr)	1.15
	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
3	Talio (Tl)	0.528
	Hierro (Fe)	0.0879
	Cobre (Cu)	70.6
	Plomo (Pb)	0.41
	Estroncio (Sr)	0.207
	Bromo (Br)	28.2

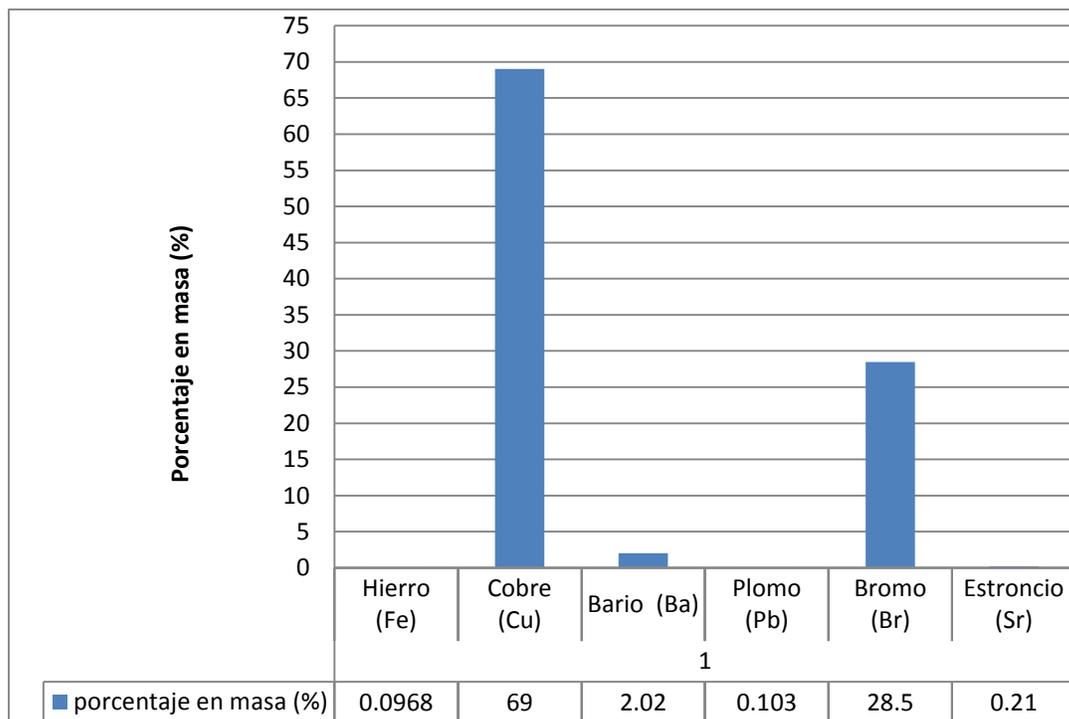
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la primera muestra



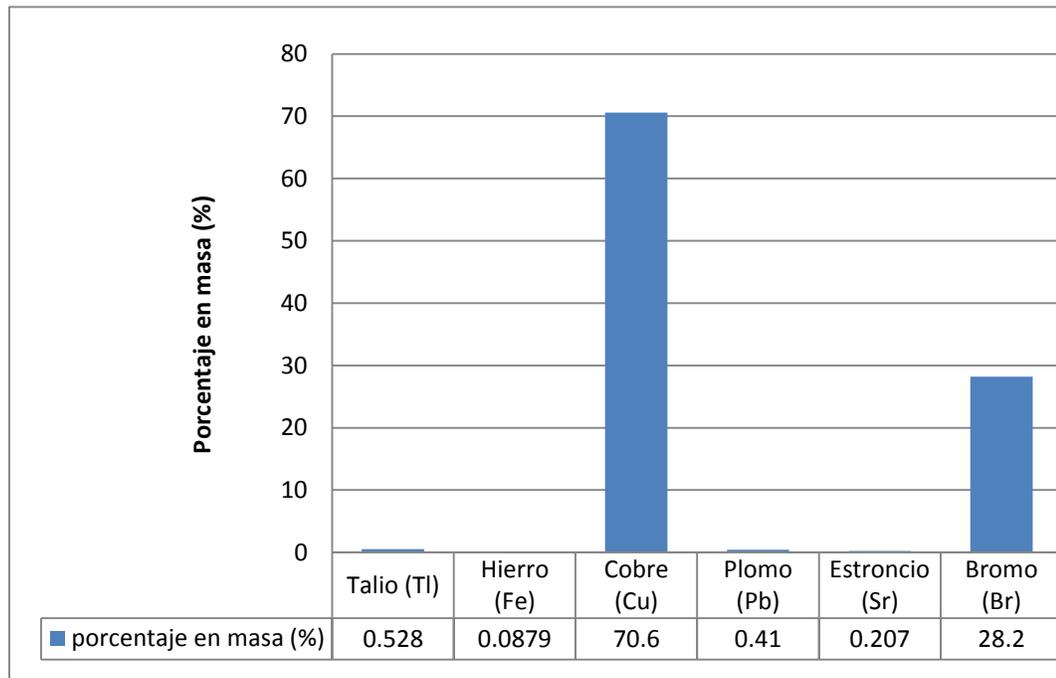
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja de energía del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la segunda muestra**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Porcentaje en masa de los elementos detectados por el espectro de fluorescencia de rayos X en la parte media y baja del circuito impreso del fotocontrol de encendido de la lámpara de alumbrado público en la tercera muestra**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Volumen de solución de nitrato de cobre obtenida como producto del proceso de lixiviación con ácido nítrico al 65% después de veinticuatro horas**

muestra	masa del circuito impreso (kg)	volumen de ácido nítrico reactivo HNO₃ (m³)	volumen de nitrato de cobre producido Cu(NO₃)₂ (m³)
1	7.52E-03	2.50E-05	1.85E-05
2	7.58E-03	2.50E-05	1.86E-05
3	7.24E-03	2.50E-05	1.91E-05
4	7.29E-03	2.50E-05	1.86E-05
5	7.47E-03	2.50E-05	1.85E-05
6	7.33E-03	2.50E-05	1.88E-05
7	7.10E-03	2.50E-05	1.88E-05
8	7.51E-03	2.50E-05	1.87E-05
9	7.59E-03	2.50E-05	1.85E-05
10	7.08E-03	2.50E-05	1.90E-05
11	7.09E-03	2.50E-05	1.81E-05
12	7.42E-03	2.50E-05	1.86E-05
promedio	7.35E-03	2.50E-05	1.87E-05
desviación estándar	1.83E-04	6.78E-21	2.50E-07

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Masa de cobre metálico obtenido por diferencia de la masa inicial del circuito impreso y la masa final posterior a la lixiviación ácida y masa de cobre obtenida por electrogravimetría y redox con aluminio**

muestra	masa inicial circuito impreso (kg)	masa final circuito impreso (kg)	masa de cobre metálico (Cu ⁰) por diferencia de masas (kg)	masa de cobre metálico (Cu ⁰) recuperado (kg)
1	1.00E-03	1.00E-06	1.77E-03	1.31E-03
2	2.00E-03	2.00E-06	1.37E-03	1.25E-03
3	3.00E-03	3.00E-06	9.05E-04	7.65E-04
4	4.00E-03	4.00E-06	1.09E-03	9.65E-04
5	5.00E-03	5.00E-06	1.15E-03	9.78E-04
6	6.00E-03	6.00E-06	1.18E-03	1.01E-03
7	7.00E-03	7.00E-06	1.09E-03	1.25E-03
8	8.00E-03	8.00E-06	1.58E-03	1.04E-03
9	9.00E-03	9.00E-06	1.48E-03	1.03E-03
10	1.00E-02	1.00E-05	9.79E-04	8.67E-04
11	1.10E-02	1.10E-05	9.95E-04	7.54E-04
12	1.20E-02	1.20E-05	1.41E-03	9.94E-04
promedio	6.50E-03	6.50E-06	1.25E-03	1.02E-03
desviación estándar	3.45E-03	3.45E-06	2.57E-04	1.72E-04

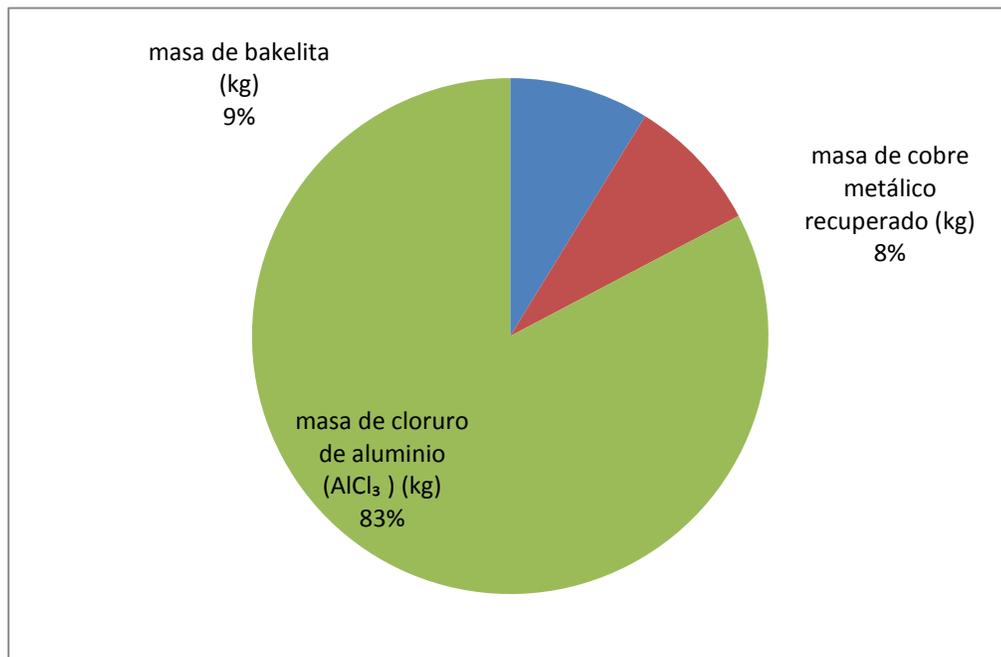
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Masa de cloruro de aluminio obtenido por evaporación posterior al filtrado de cobre metálico obtenido por lixiviación ácida y masa de cobre obtenida por electrogravimetría y redox con aluminio**

Muestra	masa de cloruro de aluminio (AlCl ₃) (kg)
1	1.13E-02
2	1.11E-02
3	1.20E-02
4	1.07E-02
5	1.13E-02
6	1.22E-02
7	1.07E-02
8	1.16E-02
9	1.13E-02
10	1.20E-02
11	1.19E-02
12	1.19E-02
promedio	1.15E-02
desviación estándar	4.86E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Porcentaje de materiales obtenidos por cada circuito impreso de la lixiviación con ácido nítrico y redox con aluminio para obtener cobre metálico**



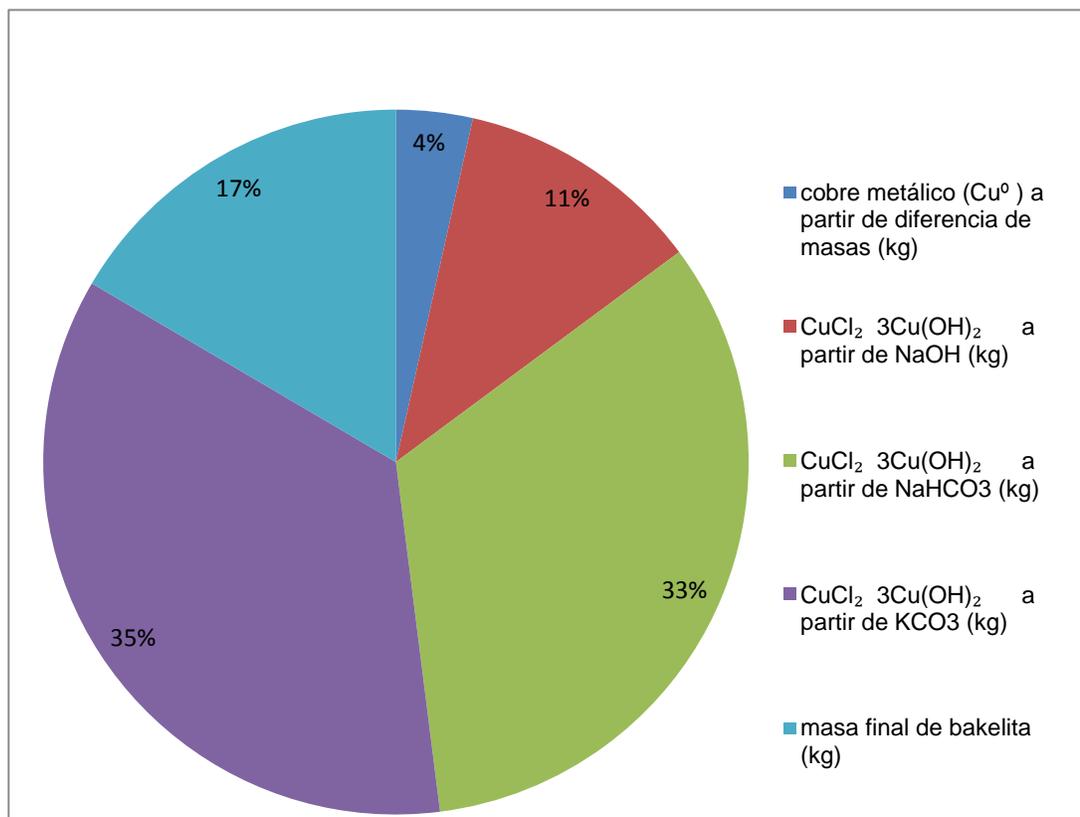
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Masa de oxiclорuro de cobre obtenido a partir de reacción con tres álcalis**

muestra	cobre metálico (Cu ⁰) a partir de diferencia de masas (kg)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaOH (kg)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaHCO ₃ (kg)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de KCO ₃ (kg)
1	1.24E-03	4.11E-03	1.15E-02	1.32E-02
2	1.56E-03	4.21E-03	1.22E-02	1.32E-02
3	1.08E-03	4.12E-03	1.22E-02	1.32E-02
4	1.25E-03	4.11E-03	1.21E-02	1.23E-02
5	1.14E-03	4.34E-03	1.25E-02	1.33E-02
6	1.48E-03	4.11E-03	1.27E-02	1.30E-02
promedio	1.29E-03	4.17E-03	1.22E-02	1.30E-02
desviación estándar	1.73E-04	8.58E-05	3.76E-04	3.35E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Productos de cobre recuperados a partir de lixiviación ácida con agua regia y lixiviación con tres sales alcalinas obtenidas sólidas por evaporación de cada circuito impreso**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Volumen obtenido de tres sales de cobre en solución acuosa del ciclo de reacciones del cobre**

muestra	masa del circuito impreso (kg)	volumen de ácido nítrico reactivo HNO ₃ (m ³)	volumen de nitrato de cobre producido Cu(NO ₃) ₂ (m ³)	volumen de agua para Cu[H ₂ O] ₆ (m ³)
1	7.10E-03	2.50E-05	1.88E-05	2.00E-04
2	7.51E-03	2.50E-05	1.87E-05	2.00E-04
3	7.59E-03	2.50E-05	1.85E-05	2.00E-04
4	7.08E-03	2.50E-05	1.90E-05	2.00E-04
5	7.09E-03	2.50E-05	1.81E-05	2.00E-04
6	7.42E-03	2.50E-05	1.86E-05	2.00E-04
promedio	7.30E-03	2.50E-05	1.86E-05	2.00E-04
desviación estándar	2.14E-04	3.66E-21	2.79E-07	2.93E-20

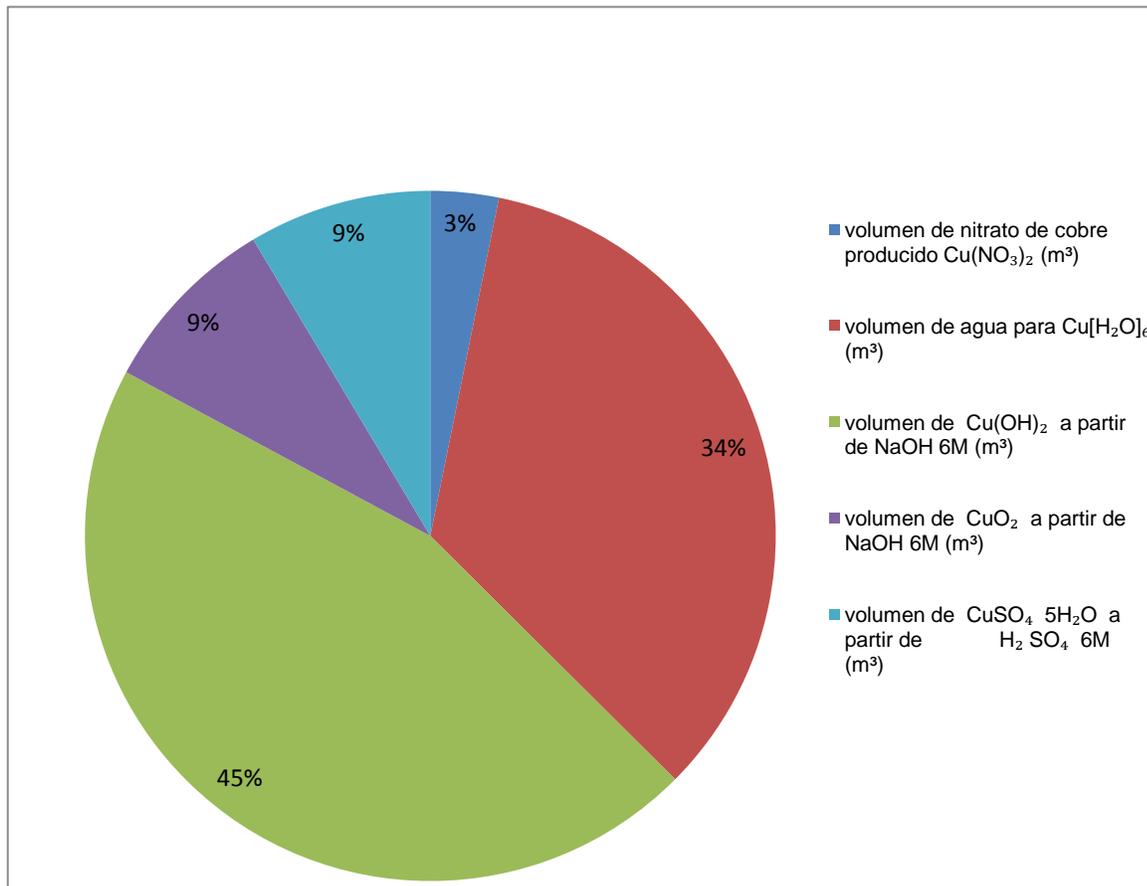
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. Volumen y una masa de productos obtenidos por ciclo de reacción del cobre

muestra	volumen de Cu(OH)_2 a partir de NaOH 6M (m^3)	volumen de CuO_2 a partir de NaOH 6M (m^3)	volumen de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ a partir de H_2SO_4 6M (m^3)	masa de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ por evaporación (kg)
1	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.57E-03
2	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.65E-03
3	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.90E-03
4	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.03E-03
5	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.99E-03
6	2.65E-04	5.00E-05	1.15E-04	1.99E-03
promedio	2.65E-04	5.00E-05	5.00E-05	1.15E-04
desviación estándar	0.00E+00	7.32E-21	7.32E-21	2.46E-05

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Sales de cobre obtenidas por reacciones químicas según su espontaneidad para la obtención de sulfato de cobre pentahidratado por muestra de circuito impreso tratado



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Características, aplicaciones y toxicidad de sales de cobre**

Productos recuperados de Lixiviación	Características Estado de la materia, color	Aplicaciones	Toxicidad
cobre metálico (Cu ⁰)	Polvo color café o marrón	Elemento químico Utilizado en estructuras, tubos, conexiones	TWA 0,2 mg/m ³ Oral (LD-50) mayor >1398 mg/kg rata >2000 mg/kg rata >4,75 mg / L aire, 4h
nitrato de cobre Cu(NO ₃) ₂	Solución acuosa verde oscuro Polvo color verde	Aditivo en las cerámicas, superficies metálicas, en fuegos artificiales y como textil mordiente o colorantes. Síntesis de catalizadores CuO.	Oral 940 mg/kg muy tóxico para organismos acuáticos, para algas 1mg / L
CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaOH NaHCO ₃ y K ₂ CO ₃	Solución acuosa color verde claro intenso Polvo color claro intenso.	Fungicida sirve para combatir enfermedades criptógamas en cultivos frutales y vegetales	Oral aguda DL50 _{rata} 700 – 2000 mg/kg Dérmica DL 50 _{conejo} 2000mg/kg Inhalación aguda DL50 _{rata} 30 (4h) mg/L
Ión hexaaqua de cobre Cu[H ₂ O] ₆	Solución acuosa celeste clara	Base para la preparación de sales de cobre como hidróxido de cobre, sulfato de tetramín cobre y sulfato de cobre	LD ₅₀ oral = 1 a 2 mg/kg
volumen de Cu(OH) ₂ a partir de NaOH 6M	Solución acuosa bifásica verde y celeste claro	Fungicida, bactericida	No sobrepasar 15 mL/ kg de peso en niños LD ₅₀ oral = 1 a 2 mg/kg LD ₅₀ dermal ratas >2mg/kg
volumen de CuO ₂ a partir de NaOH 6M	sólido de color negro	Base para la producción de sulfato de cobre. Usado para producir pinturas y recubrimientos Usado como plaguicida	Límite de exposición 0,2 mg / m ³ 2.92 mg / L
volumen de CuSO ₄ 5H ₂ O a partir de H ₂ SO ₄ 6M	Solución acuosa color celeste intenso ó Sólido color celeste	Utilizado como herbicida o fungicida a frutas y verduras agente antifúngico	OSHA 1mg/m ³ ACGIH 1mg/m ³ Toxicidad aguda en ratas DLSO 472 mg/kg peso corporal
Cloruro de aluminio (AlCl ₃)	Sólido color blanco	antitranspirante combatir la hiperhidrosis	10% m/m – 15% m/m Por formulación

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Detección inicial de cobre por fluorescencia de rayos X

El circuito impreso es la parte del fotocontrol de las lámparas de alumbrado público, que tiene como función ser el soporte de las partes electrónicas que lo componen para su funcionamiento. Ya interconectadas estas partes ayudan a enviar la señal de encendido y así cumplir su función en la luminaria. Los circuitos impresos que conforman las fotoceldas de las luminarias están elaborados de bakelita como superficie y tienen pistas de un material conductor siendo en este caso el cobre metálico.

La finalidad de esta investigación es dar continuidad al tratamiento de los desechos de las fotoceldas. Específicamente se pretende recuperar sales de cobre y cobre metálico, del circuito impreso del fotocontrol de encendido de las lámparas de alumbrado público por lixiviación ácida y alcalina a nivel laboratorio con potencial para ser utilizado como componente de fertilizantes siendo analizando previamente la presencia de cobre y otros metales traza por análisis de fluorescencia de rayos X.

Las fotoceldas seleccionadas fueron las de sensor fotoresistivo que tenían como parte medular el circuito impreso para su funcionamiento. Las muestras seleccionadas al azar fueron 12. Se procedió a la separación mecánica de la fotocelda. Para lo cual se retiró la cubierta y la base con desarmador y alicate. Quedó del circuito con las partes electrónicas. Para separarlas se utilizó un cautín y por fundición del estaño se separaron esas partes, quedando únicamente el circuito impreso.

Para confirmar la distribución de cobre en la placa de circuito impreso. Se hizo un análisis elemental de Fluorescencia de rayos X. Se localizó la distribución porcentual en que se encontró el cobre en la placa. Para fines analíticos, los rayos X se obtienen de cuatro maneras, una por bombardeo de un blanco metálico con un haz de electrones de elevada energía. Dos por exposición de una sustancia a un haz primario de rayos X con el objetivo de generar un haz secundario de fluorescencia de rayos X. tres al usar una fuente radiactiva cuyo proceso de desintegración produce una emisión de rayos X. Cuatro a partir de una fuente de radiación sincrotrón. (Skoog D. A., 2008).

Con los resultados del análisis de espectros de fluorescencia de rayos X, se seleccionó el medio óptimo de extracción por lixiviación ácida para la obtención del cobre y de las sales producto de las reacciones químicas. Para este análisis se escogieron tres placas de circuito impreso. Estando las placas de circuito impreso libres de otras partes electrónicas, se procedió a preparar muestras circulares para ser colocadas en los carretes del equipo. Para preparación de las muestras, se cortó en formas de círculos la placa, para ser colocadas en el carrete del equipo de fluorescencia de rayos X.

En la figura 1 se presentó el primer espectro de rayos X de la parte alta de energía en la placa de circuito impreso para la primera muestra analizada. Se determinó que el metal presente con mayor porcentaje es el estaño. Se encontró un 83.3 % m /m. el otro metal detectado fue el antimonio con un 16.7% m/m. En la figura 2 se mostró el espectro de Fluorescencia de rayos X de la media y baja de energía, de la placa de circuito impreso para la primera muestra. Se determinó que el metal presente con mayor porcentaje es el cobre, encontrando un 69 % m /m. Los otros metales presentes detectados por el equipo de manera ascendente fueron hierro, plomo, estroncio, bario y bromo.

En la Figura 3 se presentó el espectro de rayos X de la parte alta de energía, de la placa de circuito impreso para la segunda muestra analizada. Se determinó que el metal presente con mayor porcentaje es el estaño. Se encontró un 60.7% m /m. el otro metal detectado fue el antimonio con un 39.3% m/m. En la Figura 4 se mostró el espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía de la placa de circuito impreso para la segunda muestra. Se determinó que el cobre representa un 16.6% m/m dentro del circuito impresa, lo que puede indicar un desgaste, deterioro o desprendimiento del metal debido al uso. El elemento presente con mayor porcentaje es el bromo con un 48.3% m/m, seguido de manera descendente por el plomo, talio, estroncio, hierro y níquel.

En la Figura 5 se presentó el espectro de rayos X de la parte alta de energía de la placa de circuito impreso para la tercera muestra analizada. Y se determinó que el metal presente con mayor porcentaje es el estaño. Y se encontró un 87.8% m /m. El otro metal detectado fue el antimonio con un 12.2% m/m. En la figura 6 se mostró el espectro de fluorescencia de rayos X de la parte media y baja de energía de la placa de circuito impreso para la tercera muestra. Se determinó que el metal presente con mayor porcentaje es el cobre, encontrando un 70.6% m /m. Los demás elementos reflejados en el espectro fueron de manera descendente el bromo, plomo, estroncio, talio y hierro.

Posterior a cada espectro de rayos X presentado se compiló en tablas los porcentajes en masa obtenidos de las tres muestras de las tarjetas de circuito impreso. Se realizó gráficas de barras para la visualización de la cantidad de elementos que se detectaron en cada muestra según las partes en que se analizó en el aparato de fluorescencia de rayos X.

Esta determinación cualitativa sirvió para determinar que el mejor medio de extracción sólido-líquido para obtener el cobre metálico en la tarjeta de circuito impreso, era el ácido nítrico, ya que por el potencial estándar de reducción que presenta el cobre y el ácido se llevó a cabo una redox espontánea.

Teniendo el circuito listo para los análisis, se midió la masa de cada muestra de la tarjeta de circuito impreso. La masa promedio determinada fue de $7.53\text{E-}3\text{kg}$ con una desviación estándar $1.83\text{E-}04$ kg. Estas mediciones se utilizaron para los cálculos de la electrogravimetría que se realizó para el procedimiento experimental de la lixiviación ácida, para la obtención de las sales de cobre y del cobre metálico. También se determinó el área de cada muestra de circuito impreso. Partiendo que las muestras presentan una forma geométrica rectangular, se midió con una cinta métrica la base y la altura de la tarjeta. Luego se realizó el cálculo con la ecuación de área. Por lo que se calculó que el área promedio de las tarjetas de circuito impreso es de $2.48\text{E-}03$ m² con una desviación estándar de $1.22\text{E-}04$ m². Con estos observables se procedió a preparar las muestras de tal manera que fueran las idóneas para el análisis cualitativo no destructivo y para la separación química del cobre y sus sales.

4.2 Lixiviación del circuito impreso con ácido nítrico

Como producto de la lixiviación ácida, se obtuvo nitrato de cobre en solución acuosa. En promedio se obtuvo un volumen de $1.87E-05 \text{ m}^3$, lo que indica que hubo una pérdida de volumen por reacción y también debido a la formación de gas dióxido de nitrógeno como producto. Por esta razón se presentó como resultado, la masa de la tarjeta de circuito impreso y el volumen de ácido nítrico utilizado para la maceración estática. Ya que se debe tomar en cuenta que el producto esperado se formó espontáneamente en menor cantidad.

Debido a la formación de gas dióxido de nitrógeno, se armó un equipo de balón de fondo plano conectado en la parte superior con un tubo de vidrio de forma de "U", a un *erlenmeyer* con agua. Se observó la formación de una solución de color verde intensa, siendo el nitrato de cobre. Primera evidencia cualitativa. De igual manera, se midió el volumen y era muy cercano al sistema de maceración estática abierto. Se dejó el mismo tiempo para reaccionar. Y se monitoreó el pH del agua, el cual presentó una ligera acidez.

Este fue el primer ciclo de reacción, donde se llevó a cabo la primera redox espontánea, siendo el nitrato de cobre el producto esperado. El voltaje teórico es de 0.6 V. Lo que ratifica el tiempo que se dejó en maceración estática. Al igual que el valor de la energía de Gibbs, que presentó un valor teórico negativo, con magnitud considerable. El nitrato de cobre fue la sal en equilibrio en solución acuosa obtenida y podría ser aprovechado en este estado de agregación de la materia. Podría ser utilizado como recubrimiento de metales o como materia prima para obtención de otros productos de cobre, como se presentará a continuación.

4.3 Redox con aluminio para obtención de cobre metálico

El siguiente producto que se obtuvo el cobre metálico, para ello se procedió a la segunda redox del ciclo de lixiviación ácida. Teniendo como reactivos la solución de nitrato de cobre anterior y aluminio metálico. Los resultados presentados en este proceso, fueron la masa inicial del circuito impreso y la masa final del circuito impreso para obtener la cantidad de cobre metálico por gravimetría. También se presentó la masa de cobre metálico recuperado por filtración, se secó y se midió la masa en la balanza analítica. Con ello se pudo tener a la vista la cantidad de cobre que había en el circuito impreso y la cantidad de cobre obtenido por reacción con su considerable pérdida de masa debido al manejo de cristalería y manejo instrumental.

Se realizó el cálculo de cobre separado de la bakelita, por diferencia de la masa del circuito impreso al inicio y al final del proceso de la lixiviación y se determinó que la masa promedio de metal separada fue de $1.25 \text{ E-}03 \text{ kg}$ con una desviación estándar de $2.57 \text{ E-}05 \text{ kg}$. La masa de cobre recuperado, vía redox con aluminio fue en promedio de $1.02 \text{ E-}03 \text{ kg}$. Con una desviación estándar de $1.72\text{E-}04\text{kg}$.

Como producto acuoso del filtrado del cobre metálico, se obtuvo solución acuosa de cloruro de aluminio, por lo que se evaporó. Se presentó también la masa del producto de evaporación de cada tarjeta de circuito impreso. El producto fue una sal de color amarilla y blanca, y por reacción química se determinó que era cloruro de aluminio con trazas de nitrato de aluminio. Se procedió a medir la masa promedio obtenida que fue de $1.15\text{E-}02 \text{ kg}$ con una desviación de $4.86 \text{ E-}04 \text{ kg}$. Se presentó una gráfica circular que representa la distribución de compuestos obtenidos de esta segunda redox, por cada circuito impreso.

4.4 Lixiviación con agua regia del circuito impreso

Como ciclo de lixiviación alterno se llevó a cabo una maceración estática con agua regia. El producto obtenido en cada reacción realizada fue el oxiclورو de cobre, que se caracterizó por su color verde encendido o fluorescente. A diferencia del primer ciclo en este, con agua regia se trataron seis muestras. El primer producto obtenido fue el cobre metálico y por gravimetría se obtuvo una cantidad promedio de $1.29\text{E-}03$ kg con una desviación estándar de $1.73\text{E-}04$ kg.

En este procedimiento se utilizaron tres álcalis para reaccionar con el cloruro de cobre en solución acuosa. La primera reacción de doble desplazamiento que se realizó fue con hidróxido de sodio. Se midió la masa obtenida de oxiclورو de cobre sólido, que fue en promedio $4.17\text{ E-}03$ kg y una desviación de $1.73\text{ E-}04$ kg. Fue la sal que dio la menor masa. La segunda reacción realizada fue con bicarbonato de sodio. El promedio de sal oxiclورو de cobre sólido producido, fue de $1.22\text{E-}02$ kg con una desviación estándar de $3.76\text{ E-}04$ kg. Fue la sal que se produjo con un valor de masa mayor. Y la masa producida de oxiclورو de sodio a partir de carbonato de potasio fue de $1.30\text{ E-}02$ kg con una desviación estándar de $3.35\text{ E-}04$ kg. Fue la sal que se presentó en proporción intermedia. Con este procedimiento gravimétrico se tuvo las muestras listas para un posterior análisis de sólidos por fluorescencia de rayos X.

Como resultado también se presentó un diagrama circular, con los porcentajes de los productos obtenidos a partir de esta lixiviación con una regia. Indicando con colores los productos obtenidos a partir de cada reactivo alcalino utilizado. Se ratificó que la reacción de cloruro de cobre con bicarbonato, produce la mayor masa de oxiclورو de cobre del proceso.

4.5 Ciclo de reacciones para obtención de siete productos de cobre

El último ciclo de reacciones generó siete productos o sales de cobre. La característica de este ciclo es que hay diversidad de equilibrios que se desarrollaron para obtener cada producto. El equilibrio químico que se dio en cada etapa favoreció a la formación de los productos, por lo tanto, el principio de *Le chatelier* se dio hacia la derecha. Varios de los productos fueron comunes a los que se habían extraído en los ciclos anteriores. Para este ciclo se presentaron los resultados de seis muestras.

El primer producto obtenido fue el nitrato de cobre, ya que el agente lixivante utilizado fue el ácido nítrico al 65%. Los colores evidenciados fueron característicos de las sales esperadas y a simple vista se pudo notar el cambio a un color verde intenso. El volumen promedio obtenido de nitrato de cobre fue de $1.86E-05 \text{ m}^3$, con una desviación estándar de $2.79E-07 \text{ m}^3$. El siguiente producto obtenido fue el compuesto de coordinación acuoso de cobre, hexacaqua de cobre. Para el caso de la formación del complejo, se confirmó con éxito por medio del color celeste presentado; que a la vez evidenció la formación del enlace covalente dativo.

Se confirmó que el ion central era el cobre y que el ligando fue el agua. Para la formación de este equilibrio del complejo favoreció la disposición de los electrones. Ya que facilitó la formación del siguiente producto. El volumen del compuesto de coordinación en solución acuosa fue de $2.00E-04 \text{ m}^3$ con una desviación estándar de $2.93E-20 \text{ m}^3$. Lo que indica que no hubo un cambio significativo en el volumen por efecto de la reacción química.

El siguiente compuesto obtenido fue el hidróxido de cobre, se obtuvo en solución acuosa, una cantidad de $2.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Con una desviación estándar de cero. Este producto se obtuvo por la reacción química entre el complejo anterior con hidróxido de sodio. Experimentalmente se evidenció la formación del hidróxido de cobre, por el cambio en el aspecto de la solución. Primero hubo un cambio de solubilidad por la textura y aparición de dos fases, de diferentes colores. El color que se observó en la superficie fue un verde claro que indicaba cualitativamente que era nitrato de cobre y en el fondo del *beacker* se tornó un precipitado color celeste, que evidenció la aparición del hidróxido de cobre.

De la solución anterior se obtuvo óxido de cobre, en solución acuosa. Esto se logró por calentamiento del hidróxido de cobre. En promedio se obtuvo un valor de $5.00 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ con una desviación estándar de $7.32 \times 10^{-21} \text{ m}^3$. El color característico del óxido de cobre es negro o café oscuro. Este se confirmó, además se presentó posterior a la reacción en dos fases. Se le hicieron lavados y se separó de la parte acuosa para realizar la última reacción del ciclo. Por la espontaneidad del proceso se cuantificaron los productos en unidades de volumen.

La última reacción en realizarse fue entre el óxido de cobre y el ácido sulfúrico, se sometió la solución a evaporación y se obtuvo un producto sólido que era el sulfato de cobre penta-hidratado con una masa de $1.15 \times 10^{-4} \text{ kg}$ con una desviación estándar de $2.46 \times 10^{-5} \text{ kg}$. El color visualizado fue el característico de este producto. Por lo que se confirmó el éxito de la marcha analítica. Con el orden en que se realizó este ciclo del cobre se podría obtener el cobre metálico en esta última etapa haciendo una redox. Pero se dio la prioridad en la primera parte de las separaciones por lixiviación ácida.

Se presentó una gráfica circular con la distribución de las sales obtenidas de este último ciclo, con esto se puede visualizar el porcentaje de los compuestos obtenidos, siendo el de mayor proporción el hidróxido de cobre, le sigue el compuesto de coordinación de cobre, en la misma proporción se obtuvo óxido de cobre y el nitrato de cobre y se obtuvo en menor proporción el sulfato de cobre penta – hidratado.

4.6 Toxicidad y reutilización de las sales de cobre recuperadas

Se presentó una tabla que recopila los productos obtenidos en la primera columna, en la segunda columna están las características experimentales presentadas de cada compuesto. En la tercera columna se presentó las posibles aplicaciones y en la última columna se encuentra la toxicidad teórica a partir de las MSDS. El primer compuesto recuperado con éxito fue el cobre metálico, con un color café o marrón. Las aplicaciones más comunes es que es utilizado en estructuras, tubos o conexiones. La toxicidad presentada es en magnitudes muy bajas y se realizaron pruebas en ratas. En estado sólido es poco tóxico para el ser humano.

El segundo compuesto obtenido fue el nitrato de cobre, presentó un color verde oscuro, en solución acuosa. En estado sólido color verde intenso. Sus aplicaciones más comunes son, como aditivo en las cerámicas, superficies metálicas, en fuegos artificiales, en textiles como mordiente o colorante. También es utilizado en síntesis de catalizadores de óxido de cobre. Se debe tener cuidado si se realiza la reacción química para obtenerlo, ya que los gases producidos en la reacción son los más tóxicos. La toxicidad más significativa es en organismos acuáticos para algas. Por lo que, no se debe descartar en solución acuosa, cerca de mantos acuíferos, ríos o lagos.

El tercer compuesto obtenido fue el oxiclورو de cobre a partir de tres álcalis, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de potasio. En solución acuosa y en estado sólido presentó un color verde claro intenso. Dentro de las aplicaciones se encuentra como fungicida, sirve para combatir enfermedades criptógamas en cultivos frutales y vegetales. La toxicidad para el ser humano es baja, se encontró que en animales como ratas y conejos los miligramos consumidos deben ser mayores a mil miligramos para intoxicación aguda.

Los compuestos que se quedaron en solución acuosa fueron el complejo de cobre, el hidróxido de cobre y el óxido de cobre. Por lo que el ion hexaaqua de cobre, se presentó en solución acuosa, con un color celeste claro. Dentro de sus aplicaciones puede servir como base para la preparación de sales de cobre como hidróxido de cobre, sulfato de cobre, sulfato de tetrammín cobre y sulfato de cobre. La toxicidad en seres humanos es baja. El siguiente compuesto en solución acuosa es el hidróxido de cobre, se evidenció como una solución bifásica de dos colores, en la superficie color verde claro y en el fondo celeste, que comprobó la formación del hidróxido. En las aplicaciones de este compuesto se encuentra como fungicida y bactericida. La toxicidad debe ser de 15mL/ kg del peso en niños.

La última sal en solución acuosa encontrada fue el óxido de cobre. Se evidenció su formación experimental por el color negro o café oscuro. Dentro de sus aplicaciones se encuentra que la principal es la base para la producción de sulfato de cobre. Usado también para producir pinturas, recubrimientos y también utilizado como plaguicida. El límite de exposición es bajo. Y Poco tóxico para el ser humano.

La última sal de cobre obtenido fue del sulfato de cobre pentahidratado. Presentó un color celeste claro encendido, en solución acuosa y sólido. Las aplicaciones de este compuesto son como herbicida o fungicida en frutas y verduras, agente antifúngico. El último producto enlistado fue el cloruro de aluminio. Este presentó un color blanco. Dentro de sus aplicaciones se encuentra como base para la elaboración de antitranspirante para combatir la hiperhidrosis. Es poco toxico al ser humano.

Las sales de cobre que se recuperaron por evaporación se sometieron a un segundo análisis, por espectrometría de rayos X. Con la finalidad de proporcionar los elementos que están presentes en mayor proporción. Las sales que se sometieron a este segundo análisis fueron. Nitrato de cobre, oxiclورو de cobre a partir de hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de potasio. También se obtuvo el cobre sólido por deposición que presentó un color café. Se analizó el sulfato de cobre con su color celeste característico y por último, el cloruro de aluminio que fue el producto que quedó después de filtrar el cobre metálico depositado.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el análisis de fluorescencia de rayos X a las muestras seleccionadas de las tarjetas de circuito impreso del fotocontrol de las lámparas de alumbrado público y por los espectros reflejados se determinó que el cobre es el metal que se encuentra en mayor proporción en las partes baja y media de energía, que están adheridos a la bakelita. De igual forma, el equipo detectó el porcentaje en masa de varios elementos siendo el cobre el de mayor proporción.
2. La lixiviación realizada con ácido nítrico al 65 % a las tarjetas de circuito impreso fue exitosa y se confirmó que éste ácido por su potencial estándar de reducción es el que reacciona con el cobre de manera eficiente, ya que en veinticuatro horas se logró separar todo el metal de la bakelita, por la espontaneidad de la redox y se formó una solución de nitrato de cobre de color verde o aqua intenso.
3. Los productos obtenidos según las marchas analíticas fueron cobre metálico, nitrato de cobre, oxiclورو de cobre que reaccionó con tres álcalis. También complejo de cobre en solución acuosa, hidróxido de cobre, óxido de cobre, sulfato de cobre y cloruro de aluminio. A cada uno de los anteriores se enlistó su color característico y una posible aplicación, dando también la toxicidad teórica especificada en las fichas técnicas. Tienen diversas aplicaciones, pero la más común es que puede servir en forma de sales como fungicida, plaguicida y herbicida.

4. El agua regia fue un agente lixivante eficiente para separar el cobre vía redox. Teniendo como producto cloruro de cobre en solución acuosa. Para obtener el cobre metálico a partir de una segunda redox con aluminio y zinc no fue favorable, ya que no se obtuvo de manera espontánea el cobre. El cloruro de cobre reaccionó favorablemente con el bicarbonato de sodio, con el hidróxido de sodio y con el carbonato de potasio para formar oxiclорuro de cobre en solución acuosa. Se recuperó por evaporación en forma de sales.

5. Los colores fueron la evidencia cualitativa inmediata en las reacciones químicas realizadas. Los colores características de las sales de cobre son verde intenso para el nitrato de cobre, celeste claro para el complejo de cobre, bicolor para la solución bifásica donde se formó hidróxido de cobre y nitrato de cobre, el color negro distinguió al óxido de cobre, el café al cobre metálico y el celeste intenso al sulfato de cobre pentahidratado.

RECOMENDACIONES

1. La hidrometalurgia es la ciencia que se puede tomar como base para la minería urbana. Los ciclos de las reacciones vía lixiviación ácida y básica son favorables para el re uso de los metales, en forma sólida o de sus sales binarias y ternarias en solución acuosa. Muchos de los elementos químicos como los metales conductores que se pueden separar son componentes fundamentales de fungicidas, alguicidas y plaguicidas.
2. La eficiencia de la recuperación de los elementos metálicos y sus sales depende de la correcta separación y clasificación mecánica de los componentes que integran los aparatos electrónicos. Ya que evita la aparición de elementos trazas que interfieran en la producción de nuevos compuestos químicos.
3. Seguir la comprobación de marchas analíticas establecidas para recuperación de metales y compuestos químicos y así aportar el establecimiento de las metodologías de separación y aprovechamiento de los metales de los aparatos electrónicos en general.
4. Por las dimensiones de los componentes de los fotocontroles de alumbrado público se puede continuar con la separación de elementos metálicos vía lixiviación ácida. En el caso del cadmio favorecería este método de separación y obtención de la sal de este metal. Corroborar la cantidad de ácido lixiviante y el tiempo de maceración.
5. Realizar la determinación de la reutilización o aprovechamiento de los materiales poliméricos y de la bakelita, ya que conforman un porcentaje alto de los componentes de los fotocontroles de alumbrado público.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.AMSCLAE, CECI, Consultora Multiprofesional, S.A. (2017). *Proyecto Fortalecimiento del Sistema de Gestión de los Desechos Sólidos en la Cuenca del Lago de Atitlán Atn-Me-Gu14314- Pro Atitlan-*. Sololá, Guatemala.
- 2.Casas, J. (2015). *Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico*. (U. D. Colombia, Ed.) Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/282648645>.
- 3.Chaverra , D. (2014). *Extracción de Cobre a Partir de Tarjetas de Circuito Impreso de Residuos Electrónicos*. tesis o Trabajo de graduación presentado para optar al título de Magister en Ingeniería de materiales y procesos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- 4.CNEE. (2003). *Comision Nacional De Energía Eléctrica*. Guatemala.
- 5.Código Municipal de Guatemala Decreto 12-2002. (2002). *Descarga Código Municipal de Guatemala Decreto 12-2002 Congreso de La República*. Recuperado de <http://derechoyleyes.com/2013/02/codigo-municipal-de-guatemala-decreto-12-2012/>

6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2012). *Boletín Website*. Recuperado de [Www.Cnee.Gob.Gt](http://www.cnee.gob.gt):
[Www.Cnee.Gob.Gt/Xhtml/Prensa/Boletin%20alumbrado%20publico,%20nov-2012.Pdf](http://www.cnee.gob.gt/Xhtml/Prensa/Boletin%20alumbrado%20publico,%20nov-2012.Pdf)
7. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Gerencia de Proyectos Estratégicos. (2014). *Miniforo Mem-Cyted Eficiencia Energética En Alumbrado Público*. Recuperado [www. cnee.Gob.Gt/.../Alumbrado_Publico-Cnee-2-11-2014_Miniforo_Mem-Cyted...](http://www.cnee.gob.gt/.../Alumbrado_Publico-Cnee-2-11-2014_Miniforo_Mem-Cyted...)
8. De León , T. (2016). *Tratamiento primario de los residuos sólidos provenientes de las fotoceldas utilizadas en los sistemas de alumbrado público*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, escuela de estudios de postgrado, maestría en energía y ambiente. EEGSA Grupo-Ep. (Departamento de Comunicación Corporativa Eegsa). *Informe Anual 2016*. (I. A. 2016, Ed.) Recuperado , de [Https://Eegsa.Com/Wp-Content/Uploads/2016/04/Informe-Anual-2016.Pdf](https://eegsa.com/wp-content/uploads/2016/04/Informe-Anual-2016.Pdf)
9. ENERGUATE. (2017). *Energuate luz de mi tierra*. Recuperado 2019, de [Energuate.Com: Https://Www.Youtube.Com/Watch?V=Pz4opal4ge](https://www.youtube.com/watch?v=Pz4opal4ge)
10. Escobar, G. (4 de Julio De 2012). *Wiki Egi*. Recuperado de equipos y eficiencia en alumbrado exterior en eficiencia energética: [Http://Www.Eoi.Es/Wiki/Index.Php/Equipos_Y_Eficiencia_En_Alumbrado_Exterior_En_Eficiencia_Energ%C3%A9tica](http://www.eoi.es/wiki/index.php/Equipos_Y_Eficiencia_En_Alumbrado_Exterior_En_Eficiencia_Energ%C3%A9tica)
11. Fernández, H. (2010). *Reciclaje de materiales no ferrosos, en busca de una producción mas limpia*. Recuperado de [Http://Revistas.Utp.Edu.Co/Index.Php/Revistaciencia/Article/View/237/97](http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/237/97)

12. Forjas Estilo Español. (2016). *Forjasestilo*. Recuperado de luminaria alumbrado publico: componentes y tipos: Www.Forjasestilo.Es/Noticias/Entry/Luminaria-Alumbrado-Publico-Componentes-Y-Tipos
13. Gallardo, O. (2015). *Fabricación de placas de circuito impreso con proteus*. Universidad de valladolid. Valladolid, España: Universidad De Valladolid, Escuela De Ingenierías Industriales.
14. Gozalo, D. (2017). *Estudio del flujo luminoso para la estabilidad de luminarias*. Valladolid, España: trabajo de graduación. Universidad De Valladolid Facultad De Ciencias.
15. Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Ed.). (S. D. Interamericana Editores, Ed.) México: McGrawHill.
16. Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta Edición Ed.). México D.F., México: Mcgraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A. De C.V.
17. Mogollón, B. (2013). *Plan maestro de mantenimiento preventivo centrado en la confiabilidad para el sistema de alumbrado público del municipio de maracaibo*. Venezuela: trabajo de graduación División de Postgrado, Programa De Postgrado En Gerencia De Mantenimiento. Universidad del Zulia,
18. Monsalve, G. (2009). *Telegestión de alumbrado público en Medellín*. Medellín: trabajo de graduación de la Universidad De San Buena Ventura, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Electrónica.
19. Naturales, M. (2015). *Política nacional para la gestion integral de residuos y desechos sólidos*. Guatemala: Serviprensa, S.A.

- 20.Oliveros H. (2011). *Metodología para pecuperar metales preciosos: oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia, Magister en Ingeniería de materiales y procesos: Facultad De Minas.
- 21.Posada G. (2016). *Elementos Básicos de Estadística Descriptiva para el Análisis de datos*. Medellín , Colombia: Fondo Editorial Luis Amigó.
- 22.Prensa Libre. (2015). *El auge del reciclaje*. (A. L. González, Ed.) *Www.Prensalibre.Com*.
- 23.Prensa Libre. (2017). *Iluminación con tecnología led en espacios públicos se convierte en novedad*. *www.Prensalibre.com*.
- 24.Proatitlan / Multipsa. (2017). *Diagnóstico sobre el manejo de los desechos sólidos en la cuenca del Lago Atitlán*. Panajachel, Sololá, S.A.: Proatitlán.
- 25.Proatitlán. (2017). *Estrategia regional de residuos sólidos de la cuenca del Lago De Atitlan -Ers-*. Panajachel, Sololá: Proatitlán.
- 26.Silva, U. (2009). *Gestión de residuos electrónicos en América Latina*. (P. Matta, Ed.) Santiago de Chile, Providencia: Ediciones Sur/ Plataforma Relac Sur/ Idrc.
- 27.Skoog, D. (2007). *Fundamentos de química analítica* (Octava Edición Ed.). (E. T. Jorge Luis Blanco Y Correo, Trad.) México: Thomson.
- 28.Skoog, D. (2008). *Principios de análisis instrumental* (Sexta Edición Ed.). México: Cenpage Learning Editores, S.A.De Cv.

29. Suntecún, A. (2010). *Tratamiento primario de desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala*. Trabajo de graduación: Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería. Escuela de Estudios de Postgrado.
30. Toledo, R. D. (2012). *Reciclado o recuperación de metales y compuestos metálicos ferrosos*. Recuperado, de <https://es.scribd.com/document/161056521/Reciclado-O-Recuperacion-De-Metales-Y-Compuestos-Metalicos-Ferrosos>
31. Zeceña, C. (2013). *Determinación, evaluación y propuesta del manejo de los desechos sólidos del alumbrado público en el departamento de Guatemala*. Guatemala: Senacyt.

APÉNDICE

Apéndice 1.

Muestra de cálculo

- 1.- Conversión de unidades a las del sistema internacional, para la masa de las tarjetas de circuito impreso, utilizando factor unitario.

$$7.519\text{g} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} = 7.53 \times 10^{-3}\text{kg}$$

Este cálculo se realizó para hacer la conversión de unidades al sistema internacional, de los observables básicos y derivados en toda la investigación. Se Consideró el factor unitario de conversión para el observable en cuestión.

- 2.- Determinación del área de circuito impreso del fotocontrol de encendido de alumbrado público utilizando la ecuación de área de rectángulo.

$$A = b \times h \quad (1)$$

Donde:

A: área de la tarjeta de circuito impreso del fotocontrol de encendido (m^2)

b: base de la tarjeta de circuito impreso del fotocontrol de encendido (m)

h: altura de la tarjeta de circuito impreso del fotocontrol de encendido (m)

Continuación apéndice 1.

Utilizando los valores medidos en unidades del sistema internacional de la primera muestra tarjeta de circuito impreso:

$$b = 0.058 \text{ m}$$

$$h = 0.045 \text{ m}$$

$$A = (0.058 \text{ m}) \times (0.045 \text{ m})$$

$$A = 2.61 \text{ E } -3 \text{ m}^2$$

Este cálculo se realizó para determinar el área de las tarjetas circuito impreso. Los cálculos se encuentran en el apéndice en la sección de datos calculados.

4.- Determinación de la cantidad de cobre por gravimetría de la bakelita, posterior al proceso de lixiviación con ácido nítrico.

$$m_{\text{Cu}} = m_{\text{bal}} - m_{\text{bdl}}$$

m_{Cu} : masa de cobre obtenido por diferencia de masa (kg)

m_{bal} : masa del circuito impreso antes de la lixiviación con ácido nítrico (kg)

m_{bdl} : masa del circuito impreso seco después de la lixiviación ácida. (kg)

Utilizando los valores medidos en unidades del sistema internacional de la primera muestra tarjeta de circuito impreso:

$$m_{\text{Cu}} = 7.52\text{E}-3 \text{ kg} - 5.75\text{E}-3 \text{ kg}$$

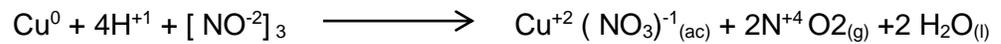
$$m_{\text{Cu}} = 1.79 \text{ E } -3 \text{ kg}$$

Esta ecuación de diferencia de masa inicial y final se aplica en los cálculos de gravimetría que se emplearon en toda la investigación. Al igual que en los procesos de filtración donde se resta la tara del papel filtro. Los datos se encuentran en el apéndice de datos calculados.

Continuación apéndice 1.

5.- Reacción iónica, redox y global, balanceadas para proceso de lixiviación con ácido nítrico al 65%, para la reacción de formación y obtención de nitrato de cobre y potenciales de celda.

Reacción iónica



Balanceo y reacciones redox

Oxidación Ánodo	$\text{Cu}^0 \longrightarrow \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^-$	$E^0 = +0.34\text{V}$
Reducción Cátodo	$(\text{N}^{+5} \text{O}^{-2})_3 + 1\text{e}^- \longrightarrow (\text{N}^{+4} \text{O}_2) + \text{H}_2\text{O}$ $2(2\text{H}^+ + (\text{NO}^-2)_3 + 1\text{e}^- \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$E^0 = +0.94\text{V}$
Reacción Total	$4\text{H}^+ + \text{Cu}^0 + 2 (\text{NO}^-2)_3 + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^- + 2\text{NO}_2$	$E^0 = 0.6 \text{ V}$ total

5. Reacción global



Continuación apéndice 1.

6.- Determinación del potencial de celda de la reacción entre el cobre y el ácido nítrico concentrado.

$$E^0_{\text{total}} = E^0_{\text{cátodo}} - E^0_{\text{ánodo}}$$

Donde:

E^0_{total} : Potencial estándar total de la reacción entre el cobre metálico y el ácido nítrico.

$E^0_{\text{cátodo}}$: Potencial estándar de reducción de la reacción de oxidación.

$E^0_{\text{ánodo}}$: Potencial estándar de reducción de la reacción de reducción.

$$E^0_{\text{total}} = 0.94 \text{ V} - 0.34\text{V} = 0.6\text{V}$$

$$E^0_{\text{total}} = 0.6\text{V}$$

$E^0_{\text{total}} > 0$ proceso espontáneo la reacción favorece a la formación de los productos en este caso a la formación del cobre metálico.

7.- Determinación de la energía de Gibbs para la reacción entre el cobre metálico y el ácido nítrico.

$$\Delta G = -nFE^0$$

Donde:

ΔG : Energía de gibbs (kJ / mol)

n: número de moles de electrones ($2e^-$)

F: Constante de Faraday (96,485 C)

E^0 : Potencial estándar de electrodo total (V)

Continuación apéndice 1.

Utilizando los valores teóricos de la redox entre el cobre y el ácido nítrico, para determinar la energía de Gibbs.

Donde:

$$\Delta G = ? \text{ (kJ / mol)}$$

$$N = 2e^-$$

$$F = 96,485 \text{ C}$$

$$E^0 = 0.6 \text{ V}$$

$$\Delta G = - (2e^-) (96,485 \text{ C}) (0.6\text{V})$$

$$\Delta G = - 115,782.00 \text{ J/mol}$$

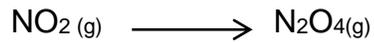
$$\Delta G = - 115.782 \text{ kJ/mol}$$

$\Delta G < 0$ Reacción espontánea que favorece a la formación de los productos

Este mismo cálculo se realizó para todas las reacciones y confirmar su espontaneidad.

8.- La reacción entre el cobre del circuito impreso y el ácido nítrico produjo al reaccionar un gas de color rojo o marrón, con tendencia a amarillo, por lo que esta reacción es reversible, se puede constatar que pudo haber presencia de tetraóxido de dinitrógeno $N_2O_{4(g)}$ y $2NO_2$. Todo esto ocurrió debido a que la reacción es endotérmica de manera que al introducir los beakers en baño maría aumenta el calor y por lo tanto la reacción se desplaza hacia la derecha volviéndose más rojo. Esto ocurre también si se mantiene encendida la campana de extracción de gases. Para el análisis del equilibrio se debe partir del NO_2 es marrón y el N_2O_4 incoloro. Por lo tanto, el contenido al mantener la temperatura y aumentarla favoreció la formación del producto dióxido de

nitrógeno. Al aumentar la temperatura aumenta el NO₂. Por lo tanto, es exotérmica.



Continuación apéndice 1.

$$K_c = K_p = \frac{[\text{N}_2\text{O}_4]}{[\text{NO}_2]}$$

Donde:

[N₂O₄]: Concentración molar del trióxido de dinitrógeno

[NO₂]: Concentración molar del dióxido de nitrógeno.

Utilizando los valores molares de la reacción química se operan en la ecuación.

$$[\text{N}_2\text{O}_4] = 1 \text{ mol / L}$$

$$[\text{NO}_2] = 2 \text{ mol / L}$$

$$K_c = K_p = \frac{[1]}{[2^2]} = \frac{1}{4}$$

$$K_c = 0.25$$

Por el valor obtenido de la constante de equilibrio la reacción química entre el cobre y el ácido nítrico. Favorece el equilibrio a la derecha a la formación de los productos.

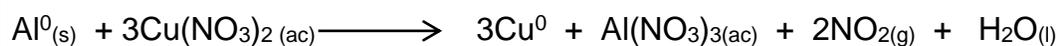
9.- Segunda Redox implicada en el proceso de obtención del cobre metálico a partir del nitrato de cobre obtenida en el primer proceso de lixiviación ácida.

Continuación apéndice 1.

Balaceo y reacciones redox

Oxidación Ánodo	$2 \text{Al}^0 \longrightarrow 2 \text{Al}^{+3} + 6\text{e}^-$	$E^0 = -1.66\text{V}$
Reducción Cátodo	$3 \text{Cu}^{+2} + 6\text{e}^- \longrightarrow 3 \text{Cu}^0$	$E^0 = +0.34\text{V}$
Reacción Total	$3 \text{Cu}^{+2} + 2 \text{Al}^0 \xrightarrow{\text{NaCl}} 2 \text{Al}^{+3} + 3 \text{Cu}^0$	$E^0 = 2 \text{V}$ total

Reacción global



10.- Estequiometría para la determinación de la cantidad de ácido nítrico al 65% en el primer ciclo de lixiviación de la tarjeta de circuito impreso para la obtención de nitrato de cobre y su posterior electrodeposición con aluminio.

$$1.769\text{g} * \frac{1\text{mol Cu}^0}{63.546\text{g Cu}^0} * \frac{4\text{mol HNO}_3}{1\text{mol Cu}^0} * \frac{63\text{g HNO}_3}{1\text{mol HNO}_3} * \frac{100\text{g solución}}{65\text{g}} * \frac{1\text{mL}}{1.51\text{g}} =$$

R: 7.15 mL HNO₃ al 65%

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice 1.

Esta es la cantidad teórica de ácido calculada para lixiviar una muestra de tarjeta de circuito impreso, en base a la cantidad de cobre presente. Según pruebas experimentales hay una pérdida de volumen por la formación de dióxido de nitrógeno y un cambio de volumen por reacción. Por lo tanto se utilizó 25 mL de solución de ácido nítrico al 65%.

11.- Determinación de la cantidad del hidróxido de sodio para el ciclo de reacción y formación del hidróxido de cobre. Para preparar una solución con una concentración de 6M.

$$1L * \frac{6 \text{ mol NaOH}}{1L} * \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 240 \text{ g NaOH}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos calculados y espectros de fluorescencia de rayos Complementarios realizados a las sales obtenidas Área de las tarjetas de circuito impreso y conversión a unidades SI

muestra	base (cm)	altura (cm)	area (cm ²)	base (m)	altura (m)	area (m ²)	area (m ²)
1	5.8	4.5	26.1	0.058	0.045	0.00261	2.61E-03
2	5.2	4.5	23.4	0.052	0.045	0.00234	2.34E-03
3	5.2	4.5	23.4	0.052	0.045	0.00234	2.34E-03
4	5.7	4.5	25.65	0.057	0.045	0.00257	2.57E-03
5	5.7	4.5	25.65	0.057	0.045	0.002565	2.57E-03
6	5.8	4.5	26.1	0.058	0.045	0.00261	2.61E-03
7	5.2	4.5	23.4	0.052	0.045	0.00234	2.34E-03
8	5.8	4.5	26.1	0.058	0.045	0.00261	2.61E-03
9	5.2	4.5	23.4	0.052	0.045	0.00234	2.34E-03
10	5.2	4.5	23.4	0.052	0.045	0.00234	2.34E-03
11	5.7	4.5	25.65	0.057	0.045	0.002565	2.57E-03
12	5.7	4.5	25.65	0.057	0.045	0.002565	2.57E-03
media	5.517	4.500	24.825	0.055	0.045	0.002	0.002
Varianza	0.073	0.000	1.479	0.000	0.000	0.000	0.000
DS	0.2703	0.0000	1.2163	0.0027	0.0000	0.0001	0.0001

Masas de las tarjetas de circuito impreso

muestra	masa (g)	masa (kg)	masa (kg)
1	7.519	0.007519	7.52E-03
2	7.578	0.007578	7.58E-03
3	7.241	0.007241	7.24E-03
4	7.286	0.007286	7.29E-03
5	7.469	0.007469	7.47E-03
6	7.332	0.007332	7.33E-03
7	7.100	0.007100	7.10E-03
8	7.508	0.007508	7.51E-03
9	7.591	0.007591	7.59E-03
10	7.079	0.007079	7.08E-03
11	7.090	0.00709	7.09E-03
12	7.416	0.007416	7.42E-03
media	7.351	0.007	0.007
DS	0.183	0.000	0.000
Varianza	3.701	0.000	0.000

Continuación apéndice 2.

Masa y área de las muestras de circuito impreso

muestra	base circuito impreso (m)	altura circuito impreso (m)	área circuito impreso (m ²)	masa circuito impreso (kg)
1	0.058	0.045	2.61E-03	7.52E-03
2	0.052	0.045	2.34E-03	7.58E-03
3	0.052	0.045	2.34E-03	7.24E-03
4	0.057	0.045	2.57E-03	7.29E-03
5	0.057	0.045	2.57E-03	7.47E-03
6	0.058	0.045	2.61E-03	7.33E-03
7	0.052	0.045	2.34E-03	7.10E-03
8	0.058	0.045	2.61E-03	7.51E-03
9	0.052	0.045	2.34E-03	7.59E-03
10	0.052	0.045	2.34E-03	7.08E-03
11	0.057	0.045	2.57E-03	7.09E-03
12	0.057	0.045	2.57E-03	7.42E-03
promedio			2.47E-03	7.37E-03
desviación estándar			1.22E-04	1.83E-04
Varianza			4.11E-07	3.70E-06

Continuación apéndice 2.

Área y masa de las tarjetas de circuito impreso en los fotocontroles de encendido de las lámparas de alumbrado público.

muestra	base circuito impreso (m)	altura circuito impreso (m)	área circuito impreso (m²)	masa circuito impreso (kg)
1	0.058	0.045	2.61E-03	7.52E-03
2	0.052	0.045	2.34E-03	7.58E-03
3	0.052	0.045	2.34E-03	7.24E-03
4	0.057	0.045	2.57E-03	7.29E-03
5	0.057	0.045	2.57E-03	7.47E-03
6	0.058	0.045	2.61E-03	7.33E-03
7	0.052	0.045	2.34E-03	7.10E-03
8	0.058	0.045	2.61E-03	7.51E-03
9	0.052	0.045	2.34E-03	7.59E-03
10	0.052	0.045	2.34E-03	7.08E-03
11	0.057	0.045	2.57E-03	7.09E-03
12	0.057	0.045	2.57E-03	7.42E-03
promedio			2.48E-03	7.35E-03
desviación estándar			1.22E-04	1.83E-04

Continuación apéndice 2.

Reactivos utilizados en la lixiviación con agua regia del circuito

muestra	masa (g)	masa de circuito impreso (kg)	HCl (mL)	volumen de ácido clorhídrico HCl (m³)	HNO3 (mL)	volumen de ácido clorhídrico HCl (m³)	tiempo	muestra (mL)	hidróxido de sodio NaOH (g)	carbonato de potasio K ₂ CO ₃ (g)
1	7.249	7.25E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10
2	7.668	7.67E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10
3	7.176	7.18E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10
4	7.345	7.35E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10
5	7.234	7.23E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10
6	7.567	7.57E-02	75	7.50E-05	25	2.50E-05	24h	25	12.5	10

Fuente: elaboración propia.

Masa de oxiclورو de sodio obtenido por reacción con álcalis

bicarbonato de sodio NaHCO ₃ (g)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaOH (g)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaOH (kg)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de KCO ₃ (g)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de KCO ₃ (kg)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaHCO ₃ (g)	CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaHCO ₃ (kg)
20	4.114	4.11E-03	13.234	1.32E-02	11.512	1.15E-02
20	4.211	4.21E-03	13.223	1.32E-02	12.213	1.22E-02
20	4.115	4.12E-03	13.231	1.32E-02	12.152	1.22E-02
20	4.114	4.11E-03	12.321	1.23E-02	12.100	1.21E-02
20	4.343	4.34E-03	13.254	1.33E-02	12.456	1.25E-02
20	4.113	4.11E-03	12.982	1.30E-02	12.743	1.27E-02

Continuación apéndice 2.

Masa de cobre metálico obtenido por electrogravimetría

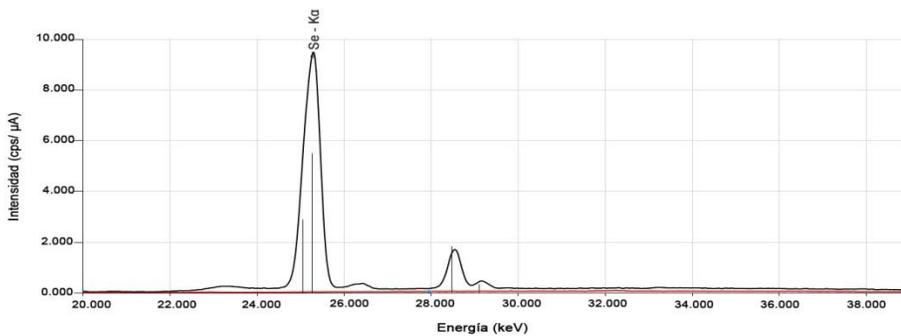
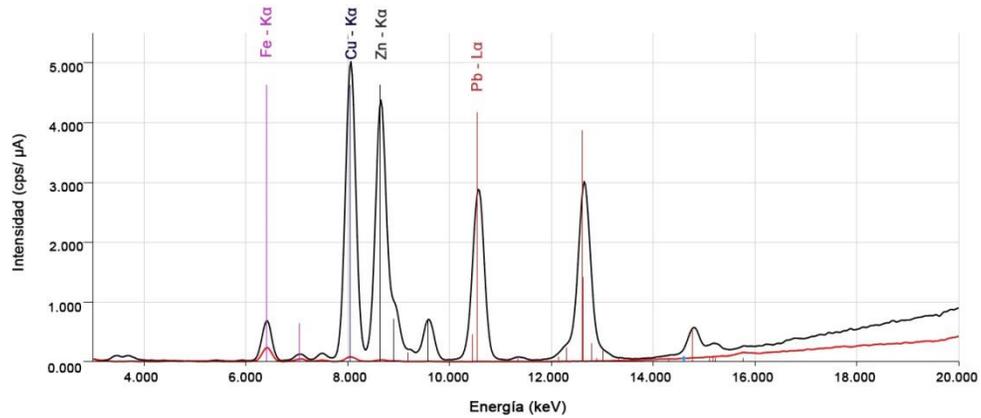
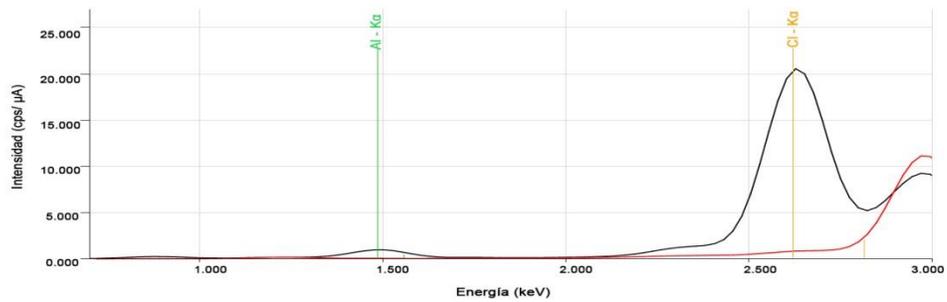
masa inicial del circuito impreso (g)	masa inicial de circuito impreso (kg)	masa final del circuito impreso (g)	masa final del circuito impreso (kg)	cobre metálico (Cu ⁰) a partir de diferencia de masas (kg)
7.25	7.25E-02	6.01	6.01E-03	1.24E-03
7.67	7.67E-02	6.11	6.11E-03	1.56E-03
7.18	7.18E-02	6.10	6.10E-03	1.08E-03
7.35	7.35E-02	6.09	6.09E-03	1.25E-03
7.23	7.23E-02	6.10	6.10E-03	1.14E-03
7.57	7.57E-02	6.09	6.09E-03	1.48E-03
promedio	7.37E-02	6.08E+00	6.08E-03	1.29E-03
desviación estándar	0.00182	0.03	0.00003	0.00017
Varianza	0.00065	4.58	0.00000	0.00000

Reactivos utilizados para la lixiviación con ácido nítrico

muestra	HNO ₃ (mL)	NaCl(g)	Aluminio (g)	Aluminio (g)	tiempo inicio (s)	tiempo (s)	masa (g)	masa (kg)
1	18.50	5.00	0.58	3.20	150.00	172,800.00	11.27	1.13E-02
2	18.60	5.00	0.58	3.20	120.00	172,800.00	11.10	1.11E-02
3	19.10	5.00	0.58	3.20	100.00	172,800.00	12.00	1.20E-02
4	18.60	5.00	0.58	3.20	110.00	172,800.00	10.70	1.07E-02
5	18.50	5.00	0.58	3.20	105.00	172,800.00	11.25	1.13E-02
6	18.80	5.00	0.58	3.20	115.00	172,800.00	12.15	1.22E-02
7	18.80	5.00	0.58	3.20	130.00	172,800.00	10.68	1.07E-02
8	18.70	5.00	0.58	3.20	120.00	172,800.00	11.60	1.16E-02
9	18.50	5.00	0.58	3.20	150.00	172,800.00	11.34	1.13E-02
10	19.00	5.00	0.58	3.20	110.00	172,800.00	11.98	1.20E-02
11	18.10	5.00	0.58	3.20	105.00	172,800.00	11.87	1.19E-02
12	18.60	5.00	0.58	3.20	115.00	172,800.00	11.91	1.19E-02
						promedio	11.49	1.15E-02
						desviación estándar	0.49	4.86E-04

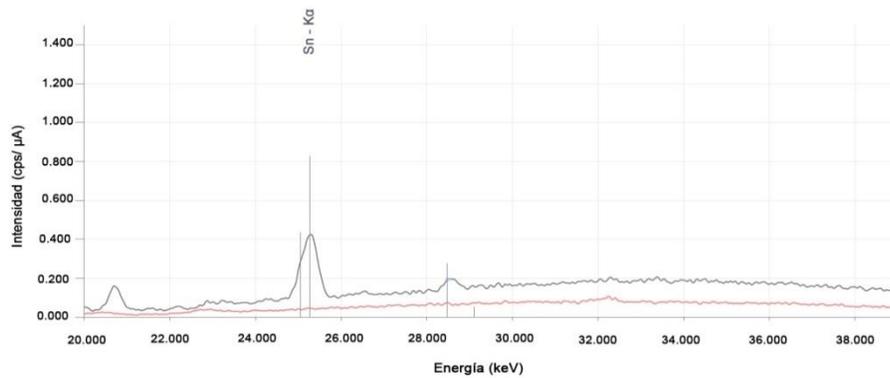
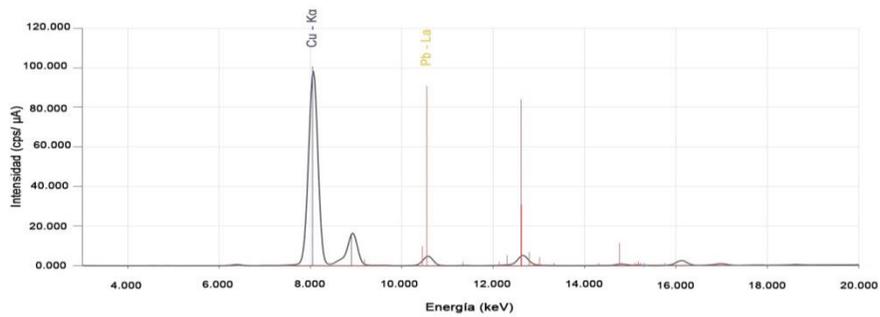
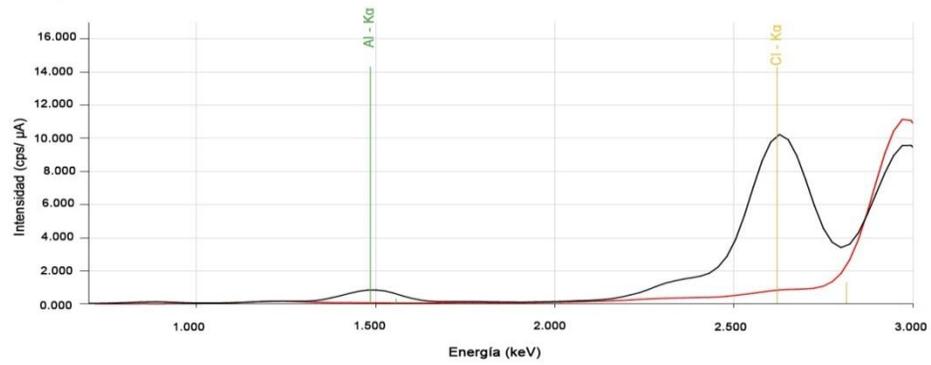
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta, el sólido obtenido por evaporación de lixiviación con agua regia



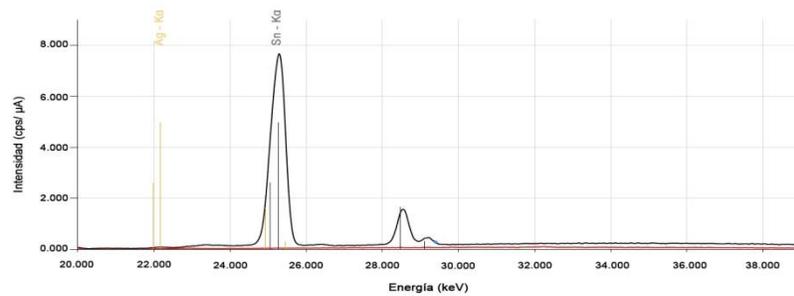
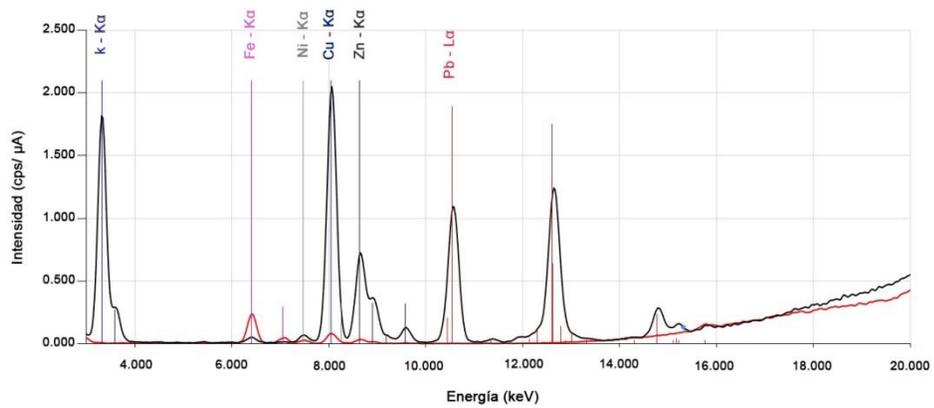
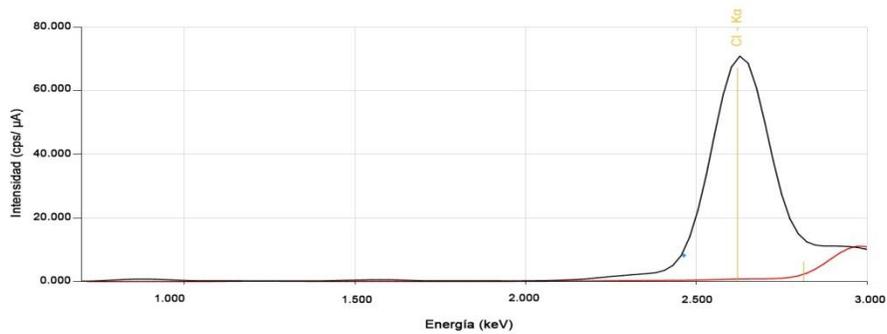
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta del sólido obtenido por electrodeposición a partir de nitrato de cobre



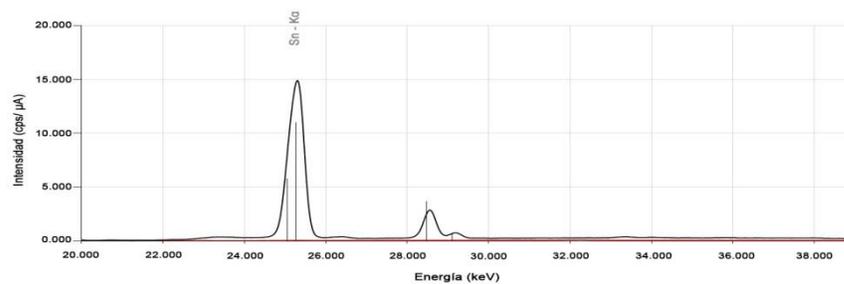
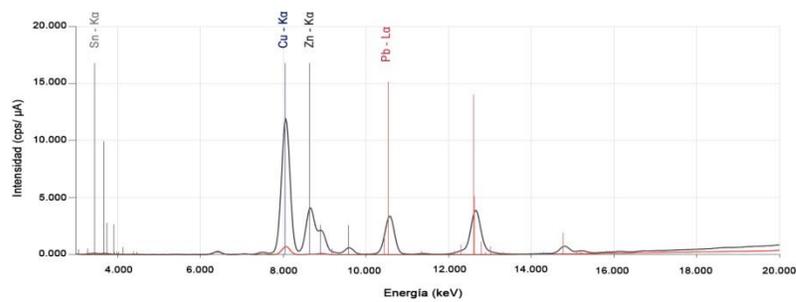
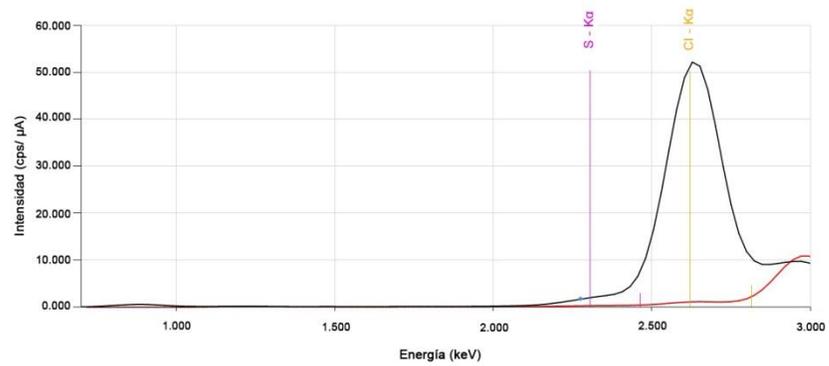
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta, del sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con carbonato de potasio



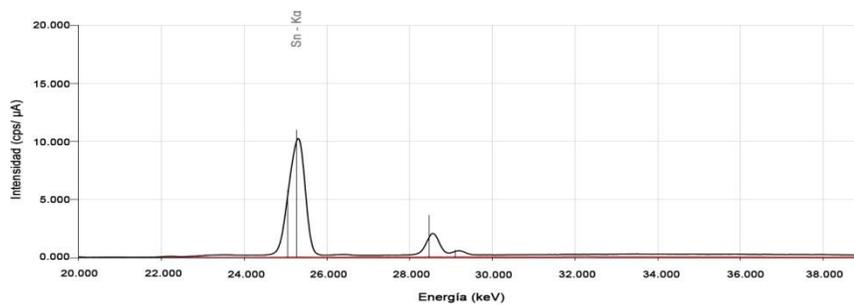
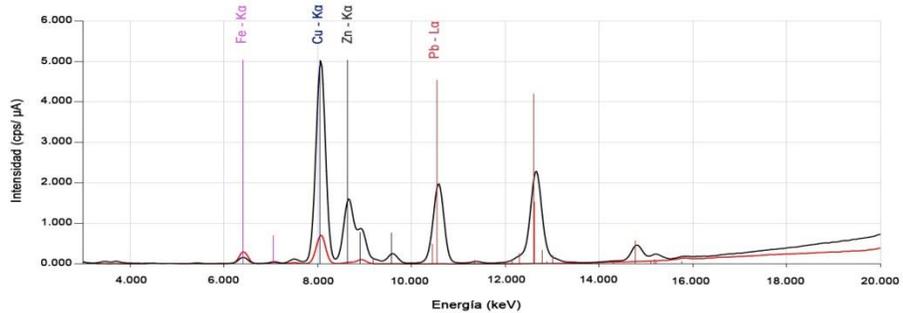
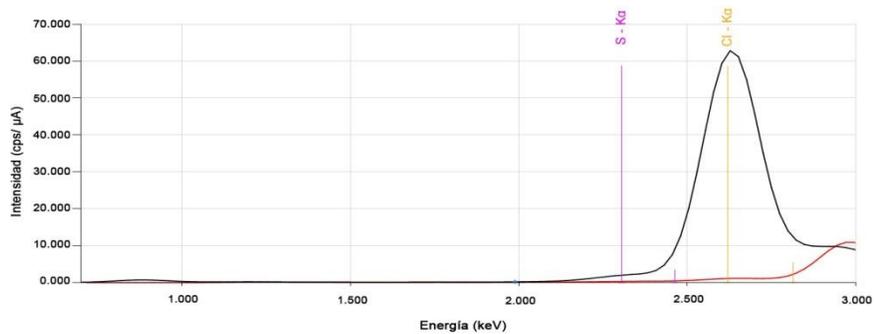
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta, del sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con hidróxido de sodio



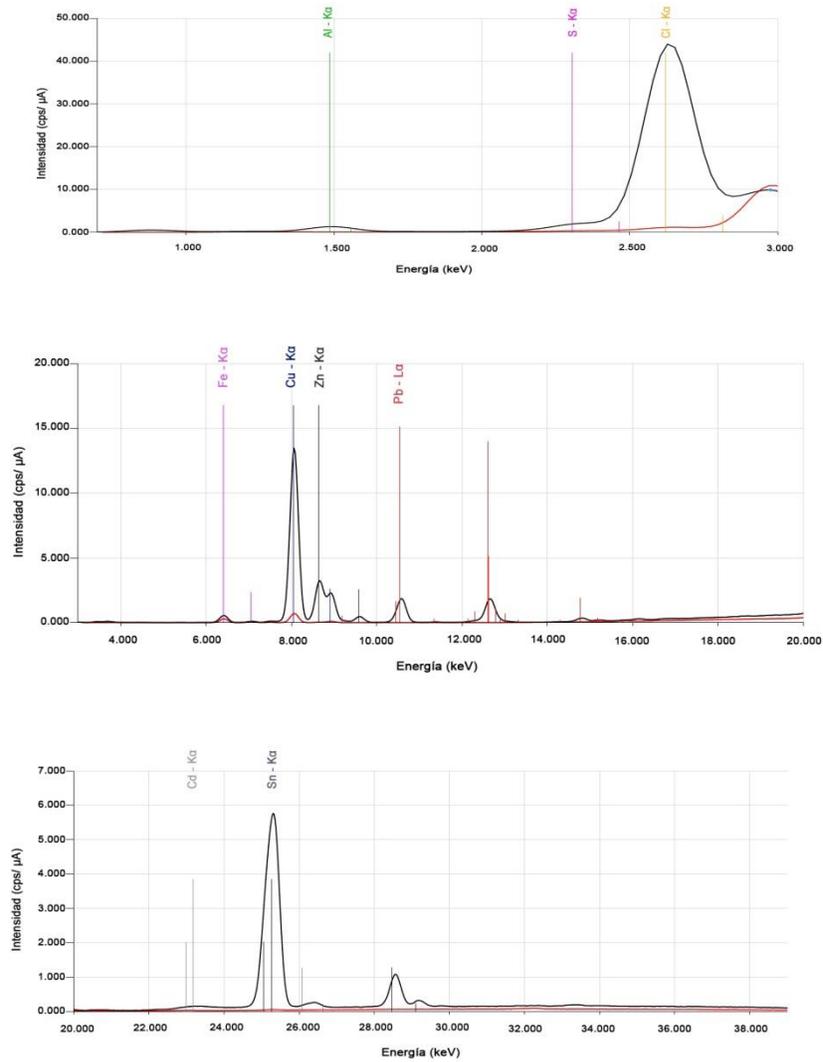
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta, sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con bicarbonato de sodio



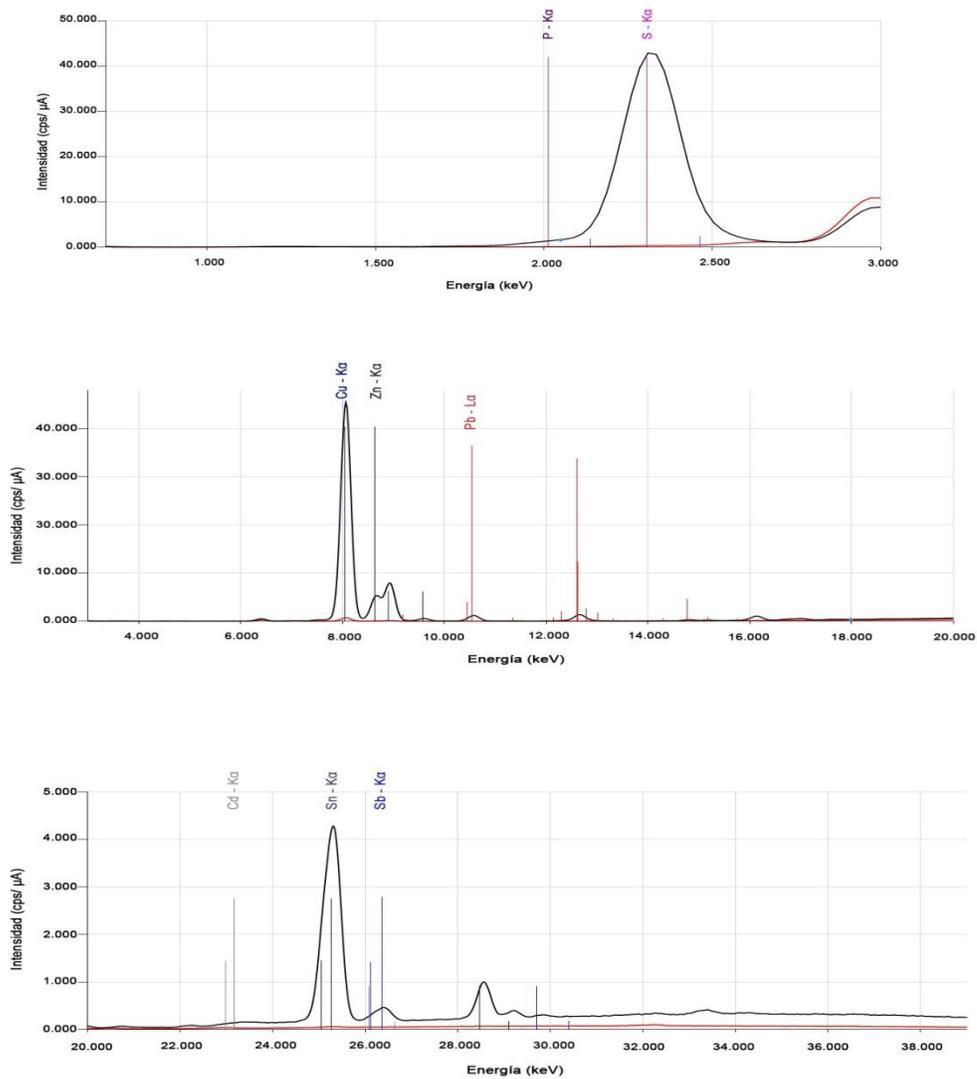
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X región baja, media y alta del producto sólido obtenido de lixiviación con ácido nítrico



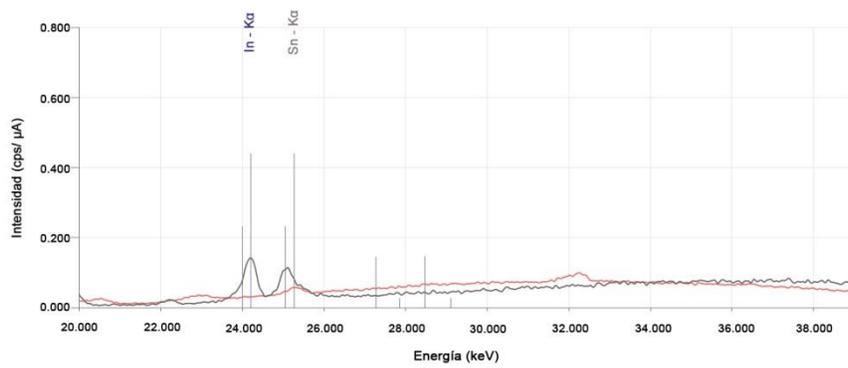
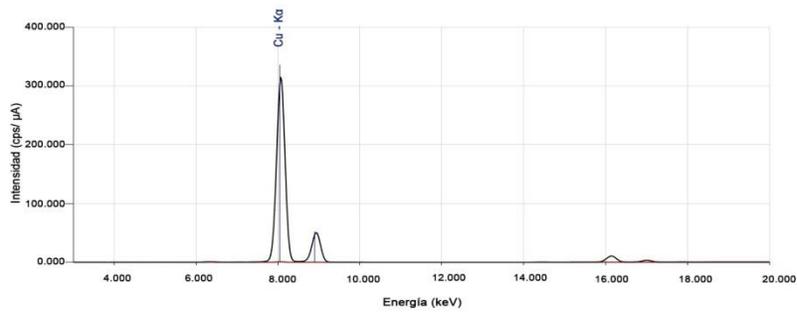
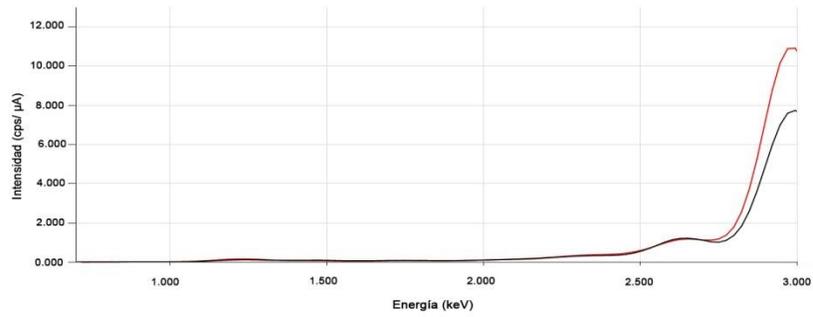
Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X región baja, media y alta del sólido obtenido como sulfato de cobre



Continuación apéndice 2.

Espectro de fluorescencia de rayos X región baja, media y alta de cobre obtenido por electrodeposición



Continuación apéndice 2.

Porcentajes en masa detectados por fluorescencia de rayos X de las sales de cobre sólidas obtenidas por evaporación

muestra	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
cobre metálico (Cu ⁰)	Cobre (Cu)	100%
Nitrato de cobre Cu(NO ₃) ₂	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	2.80
	Cloro (Cl)	57.10
	Aluminio (Al)	29.00
	Zinc (Zn)	0.56
	Plomo (Pb)	1.07
	Estaño (Sn)	9.41
Oxicloruro de cobre CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaOH	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	15.80
	Cloro (Cl)	57.50
	Estaño (Sn)	18.30
	Plomo (Pb)	0.56
Oxicloruro de cobre CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de NaHCO ₃	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	6.95
	Cloro (Cl)	78.60
	Zinc (Zn)	1.47
	Plomo (Pb)	2.97
	Estaño (Sn)	10.00
CuCl ₂ 3Cu(OH) ₂ a partir de K ₂ CO ₃	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cloro (Cl)	38.10
	potasio (K)	48.70
	Cobre (Cu)	0.62
	Plomo (Pb)	0.31
	Plata (Ag)	0.01
	Estaño (Sn)	1.13
Cu obtenido por deposición color verde y café	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	46.90
	Aluminio (Al)	43.10
	Azufre (S)	0.28
	Cloro (Cl)	9.59
Sulfato de cobre CuSO ₄ 5H ₂ O	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	35.00
	Azufre (S)	57.80
	Zinc (Zn)	2.89
	Estaño (Sn)	4.30
Cloruro de aluminio (AlCl ₃)	Componente analizado	porcentaje en masa (%m/m)
	Cobre (Cu)	2.90
	Aluminio (Al)	28.20
	Cloro (Cl)	40.80
	Azufre (S)	0.21
	Plomo (Pb)	4.70
	Zinc (Zn)	6.89
	Estaño (Sn)	13.50
Antimonio (Sb)	2.75	

Fuente: elaboración propia

Apéndice 3. **Análisis de fluorescencia de rayos X a las sales obtenidas**

En las marchas analíticas realizadas se obtuvo un total de ocho sales sólidas, producto de evaporación. Estas sales fueron sometidas a un análisis de fluorescencia de rayos X para determinar el porcentaje en masa de los elementos químicos detectados. Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda corta que se produce cuando se desaceleran los electrones de alta energía o por transiciones de electrones que están en los orbitales internos de los átomos. (Skoog D. A., 2008).

El primer espectro presentado fue el de fluorescencia de rayos X, región baja, media y alta, del sólido obtenido por evaporación de lixiviación con agua regia. Cualitativamente por el color se esperó obtener cloruro de cobre y nitrato de cobre en proporción a la solución de agua regia preparada. La aplicación de este producto puede ser un recubrimiento de algún material para evitar microorganismos que oxiden o desgasten las superficies. También como fertilizante aplicado en solución acuosa.

El segundo espectro de fluorescencia de rayos X, presentado, en la región alta, media y baja de energía, fue el del sólido obtenido por electrodeposición a partir de nitrato de cobre con aluminio se esperó tener cobre metálico. Este presentó un color café y conforme el secado al cual se sometió se visualizaron partes verdes. Las cuales daban indicio de tener otro metal y en efecto se obtuvo. Los porcentajes de los elementos químicos presentes fueron el cobre 46.9%, aluminio con 43.1%, cloro 9.59%, y en menor porcentaje azufre y plomo. La aplicación de este producto, puede ser, fundirlo para una estructura y ser un material conductor. Que sea un metal para producir otra electrodeposición o nuevamente realizar el ciclo del ataque ácido para producir otra sal de cobre.

Continuación apéndice 3.

El tercer espectro de fluorescencia de rayos X, presentado en la región baja, media y alta, fue el del sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con carbonato de potasio. El producto esperado de esta reacción fue el oxiclورو de cobre. Ya que en reacción química el circuito impreso con el agua regia tornó un color donde se evidenció la presencia de cloruro de cobre. Esta solución ácida se hizo reaccionar con carbonato de potasio, lo cual dio origen al oxiclورو. Los elementos químicos detectados fueron cloro 38.51%, potasio 48.7%, cobre 0.624%, estaño 1.13 y trazas de plomo y plata. Estos dos últimos elementos pueden ser ruido. Este producto por tener un contenido significativo de cloro y potasio puede ser aplicado en solución acuosa como fertilizante, pero se debe tener una investigación específica hacia que vegetal se podría aplicar.

El cuarto espectro de fluorescencia de rayos X, obtenido en la región baja, media y alta, del sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con hidróxido de sodio. Este producto esperado es un oxiclورو de cloruro de cobre. Se detectaron los siguientes elementos, cobre 15.8%, cloro 57.5%, estaño 18.3% y plomo 0.555%. Esta sal presenta un porcentaje más alto de cobre y como fertilizante puede ser un buen nutriente para vegetales. Se recomienda para aplicarlo en solución acuosa en plantas de café y tomate.

El quinto espectro de fluorescencia de Rayos X, en la región baja, media y alta, fue el del sólido obtenido a partir de la lixiviación con agua regia y reacción con bicarbonato de sodio. El producto obtenido en esta reacción fue otro oxiclورو de cobre. Este producto presento los siguientes elementos cobre 6.95%, cloro 78.6%, zinc 1.47%, plomo 2.97% y estaño 10%. Esta sal también puede ser aplicada como fertilizantes.

Continuación apéndice 3.

De los tres productos obtenidos como oxiclورو, presentan una cantidad significativa y mucho mayor que los demás elementos el cloro. Lo que puede ser origen de la cantidad de agua regia utilizada para la lixiviación. Se recomienda utilizar una cantidad menor, aunque la extracción del metal lleve más tiempo.

El sexto espectro de fluorescencia de rayos X región presentado en la región baja, media y alta del producto sólido obtenido de lixiviación con ácido nítrico, fue el nitrato de cobre. Este producto puede ser utilizado en recubrimientos de estructuras. Excelente agente de conservación. Los elementos detectados en el análisis fueron Los elementos químicos detectados fueron cobre un 2.8%, cloro un 57.1%, aluminio un 29%, estaño 9.41% y en mínimo porcentaje el zinc y plomo.

El séptimo espectro de fluorescencia de rayos X presentado en la región baja, media y alta de energía, fue el del sólido obtenido como sulfato de cobre. Para obtener este producto se realizó el ciclo de reacciones más larga. En cada etapa se obtuvo una sal característica de cobre, que facilitó la obtención de esta última. Los componentes químicos detectados fueron un 35% de cobre, de azufre 57.8%, esto pudo deberse a la cantidad de ácido sulfúrico utilizado para su reacción. También se obtuvo un 4.3% de estaño y 2.89% de zinc. Estos en mayor porcentaje en la región media del espectro.

El octavo espectro de fluorescencia de rayos X fue para el cobre. Este la detección presentada fue en la región baja, media y alta de energía para el cobre obtenido por electrodeposición. Este elemento presenta un pico alto en la región media mostrando un 100% de cobre de porcentaje en masa de la muestra.

Fuente : elaboración propia

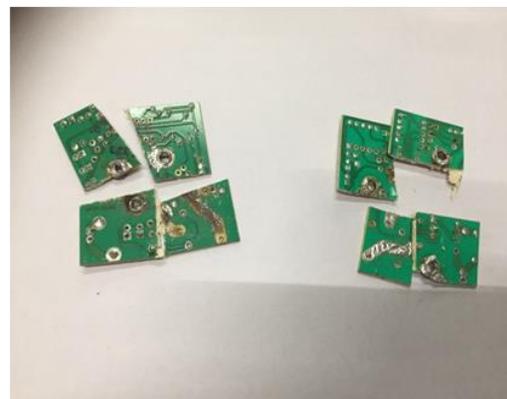
Apéndice 4. Fotografías del trabajo de investigación

Muestras de los fotocontroles de alumbrado público



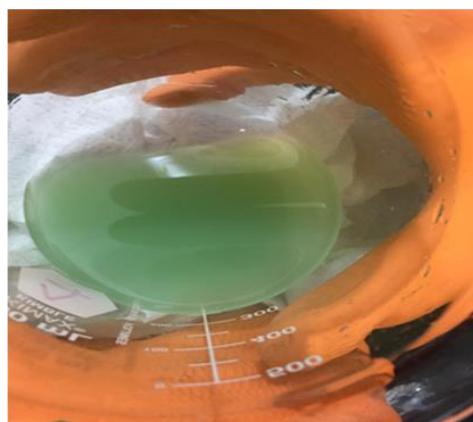
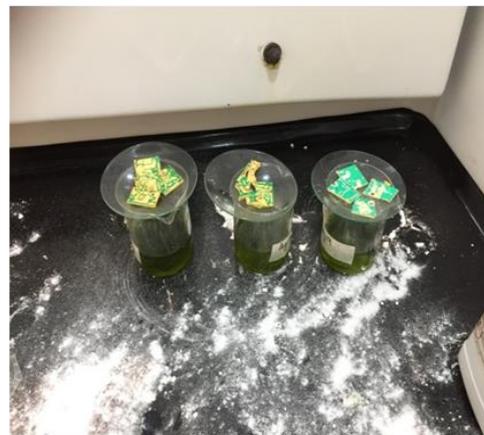
Continuación de apéndice 4.

Preparación de muestras para análisis instrumental y químico



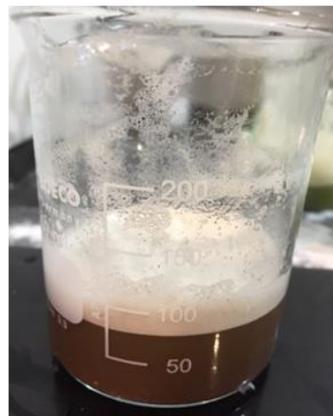
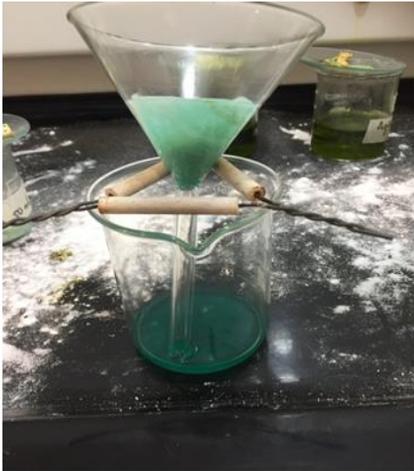
Continuación de apéndice 4.

Lixiviación de circuito impreso con ácido nítrico y agua regia



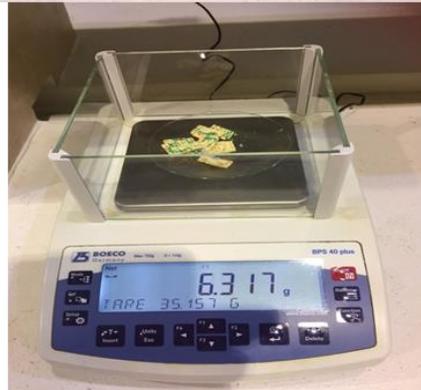
Continuación de apéndice 4.

Ciclo de reacciones para obtener cobre metálico como electrodepósito



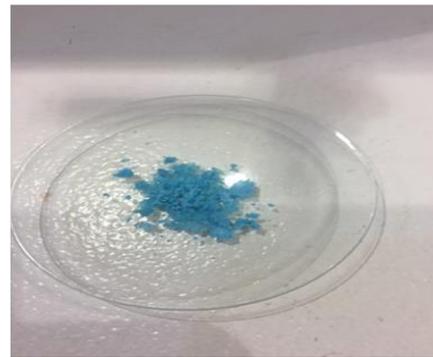
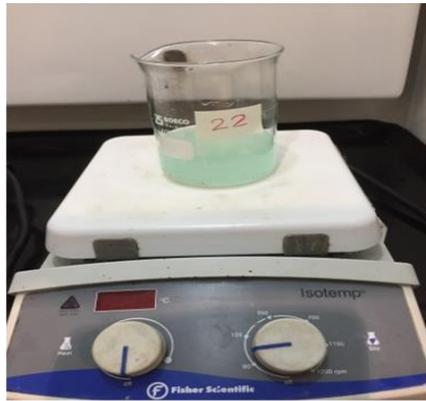
Continuación de apéndice 4.

**Primera parte ciclo de cobre para producir cinco sales de cobre y bakelita
seca**



Continuación de apéndice 4.

Segunda parte ciclo de reacciones producto final sulfato de cobre



Continuación de apéndice 4.

Análisis en equipo de fluorescencia de rayos X de sales producidas



Fuente: elaboración propia