



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“DESECHOS ELECTRÓNICOS: DISEÑO DE PROCESOS PARA LA
RECUPERACIÓN DE METALES DE INTERÉS POR MÉTODOS
HIDROMETALÚRGICOS”**

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MINAS

Presentado por:

Marlon Danilo Cabrera Ormaza

**GUAYAQUIL – ECUADOR
2017**

DEDICATORIA

A mi hermano, José Manuel

A mi mejor amiga, Valeria

AGRADECIMIENTO

A mis padres Marlon y Verónica, y mis hermanas Verónica y Victoria por su apoyo durante todos estos años.

A Karem Ramos, Daniela Acuña, Gary Vincés, Paulo Valdivieso, Diego Barros, Adolfo Villaquirán, Robert Brito, Roberto Chang, Jhon Gualacata, Roberto Noriega, y demás compañeros sin quienes este proyecto no hubiese podido darse a cabo.

Al Dr. Eduardo Recalde, por su guía y soporte en la elaboración del trabajo.

Al Ing. Washington Pincay, por su colaboración durante las pruebas de laboratorio.

A Valeria Lucas, quien me acompañó en las noches durante la fase de pruebas, y una voz de aliento durante todo el proceso.

A mis profesores, en especial a los ingenieros Juan Carlos Pindo y Samantha Jiménez.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Eduardo Luis Recalde Chiluza, PhD.
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA

Juan Carlos Pindo Macas, Ing.
MIEMBRO EVALUADOR

Paúl César Carrión Mero, PhD.
MIEMBRO EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

Marlon Danilo Cabrera Ormaza

RESUMEN

El crecimiento de la economía global, y el constante desarrollo de nuevas tecnologías han logrado que los seres humanos estén cada vez más conectados y puedan hacer su vida más sencilla gracias al uso de diversos aparatos electrónicos.

Sin embargo, a pesar de los efectos positivos que los aparatos electrónicos poseen en nuestras vidas, el ritmo acelerado de la sociedad actual ha causado que se vuelva más sencillo desechar un equipo y adquirir uno nuevo, que repararlo, generándose así basura a un ritmo exponencial hasta llegar a 41 millones de toneladas por año según cifras del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Nichols, 2015), y, de las cuales apenas el 10% se recicla. Esta producción acelerada, produce a su vez una mayor demanda de metales, con el consiguiente impacto ambiental que esto genera.

El siguiente trabajo plantea el uso de métodos hidrometalúrgicos como una alternativa de solución a la problemática que se genera en torno a la disposición final que debería darse a los desechos electrónicos, en este caso con el uso de soluciones de $\text{NaCl-CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ y NaCN para la recuperación selectiva de metales. Se muestra además la metodología

seguida, así como el tratamiento físico previo que se debe dar a estos equipos antes de poder ser tratados químicamente.

La solución ácida utilizada demostró tener cierta utilidad para la separación selectiva de Cu, Ag y Fe. Las altas concentraciones del hierro resultaron negativas en la disolución de los restantes, con la respectiva baja de las recuperaciones de oro en las soluciones de cianuro. A pesar de esto, los análisis finales revelan la presencia de altos valores de plata y oro en este tipo de desechos, lo suficientemente interesantes como para continuar la investigación.

Palabras clave: Oro – Plata – Cobre – Cianuración – Desechos electrónicos
– Lixiviación

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	iii
DECLARACIÓN EXPRESA	iv
RESUMEN	v
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema y justificación.....	4
1.3. Hipótesis y alcance del trabajo	4
1.4. Marco Teórico.....	5
1.5. Objetivos.....	14
CAPÍTULO 2	15
METODOLOGÍA	15
2.1. Diagrama de flujo.....	16
2.2. Preparación manual del material.....	17
2.3. Reducción de tamaño	17
2.4. Determinación del tamaño de liberación.....	17
2.5. Lixiviación de Cu, Fe, Ag, Ni y Pd.....	18
2.6. Filtración y neutralización	18
2.7. Lixiviación de Au mediante cianuro de sodio	19

2.8. Análisis de resultados y conclusiones	19
CAPÍTULO 3.....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1. Recolección de muestras	21
3.2. Separación manual de los desechos.....	22
3.3. Separación manual de los desechos.....	23
3.4. Proceso hidrometalúrgico	27
3.5. Lixiviación ácida	30
3.6. Lixiviación alcalina (NaCN)	33
3.7. Disolución con agua regia	34
3.8. Análisis mediante absorción atómica	25
3.9. Discusión.....	28
CAPÍTULO 4.....	31
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31
4.1. Conclusiones	32
4.2. Recomendaciones	34
BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXOS.....	40

ABREVIATURAS

pH	Potencial de hidrógeno
PCB	Placa de circuito impreso (printed circuit board)

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
RPM	Revoluciones por minuto
CN ⁻	Cianuro
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Pd	Paladio
Ag	Plata
Au	Oro
Pb	Plomo
Fe	Hierro
NaCl	Cloruro de sodio
CuSO ₄	Sulfato de cobre
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
HCl	Ácido clorhídrico
ppm	Partes por millón
mg	miligramos
g	gramos
g/ton	Gramos por tonelada
h	horas
L	Litros
mL	Mililitros
NaOH	Hidróxido de sodio
NaCN	Cianuro de sodio
Pt	Platino
FPS	Cuadros por segundo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama computarizado de un PCB, y diseño final con componentes ensamblados.	5
Figura 1.2: Esquema propuesto para recuperación de metales a partir de desechos electrónicos.	7
Figura 1.3: Diagrama de procesos hidrometalúrgicos para la extracción de cobre y metales preciosos a partir de PCB.	10
Figura 2.1: Metodología del proyecto.....	16
Figura 3.1: Afiche campaña de recolección de residuos electrónicos.....	21
Figura 3.2: Proceso de separación manual de los desechos	22
Figura 3.3: Rendijas del molino de discos por donde sale el material.	23
Figura 3.4: Diseño de los ángulos fabricados.	24
Figura 3.5: Funcionamiento de las piezas diseñadas	25
Figura 3.6: Reducción de tamaño conseguida.....	26
Figura 3.7: Distribución granulométrica del material.....	26
Figura 3.8: Tamizador sónico.....	26
Figura 3.9: Naturaleza corrosiva de las soluciones.....	27
Figura 3.10: Esquema de diseño del agitador.....	28

Figura 3.11: Metodología del proceso hidrometalúrgico	29
Figura 3.12: Solución Ácida	30
Figura 3.13: Lixiviación Ácida	30
Figura 3.14: Diagrama de Pourbaix del sistema Cu-Cl-H ₂ O a 25 °C para actividades unitarias de ligantes Cl ⁻	32
Figura 3.15: Cianuración, titulación del CN ⁻ libre y control de pH	33
Figura 3.16: Tratamiento con agua regia	34
Figura 3.17: Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 603	34
Figura 3.18: Recuperación de metales en la solución cianurada vs. tiempo de residencia en la solución ácida.	28
Figura 3.19: Recuperación de metales en la solución ácida vs. tiempo de residencia en la solución ácida.	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Concentración de metales en PCB reportadas por diferentes autores	6
Tabla II. Resultados de los análisis de absorción atómica.	25
Tabla III. Ley de Cabeza	26
Tabla IV. Resultados de la prueba de 4 horas.	26
Tabla V. Resultados de la prueba de 6 horas.	27
Tabla VI. Resultados de la prueba de 10 horas.....	27

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Según cifras de técnicos del Ministerio de Telecomunicaciones, existen en el Ecuador al menos 40.000 toneladas de residuos electrónicos. Se estima que de estas, apenas entre un 2% y 5% reciben algún tipo de tratamiento especial (los cuales incluyen su desensamble y exportación a otros países) (Revista Líderes, 2012). Estudios adicionales, llevados a cabo de manera independiente por la organización sin fines de lucro One Life, con base en Quito, concluyen que entre 13.000 y 20.000 toneladas adicionales de desechos electrónicos acaban en los botaderos comunes del país (El Universo, 2014) y datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos revelan que en 2015 el 74.27% de los ecuatorianos depositan este tipo de desechos junto con la basura común (INEC, 2013). Estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas señalan que al ritmo detectado en el año 2013, la cantidad de basura electrónica generada a nivel global aumentará un 33% para el año 2017 (El Comercio, 2014).

La Política Nacional de Pos consumo de equipos Eléctricos y Electrónicos, oficializada por el Ministerio del Ambiente el 29 de enero de 2013 señala en el numeral 6 del art. 3: "Se prohíbe la disposición final de equipos eléctricos y electrónicos en desuso que sean factibles de ser reciclados o tratados fuera del país, bajo condiciones ambientalmente amigables, así como la

incineración de sus componentes o elementos constitutivos”(Ministerio del Ambiente, 2012). Esta política ha impulsado la creación de varias empresas dedicadas a la recolección de este tipo de desechos, he incluso la creación de la primera planta de reciclaje de estos en el país en el año 2012(ANDES, 2012), sin embargo y como se menciona en el párrafo anterior, su manejo sólo se limita a acondicionarlos para su explotación a otros países en donde se les dará otro tipo de disposición.

Los desechos electrónicos, y en particular las placas de circuitos impresos o PCB –Printed Circuit Board-, presentan una gran cantidad de metales de interés -ferrosos y no ferrosos-, susceptibles de recuperación y capaces de generar un ingreso económico importante de ser extraídos. Su tratamiento en otros países, suele darse por vía pirometalúrgica, donde la gran cantidad de desechos existentes justifican la inversión para plantas de este tipo. Sin embargo, la gran concentración de metales de alto valor (Yamane *et.al*, 2011) (Au, Ag, Pt, Pd), sumado a otras ventajas en comparación al tratamiento de fuentes primarias (como la eliminación del costo de minado), hacen que la extracción mediante procesos hidrometalúrgicos, se convierta en una alternativa atractiva para obtener ingresos adicionales, sobre todo si se le compara con la venta para exportación.

1.2. Planteamiento del problema y justificación

La cantidad de desechos electrónicos generados en el país actualmente, sumado a las políticas del Gobierno Nacional sobre su disposición final, hacen que cada año se envíen cientos de toneladas de este material a plantas de reciclaje en el extranjero. La gran cantidad de metales de alto valor presentes hace que su uso como fuentes secundarias de materia prima sea muy atractivo; sin embargo, la cantidad de materiales no metálicos causa que los procesos pirometalúrgicos sean los preferidos al momento de realizar su recuperación, ya que con ellos se ahorra tiempo y capital al eliminar la necesidad de una selección más exhaustiva del material. Los métodos hidrometalúrgicos han demostrado ser efectivos en el beneficio del material, sin embargo, su uso aún no ha logrado ser industrializado a gran escala.

1.3. Hipótesis y alcance del trabajo

La aplicación de procesos hidrometalúrgicos para la obtención de metales de alto valor a partir de placas de circuito impreso genera un porcentaje de recuperación lo suficientemente alto, como para considerarse una alternativa económicamente atractiva frente a la exportación de chatarra al exterior.

1.4. Marco Teórico

Placas de circuito impreso:

Se conocen como tarjetas de circuito impreso a aquellas placas que soportan y conectan componentes electrónicos (resistores, capacitores, etc.) a través de pistas conductoras impresas sobre capas de cobre laminadas sobre un sustrato no conductor.

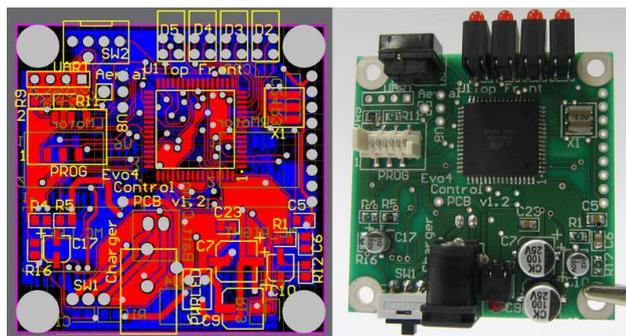


Figura 1.1: Diagrama computarizado de un PCB, y diseño final con componentes ensamblados. **Fuente:** Dominio Público

Estas se suelen recubrir de una fina capa de oro para dar a las pistas de cobre una protección adicional contra la corrosión. Los componentes soldados pueden contener además otros metales de interés (Pb, Sn, Pt, Pd, Ag, etc.).

Según Ghosh et.al,2015 (Ghosh *et al*, 2015), la composición elemental de las placas de circuito impreso varía en función del tipo de uso que se la dará, la fecha de fabricación, y los elementos adheridos a estas. Aun así, se puede estimar que de manera general las placas se componen de alrededor de un 28% de metales, un 23% de plásticos y la fracción restante de cerámicos y vidrios.

En cuanto al contenido metálico, Ogunniyi (Ogunniyi, Vermaak, & Groot, 2009) resume en la Tabla I, el trabajo de caracterización realizado por varios autores:

Tabla I. Concentración de metales en PCB reportadas por diferentes autores

Metal	%(Shuey)	%(Zhao)	%(Zhang)	%(Kim)	%(Iji)	%(Kogan)
Cu	20	26.8	10	15.6	22	17.85
Al	2	4.7	7	-	-	4.78
Pb	2	-	1.2	1.35	1.55	4.19
Zn	1	1.5	1.6	0.16	-	2.17
Ni	2	0.47	0.85	0.28	0.32	1.63
Fe	8	5.3	-	1.4	3.6	2
Sn	4	1	-	3.24	2.6	5.28
Sb	0.4	0.06	-	-	-	-
Au/ppm	1000	80	280	420	350	350
Pt/ppm	-	-	-	-	-	4.6
Ag/ppm	2000	3300	110	1240	-	1300
Pd/ppm	50	-	-	10	-	250

Fuente: Ogunniyi, et. al, 2009

Tratamiento de los desechos electrónicos:

Yazici et. al,2009(Yazici, 2009) proponen el siguiente esquema para el tratamiento y recuperación de metales a partir de los residuos electrónicos, ver Figura 1.2

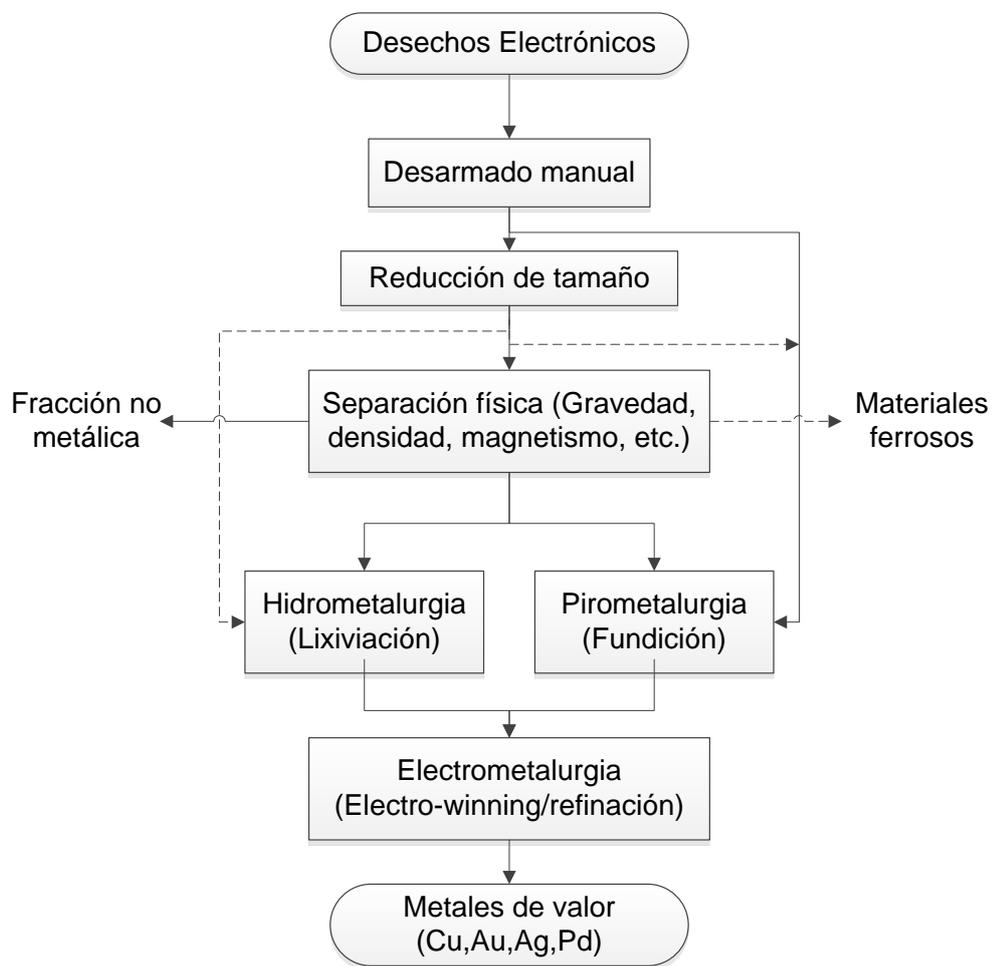


Figura 1. 2: Esquema propuesto para recuperación de metales a partir de desechos electrónicos. **Fuente:** Yazici, et. al, 2009

Desensamblado manual:

Tiene la finalidad de aumentar la viabilidad económica y seguridad del proceso al separar las placas de circuito impreso de las carcasas que las contienen y remover elementos potencialmente peligrosos como pantallas, capacitores, baterías, etc., los cuales suelen contener metales pesados (Duan *et al*, 2011).

Reducción de tamaño:

Después de separar los componentes removibles, es necesario realizar operaciones de trituración y molienda para reducir el tamaño del material. Esto permite la liberación de los metales de materiales en lo que pudiesen estar atrapados como resinas, fibras de vidrio y plásticos. Sin embargo, debido a la naturaleza dúctil de alguno de estos materiales, equipos de conminución tradicionales pueden ser poco eficaces al momento de liberar el mineral, por lo que se prefieren aquellos cuyo mecanismo se base en el uso de esfuerzos cortantes (Ghosh *et al.*, 2015).

Zhang y Forssberg (Zhang & Forssberg, 1999), determinaron que para tamaños de partícula menor a 6 mm, el cobre y los materiales ferromagnéticos son completamente liberados a la vez, mientras que Tuncuk (Tuncuk *et al*, 2012) registra la liberación completa del cobre a partir de tamaños menores a 2 mm. Finalmente Vidyadhar y Das (Vidyadhar & Das,

2012) reportaron que para un tamaño de molienda menor que 150 μm , se produce la separación completa de partículas metálicas y no metálicas.

A pesar de esto, la generación de partículas demasiado finas se constituye en un problema adicional, esto sin tomar en cuenta el aumento en el consumo energético en la molienda para llegar a tamaños menores. Koyanaka(Koyanaka et al, 1999) observó que los materiales vidriosos de los PCB se acumulan de manera más veloz que los metales en la fase final de la molienda, esto debido a su mayor fragilidad. Janáčová (Janacova et al, 2009) y Li (Li et al, 2010) encontraron además que durante moliendas continuas, se pueden producir aumentos zonales de temperatura que generen pirolisis localizadas con la subsecuente aglomeración de los plásticos y encapsulación de los metales, lo que complicaría el proceso.

Separación física:

Es posible utilizar un separador magnético u otro tipo de método de concentración para enriquecer el material, estos incluyen la separación de plásticos y fibra de vidrio por densidades mediante el uso de un JIG o mediante flotación por espumas. Sin embargo las pruebas realizadas por Sarvar y Ogunniyi revelan recuperaciones del 79% y 64 %, respectivamente, mediante este último método (Sarvar *et al*, 2015)(Ogunniyi & Vermaak, 2009).

Hidrometalurgia:

Quinet et al., 2005 (Quinet *et al*, 2005) propone la siguiente metodología para la extracción de metales de interés a partir de PCB por vía húmeda, ver figura 1.3.

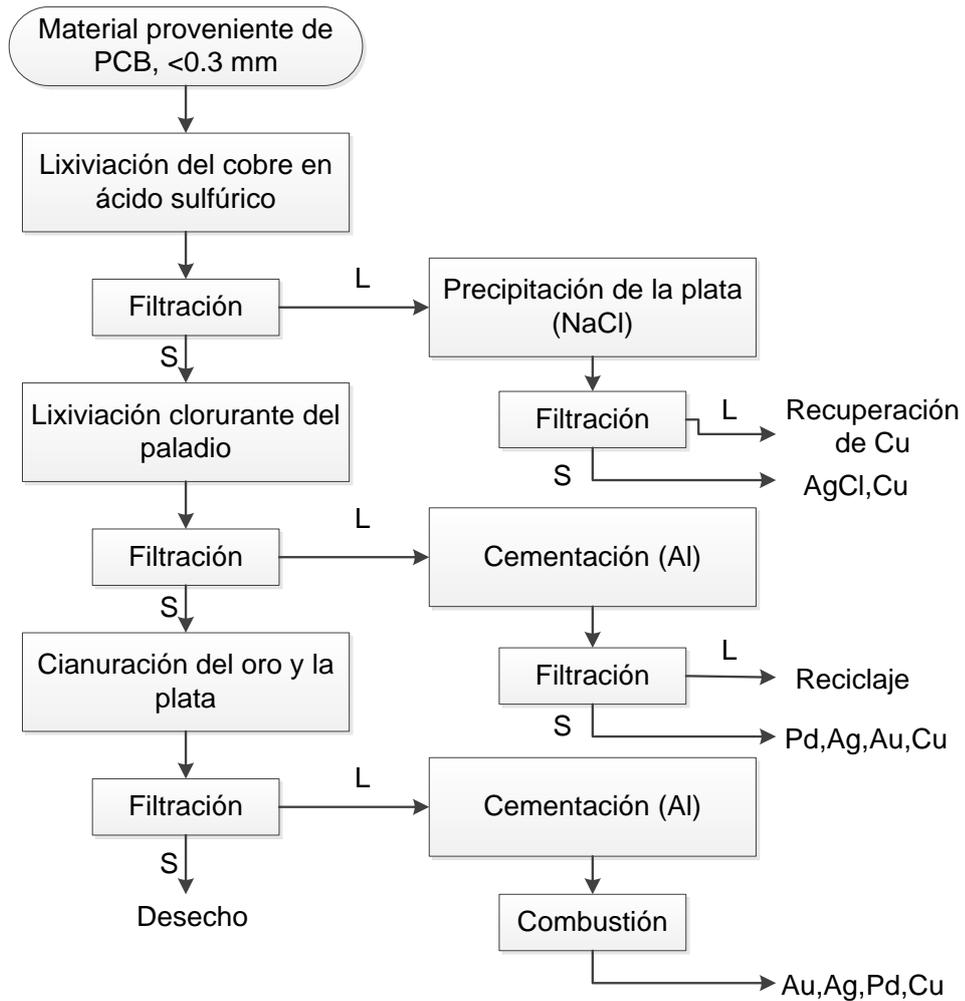


Figura 1. 3: Diagrama de procesos hidrometalúrgicos para la extracción de cobre y metales preciosos a partir de PCB. **Fuente:** Quinet et al., 2005

Pretratamiento con ácido nítrico:

Es posible remover los componentes electrónicos soldados a las placas de circuito impreso mediante un tratamiento previo de estos con ácido nítrico en baja concentración. El estaño y plomo presentes en los puntos de soldadura reaccionan con el ácido nítrico para formar ácido estánnico insoluble y nitrato de plomo soluble. Posteriormente, la solución es separada, y tratada con ácido sulfúrico para precipitar el plomo en forma de sulfato.

Debido a que el cobre generalmente se encuentra en la capa intermedia de las placas no se expone a la solución de ácido nítrico en la etapa inicial de la reacción. Se puede controlar la pérdida de cobre por este método controlando de manera constante la concentración de ácido nítrico, ya que este no reacciona con el cobre hasta que el estaño lo ha hecho completamente (Yang, Liu, & Yang, 2011).

Cianuración del oro:

Se trata de un proceso metalúrgico que permite extraer oro en vía húmeda gracias a la conversión de este en un complejo coordinado soluble en agua mediante el uso de soluciones de cianuro de sodio o potasio.

La reacción del oro con el cianuro para formar el ion dicianoaurato, se describe mediante la siguiente ecuación balanceada, conocida comúnmente como la ecuación de Elsner:



Parámetros que afectan la cianuración del oro:

- **pH:** Debido a su peligrosidad, se evita el mantener un pH ácido con el fin de prevenir la formación de ácido cianhídrico, el cual aún en pequeñas concentraciones suele ser mortal. Sin embargo, el mantener potenciales muy elevados resulta perjudicial para el proceso ya que la adsorción de iones OH sobre las partículas de oro reduce la superficie disponible para la reacción de lixiviación. Según Marsden y House (Marsden & House, 1992) el pH óptimo adecuado para un proceso dado debe ser obtenido experimentalmente para cada material, aunque usualmente se suele mantener un pH de 10.5 mediante la adición de hidróxido de calcio o de sodio.
- **Concentración de cianuro:** Ellis y Senanayake (Ellis & Senanayake, 2004) afirman que el ratio de lixiviación del oro aumenta al incrementar la concentración de cianuro, pero que sin embargo la reacción se vuelve independiente de la concentración de este al sobrepasar los 600 ppm de NaCN (o 0.075% de KCN).

Medir la concentración de cianuro de manera periódica durante el proceso permite establecer el ratio de disolución de los metales. Su medición se realiza volumétricamente mediante titulación con nitrato de plata y usando yoduro de potasio como indicador, la reacción que se da es la siguiente:



Al conocer las concentraciones iniciales de cianuro y de la solución de nitrato de plata, es posible calcular el cianuro consumido durante un determinado periodo de tiempo.

- **Concentración de iones Cu^{2+} :** El cobre es capaz de formar varios complejos con el cianuro, por lo que se vuelve indeseable en la reacción al competir directamente con el oro por este, disminuyendo su ratio de disolución. Mardsen y House [22] recomiendan mantener una concentración de cianuro igual a tres veces la requerida estequiométricamente por el cobre presente, esto con el propósito de mantener suficientemente alto el ratio de disolución del oro. A valores de pH altos el complejo que se forma es, $Cu(CN)_3^{2-}$.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Plantear una posible secuencia de métodos hidrometalúrgicos para la recuperación de metales de valor a partir de placas de circuito impreso extraídas de desechos electrónicos.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el material de residuo electrónico con el fin obtener los diferentes parámetros necesarios para el diseño del método de recuperación.
- Diseñar el método de recuperación en base a las propiedades físicas y químicas del material y plantear alternativas al proceso.
- Realizar pruebas de las diferentes alternativas y comparar los resultados de recuperación obtenidos en cada una de ellas.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Diagrama de flujo

Las estrategias y directrices de la investigación se desarrollan de acuerdo con el diagrama de flujo de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mostrando la estrategia simultánea de trabajo y desarrollo de la línea de investigación:

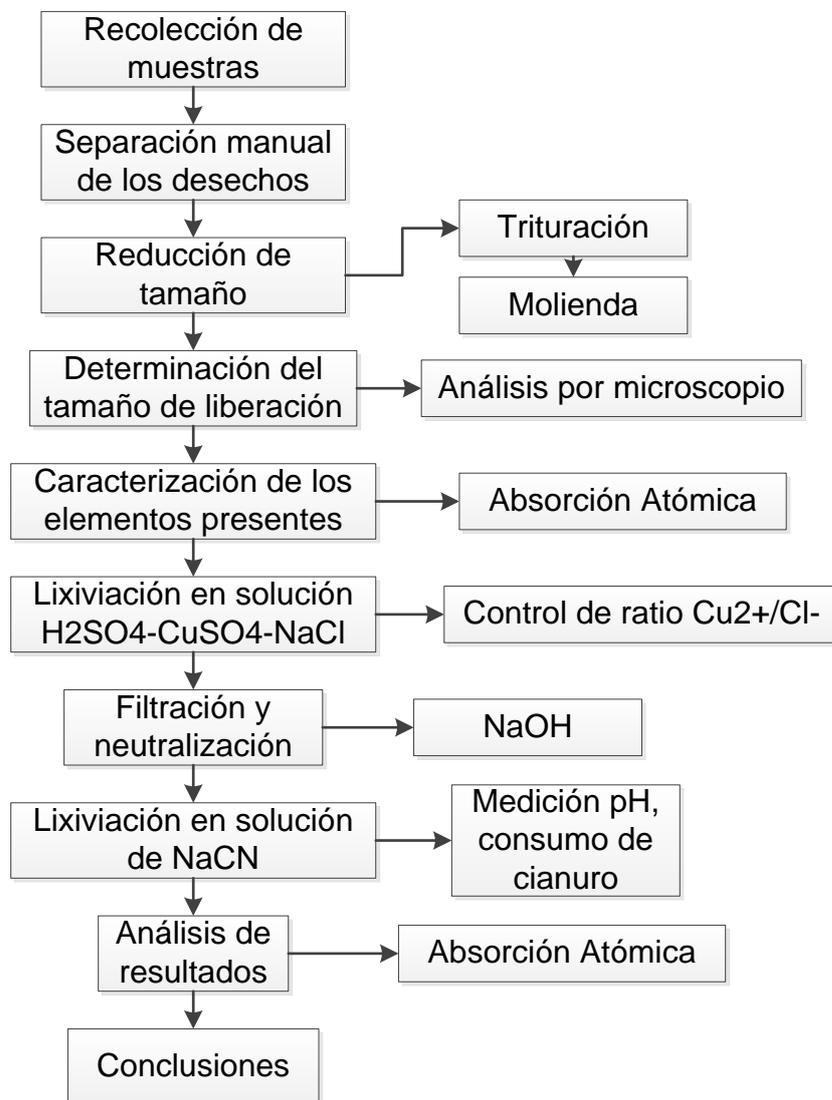


Figura 2. 1: Metodología del proyecto
Fuente: Autor

2.2. Preparación manual del material

Se desensamblan manualmente los desechos electrónicos obtenidos, con el fin de separar los residuos peligrosos y las partes que pudieran interferir en el proceso. Las principales partes a separar son: carcasas metálicas o plásticas, baterías y pantallas LCD. Los componentes soldados serán mantenidos ya que se busca que el proceso requiera la menor cantidad de pasos manuales posibles.

2.3. Reducción de tamaño

Con el fin de aumentar la superficie específica de las partículas y facilitar la disolución del oro, se disminuirá el tamaño del material mediante trituración y posterior molienda. Para ello se hará uso de una trituradora de mandíbulas y posteriormente de un molino de discos o de bolas.

2.4. Determinación del tamaño de liberación

Previa una homogenización y cuarteo se realiza el tamizado del material molido y se pesan las diferentes fracciones y se genera la curva de distribución granulométrica del material. Como se menciona en el capítulo anterior, varios autores aseguran que la mayor parte de partículas metálicas se liberan completamente de los materiales que los encapsulan al alcanzar tamaños entre 0.15 y 2mm. Debido a que se trata de un tamaño de partícula relativamente alto, el porcentaje de liberación en cada fracción del material

será determinado mediante el uso de microscopios ópticos y el conteo manual de partículas liberadas y encapsuladas.

2.5. Lixiviación de Cu, Fe, Ag, Ni y Pd

Para eliminar la interferencia de iones consumidores de cianuro que pudieran entorpecer el proceso de recuperación del oro, se tratará estos mediante una solución de $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Cu}_2\text{SO}_4\text{-NaCl}$. Esta solución, cuya particularidad es la utilización del sulfato cúprico como oxidante, ha demostrado una recuperación importante de estos metales (hasta 58% de Pd y mayores al 91% en los otros) en pruebas experimentales, y se presenta como un potencial reemplazo al peróxido de hidrógeno cuyo alto precio y ratio de consumo impiden su utilización a escala industrial.

2.6. Filtración y neutralización

Una vez concluida la etapa de lixiviación en ácido sulfúrico, la solución es filtrada mediante un kitasato y una bomba de aire. La fase líquida se almacena para su posterior análisis, mientras que los sólidos son llevados a una nueva solución acuosa y neutralizados con hidróxido de sodio u óxido de calcio, con el fin de obtener un pH de 10.5 a 11, óptimo para iniciar el proceso de cianuración.

2.7. Lixiviación de Au mediante cianuro de sodio

Se somete la fase sólida obtenida a partir de la filtración anterior a una lixiviación con cianuro de sodio. Los iones cianuro formarán complejos solubles con la mayoría de elementos metálicos, lo que permitirá separarlos en la fase líquida. Cada hora se deberá realizar controles de pH y de consumo de cianuro, para comprobar que la solución se mantenga en niveles de seguridad aceptables, y determinar cuando todos los elementos de interés hayan completado su disolución.

El consumo de cianuro será medido mediante titulación con nitrato de plata y utilizando como indicador al yoduro de potasio. Finalmente, mediante filtración, se separan las fases sólida y líquida, luego se almacena para su posterior análisis.

2.8. Análisis de resultados y conclusiones

Las soluciones obtenidas son analizadas directamente mediante absorción atómica para medir la concentración de metales en estas. Los sólidos filtrados serán disueltos en agua regia para comprobar su contenido final. En base a estos resultados podrá comprobarse la recuperación del método propuesto y emitir conclusiones al respecto.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Recolección de muestras

Para la recolección del material a ser utilizado en el proceso se realizó una campaña de reciclaje de desechos electrónicos en las oficinas del capítulo estudiantil de la SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration). Dicha campaña fue aprobada por el decano de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, el Dr. David Matamoros C., y socializada en las redes sociales y del sistema de mail masivo de la universidad. Se realizó además un afiche informativo, mencionando el propósito de la campaña, el tipo de material a recogerse, y la disposición final que se le daría a estos.

Recolección de Residuos Electrónicos

CAMPAÑA

INVITAMOS A LA COMUNIDAD POLITÉCNICA A PARTICIPAR DE LA PRIMERA JORNADA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS

LUNES 21 AL VIERNES 25 DE NOVIEMBRE

Punto de recolección: Oficinas del Capítulo Estudiantil SME-ESPOL
(Junto a edificio principal de la FICT)

✓ **SE RECIBE:** Equipos electrónicos en desuso, tales como:
Computadoras – Teclados – Consolas de videojuegos – Tarjetas electrónicas – Celulares – Mouse – Monitores – Decodificadores – Controlés remoto – Impresoras/copiadoras – Calculadoras – Reproductores de video o música – Cámaras fotográficas.

✗ **NO SE RECIBE:** tóner, cartuchos de tinta, pilas y baterías que no estén incluidas dentro de los aparatos

Los residuos electrónicos recolectados, serán utilizados para investigaciones en el área de recuperación de metales y Proyectos Integradores de la carrera de Ingeniería de Minas.

Contacto: Marlon Cabrera (mccabrera@espol.edu.ec / 0984808111)

FICT
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Figura 3. 1: Afiche campaña de recolección de residuos electrónicos.
Fuente: Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

3.2. Separación manual de los desechos

Los desechos recogidos fueron desmantelados, y las placas de circuito impreso removidas del interior de estos. Las carcasas, baterías, capacitores y pantallas fueron separados y almacenados para su posterior transporte a un centro de reciclaje.



Figura 3. 2: Proceso de separación manual de los desechos
Fuente: Autor

El proceso de separación fue realizado durante 3 días en las oficinas del SME. Para ello se contó además con el apoyo de varios estudiantes de la carrera de Ingeniería de Minas, los cuales se ofrecieron voluntariamente para colaborar en el proyecto.

3.3. Separación manual de los desechos

Debido a la naturaleza del material a reducir (plásticos, fibra de vidrio, metales dúctiles), es necesaria la utilización de equipos que realicen el proceso de reducción mediante esfuerzos cortantes. Sin embargo, debido a que su uso principal siempre fue el tratamiento de minerales, el laboratorio de mineralurgia no cuenta con equipos que cumplan esta característica, sino solamente equipos que lo realizan por compresión.

A pesar de esto se realizaron pruebas en diferentes equipos del laboratorio, con el propósito de observar el comportamiento del material ante estos efectos. Los equipos no resultaron efectivos, siendo el molino de martillos el único capaz de fracturar los PCBs. Lastimosamente, aunque los resultados fueron prometedores, el diseño de la placa de golpe y la forma laminar del propio material no permitieron su recirculación ya que este escapaba por las rendijas. El molino de discos también fue capaz de reducir el material de tamaño, pero requería un tamaño de alimentación más pequeño que el existente,



Figura 3. 3: Rendijas del molino de discos por donde sale el material. **Fuente:** Autor

Se intentó además realizar el corte de forma manual mediante un alicate de corte inicialmente, y más tarde con una cizalladora. Esto presentaba la problemática de que se requería un esfuerzo muy grande, y de tiempos excesivamente largos, por lo que la idea acabó también siendo descartada.

Debido a la dificultad en la reducción del tamaño del material, se tomó la decisión de realizar adaptaciones a la cámara del molino de martillos con el objetivo de bloquear la salida de las placas de PCB a través de las rejillas y permitir la recirculación de estas en el equipo. Para ello se fabricaron 18 ángulos de acero, los cuales son capaces de obstruir completamente los orificios de salida. Un esquema de las piezas adaptadas se muestra a continuación:

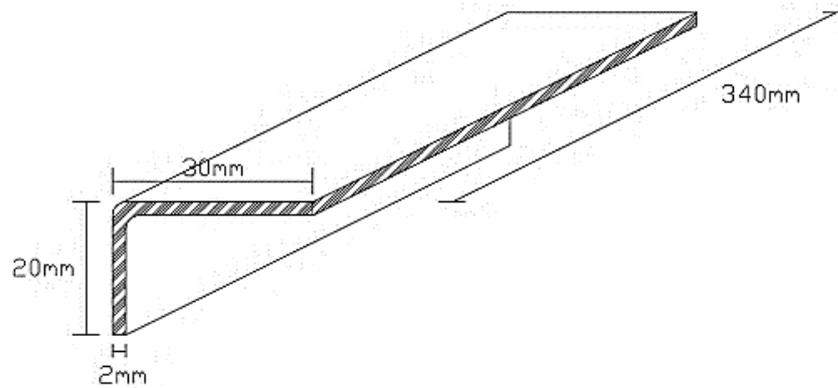


Figura 3. 4: Diseño de los ángulos fabricados.
Fuente: Autor

Los resultados obtenidos a partir de esta modificación fueron positivos, consiguiéndose una buena reducción de tamaño. Sin embargo, un inconveniente grave que se presenta es un aumento significativo en la emisión de ruido debido a la presencia de los ángulos, además de un crecimiento en el nivel de las vibraciones del equipo. Por lo tanto, y debido a que se presume una baja eficiencia en la operación de este equipo, no se recomienda su uso para procesos a escala industrial. Por el contrario, debido a la inexistencia en la facultad de equipos diseñados para materiales con estas características, su uso como herramienta didáctica podría resultar útil al menos hasta que puedan adquirirse equipos más adecuados.



Figura 3. 5: Funcionamiento de las piezas diseñadas
Fuente: Autor

Las siguientes imágenes muestran el resultado de la reducción de tamaño utilizando el molino de martillos modificado.



Figura 3. 6: Reducción de tamaño conseguida
Fuente: Autor

Tras realizar el análisis granulométrico, se determinó que el 80% de las partículas existentes poseen un tamaño inferior a 2 mm.

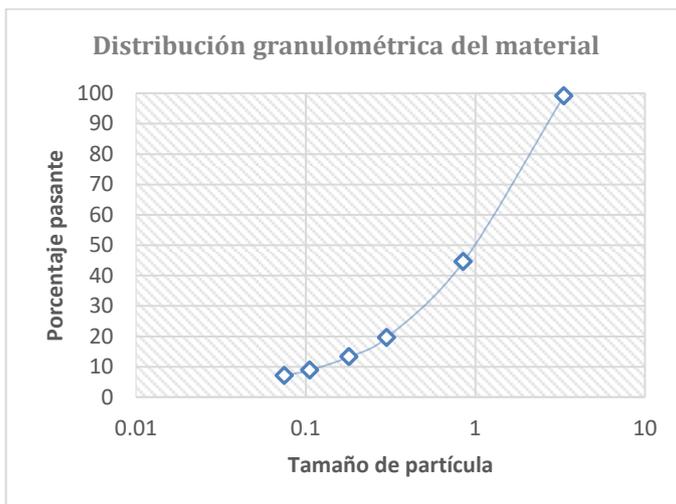


Figura 3. 7: Distribución granulométrica del material. **Fuente:** Autor



Figura 3. 8: Tamizador sónico
Fuente: Autor

3.4. Proceso hidrometalúrgico

El proceso hidrometalúrgico planteado se puede dividir en dos fases bien diferenciadas, una lixiviación ácida, cuyo propósito es separar selectivamente la mayor cantidad de metales cianicidas; y una lixiviación alcalina utilizando cianuro de sodio, con el objetivo de recuperar los metales de mayor valor.

Con el objetivo de poder determinar si la lixiviación ácida genera algún efecto en la recuperación final de los metales valiosos obtenidos en la cianuración, se realizaron tres pruebas diferentes. En ellas se modificó el tiempo de residencia de las muestras en la solución ácida, manteniendo constantes el resto de parámetros.



Figura 3. 9: Naturaleza corrosiva de las soluciones
Fuente: Autor

La existencia de elementos altamente magnéticos imposibilitó la utilización de agitadores de este tipo, por lo que la agitación mecánica se convirtió en la única alternativa. Sin embargo, la naturaleza altamente corrosiva de las

soluciones a utilizarse evitó la utilización de cualquier tipo de hélice o aspa metálica, ya no sólo por el riesgo de contaminación de las pruebas, sino también por la posibilidad de dañar los equipos presentes en el laboratorio.

Por esta razón, se tomó la decisión de fabricar un agitador mecánico, utilizando un motor de 9V, una hélice impresa en 3D, y un potenciómetro de 5k Ω para poder ajustar la velocidad de giro. Ya que las pulpas poseen magnitudes de viscosidad y densidad diferentes, se necesitó realizar de forma manual el ajuste del giro del motor. Esto se realizó utilizando un cámara de video capaz de grabar a 120 FPS y contando el número de revoluciones que se dan en un minuto.

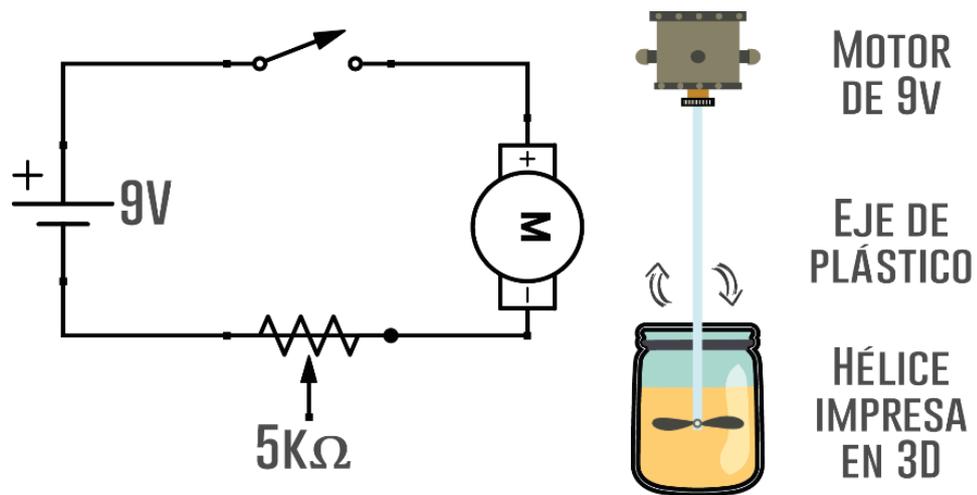


Figura 3. 10: Esquema de diseño del agitador
Fuente: Autor

El siguiente diagrama de flujo permite resumir la metodología experimental seguida:

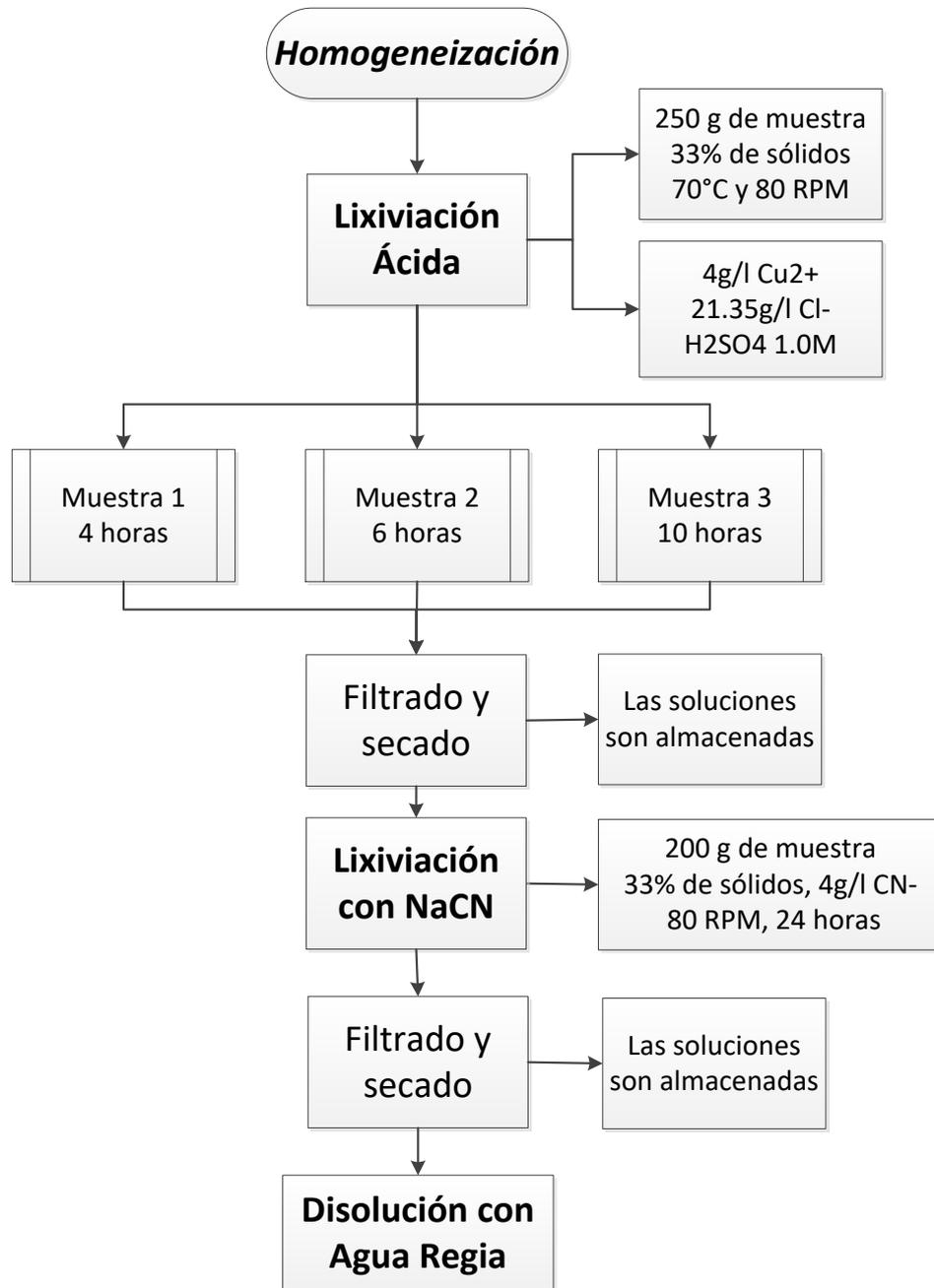


Figura 3. 11: Metodología del proceso hidrometalúrgico
Fuente: Autor

3.5. Lixiviación ácida

- Se utilizó una solución 1.0 M de H_2SO_4 , ya que la mayoría de metales presentes son solubles o levemente solubles en este, excepto aquellos de mayor interés como el oro.
- Se añaden 4 g/L de iones Cu^{2+} en forma de sulfato cúprico pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), con fin de aumentar el potencial de oxidación de la solución. De esta manera se facilita que los metales presentes puedan oxidarse y mantenerse en disolución.



Figura 3. 12: Solución Ácida
Fuente: Autor



Figura 3. 13: Lixiviación Ácida
Fuente: Autor

- Se añaden 21.35 g/L de iones Cl^- (en exceso) en forma de cloruro de sodio. Esto con dos objetivos: el exceso de estos iones permite evitar la formación de cloruros metálicos insolubles y forzar la aparición de complejos coordinados clorurados solubles (CuCl_2 vs CuCl_2^-); la formación de estos complejos a su vez permite reducir la concentración de iones metálicos, y que por el principio de Le Chatelier, aquellos que se encuentren en estado basal deban oxidarse con el fin de mantener el equilibrio. De cierta manera se obliga a los metales presentes a entrar en disolución.

La Figura 3.14, muestra el diagrama potencial-pH del sistema Cu-Cl- H_2O , [24], en soluciones con altas concentraciones de cloruro, el Cu^+ es termodinámicamente estable y el Cu^{2+} se puede usar como agente oxidante. La velocidad de disolución se incrementa con la concentración de cloruro hasta 1 M, pero se vuelve independiente de ese parámetro a concentraciones más altas, según Winant et al., 1991, debido a que el incremento de la actividad del cloruro no es tan significativo.

Los iones Cu^+ y Cu^{2+} forman complejos con los iones cloruro, cuya estabilidad depende de la composición de la solución y de la temperatura; en medio sulfato, todo el cobre soluble se presenta como ion Cu^{2+} , mientras que en medio cloruro se presentan ambos iones de cobre de manera estable y formando complejos cloro-cobre.

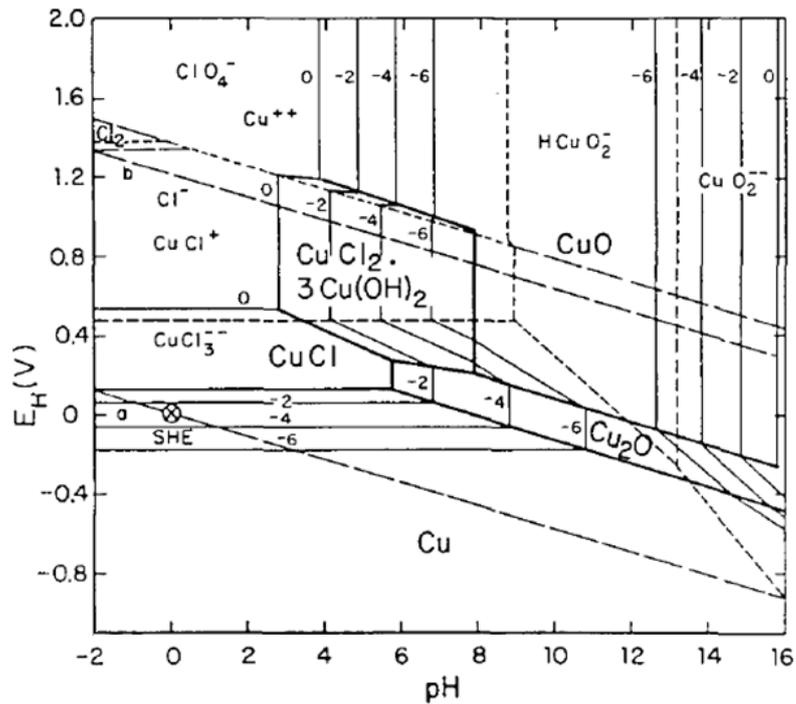


Figura 3. 14: Diagrama de Pourbaix del sistema Cu-Cl-H₂O a 25 °C para actividades unitarias de ligantes Cl⁻.
Fuente: (Winand, 1991).

La ventaja del cloruro en la lixiviación de minerales, se puede explicar a través de cambios en las propiedades físico-químicas de la solución; así, a altas concentraciones de cloruro se observa una rápida cinética de lixiviación en condiciones atmosféricas, debido al aumento de la actividad de los protones y al efecto de los iones de cloruro que promueven la formación de iones complejos cloro-metal más estables.

- Se mantiene una temperatura de 70°C durante el proceso., temperaturas altas aporta energía al sistema y mejoran la cinética de las reacciones, pero poseen el inconveniente de inducir la

evaporación de las soluciones y modificar las concentraciones iniciales.

3.6. Lixiviación alcalina (NaCN)

- Se mantiene un pH de 10.5-11 en la solución. Esto se logra con la adición de hidróxido de sodio y óxido de calcio. Niveles de pH más altos dificultan la formación de complejos cianurados y más bajos generarían un peligro potencial al fomentar la producción de gas cianhídrico.



Figura 3. 15: Cianuración, titulación del CN^- libre y control de pH
Fuente: Autor

- Se mantiene una concentración de 4 g/l de CN^- en solución. Se controla la concentración de cianuro mediante titulación con nitrato de plata y yoduro de potasio.

3.7. Disolución con agua regia



Figura 3. 16: Tratamiento con agua regia
Fuente: Autor



Figura 3. 17: Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 603
Fuente: Autor

- Se tomó una pequeña muestra del residuo de cada prueba para ser disuelta en agua regia. Esto permitió conocer la cantidad de metales que no fueron lixiviados durante el proceso.

3.8. Análisis mediante absorción atómica

La siguiente tabla resume los resultados de los análisis de las diferentes soluciones mediante absorción atómica:

Tabla II. Resultados de los análisis de absorción atómica.

Muestra	Descripción	Masa (kg)	Vol (L)	Concentración (ppm)			
				Cu	Fe	Ag	Au
1	CN 4H	0,2	0,4	486	156	3,5	2
2	CN 6H	0,2	0,4	702	540	2,6	2,3
3	CN 10H	0,2	0,4	702	132	1,8	2,8
4	Ácido 4H	0,25	0,5	675	2070	12	0,6
5	Ácido 6H	0,25	0,5	603	3780	15	0,6
6	Ácido 10H	0,25	0,5	864	2700	15	0,6
7	Residuo 4H	0,0021916	0,025	270	1530	30	10,7
8	Residuo 6H	0,0021571	0,025	216	1530	27	8,4
9	Residuo10H	0,0020331	0,025	189	720	27	6,9
10	Cabeza	0,0020374	0,025	486	1800	30	14,5

Fuente: Autor

Ley de cabeza:

Muestra proveniente del material triturado sin ningún tipo de tratamiento.

Tabla III. Ley de Cabeza

Ley de Cabeza (g/ton)			
Cu	Fe	Ag	Au
5963,48	22086,97	368,12	177,92

Fuente: Autor

Prueba I:

La prueba consiste en 4 horas de lixiviación ácida, seguida de 24 horas de cianuración.

Tabla IV. Resultados de la prueba de 4 horas.

Recuperación (%)

Elemento	Cu	Fe	Ag	Au
Sol. Ac.	24,99	18,90	6,43	0,94
Sol. CN	17,99	1,42	1,88	3,14
Total	42,98	20,32	8,31	4,09

Fuente: Autor

Prueba II:

La prueba consiste en 6 horas de lixiviación ácida, seguida de 24 horas de cianuración.

Tabla V. Resultados de la prueba de 6 horas.

	Recuperación (%)			
Elemento	Cu	Fe	Ag	Au
Sol. Ac.	23,59	28,67	8,62	1,16
Sol. CN	27,46	4,10	1,49	4,46
Total	51,04	32,76	10,11	5,62

Fuente: Autor

Prueba III:

La prueba consiste en 10 horas de lixiviación ácida, seguida de 24 horas de cianuración.

Tabla VI. Resultados de la prueba de 10 horas.

	Recuperación (%)			
Elemento	Cu	Fe	Ag	Au
Sol. Ac.	31,67	37,20	8,21	1,31
Sol. CN	25,73	1,82	0,98	6,11
Total	57,40	39,02	9,19	7,42

Fuente: Autor

3.9. Discusión

Los siguientes gráficos muestran la concentración de metales presentes en las soluciones: ácida y cianurada, y el tiempo de residencia de las muestras en la solución ácida. (mg de oro y plata exagerados 100 veces).

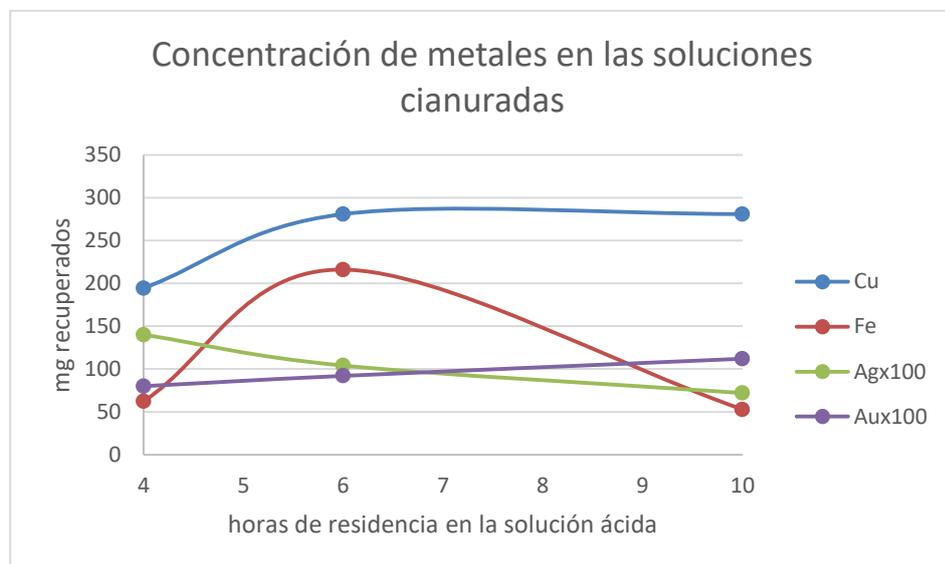


Figura 3. 18: Recuperación de metales en la solución cianurada vs. tiempo de residencia en la solución ácida. **Fuente:** Autor

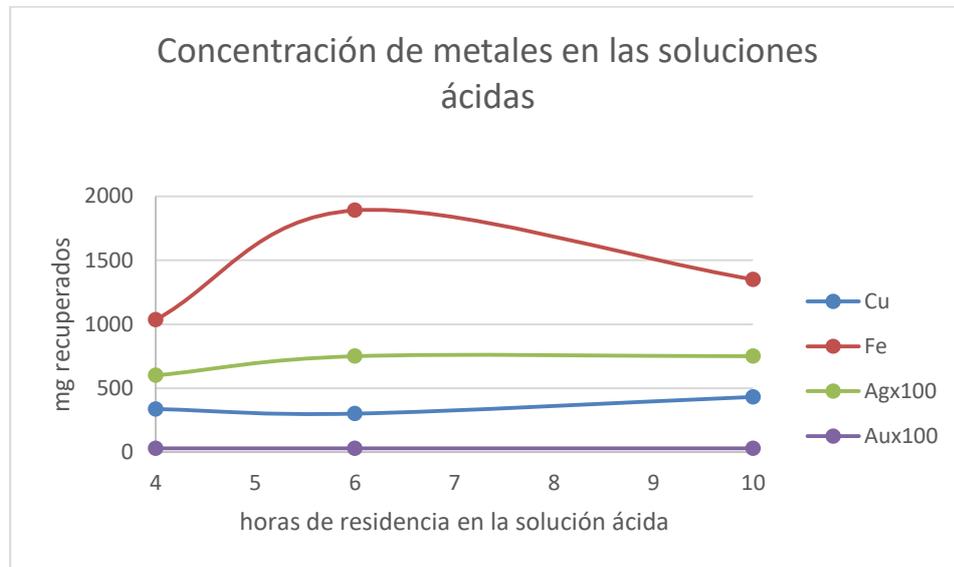


Figura 3. 19: Recuperación de metales en la solución ácida vs. tiempo de residencia en la solución ácida. **Fuente:** Autor

A partir de ellos se pueden emitir las siguientes observaciones:

- Mayores tiempos de residencia en la solución ácida generan mayores recuperaciones de plata y cobre. Esto provoca una mejora en la recuperación de oro en la solución cianurada, ya que existe una menor cantidad de metales cianicidas presentes. Las concentraciones de Fe, Cu y Ag en la solución de cianuro disminuyen al aumentar el tiempo de permanencia en las soluciones ácidas.
- La presencia de hierro es perjudicial para la lixiviación del cobre en las soluciones ácidas. Se puede inferir de la curva que la disolución del cobre

se da de manera posterior a la del hierro, y que de hecho esta no se da hasta el momento en que la solución se sobresatura de hierro. Se sugiere aumentar la concentración de iones cloruro a 50 g/l para analizar la posible precipitación de hierro y mejorar la lixiviación de cobre.

- La gran cantidad de hierro, cobre y plata presentes producen un efecto negativo en la recuperación del oro (recuperaciones inferiores al 10%). Esto afecta la utilidad del proceso de cianuración como alternativa atractiva desde el punto de vista económico.
- Es posible que el no alcanzar tamaños de molienda más pequeños afecta negativamente la disolución de los metales al tener una superficie específica muy pequeña, serían necesarias más pruebas para poder descartar o confirmar esta hipótesis.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se produjeron adaptaciones al molino de martillos con el fin de poder reducir el tamaño del material y así aumentar la superficie específica de los metales. Se alcanzó de esta manera un D80 de 2 mm, sin embargo, el proceso de molienda mediante este equipo resulta extremadamente ineficiente, lográndose apenas 2 kg de material molido durante dos días de trabajo. Esta ineficiencia es fácil de explicarse, ya que casi la totalidad de la energía es convertida en ruido y vibraciones. El nivel de ruido generado es varias veces mayor al producido por un molino de bolas de tamaño similar.
- Se caracterizó el material proveniente de los PCB disolviendo una muestra en agua regia y analizando la solución mediante absorción atómica. Se encontraron valores importantes de contenido de plata y oro, 368 y 173 g/ton respectivamente. Estos valores resultan lo suficientemente altos como para generar interés en futuras investigaciones.
- La caracterización exhaustiva del material (composición elemental, determinación de tamaño de liberación) no pudo ser realizada debido a los altos costes que estos conllevaban. El número de pruebas realizadas se

vio limitada en gran medida por el costo elevado de los análisis posteriores, y sin poder contar con ciertos insumos y equipos.

- Se planteó un método de recuperación hidrometalúrgica con el fin de obtener los diferentes metales presentes. La utilización del pretratamiento ácido presenta mejoras en la recuperación de oro en el proceso de cianuración, sin embargo, las altas concentraciones de hierro iniciales afectan negativamente las separaciones selectivas de cobre y plata. A partir de las 6 horas de residencia en la solución ácida se produce una sobresaturación de hierro en las soluciones, lo que induce la disolución de los otros. Se considera que es el hierro el elemento que afecta de manera más negativa la lixiviación del oro. Alternativas posibles para disminuir este efecto serían la disminución del porcentaje de sólidos en las soluciones, la separación selectiva de hierro mediante ácido cítrico o ácido etilendiaminotetraacético, el aporte de iones cloruro a través de ácido clorhídrico en vez de cloruro de sodio, aumentando la concentración de cloro o la utilización de un método de recuperación más selectivo como la tioureación.
- Se realizaron diferentes pruebas para comprobar la efectividad del pretratamiento con ácido sulfúrico. A pesar de la baja eficiencia de la recuperación del oro, existe evidencia para sugerirlo como alternativa para

la separación de los otros metales, e hipotetizar que el tiempo de residencia tiene una relación directa con la disolución de estos.

- La recuperación de metales a partir de métodos hidrometalúrgicos resulta interesante y puede ser considerado una actividad económica muy lucrativa de llegar a ser refinada. Se recomienda continuar la investigación. Existen valores lo suficientemente altos de metales valiosos como para que estos sean ignorados. No sólo se perfila como una fuente probable de ingresos, sino como una alternativa más ecológica que el simple desecho y la fundición.

4.2. Recomendaciones

- Realizar más pruebas con el fin de poder emitir conclusiones que posean significancia estadística, y descartar la posibilidad de errores aleatorios o de procedimiento.
- Caracterizar de manera más exhaustiva del material, incluyendo análisis de todos los elementos presentes.

- Adquirir insumos que permitan realizar pruebas con mayor facilidad, así como un mayor número de estos. Entre estos se incluyen: rodanina como indicador, molinos de corte, agitadores de plástico, campanas de extracción de gases, platos calentadores, bombas de filtrado, reactivos diversos, vidriería, etc.
- Continuar con más experimentos para poder determinar como la variación de otros parámetros modifica el comportamiento de los procesos de lixiviación. Entre ellas se pueden mencionar: variaciones del porcentaje de sólidos, aumento de los tiempos de residencia, cambios en las concentraciones de los reactivos, uso de otros oxidantes, uso de otro tipo de soluciones lixiviantes, aumento del número de pasos, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDES. (2012). Ecuador abrió la primera planta de reciclaje de desechos electrónicos | ANDES.
- Duan, H., Hou, K., Li, J., & Zhu, X. (2011). Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.057>
- El Comercio. (2014). La basura electrónica crecerá 33% en el 2017 :: Planeta :: EL COMERCIO.
- El Universo. (2014). Desechos electrónicos se reutilizan poco en Ecuador - Ecología - Vida y Estilo | El Universo.
- Ellis, S., & Senanayake, G. (2004). The effects of dissolved oxygen and cyanide dosage on gold extraction from a pyrrhotite-rich ore. *Hydrometallurgy*, 72(1–2), 39–50. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00131-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00131-2)
- EY Yazici, H. D. (2009). Recovery of metals from E-wastes. *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey*, 48(3), 3–18.
- Ghosh, B., Ghosh, M. K., Parhi, P., Mukherjee, P. S., & Mishra, B. K. (2015). Waste Printed Circuit Boards recycling: An extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*, 94, 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024>

INEC. (2013). Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC´S).

Estadísticas Sociales INEC 2013, 1–33.

<https://doi.org/10.1109/ColombianCC.2013.6637543>

Janacova, D., Charvatova, H., & Kolomaznik, K. (2009). Modeling of temperature fields inside two layers board copper - plastic materials during treatment.

Proceedings of the 6Th Wseas International Conference on Engineering

Education - Recent Advances in Engineering Education, 174–177. Retrieved

from

http://apps.isiknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=14&SID=N14OleD5ne2NO2Ailh5&page=7&doc=333

Koyanaka, S., Ohya, H., Lee, J., Iwata, H., & Endoh, S. (1999). Impact Milling of Printed Circuit Board Wastes for Resources Recycling and Evaluation of the Liberation using Heavy Medium Separation. *J. Soc. Powder Technol. Japan*, 36(18), 479–483.

Li, J., Duan, H., Yu, K., Liu, L., & Wang, S. (2010). Characteristic of low-temperature pyrolysis of printed circuit boards subjected to various atmosphere. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 810–815.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.011>

Marsden, J., & House, I. (1992). *The Chemistry of Gold Extraction (I)*. West Sussex: Ellis Horwood Ltd.

Ministerio del Ambiente. (2012). AM 190 Política-Nacional-de-Post-Consumo-de-Equipos-Eléctricos-y-Electrónicos1.pdf.

- Ogunniyi, I. O., & Vermaak, M. K. G. (2009). Investigation of froth flotation for beneficiation of printed circuit board comminution fines. *Minerals Engineering*, 22(4), 378–385. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.10.007>
- Ogunniyi, I. O., Vermaak, M. K. G., & Groot, D. R. (2009). Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations. *Waste Management*, 29(7), 2140–2146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.004>
- Quinet, P., Proost, J., Van Lierde, A. (2005). Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Minerals Metallurgical Process*, (22), 17–22.
- Revista Líderes. (2012). La basura electrónica es un reto | Revista Líderes. Retrieved from <http://www.revistalideres.ec/lideres/basura-electronica-reto.html>
- Sarvar, M., Salarirad, M. M., & Shabani, M. A. (2015). Characterization and mechanical separation of metals from computer Printed Circuit Boards (PCBs) based on mineral processing methods. *Waste Management*, 45, 246–257. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.020>
- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>
- Vidyadhar, a, & Das, a. (2012). Kinetics and Efficacy of Froth Flotation for the Recovery of Metal Values From Pulverized Printed Circuit Boards. XXVI

International Mineral Processing Congress (IMPC), (457), 236–243.

Will Nichols. (2015). Up to 90% of world's electronic waste is illegally dumped, says UN | Environment | The Guardian. Retrieved March 3, 2017, from <https://www.theguardian.com/environment/2015/may/12/up-to-90-of-worlds-electronic-waste-is-illegally-dumped-says-un>

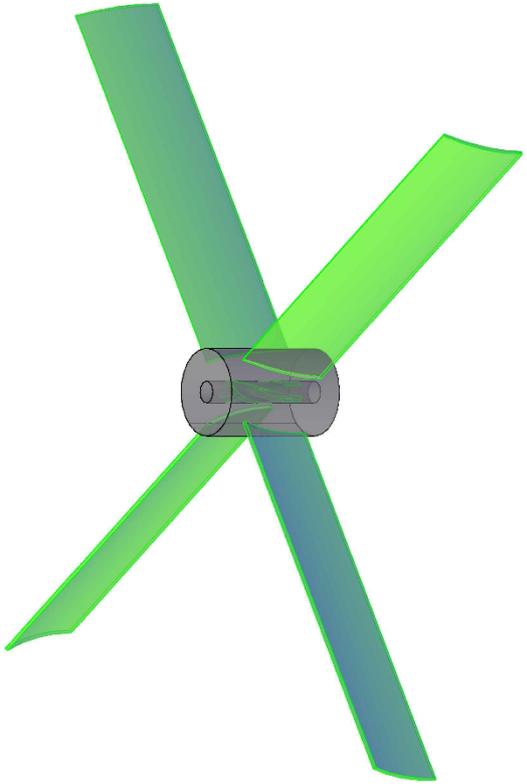
Yamane, L. H., de Moraes, V. T., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2011). Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*, 31(12), 2553–2558. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006>

Yang, H., Liu, J., & Yang, J. (2011). Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1–3), 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.051>

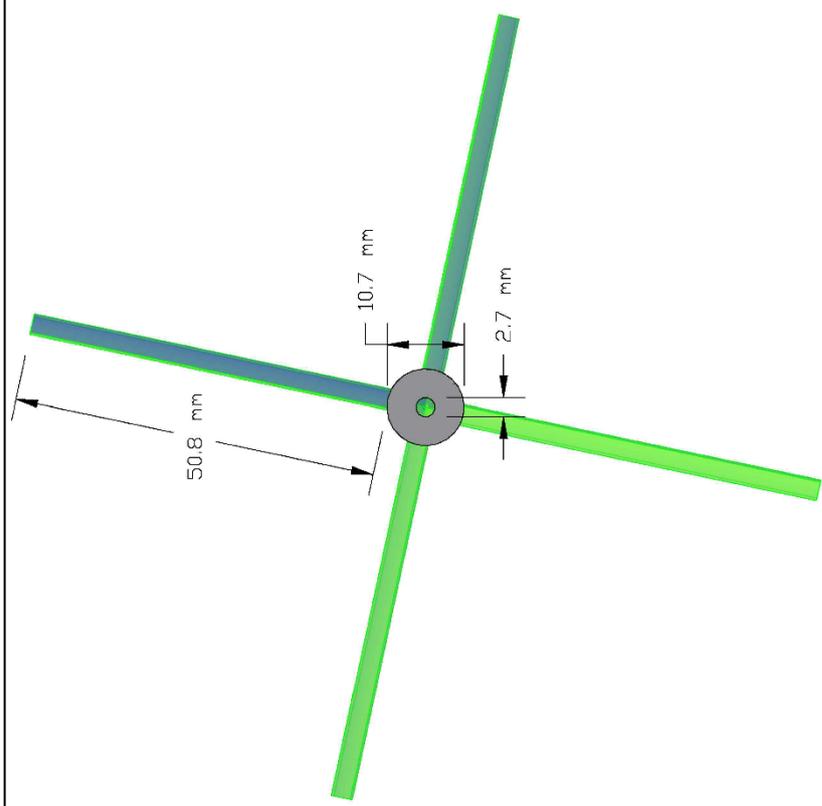
Zhang, S., & Forssberg, E. (1999). Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 105(1), 295–301. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00151-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00151-5)

ANEXOS

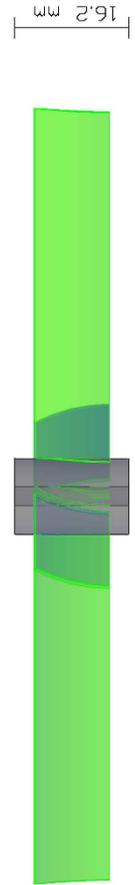
Esquema de la Hélice utilizada para el agitador



1



2



3

Esquema de Hélice en 3D

- 1 Vista Isométrica
- 2 Vista en Planta
- 3 Vista Frontal

Vista microscópica del material

