

2021 INFORME



Proyectos

“CIRWASTE”

ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA AL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS

Informe final

Número de proyecto: 22100002

Expediente: IMAMCC/2021/1

Duración: Del 01/01/2021 al 31/12/2021

Coordinado en AIDIMME por: GRIMA CARMENA, LAURA

Línea de I+D: ECONOMÍA CIRCULAR



GENERALITAT
VALENCIANA

iVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL

ÍNDICE

1	Introducción, objetivos del proyecto.	3
2	Actividades realizadas, desarrollo del proyecto.	3
3	Resultados obtenidos.	4
3.1	Metodología	4
3.2	Estudio sobre residuos eléctricos y electrónicos	5
3.2.1	Abreviaturas	5
3.2.2	Residuos eléctricos. Clasificación y Normativa actual	6
3.2.3	Nueva clasificación de los AEE	7
3.2.4	Selección de RAEEs. Importancia económica y economía circular	8
3.2.5	Circuitos impresos	16
3.3	Estado del arte: Técnicas de reciclaje actuales	21
3.3.2	Nivel industrial. Estudio de patentes.	27
3.3.3	Sistemas de recuperación. Procesos de investigación.	33
3.4	Alternativas de mejora. Proceso propuesto	43
3.4.1	Alternativas de mejora	43
3.4.2	Proceso propuesto	44
3.5	Ensayos realizados	46
3.6	Resultados	47
4	Alcance, colaboradores y público objetivo.	55
5	Acciones de difusión y transferencia.	56
6	Resumen y conclusiones.	57
7	Anexos y bibliografía.	58

1 Introducción, objetivos del proyecto.

El proyecto CIRWASTE se enmarca en el diseño de propuestas para evaluar la integración de la economía circular en el ámbito del tratamiento de residuos de alto impacto como son los residuos electrónicos.

El objetivo principal consiste en el planteamiento de un proceso de reciclaje con enfoque a la economía circular, donde los metales se recuperan de los residuos de forma que puedan ser utilizados en el mismo o diferentes aplicaciones a su uso original.

2 Actividades realizadas, desarrollo del proyecto.

Las actividades realizadas durante el 2021 en este proyecto se muestran en la siguiente tabla:

	Actividad	Período de realización
1	Identificación de la normativa aplicable actual a los residuos eléctricos y electrónicos	01/01 - 17/01
2	Estudio de los diferentes residuos eléctricos y electrónicos en función de su composición y potencialidad para su reciclado	11/01 – 28/02
3	Selección de los residuos objetivo para realizar el reciclaje en función de la cantidad e importancia económica de los mismos	29/01 – 28/02
4	Estudio del estado del arte para las técnicas de reciclaje actuales para residuos electrónicos y en particular circuitos electrónicos	01/03 – 29/04
5	Estudio del estado del arte sobre los sistemas de extracción y recuperación de circuitos y metales preciosos a nivel industrial y patentes.	04/04 – 31/07
6	Estudio del estado del arte sobre los sistemas de recuperación de metales en circuitos electrónicos a nivel investigación o piloto	04/04 – 31/07
7	Identificación de alternativas de mejora para incrementar la sostenibilidad del reciclaje de los residuos electrónicos según criterios técnico, económico y medioambiental. Propuesta de proceso de reciclaje de los circuitos.	01/06 – 31/12
8	Realización de ensayos o pruebas de concepto para la recuperación de estos metales en base a la economía circular. Análisis y ensayos sobre residuos reales.	01/11 – 31/12
9	Discusión de resultados y conclusiones.	18/11 – 31/12
10	Difusión del proyecto.	01/01 – 31/12

Mes Actividad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

3 Resultados obtenidos.

3.1 Metodología

El **objetivo** principal consiste en el planteamiento de un proceso de reciclaje con enfoque a la economía circular. Para ello, se procede a la **identificación y selección de residuos** electrónicos con mayor potencial para su reciclaje considerando criterios técnicos, económicos y medioambientales así como a la evaluación de la **eficacia de recuperación** mediante pruebas de concepto sobre uno de los residuos.

El objetivo ha sido la identificación de tecnologías o procesos alternativos para recuperar metales de alto impacto ambiental o de elevado interés económico.

Los trabajos, artículos y guías consultadas han sido buscados usando Google, Google Scholar y Elsevier¹ con un número de palabras clave en **áreas** diferentes:

- Generación y recolección de residuos eléctricos y electrónicos. Normativa aplicable e información accesible desde el ministerio
- Técnicas de separación y/o reciclaje mecánico de residuos eléctricos y electrónicos
- Tratamientos industriales pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos para la recuperación selectiva de los metales contenidos en estos residuos

La búsqueda de patentes se ha realizado en portales oficiales tales como la Oficina Española de Patentes y Marcas OEPM², ESPACENET³ y la base de datos PATENTSCOPE con acceso a solicitudes internacionales, OMPI Organización Mundial de la Propiedad Intelectual⁴.

¹ <https://www.elsevier.com/es-es/solutions/scopus>

² <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jspx;jsessionid=T3nWJmsgpzscKGM9u1Svp7mo.srvvarsovia2>

³ <https://es.espacenet.com/>

⁴ <https://www.wipo.int/patentscope/es/>

Como **palabras clave** para la búsqueda se han establecido (mediante distintas combinaciones booleanas AND, OR, “”, -) y tanto en inglés como en español; residuos eléctricos, reciclaje electrónico, printed circuit boards; printed wiring board; waste pcb; recycling WPCB, Best available technology, precious metal recycling/recovery, separación física residuos metálicos, electronic equipment/device recycling/recovery, scrap recovery precious metals...

Se ha hecho una revisión extensa del **estado del arte** para la reutilización y/o el reciclaje de estos residuos y procesos encontrados para la extracción de elementos valiosos encontrados en los mismos. Los circuitos impresos se encuentran en cualquier dispositivo eléctrico o electrónico y contienen metales de mucho valor añadido por lo que existen numerosos estudios destinados a su reciclaje. Los artículos encontrados en Google coinciden con los artículos de investigación encontrados en el buscador de revistas científicas. Por otra parte, también aparecen extractos de libros de texto científicos, así como, informes publicados por universidades y empresas de investigación.

No obstante, la elevada **complejidad** de estos residuos hace del tratamiento y recuperación un reto tecnológico en el límite del conocimiento **que hasta el momento no tiene una única solución.**

3.2 Estudio sobre residuos eléctricos y electrónicos

3.2.1 Abreviaturas

PCBS	Printed circuit boards
PWBS	printed wiring boards
WPBS	Waste Printed Circuit Boards
EEE	electric and electronic equipment
WEEE	Waste electrical and electronic equipment
AEE	aparatos eléctricos y electrónicos
RAEE	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
CPU	Central processing unit
E-WASTE	Electronic waste
REE	Rare earth element
HREE	Heavy rare earth element
LREE	Light rare earth element
BAT	Best available technology
MB	Motherboard
MP-PM	Metales preciosos
EC – CE	componentes electrónicos

3.2.2 Residuos eléctricos. Clasificación y Normativa actual

La gestión de RAEE está regulada por la **Directiva 2012/19 / UE** del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

La primera Directiva RAEE (**Directiva 2002/96 / CE**) entró en vigor en febrero de 2003. La Directiva preveía la creación de sistemas de recogida en los que los consumidores devuelven sus RAEE de forma gratuita. Estos esquemas tienen como objetivo aumentar el reciclaje y / o la reutilización de RAEE. La Directiva **2002/96/ CE fue derogada el 15 de febrero de 2014 y sustituida por la Directiva 2012/19 / UE** sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), que introduce un aumento escalonado de los objetivos de recogida para los años 2016 y 2019. Además, a partir del año de referencia 2018 en adelante, el ámbito de aplicación de la Directiva se amplía a todas las categorías de AEE. Por lo que la definición y número de categorías cambian.

La **normativa aplicable a nivel nacional** en materia de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos:

- Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Real Decreto 219/2013, de 22 de marzo, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos

Según el artículo 3.a del Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, se consideran **aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)** a todos los aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, que están destinados a ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1.000 V en corriente alterna y 1.500 V en corriente continua.⁵

Los **residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)**, según el art. 3.f, son todos los aparatos eléctricos y electrónicos que pasan a ser residuos de acuerdo con la definición que consta en el artículo 3.a) de la Ley 22/2011, de 28 de julio. Esta definición comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en que se desecha.

El alto contenido en materiales valiosos y de sustancias peligrosas de estos residuos son los que determinan su peculiaridad y hace necesario mejorar el comportamiento medioambiental de todos los agentes clave que intervienen en el ciclo de vida de los AEE, los consumidores, los distribuidores y, en particular, los agentes directamente implicados en la recogida y tratamiento de los RAEE.

La Directiva 2002/95/CE sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos (Directiva RoHS), adoptada en paralelo a la Directiva RAEE, tenía como objetivo la protección del medio ambiente y de la salud humana mediante la limitación en dichos aparatos del uso de plomo, mercurio, cadmio, cromo y algunos retardadores de llama bromados. La aplicación de estas dos Directivas en los Estados miembros no estuvo exenta de dificultades: solo un tercio de todos los residuos eléctricos y electrónicos se recogían y trataban adecuadamente. Por ello, en 2012, tras un largo proceso legislativo, se adoptó una refundición de la Directiva 2012/19/UE (RAEE) y de la Directiva 2012/18/UE (RoHS). Ambas directivas requerían que los Estados miembros incrementaran la cantidad de residuos electrónicos que recogían y permitieran

⁵ MITECO – Aparatos eléctricos y electrónicos. [Enlace](#)

a los consumidores entregar sus aparatos eléctricos pequeños en cualquier establecimiento especializado sin tener que adquirir nuevos productos. Adoptadas en **mayo de 2018** a raíz de negociaciones interinstitucionales entre el Parlamento y el Consejo, las cuatro Directivas:

- [\(UE\) 2018/849](#): Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se modifican la Directiva 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, la Directiva 2006/66/CE relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y la Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
- [\(UE\) 2018/850](#): Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos (Texto pertinente a efectos del EEE)
- [\(UE\) 2018/851](#): Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance)
- [\(UE\) 2018/852](#): Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste (Text with EEA relevance)

Incorporaban los siguientes elementos clave⁶:

- Regímenes obligatorios de **responsabilidad ampliada de los productores** para que estos comercialicen productos más ecológicos
- Apoyo a los regímenes de **recuperación y reciclado** (para envases, baterías, equipos eléctricos y electrónicos, y vehículos al final de su vida útil, por ejemplo).
- Aprovechamiento eficaz de los recursos
- Gestión y prevención de los residuos
- Legislación específica sobre producción y flujos de residuos
- Tratamiento y eliminación de los residuos
- El plástico en la economía circular
- El Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular en el marco del Pacto Verde Europeo

3.2.3 Nueva clasificación de los AEE

Según el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, las categorías de los AEE, en función de su uso y de sus características son las 7 siguientes, incluidas en el anexo III del RD:

1. Aparatos de intercambio de temperatura (FR1)
 - 1.1. Aparatos con CFC, HFC HCFC, HC, NH3
 - 1.2. Aparatos Aire acondicionado y aceites
 - 1.3. Aparatos con aceite en circuitos o condensadores
2. Monitores y pantallas (FR2)
 - 2.1. Monitores y pantallas CRT

⁶ <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/76/la-eficiencia-en-el-uso-de-los-recursos-y-la-economia-circular>

2.2. Monitores y pantallas: No CRT, no LED

2.3. Monitores y pantallas LED

3. Lámparas (FR3)

3.1. Lámparas de descarga, no LED y fluorescentes.

3.2. Lámparas LED

4. Grandes aparatos (FR4)

4.1. Grandes aparatos con componentes peligrosos

4.2. Grandes aparatos (Resto)

5. Pequeños aparatos (FR5)

5.1. Pequeños aparatos con componentes peligrosos y pilas incorporadas

5.2. Pequeños aparatos (Resto)

6. Aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños (FR6)

6.1. Aparatos de informática y telecomunicaciones pequeños con componentes peligrosos

7. Paneles fotovoltaicos (FR7)

7.1. Paneles fotovoltaicos (Ej.: Si)

7.2. Paneles fotovoltaicos peligrosos (Ej.:CdTe)

3.2.4 Selección de RAEEs. Importancia económica y economía circular

En el rápido mundo en desarrollo actual, los avances tecnológicos en equipos eléctricos y electrónicos (televisión, computadoras, impresora, teléfono, módem, máquinas de fax, fotocopiadoras, LED / Monitores LCD, ordenadores portátiles, placas de circuitos impresos, equipos médicos, etc.) tienen una vida útil menor en comparación con antaño debido al rápido aumento de la demanda de productos avanzados.

Esta disminución en la vida útil de los equipos eléctricos y electrónicos (AEE) genera una enorme cantidad de residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE) denominados "Residuos electrónicos". Las razones de la disminución de la vida útil de los dispositivos electrónicos son las siguientes⁷:

- Entrada de dispositivos altamente avanzados y técnicamente capacitados
- Rápido crecimiento en el estilo de vida de los seres humanos con instalaciones modernas con equipos eléctricos y electrónicos fáciles de usar.
- Fuerte competencia entre los individuos y empresas para usar y producir y vender los mejores productos fabricados en tecnologías avanzadas.

Los materiales de los RAEE se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Metales preciosos: **Au y Ag, Pd, Pt**
- Metales del grupo del platino: **Pd, Pt, Rh, Ir y Ru**
- Metales base: **Cu, Al, Ni, Sn, Zn y Fe**

⁷ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

- Metales peligrosos y especiales: **Hg, Be, Pb, In, Sb, Bi, Cd, As y Se**
- Elementos escasos: **Te, Ga, Se, Ta y Ge**
- Halógenos: **Br, F, Cl**
- Plásticos y orgánicos
- Cerámicos, vidrio

Los recursos de metales secundarios como los RAEE contienen **metales básicos** y **metales preciosos** comparables al contenido de metales en minerales y concentrados⁸. Por lo tanto, el reciclaje de RAEE es de primordial importancia tanto para el medio ambiente como para el beneficio económico⁹. Además, estos residuos contienen una variedad de sustancias **peligrosas**, que pueden causar problemas ambientales cuando no se gestionan adecuadamente.¹⁰

Las fracciones/componentes que contienen los metales preciosos son;

- Circuitos impresos del final de vida útil de los siguientes residuos:
Placas de ordenador, de teléfono móvil, discos duros, placas de televisores y dispositivos de audio etc.
- Componentes como capacitores/condensadores multicapa, contactos,
- Pequeños aparatos y otros dispositivos encontrados en la industria como catalizadores en cuya composición consten los metales preciosos
- Materiales técnicos avanzados: electro ópticos, óxidos y químicos especiales

A continuación se muestran las composiciones encontradas en bibliografías para residuos electrónicos. Cabe destacar que en la gran mayoría de casos se hace hincapié en la gran variabilidad de composiciones entre estos dispositivos, por tanto los valores son indicativos y podrían variar incluso dentro de las mismas categorías.

Tabla 1. Tipos de residuos y composición en metales. Fuente¹¹

E-Waste	Fe (wt%)	Cu (wt%)	Al (wt%)	Pb (wt%)	Ni (wt%)	Ag (ppm)	Au (ppm)	Pd (ppm)
TV board scrap	28	10	10	1.0	0.3	280	20	10
PC board scrap	7	20	5	1.5	1	1000	250	110
Mobile phone scrap	5	13	1	0.3	0.1	1380	350	210
Portable audio scrap	23	21	1	0.14	0.03	150	10	4
DVD player scrap	62	5	2	0.3	0.05	115	15	4
Calculator scrap	4	3	5	0.1	0.5	260	50	5
PC mainboard scrap	4.5	14.3	2.8	2.2	1.1	639	566	124
Printed circuit boards scrap	12	10	7	1.2	0.85	280	110	-
TV scrap (CRT's removed)	-	3.4	1.2	0.2	0.038	20	<10	<10
Electronic scrap	8.3	8.5	0.71	3.15	2.0	29	12	-
PC scrap	20	7	14	6	0.85	189	16	3
Typical electronic scrap	8	20	2	2	2	2000	1000	50
E-scrap sample 1	37.4	18.2	19	1.6	-	6	12	-
E-scrap sample 2	27.3	16.4	11.0	1.4	-	210	150	20
Printed circuit boards	5.3	26.8	1.9	-	0.47	3300	80	-
E-scrap (1972 sample)	26.2	18.6	-	-	-	1800	220	30
E-waste mixture	36	4.1	4.9	0.29	1.0	-	-	-

Note that "--" denotes not reported.

Los AEE son productos muy complejos que, generalmente, incluyen numerosas partes y componentes, y la proporción de cada uno de estos materiales dependerá del tipo de AEE en

⁸ Havlik et al., 2011; Tuncuk et al., 2012; Birloaga et al., 2013

⁹ Wildmer et al., 2005; Robinson, 2009; Yazici y Deveci, 2013

¹⁰ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

¹¹ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

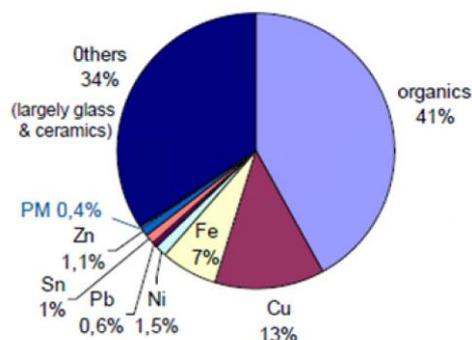
cuestión. Un ejemplo de los materiales contenidos (% en peso) en los AEE puede resumirse en la siguiente tabla:

Tabla 2. Ejemplo de los materiales contenidos en aparatos eléctricos y electrónicos [Fuente¹²]

Categoría de AEE	Metales férricos	Metales no férricos	Vidrio	Plásticos	Otros
Grandes electrodomésticos	61	7	3	9	21
Pequeños electrodomésticos	19	1		48	32
Equipos informáticos	43		4	30	20
Telecomunicaciones	13	7		74	6
Electrónica de consumo	11	2	35	31	22
Lámpara de descarga de gas	2	2	89	2	3

Tabla 3. Composición de distintos residuos electrónicos. Fuente¹³

Unidades:	%wt	%wt	%wt	%wt	ppm	ppm	ppm	ppm
Residuo	Plástico	Fe	Al	Cu	Ag	Au	Pd	Suma PM
Placa- TV	28	28	10	10	280	20	10	310
Placa- PC	23	7	5	20	1000	250	110	1360
Telf. Móvil	56	5	2	13	3500	340	130	3970
Audio portát.	47	23	1	21	150	10	4	164
DVD	24	62	2	5	115	15	4	134
Calculadora	61	4	5	3	260	50	5	315



Metal	g/t
Ag	3630
Au	347
Pd	151
Pt	5
Total	4133

Figura 1. Ejemplo de composición media y desglose de metales preciosos para teléfono móvil [Adaptado de Fuente¹⁴].

¹² MITECO – Qué materiales y componentes tienen los RAEE [Enlace](#)

¹³ BC OEWG – Metals Recovery from e-scrap, Christian Hagelüken, 2007

Tabla 4. Tipo de residuo y precio de los metales [Fuente¹⁵]

Type of e-waste	Metal content in ppm		
	Pd	Au	Ag
Metal price (USD/t) ^a	2.95 × 10 ⁷	4.16 × 10 ⁷	5.44 × 10 ⁵
PC mainboards ^b	124 (13)	566 (82)	639 (1)
Mobile phone ^b	210 (27)	350 (65)	1380 (3)
TV boards ^b	10 (11)	20 (31)	280 (6)
Typical Cu-Au ore ^c	-	5.7	22.9
Typical Cu-Au concentrate ^d	-	490	100

Type of e-waste	Metal content and economic value (% in brackets)					
	Metal content in wt. %					
	Fe	Cu	Al	Pb	Sn	Ni
Metal price (USD/t) ^a	515	6583	2100	2377	20950	11234
PC mainboards ^b	4.5 (0)	14.3 (3)	2.8 (0)	2.2 (0)	-	1.1 (0)
Mobile phone ^b	5 (0)	13 (4)	1 (0)	0.3 (0)	0.5 (0)	0.1 (0)
TV boards ^b	28 (5)	10 (25)	10 (8)	1 (1)	1.4 (11)	0.3 (1)
Typical Cu-Au ore ^c	16	0.4	4.5	0.1	0.002	0.001
Typical Cu-Au concentrate ^d	2.9	0.97	0.5	0.03	-	0.02

		world mine- production ^a	by- product from	demand for electronic s (EEE) ^a	demand related to mine production	metal price ^{**}	Main uses in electro/electronics
		t/a		t/a		€/kg	
silver	Ag	20.000	(Pb, Zn)	6.000	30%	350	contacts, switches, (leadfree) solders, conductors, MLCC, ...
gold	Au	2.500	(Cu)	250	10%	16.000	bonding wire, contacts, IC
palladium	Pd	215	PGM	32	15%	8.500	Multilayer capacitors (MLCC), connectors, PWB plating, ...
platinum	Pt	220	PGM	13	6%	29.000	hard disks, thermocouple wires, fuel cells
ruthenium	Ru	30	PGM	6	20%	18.000	hard disks, resistors, conductive pastes, plasma display panels
copper	Cu	16.000.000		4.500.000	28%	5	cables, contacts, conductors, transformer, e-motors
tin	Sn	275.000		90.000	33%	10	(leadfree) solders (incl. other solder uses)
antimony	Sb	130.000		65.000	50%	4	flame retardants, CRT glass
cobalt	Co	58.000	Ni, Cu	11.000	19%	40	rechargeable batteries
bismuth	Bi	5.600	Pb, W, Zn	900	16%	16	leadfree solders, capacitors, heat sinks, electrostatic screening, ...
selenium	Se	1.400	Cu	240	17%	37	electrooptic, copiers, solar cells, ...
indium	In	480	Zn, (Pb)	380	79%	520	LCD glass, leadfree solders, semiconductors/LED, ...

^a rounded, source: USGS Mineral commodity summaries 2007 ^{**} rounded, as of 03/2007

Figura 2. Metales, demanda y precio de los dispositivos [UMICORE]

¹⁴ UMICORE

¹⁵ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

3.2.4.1 Volumen de residuos electrónicos

El volumen de desechos electrónicos está aumentando en todo el mundo y continuará creciendo sin interrupción durante algún tiempo debido al auge de las nuevas tecnologías y la demanda de productos electrónicos más accesibles.

El mundo generará 53,9 millones de toneladas de desechos electrónicos en 2025 y Europa será responsable de 10,2 de ellas, según indica el informe de la Comisión de Residuos Electrónicos de la Oficina Internacional del Reciclaje. Hace una década los Estados Unidos y Europa eran considerados los principales generadores de desechos electrónicos, pero el análisis de los datos recopilados indica que la región geográfica de Europa Occidental ha sido superada por los países de Asia y el Pacífico.¹⁶

Anualmente, en **Europa Occidental** se generan aproximadamente **7 millones de toneladas** de desechos electrónicos, pero es probable que el crecimiento más rápido se registre en la región de Asia - Pacífico, con un total de **15,9 millones de toneladas** producidas en 2016. En términos de volumen, se espera que en Asia- Pacífico la cifra aumente hasta 23,7 millones de toneladas en 2025. Esto supone más del doble que la segunda región generadora de residuos, **Europa Occidental, que prevé aumentar de 9 millones de toneladas en 2016 a más de 10,2 millones de toneladas nueve años después.**

La siguiente estadística muestra la evolución anual del volumen de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) recogidos en España de 2007 a 2018. En este último año se recogieron **en España** más de 320.000 toneladas de residuos electrónicos, lo que supone un aumento de aproximadamente 33.000 toneladas con respecto a 2017.

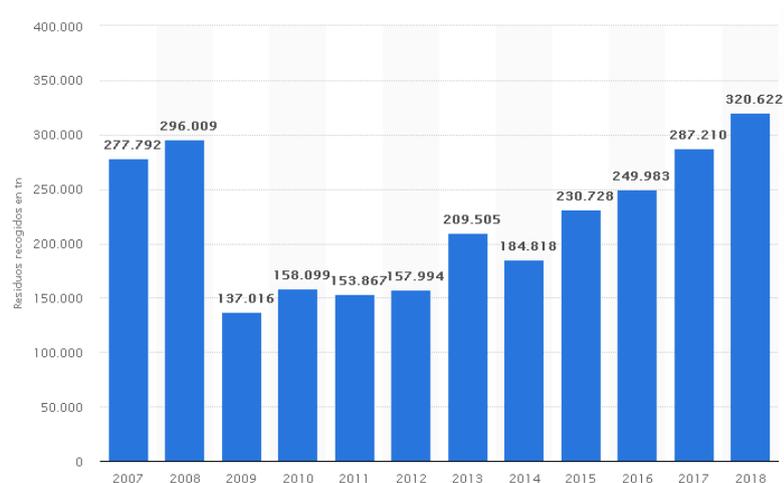


Figura 3. Cantidad de Residuos de Aparatos Eléctricos y electrónicos (RAEE) en toneladas Recogidos en España de 2007 a 2018 [Fuente¹⁷]

¹⁶ <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2018/06/europa-generara-mas-de-10-millones-de-toneladas-de-basura-electronica-en>

¹⁷ <https://es.statista.com/estadisticas/619085/cifra-de-raee-recogidos-en-espana/#statisticContainer>

La figura siguiente muestra la cantidad de RAEE recogidos en 2018 en comparación con los AEE puestos en el mercado en los tres años anteriores (2015-2017), ambos medidos en kilogramos (kg) por habitante. En la UE, los RAEE recogidos en el año 2018 se estimaron en 8,9 kg por habitante, mientras que el AEE medio puesto en el mercado durante el período 2015-2017 se estimó en 19,1 kg por habitante. La variación en las cantidades recolectadas refleja diferencias en el nivel de consumo de AEE entre países, así como diferencias en el desempeño de sus respectivos esquemas de recolección de residuos.¹⁸

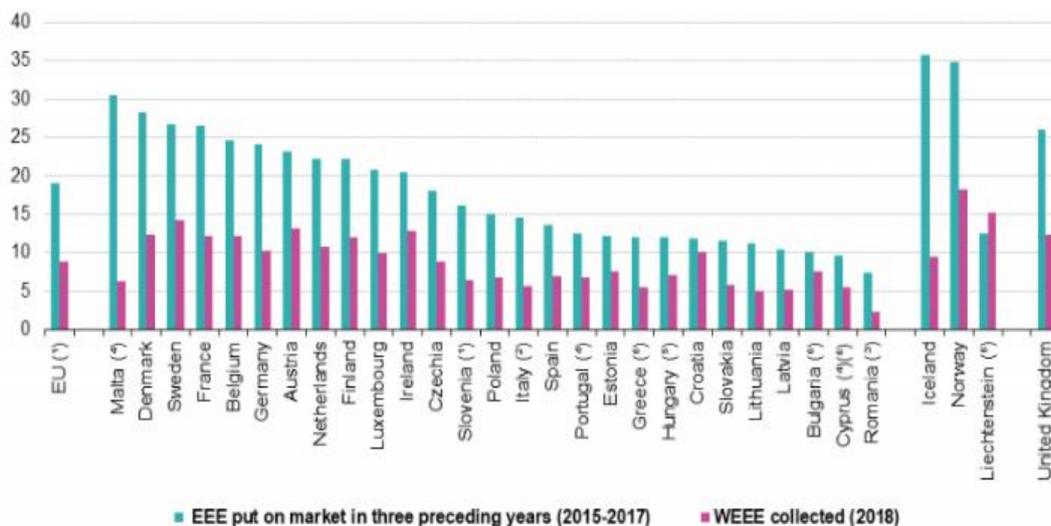


Figura 4. Kg por habitante de Dispositivos electrónicos puestos en el mercado y recogidos en Europa [Eurostat¹⁹]

Debido al incesante desarrollo de las innovaciones tecnológicas, los dispositivos electrónicos han visto **disminuir su vida útil** considerablemente: pasando de unos 10 años a solo 2 años para los AEE grandes, y de 24 a solo 9 meses en el caso de los teléfonos móviles. La corta vida de los productos electrónicos se suma a la creciente demanda de tecnología por parte de los países en desarrollo, con el resultado de una rápida generación de RAEE que, a su vez, conduce a un aumento de los residuos municipales. El problema se agrava aún más por la creciente variabilidad de su composición: con la creciente complejidad tecnológica de los dispositivos, también hay un enriquecimiento progresivo en diferentes materiales. Esto conduce a impactos adicionales en el medio ambiente, al aumentar drásticamente tanto la demanda de metales preciosos y raros de recursos primarios como el riesgo de contaminación ambiental altamente compleja por metales y otros contaminantes²⁰.

¹⁸ <https://ec.europa.eu/eurostat/>

¹⁹ [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electrical and electronic equipment \(EEE\) put on the market in the three preceding years \(2015-2017\) and waste EEE collected in 2018 \(kilograms per inhabitant\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electrical_and_electronic_equipment_(EEE)_put_on_the_market_in_the_three_preceding_years_(2015-2017)_and_waste_EEE_collected_in_2018_(kilograms_per_inhabitant).png)

²⁰ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

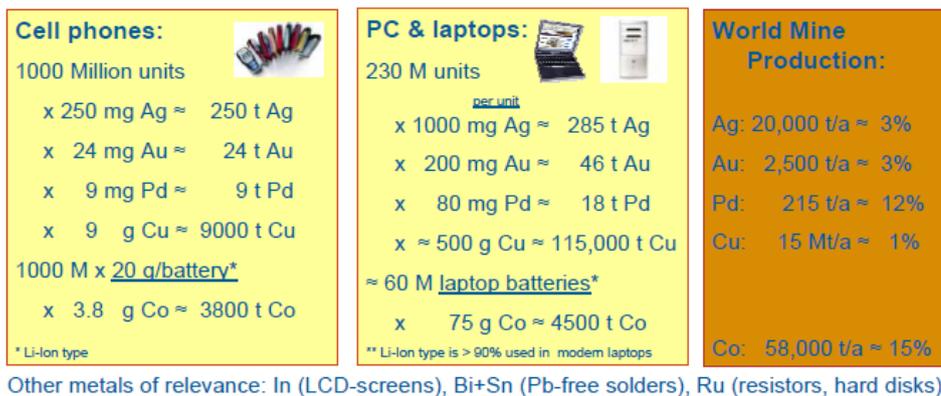


Figura 5. Ventas estimadas de móviles para 2005 Fuente: UMICORE

El porcentaje en peso de metales obtenidos de PCB posee el contenido de cobre como el más alto entre todos los demás metales. El contenido de metal en los desechos electrónicos varía según la fuente y el tipo de desechos electrónicos. Es muy importante señalar que los desechos electrónicos (en particular las placas) tienen de 13 a 26 veces más contenido de Cu y de 35 a 50 veces más de Au en comparación con los minerales / concentrados (Zhang y Forsberg, 1998; Cui y Zhang, 2008)²¹

Aunque haya cantidades despreciables por cada pieza, el aprovechamiento unitario a gran escala lleva a números totales importantes.

3.2.4.2 Evolución y precio actual de los metales que componen estos residuos

En la minería, los negocios (exportación, distribución, venta y compra, etc.) dependen de los precios de los commodities, que son representados por los metales como el oro, cobre, paladio, plata etc. Uno de los principales factores que impactan en los precios es la demanda externa. Será un aspecto directo que incrementa los ingresos de las empresas mineras debido al alza del consumo de los metales que extraen y distribuyen. El cobre es un ejemplo de ello. Se trata de un metal bastante utilizado en diversos sectores como construcción, electricidad, tecnología, entre otros. Desde el 2017, los precios de las materias primas han aumentado.²²

Precios - London Metal Exchange

La Bolsa de Metales de Londres (LME)²³ es el mayor mercado del mundo en opciones y contratos a futuro de metales no ferrosos con contratos altamente líquidos. Los contratos a plazo del LME permiten que los productores, los fabricantes, los comerciantes y los consumidores se aseguren contra los riesgos de variación de precios.

Los precios publicados en la LME son considerados como una representación verdadera de la oferta y la demanda por el sector comercial e industrial en todo el mundo.

La evolución en 5 años de algunos metales encontrados en los PCB son (Cu, Au, Ni, Sn, Ag, Rh)^{24 25}:

²¹ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

²² <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/08/el-precio-de-los-commodities-en-la-mineria-un-factor-fundamental-en-este-campo/>

²³ <https://www.lme.com/>

²⁴ <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=cobre&meses=60&moneda=eur>

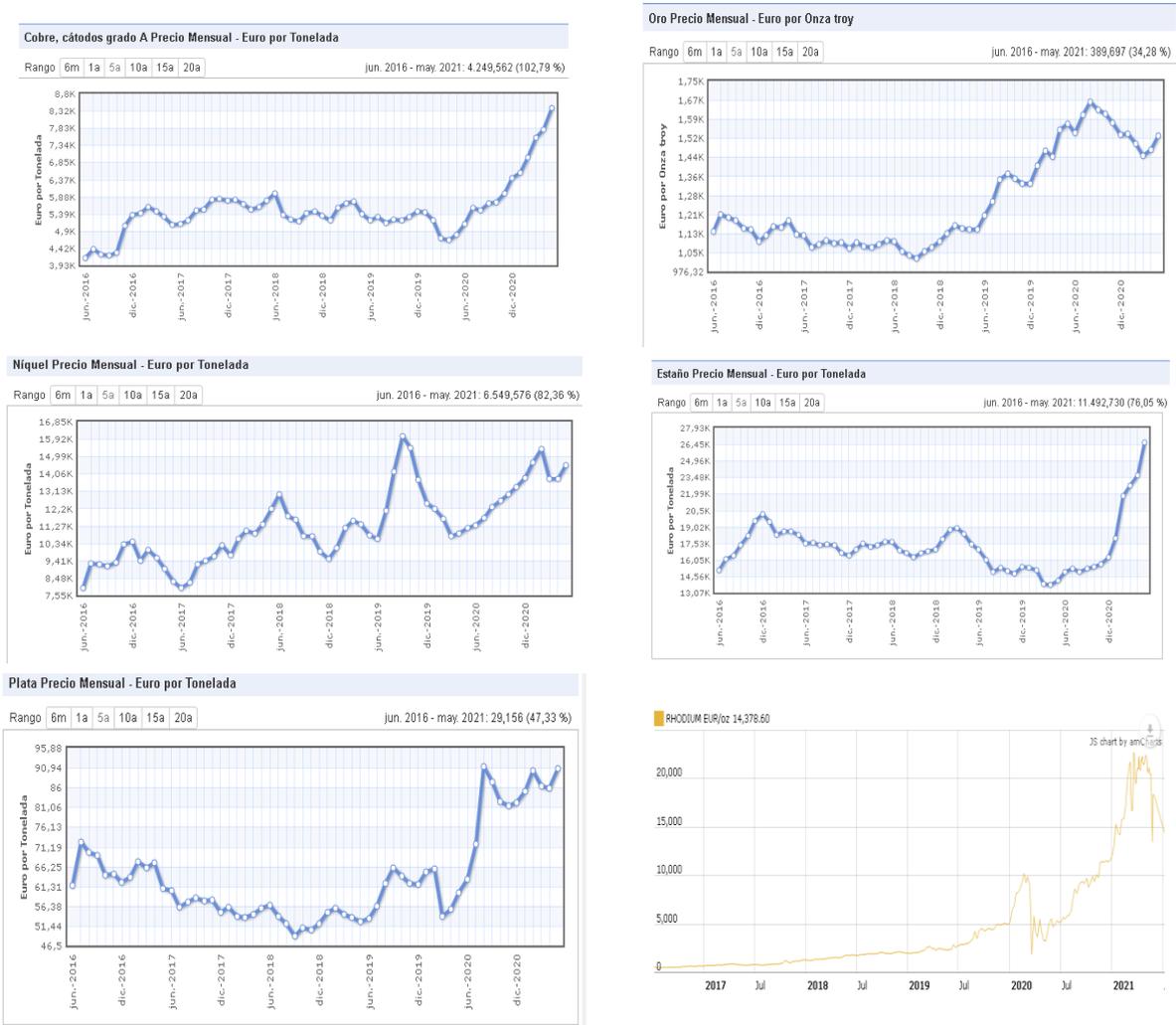


Tabla 5. Tabla de €/g de los Metales (2021)

Metal	€/ton	€/g	Fecha	Fuente
Au	64.256.278	64,26	Mayo 2021	Indexmundi
Ag	917.108	0,92	Mayo 2021	Indexmundi
Pd	83.703.704	83,70	Mayo 2021	Kitco
Pt	32.615.520	32,62	Febrero 2021	Kitco
Rh	507.936.508	507,94	Marzo 2021	Kitco

²⁵ https://www.kitco.com/charts/interactive-charts/?utm_source=kitco&utm_medium=banner&utm_content=20110407_iCharts_chdata&utm_campaign=iCharts

Cu	151.675	0,15	Mayo 2021	Indexmundi
Sn	26.600	0,03	Mayo 2021	Indexmundi
Ni	293.474	0,29	Febrero 2021	Indexmundi
Al	2.010	0,002	Mayo 2021	Indexmundi
Pb	1.800	0,001	Mayo 2021	Indexmundi

3.2.5 Circuitos impresos

Las tarjetas de circuitos impresos o circuitos electrónicos (PCB) se utilizan como soporte mecánico y/o conector eléctrico de componentes electrónicos por medio de vías conductoras grabadas desde láminas de cobre sobre un sustrato no-conductivos²⁶.

Según bibliografía^{27,28} los circuitos se componen alrededor de un 40% de metales, 30% de plásticos y 30% de materiales cerámicos. Mientras que, para el sustrato de los circuitos (sin componentes electrónicos), contiene entre el 30% y el 50% de los metales y entre el 50% y el 70% de no metales.

Los contenidos metálicos y no metálicos de los Residuos de circuitos se han presentado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Cabe señalar que estos valores de los contenidos deben ser referidos con precaución ya que son **dependen mucho del tipo específico de estudio**²⁹.

Como componente principal dentro de EEE, los PCB soportan mecánicamente los componentes electrónicos (EC) y los conectan para que funcionen correctamente. Las propiedades intrínsecas y las composiciones complicadas hacen que el **reciclaje** de WPCB sea un **desafío** y muy diferente de la recuperación de metales a partir de minerales naturales. Por lo tanto, antes de reciclar los WPCB, es **necesario investigar su estructura y materiales** de fabricación³⁰.

Las placas de circuito impreso (PCB) son un componente integral de casi todos los equipos eléctricos y electrónicos. Generalmente, los PCB constituyen del 4 al 7% de la masa total de AEE. Los PCB representan uno de los **componentes más complicados y valiosos de los equipos eléctricos y electrónicos**. Los PCB de desecho contienen más de 40 tipos de metales con un rango amplio y variable de concentraciones, como metales nocivos para el medio ambiente (p. Ej., Pb, Cr, As, Cd y Hg) y otros de valor económico (p. Ej., Cu, Sn, Au, Ag y Pd)³¹.

Las PCB Se componen esencialmente de un sustrato termoplástico no conductor (resina epoxi, ciano o fenólica, a menudo reforzada con fibras de vidrio, alúmina, sílice u otros materiales inorgánicos), una capa conductora (principalmente cobre; esta fracción representa el 10-20% del peso total), y luego los diversos componentes electrónicos. Estos últimos contienen diferentes metales de interés (por ejemplo, As, In, Ga, Ge, Sb, Se, Si, Ta, Te, Ti) y se adhieren al sustrato conductor a través de juntas típicamente hechas de aleación de plomo / estaño (hasta 4 -6% del peso total) u

²⁶ <https://rodin.uca.es/handle/10498/16758>

²⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.104>

²⁸ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

²⁹ <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.032>

³⁰ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

³¹ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

ocasionalmente de oro o paladio. Los interruptores, sensores y relés son los componentes principales que contienen metales nobles.³²

Tabla 6. Análisis por ICP de los metales contenidos en circuitos según distintos autores [Fuente³³]

Source / Weight (%)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	PCB – MP	PCB-PC
Silver	0.100	–	3300 g/t	0.05	0.2	0.21	0.16
Palladium	0.01	–	–	0.01	0.005	–	–
Aluminium	5.0	–	4.7	–	–	0.26	5.7
Gold	0.025	–	80 g/t	0.03	0.1	0.00	0.13
Copper	16.0	25.06	26.8	16	20	34.49	20.19
Iron	5.0	0.66	5.3	3	8	10.57	7.33
Nickel	1.0	0.0024	0.47	2	2	2.63	0.43
Lead	2.0	0.80	–	–	2	1.87	5.53
Tin	3.0	–	1.0	–	4	3.39	8.83
Zinc	1.0	0.04	1.5	–	1	5.92	4.48

(1): Park and Faray (2009), (2): Yang et al. (2009), (3): Guo et al. (2009), (4): Goosey and Kellner (2002), (5): Sum (2005)), PCB: printed circuit boards, MP: mobile phone, PC: personal computers.

Una tarjeta base sobre la que va montada todos los componentes eléctricos y las interconexiones entre dichos componentes está compuesta de una resina termo-estable reforzada con fibras de vidrio. La estructura conductora puede ser, cobre, níquel, oro. Los componentes electrónicos comprenden elementos tales como condensador, resistencias, integrados, etc... La composición media de las actuales placas de circuito impreso es³⁴:

- Polímero de Fibra de Vidrio: 74%
- Cobre: 10%
- Soldadura (Estaño 63% / Plomo 37%): 4%
- Acero: 4%
- Níquel: 3%
- Plata: 0.05%
- Oro: 0.03%
- Paladio: 0.01%
- Otros componentes (Bi, Sb, Ta etc.): 0.01%.

3.2.5.1 Materiales

Los PCB en particular son parte esencial de casi todos los equipos electrónicos, y se utilizan para soportar mecánicamente y conectar eléctricamente los diversos componentes electrónicos. Como una aproximación, los PCB generalmente se componen de 40% de metales (principalmente Cu, Pb y Ni), 30% de materiales orgánicos y varios óxidos inorgánicos (cerámicas) como balance. Aunque hay diferentes tipos de PCB, generalmente comprenden; serigrafía (opcional), máscara de soldadura, materiales de unión, Componentes Eléctricos, recubrimientos y capas de metal y sustrato de polímero. Los componentes electrónicos (EC: resistencias, condensadores, chips, etc.), con un alto contenido de metales, generalmente se desmantelan primero y se clasifican para su reciclaje por separado.³⁵

³² <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

³³ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

³⁴ <https://www.academia.edu/18893838/DCargo>

³⁵ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

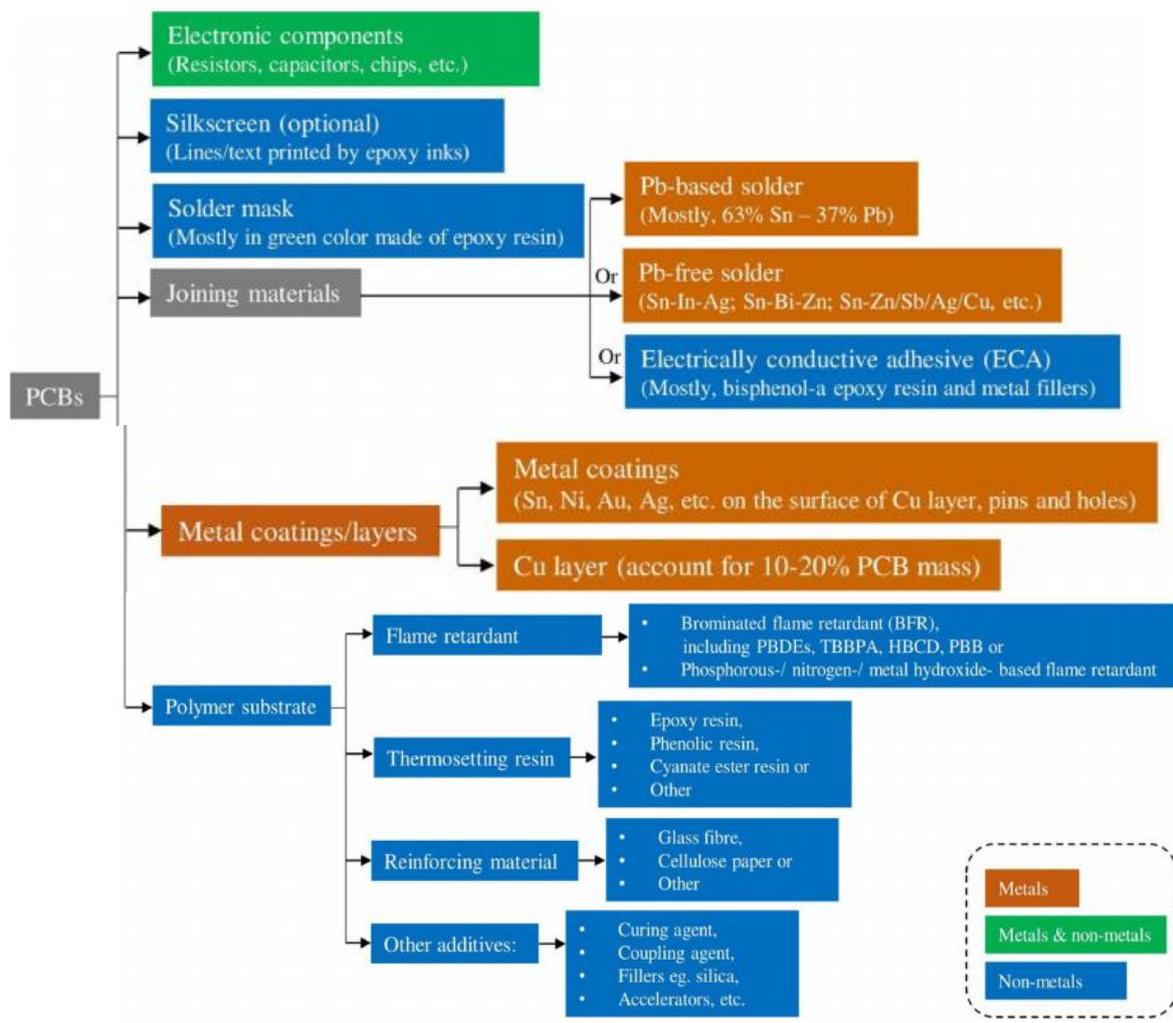


Figura 6. Esquema composición PCBs

En la parte superior de un PCB sin componentes electrónicos, la serigrafía con el contorno de la parte y el texto (principalmente en color blanco) generalmente se imprime con tintas epoxi no conductoras para hacer que el tablero sea legible. Debajo de la serigrafía se encuentra la máscara de soldadura, comúnmente en color verde, que consiste en resina epoxi para evitar la fuga de soldadura y proteger el circuito de la corrosión.

Los **metales** en el sustrato de PCB se encuentran en la forma de laminado de capas de Cu (10-20% de la masa de PCB) y los recubrimientos (Sn, Ni, Au, Ag, etc.) en la superficie de las capas de Cu, pasadores y orificios que aumentan la conductividad y la resistencia a la oxidación. Frecuentemente, el Au se utiliza como capa de recubrimiento sobre el Cu en componentes electrónicos como cobre bañado en oro para mejorar su rendimiento, especialmente a temperaturas más altas. A lo largo de los años, el contenido de oro en los PCB ha ido disminuyendo gradualmente gracias a la optimización de los circuitos. Mientras que en los años 80 el grosor de la capa de contacto dorada estaba entre 1 y 2,5 μm , hoy se ha reducido a 0,3-0,6 μm y es probable que disminuya aún más en el futuro.

La mayoría de los **materiales de unión** que se utilizan para conectar los EC y los tableros están hechos de aleación de Pb-Sn, dominada por el material de **soldadura** 63% Sn-37% Pb



tradicionalmente usado con bajos costos, buenas propiedades y una temperatura de fusión (para desmontar CE por fusión) de 183 °C. En los últimos años se han propuesto algunas soldaduras libres de Pb, como 91% Sn-9% Zn, 77,2% Sn-20% In-2,8% Ag y 85% Sn-10% Bi-5% Zn. Otro tipo de material de unión son los **adhesivos conductores** de electricidad (ECA), que consisten en aglutinantes poliméricos y rellenos metálicos (Ag, Au, Cu o Ni), que se consideran más respetuosos con el medio ambiente que la soldadura de Pb.³⁶

El **sustrato polimérico** que brinda soporte a las CE y aísla las diferentes capas de Cu está compuesto por **retardante de llama (FR)**, **resina termoendurecible**, material de refuerzo y algunos otros aditivos (Wang et al., 2017). El sustrato representa las composiciones orgánicas más complicadas de un PCB y es la principal fuente de contaminantes orgánicos durante el proceso de reciclaje. Entre los retardantes de llama (FR), los retardantes de llama bromados (BFR), incluidos los éteres difenólicos polibromados (PBDE), los bifenilos polibromados (PBB), el tetrabromobisfenol A (TBBPA) y el hexabromociclododecano (HBCD), han sido los más importantes y populares. Sin embargo, su impacto ambiental ha despertado una gran preocupación, especialmente los PBDE y PBB ya que se bioacumulan.³⁷

Actualmente, el sustrato más utilizado es la **resina epoxi reforzada con fibra de vidrio**, que comercialmente se denomina tipo **FR-4** con alta resistencia térmica y absorción infinitesimal de agua y es común en **AEE de alto valor**, como computadoras y teléfonos móviles (Hadi et al., 2015; Li et al., 2004; Zhou et al., 2010). Otro sustrato muy utilizado es la resina fenólica reforzada con papel de celulosa, también llamada tipo FR-2, que se utiliza principalmente en aparatos electrónicos domésticos y televisores (Guo et al., 2009).

Los PCB se pueden dividir en diferentes tipos de acuerdo con diferentes propiedades físicas³⁸;

- Según el número de capas, los PCB se pueden dividir en una capa, dos capas y multicapa.
- Las formas del tablero pueden ser rígidas, flexibles o rígidas a la flexión.

Los diferentes tipos de PCB tienen su aplicación particular, se pueden ordenar y clasificar después de desmontar los RAEE.

³⁶ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

³⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344916301173>

³⁸ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

Tabla 7. Clasificación de los PCB en función de las capas y formas del tablero

Classification of PCB based on the number of layers and board forms, adapted from Xu and Liu (2015).

Types of PCB	Characteristics	Applications
Based on the number of layers		
Single layer	Single layer of printed wiring or substrate, easily to design and manufacture, low-cost.	General electronic devices, e.g. calculators, radio, printers, etc.
Double layer	Printed wirings on both sides of substrate.	Instrumentation, computers, LED lighting, automotive dashboards, etc.
Multi-layer	3~ layers of printed wirings, with metallized holes connecting different layers	For complicated designs like medical equipment, satellite systems, computers, etc.
Based on board forms		
Rigid PCB	With rigid substrate preventing the board from twisting.	With single-, double- or multi-layer, application same as them.
Flexible PCB	Free bending, folding and easily coiled.	With single-, double- or multi-layer, used for special requirements, e.g. complicated shape, waterproof, shockproof
Flex-rigid PCB	Suitable for streamlined design, reducing overall board size and weight	Used in the case when space or weight are prime concerns, e.g. cellphone, digital cameras, automobiles

Como puede verse en la siguiente figura, el Cu está laminado dentro de una PCB. Para lixiviar Cu, debe exponerse en contacto con el lixiviante. En la mayoría de las rutas de reciclaje hidrometalúrgico, la solución es triturar el PCB en pequeñas partículas utilizando diversas tecnologías de trituración. En otros casos, los investigadores han utilizado enfoques que conducen a la hinchazón y exfoliación de la placa para exponer el Cu de los laminados.

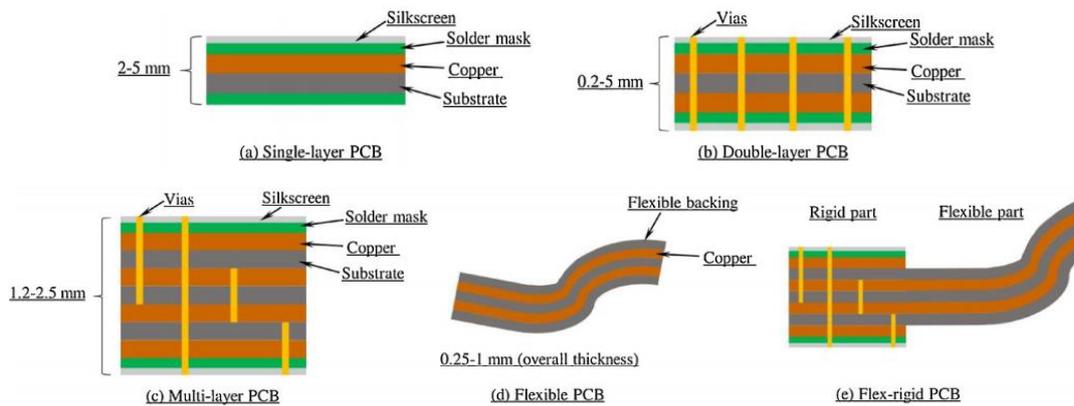


Figura 7. Tipo de PCB según sus capas (a, b, c) o formas (d, e)

3.3 Estado del arte: Técnicas de reciclaje actuales

3.3.1.1 Problemática ambiental y socio-económico

La recogida y posterior gestión de RAEE debe realizarse de forma medioambientalmente sostenible (Directiva europea de RAEE 2002/96 / CE).

Lamentablemente, la mayoría de los RAEE todavía se depositan en **vertederos**, se tratan en incineradores o incluso se transfieren a **otros países**, donde la legislación es menos exigente, con el resultado de que pueden causar graves problemas para los seres humanos y el medio ambiente por ejemplo mediante la lixiviación incontrolada de metales.

El reciclaje de los residuos de circuitos eléctricos ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos años, pero su gestión y reciclaje se ven dificultados por el hecho de que los PCB son una mezcla heterogénea de materiales orgánicos, cerámicos y metálicos. No obstante, estas placas siguen siendo el componente económicamente más interesante de los RAEE, ya que los metales que contienen representan más del 80% del valor total de los circuitos³⁹.

En 2012, alrededor del 70% de los RAEE del mundo se desecharon en China y el resto se destinó a India, Pakistán y algunos países del sudeste asiático y África. A menudo se llevan a cabo en talleres de trabajo intensivo, centrándose principalmente en los metales rentables, Cu y Au en particular. Los metales tóxicos restantes (por ejemplo, As, Cd, Cr, Pb, Hg) y las sustancias orgánicas peligrosas a menudo se eliminan simplemente en vertederos o incineración⁴⁰.

La recuperación de metales de los desechos electrónicos es favorable tanto desde el punto de vista económico como medioambiental; a modo de comparación, la extracción de una tonelada de metales preciosos (Au, Pd o Pt) genera una huella medioambiental de entre 10.000 y 17.000 toneladas de CO₂⁴¹. En este contexto, las leyes europeas promueven las denominadas estrategias de **economía circular**, sugiriendo la implementación de las "mejores tecnologías disponibles" (MTD) y la adopción de políticas de "vertidos casi nulos", especialmente en el caso de residuos peligrosos.

El reciclaje de desechos electrónicos sería el método apropiado de gestión de desechos electrónicos, desarrollando métodos de reciclaje amigables con el medio ambiente, técnicamente factibles y económicamente apropiados. Además, esto podría ser una fuente importante de recuperación de metales a partir de **recursos secundarios** en el momento en que los recursos de metales primarios se están agotando.⁴²

También se deben tomar medidas para educar a los consumidores / usuarios de los productos eléctricos y electrónicos con respecto a los centros de recolección de desechos electrónicos para aumentar la tasa de recolección para recuperar un mayor contenido de metales valiosos antes de su disposición en vertederos. Es bien sabido que los desechos electrónicos contienen

³⁹ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

⁴⁰ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

⁴¹ Schluep A, Hagelüken C, Magalini R, Maurer C, Meskers C, Mueller E, et al. Recycling – From e-waste to resources. Berlin, Germany: UNEP United Nations Environment Programme; 2009.

⁴² <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

varios compuestos orgánicos peligrosos para el medio ambiente, como retardadores de fuego (Cl / Br, etc.) y varios elementos inorgánicos (He et al., 2006⁴³).

Varias **ventajas económicas y ambientales** de la recuperación de metales de los desechos electrónicos son las siguientes (Zhang y Forssberg⁴⁴):

- Conservación de recursos de metales primarios.
- Disminución de la cantidad de residuos sólidos generados.
- Recuperación de material no metálico (plástico, etc.).
- Recuperación de metales ferrosos, no ferrosos y metales preciosos.
- Ahorro de energía a un nivel superior a los recursos metálicos primarios
- Prevención de la contaminación ambiental causada por metales pesados, retardantes de llama, solventes, plásticos y gases tóxicos liberados de los desechos electrónicos.

Los desechos electrónicos se pueden clasificar como de grado alto, medio y bajo en función de su contenido de oro (Hagelüken, 2006⁴⁵). En general, los recursos de metales primarios de alta calidad (es decir, minerales /concentrados) se procesan en fundiciones para la producción de metales mediante la técnica pirometalúrgica. El enorme consumo de minerales de alta ley para la producción de metales es responsable del rápido agotamiento de las reservas mineras existentes.

Por lo tanto, la utilización de **recursos metálicos secundarios**, como desechos electrónicos de alta calidad con un contenido de metal razonable, puede reemplazar los recursos de metales primarios futuros para la recuperación de metales.

Se ha informado que el contenido de metales preciosos en las placas de circuito impreso está disminuyendo hoy en día debido al aumento en el costo de producción de los PCB. De manera similar, el contenido de oro en los ordenadores ha disminuido 4 veces para cada dispositivo. La disminución del contenido de oro y otros metales valiosos en los equipos eléctricos y electrónicos podría haber sido una desventaja para la utilización de RAEE como recurso secundario para la recuperación de metales. Por el contrario, el **enorme tonelaje** resultante de RAEE debido a su **vida útil más corta** ha demostrado ser ventajoso. Además, la recuperación de metales preciosos y elementos de tierras raras (Ag, Au, Pd, Pt, Ru, Rh, Ir) de los desechos han ganado más importancia incluso con su baja tasa de recuperación (<15%)⁴⁶.

En la actualidad, la contaminación simultánea de metales pesados y la escasez de metales se han dado ampliamente en todo el mundo debido al aumento de la globalización y la industrialización relacionadas con la minería / metalurgia, galvanoplastia, baterías, electrónica... Se ha demostrado que los compuestos metálicos son significativamente tóxicos, no biodegradables y altamente

⁴³ <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.060>

⁴⁴ Zhang, S., Forssberg, E., 1998. Mechanical recycling of electronics scrap – the current status and prospects. Waste Manage. Res. 16 (2), 119–128. Zhang, Z., Zhang, F.-S., 2014. Selective recovery of palladium from waste printed circuit boards by a novel non-acid process.

⁴⁵ Hagelüken, C., 2006. Recycling of electronic scrap at Umicore precious metals refining. Acta Metall. Slovaca 12, 111–120

⁴⁶ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

móviles/solubles, incluso en todo el rango de pH, contribuyendo a más del 70% de la contaminación del agua en el mundo y casi al 20% de la contaminación del suelo en China. Por otro lado, los metales, compuestos metálicos y aleaciones son cruciales en los sectores industriales de alta tecnología tradicionales y modernos debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas para su uso en diferentes aplicaciones prácticas⁴⁷

3.3.1.2 Materias primas críticas

Impulsada por una población en rápido crecimiento y un uso cada vez mayor de materias primas en actividades industriales, la escasez de recursos se ha convertido en una de las principales preocupaciones mundiales. Por tanto, es necesario garantizar un acceso fiable, sostenible y sin obstáculos a estas materias primas. Como resultado, bajo la Iniciativa de Materias Primas de la UE, la Comisión Europea publicó una estrategia para identificar tales **materias primas críticas (CRM)**.

Los criterios para evaluar la criticidad de las materias primas en el futuro previsible más cercano no se basaron únicamente en las reservas globales totales. Además, su importancia económica y riesgo de oferta, que surgen de contextos geopolítico-económicos cambiantes de oferta y demanda, pueden crear restricciones a la exportación. Estos CRM se consideran vitales para el desarrollo económico, así como para mejorar la calidad de vida.

Tabla 8. Tabla de Materias Primas Críticas (CRM) publicada en 2020⁴⁸

2020 critical raw materials (new as compared to 2017 in bold)		
Antimony	Hafnium	Phosphorus
Baryte	Heavy Rare Earth Elements	Scandium
Beryllium	Light Rare Earth Elements	Silicon metal
Bismuth	Indium	Tantalum
Borate	Magnesium	Tungsten
Cobalt	Natural graphite	Vanadium
Coking coal	Natural rubber	Bauxite
Fluorspar	Niobium	Lithium
Gallium	Platinum Group Metals	Titanium
Germanium	Phosphate rock	Strontium

La lista de la UE de 2020 contiene 30 materiales en comparación con 14 materiales en 2011, 20 materiales en 2014 y 27 materiales en 2017. 26 materiales permanecen en la lista. Se agregan a la lista por primera vez bauxita, litio, titanio y estroncio. El helio sigue siendo una preocupación en lo que respecta a la concentración de la oferta, pero desaparece de la lista crítica de 2020 debido a una disminución de su importancia económica. La Comisión seguirá supervisando de cerca el helio, dada su relevancia para una serie de aplicaciones digitales emergentes. También supervisará el **níquel**, en vista de los desarrollos relacionados con el crecimiento de la demanda de almacenamiento de baterías.

⁴⁷ F. Zhao, Y. Ma, Y. Zhu, Z. Tang, S.P. McGrath, Contaminación del suelo en China: estado actual y estrategias de mitigación, Environ. Sci. Technol. 49 (2015) 750–759

⁴⁸ https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

Más de la mitad de los CRM identificados son metales, son vitales para el desarrollo de materiales avanzados como catalizadores y reactivos en las industrias. Estos metales incluyen antimonio, berilio, bismuto, cobalto, galio, germanio, hafnio, indio, magnesio, niobio, metales del **grupo del platino** (PGM), elementos de **tierras raras** (REE), escandio, tantalio, tungsteno y vanadio.

La mayoría de estos metales críticos se clasifican como **metales especiales** porque se utilizan en cantidades muy pequeñas para tecnologías muy específicas como fósforos, imanes de alta resistencia, células solares de película delgada y **circuitos integrados** (Reck y Graedel, 2012⁴⁹). Además, el oro, la plata y los del grupo platino, que consisten en platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio, se clasifican como metales preciosos y a menudo se utilizan en pequeñas cantidades, pero con un valor económico significativo.

A pesar de la importancia de estos metales para la economía de la UE, alrededor del 90% de su suministro proviene de fuera de la UE, y **China proporciona casi la mitad del suministro total de CRM**, en particular, produce más del 95% de los REE del mundo, y Sudáfrica, que produce casi el 80% del platino del mundo, lo que genera un desequilibrio o incluso un monopolio sobre estos metales.

Por lo tanto, debe prestarse atención a la **reducción de la dependencia** de las importaciones de metales de la UE y la mejora de las condiciones de suministro de materiales mediante la eficiencia de los recursos y las alternativas de suministro. Además de preservar las menguantes reservas de materias primas, la recuperación de metales críticos y preciosos de las corrientes de desechos industriales también mitiga los problemas predominantes de degradación y contaminación ambiental. En este sentido, los **circuitos** son un caso importante considerando su alta **toxicidad** y la consiguiente necesidad de inmovilización de corrientes de agua desechadas.

3.3.1.3 Minería urbana

Una definición de Minería Urbana es la "gestión integral del stock antropogénico con el objetivo de recuperar materias primas de productos longevos, edificios, infraestructura y relaves"⁵⁰.

Se está practicando la minería urbana a nivel mundial para recuperar recursos de las minas antropogénicas. En países en desarrollo sin embargo, el recurso secundario es tanto un desafío como una oportunidad, considerando su potencial para el ahorro ambiental, los beneficios de los recursos y la obtención de beneficios económicos.⁵¹



Debido al rápido desarrollo de la electrónica moderna y otras industrias de alta tecnología, se ha descargado en todas partes un número considerable de minas urbanas para la recuperación de materiales a partir de desechos electrónicos, catalizadores usados, etc. con metales de valor variable.

⁴⁹ DOI: 10.1126/science.1217501 . Challenges in metal Recycling. Barbara K. Reck, T. E. Graede

⁵⁰ Müller et al. 2017

⁵¹ <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2017.06.001>

Con el fin de mantener su sostenibilidad, se han explorado muchas tecnologías, en particular la vía de lixiviación-purificación-electrodeposición, para la recuperación eficiente y selectiva de metales⁵².

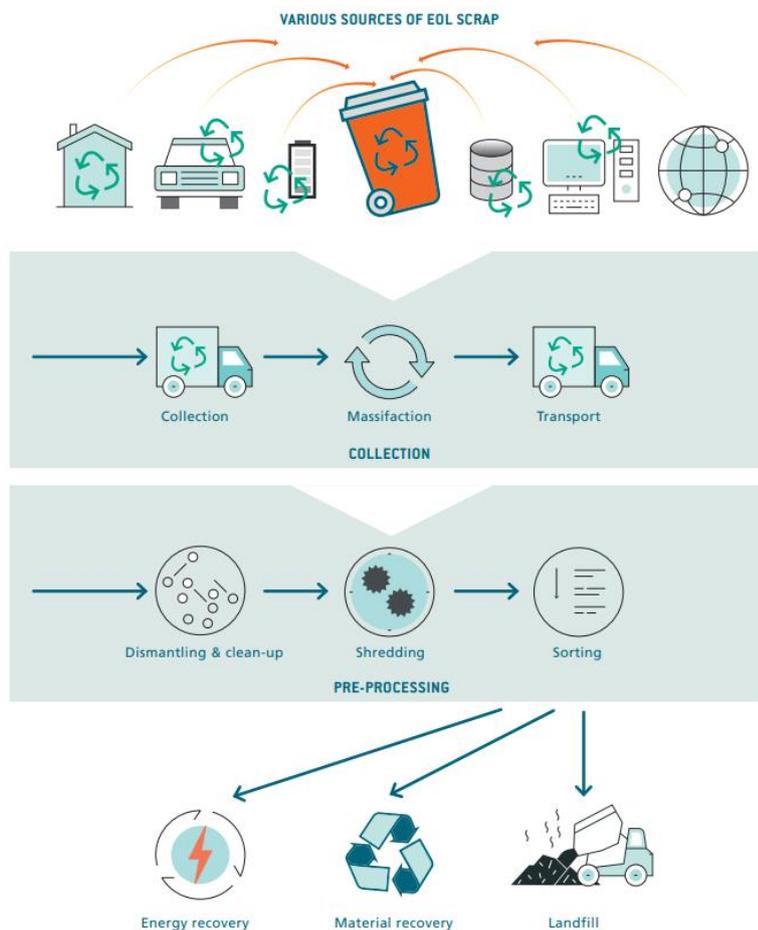


Figura 8. Cadena de reciclaje para los dispositivos electrónicos al final de su vida útil [Fuente⁵³]

Los metales provienen originalmente de la minería de recursos naturales. Sin embargo, la minería urbana proporciona una fuente en gran medida independiente de materias primas tanto en el tiempo como geográficamente, y por lo tanto no se afecta negativamente por interrupciones a corto plazo al suministro primario. Esto es ampliamente reconocido y generalmente se tiene en cuenta explícitamente en las metodologías de criticidad.⁵⁴

⁵² <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

⁵³ Potentials, Trade-Offs and Supporting Factors for the Recovery of Raw Materials from the Anthroposphere. Luis Tercero Espinoza, Leon Rostek. Karlsruhe (2020)

⁵⁴ www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer_ISI_Urban_Mining.pdf

La minería urbana es un aspecto de una red de objetivos e intereses interconectados, que se influyen mutuamente en diferentes caminos. La optimización es compleja y, a menudo, depende del punto de vista individual. Entre los **intereses y objetivos** de la minería urbana destacan⁵⁵

- Medio ambiente y cambio climático
- Conservación y eficiencia de recursos
- Autosuficiencia y seguridad en el suministro
- Generación de empleo
- Mejora de la salud pública
- Desarrollo en las cadenas de valor a nivel local

El interés por la reciclabilidad de un metal dado puede evaluarse en función de su contenido en peso, los riesgos ambientales asociados a su recuperación, la energía necesaria para su recuperación, el nivel de agotamiento de los recursos naturales, etc.

La llamada **eficiencia de recuperación de recursos** es un índice que evalúa los diferentes metales en función de su contenido de peso, eficiencia de reciclaje y reservas globales, y es probablemente la herramienta más utilizada⁵⁶. El factor principal que determina si un recurso secundario se procesa más para el reciclaje suele ser la rentabilidad del proceso.

Los **circuitos electrónicos impresos** en particular, como la parte más valiosa de los desechos electrónicos, son una **importante fuente secundaria de materiales valiosos**, así como un nuevo tema de investigación que está ganando interés bajo el nombre de "minería urbana"⁵⁷.

Además, la Resolución del Parlamento, de 15 de enero de 2020, sobre el **Pacto Verde Europeo** aboga por un nuevo y ambicioso plan de acción para la economía circular, que debe tener como objetivo reducir la huella ambiental y de recursos total de la producción y el consumo de la Unión. Destaca las fuertes sinergias entre la acción por el clima y la economía circular y pide que se cree un objetivo de la Unión en materia de eficiencia de los recursos.⁵⁸

Como el contenido de metales preciosos en los PCB de desecho es más alto que los minerales / concentrados, valdría la pena reciclar los desechos para obtener ventajas económicas y ambientales. El contenido de metal en la placa de circuito describe su valor económico, por lo que en el futuro podría preferirse la recuperación de valores metálicos de los desechos electrónicos. El contenido de metales preciosos en teléfonos, calculadoras y placas de circuitos impresos es de alrededor del 70%, mientras que en las placas de TV y reproductores de DVD es de alrededor del 40%⁵⁹.

Dado que el contenido de metales preciosos de los desechos electrónicos, en particular el oro, es la principal motivación económica para el reciclaje, se debe reducir la pérdida de estos metales. Los métodos de separación física se han aplicado industrialmente antes de los procesos metalúrgicos

⁵⁵ Potentials, Trade-Offs and Supporting Factors for the Recovery of Raw Materials from the Anthroposphere. Luis Tercero Espinoza, Leon Rostek. Karlsruhe (2020)

⁵⁶ <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/eb044031/full/html>

⁵⁷ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

⁵⁸ <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/76/la-eficiencia-en-el-uso-de-los-recursos-y-la-economia-circular>

⁵⁹ Yu et al., 2009 y Zhang, 2008.

para producir una fracción rica en metales a expensas de altas pérdidas de metales preciosos. El tratamiento hidrometalúrgico directo de los desechos electrónicos en dos etapas, es decir, la lixiviación de sulfato ácido para la extracción de cobre y otros metales básicos, y la posterior recuperación de metales preciosos en cianuro / tiourea / tiosulfato / cloruro / yoduro, podría superar estas pérdidas de metales.⁶⁰

Además, debido a la compleja estructura de los equipos eléctricos y electrónicos, el desmontaje efectivo de los desechos electrónicos antes de las actividades de reciclaje también es de gran importancia para obtener altas tasas de recuperación de metales.

Todos los esfuerzos de las empresas fabricantes también servirían para un reciclaje más rentable y sostenible.

3.3.2 Nivel industrial. Estudio de patentes.

El estado del arte de la recuperación de metales generalmente se originó en el campo de la metalurgia extractiva, que comprende la pirometalurgia usando métodos térmicos secos e hidro/electrometalurgia que involucra dos pasos distintos: disolución y lixiviación del mineral o residuo y recuperación selectiva del metal de la solución.

Como resultado, para una mayor recuperación de los metales se emplea típicamente un diagrama de flujo largo empleando típicamente diferentes técnicas térmicas o mecánicas combinadas con la lixiviación, extracción con solvente, precipitación y electrodeposición.⁶¹

El proceso de reciclaje de las tarjetas de circuitos impresos está orientado a recuperar los metales y sobre todo los metales preciosos que contiene para obtener concentrados metálicos que pueden ser empleados como materia prima. En base al estado del arte consultado, las rutas para el reciclado de los componentes de las tarjetas de circuitos impresos incluyen los siguientes procesos:

- Piro metalúrgicos
- Físico-Mecánicos
- Hidrometalúrgicos
- Biometalúrgicos
- Combinaciones de los anteriores

Los procesos industriales de recuperación se basan comúnmente en la metalurgia de alta temperatura que incluye la quema de plásticos, la fundición de metales y óxidos, el refinado y el tratamiento electroquímico posterior después de la extracción química. De manera similar, también se encuentran disponibles procesos hidrometalúrgicos, especialmente para RAEE con bajo poder calorífico, y también se han llevado a cabo una serie de investigaciones en el campo de la hidrometalurgia.⁶²

Los metales críticos y preciosos se pueden recuperar de corrientes de desechos líquidos mediante técnicas tradicionales que también se aplican en hidrometalurgia para extraer metales de minerales

⁶⁰ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

⁶¹ <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

⁶² [Bigum, M .; Brogaard, L .; Christensen, T. H. Recuperación de metales a partir de RAEE de alta calidad: una evaluación del ciclo de vida. J. Hazard. Mater. 2012, 207-208 (1), 8-14]

de alta ley. La recuperación se logra mediante la lixiviación química de los metales de sus minerales, seguida de una etapa de purificación y la separación de los metales de la solución de lixiviado.⁶³

Los reactivos químicos comunes utilizados como agentes de lixiviación para la recuperación de metales incluyen cianuro, haluros, tiourea, tiosulfato, ácidos minerales y oxidantes como agua regia, ácido sulfúrico, ácido nítrico y peróxido de hidrógeno. Después de la extracción de una corriente residual que contiene metales, los metales en el lixiviado se concentran en una fase sólida ya sea por cementación, adsorción, extracción con solvente, intercambio iónico usando resinas comerciales, flotación iónica, precipitación o reducción química o por métodos electroquímicos.⁶⁴

También se están desarrollando métodos para facilitar el reciclaje de las tarjetas de circuito impreso, basados en la técnica llamada ADSM (Active Disassembly Sequential Method⁶⁵) que requiere el uso de materiales inteligentes y el diseño de nuevos accesorios y piezas que posibiliten desensamblar de forma secuencial y automática las diferentes partes de los teléfonos móviles, unidades de control electrónico, etc.

3.3.2.1 Procesos a nivel industrial

La mayoría de las aplicaciones industriales del reciclaje de desechos electrónicos se restringen a los **procesos físicos y pirometalúrgicos**. La recuperación de metales a partir de desechos electrónicos requiere un paso de pretratamiento (separando las diferentes partes de los productos electrónicos y eléctricos) antes de la reducción de tamaño y posterior recuperación del metal mediante procesamiento hidrometalúrgico y pirometalúrgico.⁶⁶ Las mayores empresas que realizan tratamientos pirometalúrgicos basados en la fundición a escala industrial: Aurubis, Mairec, Boliden, Dow, Glencore y Umicore.⁶⁷ Del grupo platino; Hartley Platinum, Impala Platinum, Platsol⁶⁸.

⁶³ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

⁶⁴ Jadhav y Hocheng, 2012; Sayilgan et al., 2009

⁶⁵ DOI: [10.5772/31709](https://doi.org/10.5772/31709)

⁶⁶ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

⁶⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.076>

⁶⁸ <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.11.012>

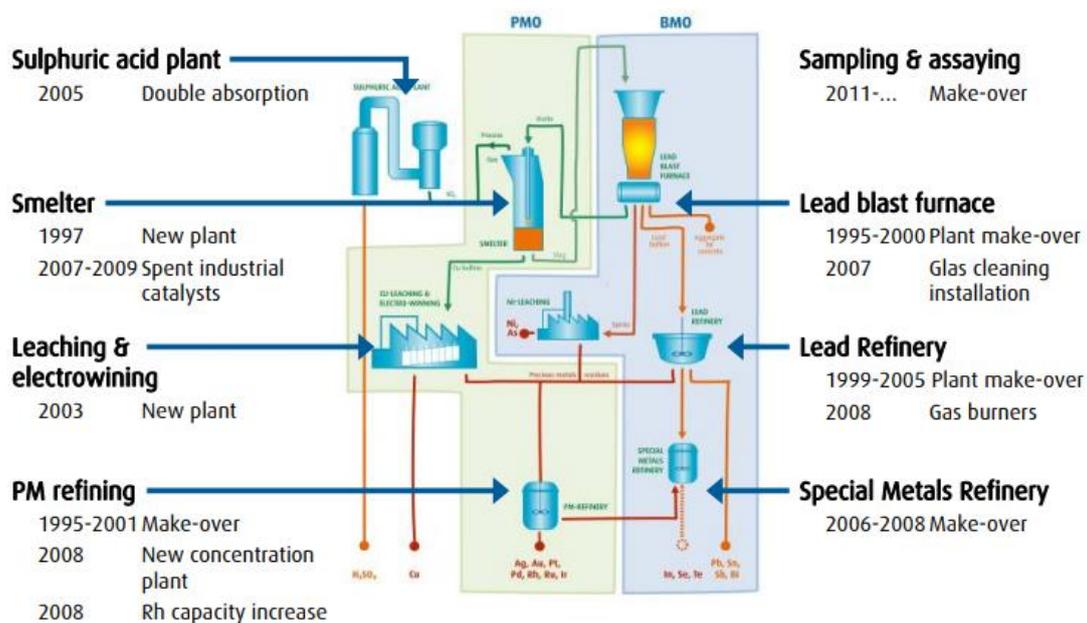


Figura 9. Esquema de la planta HOBOKEN de UMICORE⁶⁹

El **horno de fundición** (primer paso en las operaciones de metales preciosos) utiliza la tecnología de **combustión de lanza sumergida** de fundición Isa (ver apartado Isasmelt). Esto implica inyectar aire enriquecido con oxígeno y combustible en un baño fundido. Umicore es la única empresa que aplica esta tecnología a una escala tan grande con tal variedad de materiales. La fundición separa los **metales preciosos en un lingote de cobre** de la mayoría de **los demás metales**, concentrados en una **escoria de plomo, tratados posteriormente** en las Operaciones de Metales Base.

3.3.2.2 Patentes

La búsqueda de patentes se ha realizado en portales oficiales tales como la Oficina Española de Patentes y Marcas OEPM⁷⁰, ESPACENET⁷¹ y la base de datos PATENTSCOPE con acceso a solicitudes internacionales, OMPI Organización Mundial de la Propiedad Intelectual⁷².

Por lo general, el reciclaje de PCB **comienza con un pretratamiento** dirigido a la eliminación de los componentes de los PCB mediante procesos físicos y manuales, que conducen a la recuperación de los componentes electrónicos y del estaño de soldadura.

Las operaciones físico-mecánicas de reducción de tamaño, seguidas de la separación de partículas, suelen ser un requisito previo para los tratamientos posteriores.

⁶⁹ https://www.umicore.com/storage/migrate/2010CMD_Hoboken.pdf

⁷⁰ <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jspx;sessionId=T3nWJmsgpzscKGM9u1Svp7mo.srvvarsovia2>

⁷¹ <https://es.espacenet.com/>

⁷² <https://www.wipo.int/patentscope/es/>

En la búsqueda de patentes se han encontrado dos tipologías de procesos dirigidos a la **extracción** de metales: la vía **hidrometalúrgica**, que incluye la explotación de métodos biológicos, y la **pirometalúrgica**.

A continuación se realizan operaciones de **separación y purificación** para recuperar los elementos de interés, el cobre en la mayoría de los casos. Otras patentes se centran en la explotación de flujos no metálicos para la fabricación de productos como plástico, fibra de vidrio, resina, material de refuerzo y de relleno. Por otra parte, este flujo puede someterse a un tratamiento pirolítico con la producción adicional de negro de humo y aceite pirolítico.

➤ ESPACENET

- Resultado encontrado en la base de datos ES para (txt = circuito and txt = impreso) and txt = reciclaje. Igualmente para circuito en el título AND reciclaje en el título o resumen.
- Procedimiento y sistema para reciclar baterías y placas de circuito impreso de desecho en sales fundidas o metales fundidos. Numero de solicitud: ES20140725017T 20140414

Sistema de reciclaje de materiales de alimentación compuestos de desecho tales como placas de circuito impreso (PCB), baterías, teléfonos móviles y similares, comprendiendo el sistema; (...) una cámara (8) de **separación y pirólisis** en el que la cámara de separación y pirólisis en el que el líquido (7) de separación y pirólisis es una **sal fundida o un metal no ferroso fundido**; medios para permitir que los productos sólidos pesados y ligeros asociados con dicho material de alimentación se separen dentro de dicho líquido (...); medios para retirar los vapores de producto y una primera porción de dichos productos sólidos ligeros a través de una línea de retirada de vapor y escoria superior o un extractor o ambos de la superficie de dicho líquido (...).

➤ WORLDWIDE ESPACENET

Términos de la búsqueda: Printed Circuit Board Recycling⁷³

- Recycling method of waste printed circuit board

CN106947866A

La invención divulga un método de reciclaje de una placa de circuito impreso de desecho. La lixiviación conjunta **químico-biológica** se utiliza para lixiviar el metal en el tablero de circuito impreso de desecho mediante el uso de una **fuerte acidez y un alto contenido ferroso del agua de desecho de decapado**.

El método de reciclaje incluye los pasos de llevar a cabo la lixiviación química mediante el uso de las **aguas residuales de decapado** para lixiviar el Pb, Zn, Al, Fe, Sn y el metal similar por completo hasta que la **tasa de lixiviación de Cu alcanza el 30% y más, y la adición de acidithiobacillus ferrooxidans domesticado para llevar a cabo la lixiviación microbiana** hasta que la tasa de lixiviación de Cu alcanza el 90% y más.

- Printed circuit board recycling device and recycling method.

⁷³ <https://worldwide.espacenet.com/patent/search?q=printed%20circuit%20board%20recycling>

CN109158402A

Resumen: La invención revela un dispositivo de reciclaje de placas de circuito impreso, y se relaciona con el campo técnico de los equipos de desmontaje de placas de circuito. El dispositivo de reciclaje de placas de circuito impreso comprende un mecanismo de ajuste, un sistema de control PLC (Programmable Logic Controller), una primera unidad de transporte, un mecanismo de corte, al menos un rodillo de transporte, un mecanismo de raspado y molienda, una segunda unidad de transporte y un mecanismo de laminación y rechazo.

- Printed circuit board recovery processing method

CN107699708A

Resumen: La invención da a conocer un método de procesamiento de recuperación de placas de circuito impreso, que comprende los siguientes pasos: sumergir una placa de circuito impreso en un líquido de desprendimiento de soldadura, y llevar a cabo el procesamiento de desprendimiento de soldadura para obtener una placa de circuito desprendida de soldadura; sumergir la placa de circuito desprendida de soldadura en un líquido de desprendimiento de oro, y llevar a cabo el procesamiento de desprendimiento de oro para obtener una primera solución portadora de oro; y añadir un agente reductor en la primera solución portadora de oro para obtener un primer sedimento portador de oro.

- Method for recycling waste printed circuit board

CN103602816A

La invención da a conocer un método para reciclar un residuo de placa de circuito impreso, que comprende los siguientes pasos 1) separar una placa base y los componentes de la placa de circuito impreso de desecho, clasificar los componentes para un tratamiento adicional, y tratar la placa base mediante un pulverizador de **cizallamiento** en fragmentos de menos de 1cm; 2) cizallar los residuos de PVC (cloruro de polivinilo) en fragmentos de 1cm aproximadamente, mezclar los fragmentos de placa de circuito de desecho y los fragmentos de PVC en una proporción de masa de 1: 2-4:1, y ponerlo en una caldera de reacción de **oxidación hidrotérmica**; 3) añadir agua desionizada y **peróxido** de hidrógeno al 30%, sellar la caldera de reacción y controlar la relación sólido-líquido del reactivo a 1: 5-1:15g/ml; 4) calentar la caldera de reacción, comenzar a medir el tiempo cuando la temperatura se eleva a **250-380 DEG C**, reaccionar durante 30-180 minutos mientras se controla la presión en la caldera de reacción a **12-22 MPa** mediante un dispositivo de presión manual, y detener el calentamiento; y 5) enfriar a temperatura ambiente, abrir la caldera de reacción, llevar a cabo la separación sólido-líquido, evaporar la fase líquida para su concentración y cristalización, y reciclar el producto cristalino $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

- INVENES

Los resultados devueltos tras introducir "Circuito electrónico" en la barra de búsqueda son 39157, para los cuales se encuentran patentes relacionadas con el desarrollo de aparatos domésticos. Bajo la búsqueda "printed circuit" no se han encontrado resultados⁷⁴. Para la búsqueda "circuito electrónico reciclaje" se han devuelto 267 resultados, entre los cuales cabe destacar

⁷⁴ <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jsp>

- Método para recuperación biológica de metales en residuos eléctricos y electrónicos (UPC)

[ES2707353](#)⁷⁵

Método para **recuperación biológica** de metales en residuos eléctricos y electrónicos, comprende:

En primer lugar introducir una serie de microorganismos hierro-oxidantes, aeróbicos, y un medio mineral formado por diferentes sales en disolución en un reactor y realizar, en el citado reactor, una primera etapa de oxidación biológica de unos iones de hierro II presentes en dicho medio mineral a unos iones de hierro III. la primera etapa tiene una duración de al menos dos horas.

Una vez realizada la primera etapa, los microorganismos hierro-oxidantes presentes en suspensión dentro del reactor se separan, en el exterior del reactor, proporcionándose una fase sólida que comprende los microorganismos hierro-oxidantes y una fase líquida que comprende los iones de hierro III. (...)Alternativamente, en otro ejemplo de realización, la **reducción** de los metales de interés extraídos a su estado metálico se realiza mediante electrolisis o mediante una técnica por **precipitación**.

En un ejemplo de realización, las diferentes sales del medio mineral **incluyen una sal de hierro II y sales que aportan Nitrógeno, Azufre, Fósforo, Magnesio, Potasio y Calcio**. Preferiblemente, la composición del medio mineral introducido en el reactor comprende: 30 g/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, 3 g/L de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 0.5 g/L de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.5 g/L de K_2HPO_4 , 5 0.10 g/L de KCl y 0.01 g/L de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$. Asimismo, el pH del medio mineral se controla en un rango entre 1.7 y 1.8 mediante la adición de un ácido o una base.

La tercera etapa se lleva a cabo en una columna en el interior de la cual se coloca una o más placas de circuito impreso. Durante el funcionamiento de la planta, la columna es irrigada constantemente con la solución de hierro III de forma que las placas entran en contacto con la solución y se produce la reacción química que permite la extracción de los metales de interés. Tiempo de contacto en el interior de la columna de mínimo una hora.

El objetivo de la cuarta etapa es reducir **el metal extraído** de la(s) placa(s) de circuito impreso desde su estado soluble a su estado metálico para poderlo utilizar nuevamente como materia prima. En este ejemplo de realización, el proceso utilizado para obtener el metal en el estado metálico es la **cementación**. Este proceso consiste en la reacción espontánea entre el cobre II soluble y el hierro metálico, en la cual el cobre es reducido a cobre metálico y el hierro es oxidado a hierro II soluble. Para lograr una pureza superior se puede realizar adicionalmente un electro-refinado

- Método para el reciclado de placas de circuitos impresos (UPM)

[ES2739880](#)⁷⁶

La presente invención se engloba en el área de minería urbana y economía circular, y tiene como principal objetivo la **disminución del contenido en plásticos y fibras en residuos electrónicos**, concretamente, placas de circuitos electrónicos impresos, facilitando la recuperación posterior de los metales presentes en estos residuos por métodos mineralúrgicos, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

⁷⁵ A1 (03.04.2019) – UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

⁷⁶ [ES2739880](#) A1 (04.02.2020) B2 (11.06.2021) UNIVERSIDAD POLITÈCNICA MADRID

El método de la presente invención permite **enriquecer el contenido en fracción metálica** gracias a la separación de gran cantidad de polímeros y fibras de vidrio del resto de materiales, minimizando o eliminando el problema técnico y medioambiental al que actualmente están sometidos los procesos de recuperación de los metales presentes en los circuitos electrónicos impresos, y facilitando la posterior recuperación de estos metales por métodos mineralúrgicos, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos.

El presente método tiene como principal novedad la utilización de **tecnología de ultrasonidos** aplicada al proceso de separación de metales y soportes orgánicos. De forma especialmente ventajosa, este método permite disminuir en más de un 40% el contenido en plásticos de estos residuos electrónicos.

3.3.3 Sistemas de recuperación. Procesos de investigación.

3.3.3.1 Pretratamientos físico-mecánicos

El tratamiento mecánico de las tarjetas de circuito impreso permite obtener concentrados metálicos que se pueden enviar a fundidores u otros recuperadores y otras fracciones de materiales no metálicos como la fibra de vidrio, que pueden ser aprovechadas para otras aplicaciones. El tratamiento mecánico de las tarjetas puede incluir operaciones sucesivas de moliendas, separación de metales ferrosos y separación de metales no ferrosos (aluminio), cribado manual, Separación electrostática en corona (Li et al., 2007a), separación magnética (Veit et al., 2005), separación por gravedad (Eswaraiah et al., 2008; Zhou y Qiu, 2010; Duan et al., 2009), método ultrasónico (Huang et al., 2011) y separación por métodos electrostáticos⁷⁷.

El **desmantelamiento** o desensamblaje se lleva a cabo principalmente para eliminar los componentes peligrosos con el fin de minimizar los materiales tóxicos en el flujo de reciclaje y para separar las piezas reutilizables (Lu y Xu, 2016). El desmontaje también puede realizarse manualmente o mecánicamente, mientras que el desmontaje mecánico se clasifica a su vez como desmontaje semiautomático o automático

El objetivo de la **trituration** es separar los metales de las placas base de los residuos de PCB. La tecnología de trituración está íntimamente relacionada no sólo con el consumo de energía del equipo de trituración, sino también con la eficiencia selectiva posterior. Los residuos de PCB se componen de resina reforzada y piezas metálicas como cables de cobre y juntas. Tienen una gran dureza y tenacidad. Además, la mayoría de las placas base contienen una estructura de fibra (telas de vidrio) que es más fácil de romper bajo la acción de cizallamiento.

Tras el desmantelamiento físico, los RAEE restantes se someten a la trituración, el desmenuzamiento y la molienda para pulverizar los residuos hasta convertirlos en polvo. La trituración se lleva a cabo para extraer los metales de los RAEE. La reducción adicional de las dimensiones de los RAEE se realiza a través de la trituración, la trituradora de doble eje es ampliamente utilizada en el reciclaje de residuos electrónicos. Después de la trituración, se realiza la trituración/**pulverización** con sistemas de **recogida de polvo**. Posteriormente, la separación por densidad aísla los no metales y los metales.

⁷⁷ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

La trituración de los RAEE y el desprendimiento efectivo de los metales de los no metales es un requisito previo. Las trituradoras de cizalla de baja velocidad y alto par se consideran las mejores para la trituración primaria (Lu y Xu, 2016). La trituración en dos pasos ha demostrado la eficacia de las acciones de cizallamiento generadas por el rotor, los cortadores del estator y la trituradora bruta, y la posterior trituración en una trituradora de martillo se utilizan explícitamente para las placas de circuitos impresos. Se ha descrito que la trituración o la molienda pueden provocar una pérdida del 40% de los metales preciosos (Jiang et al., 2012). La trituración puede generar un polvo peligroso debido a la fuerza y la tenacidad de los RAEE, por lo que es necesario un sistema eficaz de recogida de polvo. El proceso de trituración hace que los metales adquieran una forma esférica debido a su maleabilidad y ductilidad, mientras que los no metálicos (plásticos y fibras de vidrio) mantienen una forma no esférica, normalmente en forma de varillas o filamentos, debido a la tensión (Hsu et al., 2019). Tras el proceso de trituración, la pulverización de los RAEE se realiza mediante la molienda de bolas y discos (Ghosh et al., 2015). Se han descrito varios tipos de molinos para la trituración más fina, donde los de martillo oscilante parecen ser el estándar.

Las separaciones pueden ser⁷⁸;

- Neumáticos (por aire, zig-zag)/ densimetría con aire o agua
- Por tamaño y por gravedad
- Corrientes de Foucault / Eddy Current
- Conductividad, triboelectricidad, separadores corona electrostaticos

Con este primer proceso de trituración y separación física, se pueden descartar los materiales no metálicos como los plásticos e incluso enriquecer las fracciones metálicas ya que se pueden obtener elevados rendimientos de separación de los materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos.

3.3.3.2 Tratamientos pirometalúrgicos

Los procesos pirometalúrgicos consisten en el uso de energía térmica y propiedades químicas / metalúrgicas de sustancias para fundir minerales o materiales secundarios con el fin de concentrar metales objetivo para su posterior procesamiento mientras que se separan sustancias no objetivo en escoria o fase volátil.

ISASMELT™ es un proceso de fusión en baño simple y muy eficiente para la producción de metales no ferrosos. Es reconocido a nivel mundial como el proceso de fusión más innovador, eficiente y rentable. Desde que comenzó su producción comercial en la década de los 90 la tecnología ha sido instalada en importantes plantas tanto nuevas como ya existentes alrededor del mundo. El proceso ISASMELT™ fue desarrollado conjunto por Mount Isa Mines, una subsidiaria de Glencore Technology, y la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) de Australia. El funcionamiento es el siguiente⁷⁹: El reactor es un cilindro vertical, con revestimiento refractario simple y opera con una sola lanza de combustión sumergida generando así un baño de alta turbulencia. La característica principal del proceso es la lanza ISASMELT™, que desciende de la parte superior del horno. La punta de la lanza entra en contacto con la escoria líquida que se encuentra en la parte inferior del horno. La alimentación es cargada por la parte superior del horno, y al mezclarse

⁷⁸ <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00023-1>

⁷⁹ <https://www.isasmelt.com/es/smelting/Paginas/IsaSmelt-Design.aspx>

con el baño líquido reacciona con el aire enriquecido con oxígeno inyectado por la lanza. La inyección de estos gases en el baño líquido crea una gran turbulencia dando al horno una alta intensidad de reacción.

La lanza vertical emplazada en el centro del horno inyecta aire, oxígeno y combustible en el baño líquido. La lanza se emplaza de manera tal que solo la punta esté sumergida en el baño de escoria líquida. La mezcla de aire, oxígeno y combustible que se inyecta por la lanza agita el líquido violentamente. Esta agitación asegura una reacción muy rápida entre la alimentación y el oxígeno. Una capa solidificada de escoria en la parte exterior de la lanza protege esta del ambiente agresivo del horno. Los productos gaseosos de las reacciones generadas en el horno ascienden y pasan a través de una caldera recuperadora de calor donde la energía recuperada genera vapor, los gases enfriados de esta manera pasan a través de un electro filtro para la eliminación del polvo, los gases limpios son enviados a una planta de ácido.

Los gases de proceso provenientes de las reacciones en el baño pasan a través de una salida en el techo del horno al sistema de tratamiento de gases, que generalmente consiste de un caldero de calor residual seguido de un equipo convencional de limpieza de gases. Luego de esto los gases de proceso con un alto contenido de SO₂, son tratados en una planta de ácido sulfúrico para retirar el azufre antes de su descarga a la atmósfera.

3.3.3.3 Tratamientos Hidrometalúrgicos

La lixiviación de ácidos minerales se usa generalmente para la lixiviación de metales básicos y preciosos (especialmente agua regia), mientras que la lixiviación a base de cianuro se dirige principalmente a los metales preciosos. Se han encontrado artículos que se pueden distribuir según el siguiente esquema:

- **Lixiviación con ácidos inorgánicos**
 - **Ácidos minerales:** H₂SO₄, HNO₃, HCl y aqua regia (HCl: HNO₃ = 3:1, v/v).
 - **Ácido mineral y oxidante** H₂SO₄ y oxidantes como H₂O₂ Cu²⁺, Fe³⁺ + y aire / O₂. Cu²⁺, Cl⁻
 - **Lixiviación multietapa;** lixiviación selectiva en varias etapas por ejemplo emplear un primer ácido menos concentrado como HNO₃ 0.2M y en segundo lugar HCl 4M
 - **Cianuros** (altamente tóxico aunque eficaz y barato)
- **Ácidos débiles**
 - **Tiourea** (SNH₂) para metales preciosos en medio básico (poco efectivo) o en medio ácido formando complejos Au y Ag
 - **Tiosulfato** (S₂O₃²⁻) se ha considerado un sustituto prometedor del cianuro; no obstante tiene una cinética baja y es necesario un alto consumo
 - El **tiocianato** (SCN⁻) se conoce como lixivante para la extracción de Au de minerales durante mucho tiempo aunque se han reportado muy pocos trabajos
- **Haluros**
 - la lixiviación de **cloro / cloruro:** Según Cui y Zhang (2008), se ha investigado durante años, con la lixiviación tradicional de agua regia como ejemplo, y se ha industrializado en una escala significativa. Sin embargo, el alto requerimiento de equipos, es decir, reactores de acero inoxidable y revestidos de caucho, y el riesgo potencial para la salud dificultan su amplia aplicación
 - lixiviación de **yodo / yoduro** también tiene un alto consumo de reactivos y el yodo es relativamente caro, que son los principales obstáculos de este método
- **Amoníaco-amonio**

El amoníaco-amonio ha demostrado una alta selectividad y tasa de lixiviación (≥90%) para Cu Se requieren pasos de purificación para la solución de lixiviación para la recuperación de Cu. Por otro lado, la descomposición y volatilidad del amoníaco durante el proceso de lixiviación también causa riesgos para el ser humano y el medio ambiente

- **Nuevos métodos de lixiviación**
 - **Quelantes:** asociación de los metales con quelantes multidentados para formar complejos solubles. Hay estudios que demuestran que >80% Cu se lixivia de los WPCB con EDTA 0.5M a 100 °C, pH 7 y 3h.
 - **Líquidos iónicos:** Los líquidos iónicos (ILs) son un tipo de líquido que solo consta de iones a baja temperatura (100 ° C) o incluso a temperatura ambiente. El interés en ellos tiene su fundamento en algunas de sus excepcionales propiedades como una presión de vapor prácticamente despreciable, una amplia ventana de potencial eléctrico, una amplia estabilidad térmica o una amplia conductividad iónica, disponibles todas a temperatura ambiente. El límite del uso del IL convencional es la falta de reversibilidad de que los metales no se pueden re-oxidar una vez que se han reducido.

- **Lixiviado con fluidos Supercríticos:** Por definición, el fluido supercrítico (SCF) es una sustancia que permanece como una sola fase por encima de su temperatura crítica (Tc) y presión crítica (Pc) con una velocidad de difusión similar a la de un gas, una viscosidad y una densidad similar a la de un líquido. El CO₂ supercrítico con H₂SO₄ y H₂O₂ como codisolventes a 7.5 MPa y 35 ° C para extraer Cu de WPCBs y 88.79% de Cu se logró en solo 20 min, lo que muestra una cinética rápida.
- **Disolventes:** el ataque de disolventes especiales en ciclo cerrado se consigue disolver los *polímeros termoestables que embeben el tejido de fibra de vidrio*. La recuperación de múltiples reactivos químicos (ácido sin reaccionar, agente neutralizante, sales metálicas) en un proceso requiere varios pasos adicionales posteriores que afectan la viabilidad económica.
- o **Bio-lixiviación:** La biolixiviación es la tecnología que se basa en la producción de ácidos por microorganismos.⁸⁰ Es un proceso simple para la recuperación de partículas metálicas de los desechos electrónicos, con el uso de microorganismos como bacterias, hongos y actenomicetos (Vakilchah et al., 2016). Este proceso en particular se ha considerado como un proceso de bajo consumo de energía, altamente eficiente, amigable con el medio ambiente y de bajo costo operativo que puede llevarse a cabo a temperatura ambiente y presión atmosférica (Xiang et al., 2010). Algunas de las patentes encontradas en la búsqueda describen el método utilizado para la biolixiviación, otras patentes describen el dispositivo / sistema. Las bacterias del género *Acidithiobacillus* son bien conocidas en este campo y se explotan para su producción de ácido sulfúrico. *Acidithiobacillus ferrooxidans* se puede utilizar para lixiviar cobre de PCB triturados (CN102218437). La **lixiviación química es más rápida y eficiente que la biolixiviación** en operaciones por lotes. Por el contrario, la **biolixiviación es más ecológica y ventajosa** que la lixiviación química si se opera en un reactor de tanque agitado continuo de 2–3 etapas⁸¹. A veces, la biolixiviación es selectiva para metales específicos pero Aunque medioambientalmente se encuentren bien valorados presentan el hándicap de requerir etapas de acondicionamiento de bacterias, tiempos de lixiviación largos y rendimientos no muy altos.
- o **Técnicas electroquímicas:** Debido a la naturaleza redox característica de los metales y sus óxidos, sulfuros, aleaciones e hidróxidos, los procesos electroquímicos que utilizan electrones como oxidante / reductor en lugar de productos químicos exógenos se han empleado con éxito para la reducción de fuentes y la restauración sostenible de desechos que contienen metales.

El tratamiento electroquímico eficiente y selectivo de los desechos que contienen metales normalmente implica **electro-adsorción (deionización capacitiva), lixiviación oxidativa, deposición reductora**, separación de membranas integrada, reacciones bio-electroquímicas y fotoelectroquímicas.⁸²

Se han demostrado muchas técnicas electroquímicas diferentes para la conversión de metales ambientales, como la electrocoagulación y la electrodeposición tradicionales y las técnicas relativamente modernas de electrodiálisis, y los procesos bioelectroquímicos y fotoelectroquímicos.

Debido a que los procesos electroquímicos son altamente **eficientes** y selectivos, demuestran compatibilidad de integración, no requieren la adición de productos químicos, implican una operación y control factibles, estos métodos se han empleado ampliamente para la reducción de

⁸⁰ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.076>

⁸¹ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>

⁸² <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

fuentes y la sostenibilidad de corrientes de desechos que contienen metales antes y después de la formación de contaminación.⁸³

El **rendimiento** de la remediación electroquímica está determinado en gran medida por el electrodo, el electrolito, la configuración de la celda, el transporte de masa, la transición de fase y la composición de los residuos. Además, es muy deseable desarrollar procesos electroquímicos de corta duración para una rentabilidad práctica y el alivio de la contaminación secundaria, mientras que también existe la necesidad de acoplarlo con otras tecnologías modernas dependiendo de la complejidad de los residuos.

Lixiviación asistida electroquímicamente o electro-lixiviación

La lixiviación es el paso inicial y, por lo general, el paso que determina la velocidad del proceso hidrometalúrgico, que se utiliza para extraer metales como iones de minerales o desechos sólidos. Se ha demostrado que la lixiviación electroquímica es más eficiente y respetuosa con el medio ambiente en comparación con la lixiviación acuosa convencional que utiliza altas dosis de reactivos, temperaturas y concentraciones.

Sin embargo, en contraste con la disolución (corrosión) electroquímica bien definida de los metales y sus aleaciones. Este proceso se ve frustrado por la pasivación anódica en la superficie de baja conductividad o irregular de minerales y desechos sólidos. Se han dedicado considerables esfuerzos a la electro-lixiviación indirecta por especies reactivas generadas in situ de H₂O₂, •OH, cloro, sulfato etc. Por ejemplo, Jin y col.⁸⁴ exploraron los EAOP alcalinos para la disolución de minerales y desechos acuosos y sólidos que contienen metales, en los que los iones y óxidos de As, V y Cr podrían sufrir una conversión oxidativa eficiente y selectiva mediante la electro-generación in situ de especies reactivas de oxígeno (ROS) a temperatura ambiente.

Electro-coagulación

Se han realizado estudios en los que se ha conseguido con hierro la electrocoagulación de Ag (I) y Au (I) de un licor de lixiviación cianurado. Recuperaciones de hasta un 99.9% de plata y 99.2 % de oro podrían recuperarse en 5 minutos. Adicionalmente, el cianuro también se puede eliminar (85%) del licor de lixiviación, lo cual se atribuye a la oxidación anódica del proceso.⁸⁵

Proceso de lixiviación y deposición electroquímica simultánea;

Por ejemplo en un estudio se disolvió anódicamente PB triturado en una solución ácida de **sulfato de cobre**, mientras que los iones de **cobre** se redujeron **simultáneamente en el cátodo**, produciendo cobre electrolítico puro y un residuo sólido rico en estaño, plomo, materiales no metálicos y con un pequeño contenido de cobre. El proceso de electro-lixiviación-electrodeposición de cobre se llevó a cabo en una celda acrílica especialmente diseñada con un volumen de 360 mL. El polvo de PCB se insertó en una canasta/**cesta de acero inoxidable AISI 304** (hecha con una pantalla de malla 65 plegada) que desempeñaba el papel de **ánodo**, mientras que una **placa de acero inoxidable AISI 304**, con aproximadamente 10 cm² de área expuesta, era el **cátodo**.⁸⁶

⁸³ <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

⁸⁴ [26, 27] <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

⁸⁵ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

⁸⁶ <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.06.005>

Recuperación de Au y Cu de los zócalos de CPU en una tapa mediante electrólisis⁸⁷:

En este estudio se ha informado sobre el uso de **electrólisis directa en suspensión** para recuperar Cu y Au tal y como se representa en la siguiente figura. Los desechos se trituraron en polvo y se mantuvieron en suspensión en el electrolito. Se determinó que la tasa de recuperación de Cu y su pureza alcanzó 96,67% y 98,16%, respectivamente en las mejores condiciones de operación fueron 4 mol/L HCl, 75 g/L de densidad de pulpa, 80 mA/cm² y 4 h.

Lixiviación y electrodeposición secuencial de un Sistema multi-metales⁸⁸

Para obtener la aleaciones se realizó un proceso de pre-tratamiento; se aplicó tecnología mecánica y pirometalurgia; Los MLCC (multilayer ceramic capacitors) de desecho se trituraron y tamizaron para obtener MLCC en polvo. Luego se calentó la muestra mezclada con fundentes de SiO₂ y Al₂O₃ a 1350°C durante 2 h. Luego se obtuvo el producto de escoria reciclable y aleación Ni-Ag-Pd-Cu-Bi-Sn. se determinó que **1mol/L de HNO₃ 80°C era la temperatura óptima** para la lixiviación de la aleación Ni-Ag-Pd-Cu-Bi-Sn. Para separar los metales ya lixiviados, se empleó la tecnología de electrodeposición secuencial. Las condiciones iniciales de la **disolución simulada** eran: 90 mmol/L Ni²⁺, 20 mmol/L Ag⁺, 8 mmol/L Pd²⁺, 60 mmol/L Cu²⁺, y 4 mmol/L Bi³⁺.

Lixiviación por Electro-generación de cloro: Recuperación selectiva de oro de circuitos⁸⁹:

En este caso se investigó la lixiviación de oro de los PCB de desecho de teléfonos móviles mediante cloro generado por electricidad como oxidante y su recuperación mediante un proceso de intercambio iónico.

Lixiviación y deposición selectiva de cobre en amoníaco⁹⁰.

Recuperación de forma selectiva el cobre de un residuo electrónico proporcionado industrialmente combinando la disolución electroquímica y la deposición en un electrolito a base de amoníaco. En un proceso bien controlado, se puede obtener cobre con una **pureza del 99,56%** en peso, que se puede mejorar aún más evitando la oxidación potencial en la capa electro-depositada. Los residuos electrónicos complejos **se prensaron** a través de un cilindro de acero inoxidable con una presión de **40 MPa** para preparar **muestras de pellets** de alrededor de 2 ~ 3 g. Las **placas** se cortaron con láser y se fundieron junto con cloroformo. La muestra se introdujo en una **cesta de ánodo (Titanio)** con un tamaño de **malla de 1,5 mm 1,5 mm**. Como es importante que la canasta no se disuelva en el electrolito, la canasta de titanio se **recubre con platino**. Como **cátodo**, se utilizó una placa de **cobre**, de la cual un lado se hizo **inerte** cubriéndolo con materiales de **resina**. De altura **100mm y 25mm** de ancho, quedando en superficie 25x25mm. El electrolito tenía una composición de **12% en peso de amoníaco y 155 g / L de sulfato de amonio**. La eficiencia de corriente muestra claramente valores máximos en el rango entre **300 y 450 A / m² de la densidad de corriente**.

⁸⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.161> Copper and gold recovery from CPU sockets by one-step slurry electrolysis. Chen et al. Clean. Prod. 213 (2019)

⁸⁸ <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124772> - Separation of Metals from Ni-Cu-Ag-Pd-Bi-Sn Multi-metal System of E-waste by Leaching and Stepwise Potential-controlled Electrodeposition

⁸⁹ Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.034>

⁹⁰ <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.112>

3.3.3.4 Técnicas de purificación

○ Precipitación

Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente.

En un estudio se propuso un nuevo proceso hidrometalúrgico para la recuperación selectiva de Cu, Ag, Au y Pd de las placas de circuito impreso (PCB) de desecho. Más del 99% del contenido de cobre se disolvió usando dos pasos consecutivos de lixiviación con ácido sulfúrico en presencia de H₂O₂ como agentes oxidantes.⁹¹ El residuo sólido de la 2ª etapa de lixiviación se trató con tiourea ácida en presencia de hierro férrico como agente oxidante y se logró una disolución de 85,76% de Au y 71,36% de Ag. La precipitación de Au y Ag a partir del lixiviado de tiourea ácido se investigó usando diferentes cantidades de borohidruro de sodio (SBH) como agente reductor.

Recuperación de metales del grupo del platino disueltos a partir de soluciones de lixiviación de sulfato de cobre por precipitación⁹²: La solución de lixiviación producida en la etapa final de lixiviación de las refinerías de metales base (BMR) operadas por productores de platino contiene impurezas como selenio y telurio, así como otros metales preciosos (OPM, que incluyen Rh, Ru e Ir). Se logró una precipitación máxima de Rh, Ru e Ir de 100%, 87% y 60%, respectivamente. Estas recuperaciones de OPM logradas cuando se usa tiourea como reactivo de precipitación son significativamente más altas que los valores reportados previamente cuando se usa ácido sulfuroso como reactivo de precipitación.

○ Cementación

Es un proceso de reducción electroquímica en el que los lixiviados que contienen metales se ponen en contacto con metales menos nobles como el zinc o el cobre. Es una de las técnicas más comunes utilizadas para la recuperación de metales, especialmente para metales preciosos como el oro y la plata

La cementación ha sido ampliamente aplicada, debido a que es un proceso relativamente simple y económico en el que se pueden obtener metales puros, incluso a bajas concentraciones de metales (Syed, 2016). También ofrece una gran estabilidad de los metales formados y se informa que la eficiencia de recuperación es relativamente estable en un rango de pH de 8-11. Awadalla y Ritcey (1991) estabilizaron borohidruro de sodio (NaBH₄) en solución de NaOH y lo usaron para recuperar Au (I) y Ag (I) de lixiviados de tiourea, tiocianato y tiosulfato ácidos. Se obtuvieron altas eficiencias de recuperación (> 99%) a temperatura ambiente en 30 s. El proceso de reducción es selectivo para el oro y la plata y tampoco se ve afectado por la presencia de impurezas metálicas como los metales base (Fe²⁺, Co²⁺, Ni²⁺ y Cu²⁺). A diferencia de la precipitación química, es eficaz dentro de un amplio rango de concentraciones de metales (2–2000 mg L⁻¹) en el licor de lixiviación. La hidracina (N₂H₄) es otro agente químico reductor fuerte que se usa con menos frecuencia en la recuperación de metales preciosos y críticos de las aguas residuales. A diferencia del NaBH₄, la hidracina no es cara y se reduce a N₂, lo que la hace más ecológica.⁹³ El proceso Merrill-Crowe o Cementation se utiliza para la concentración y purificación de oro y plata a partir de soluciones de cianuro. Entre otras opciones disponibles para la recuperación de metales preciosos a partir de soluciones de

⁹¹ <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.017>

⁹² <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.07.002>

⁹³ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

cianuro, la electrocoagulación (EC) es una técnica electroquímica muy prometedora para la recuperación de estos metales preciosos.

Los resultados sugieren que la **cementación de oro y plata mediante partículas de zinc suspendidas** se ajusta a una cinética de primer orden de buen comportamiento y para el proceso de EC los resultados muestran que es una excelente opción para eliminar Au y Ag de la solución de cianuro mediante el uso de electrodos de hierro. Finalmente, se eliminó el 99,5% del oro y la plata en el reactor EC experimental, y se logró en 5 minutos o menos.

○ **Disolventes orgánicos**

En el caso de la extracción con disolvente, el licor de lixiviación que contiene el metal objetivo se pone en contacto con una solución de extracción de un disolvente orgánico. La mezcla da como resultado la partición del complejo metálico en la fase orgánica (extracto) mientras que los metales restantes se dejan en la fase acuosa (refinado). El extracto se somete a un stripping para luego separar y recuperar el metal de la fase orgánica. Los extractantes más comúnmente empleados incluyen organofosforados, aminas, oximas, sulfóxidos y derivados amina-organofosforados.⁹⁴

En este trabajo⁹⁵, se realiza un proceso hidrometalúrgico para el tratamiento de PCB con ácido nítrico mediante la extracción de metales de forma secuencial. La atención se centra en el **estaño, el plomo y el cobre**, que están presentes en cantidades significativas en los PCB. El estaño, el plomo y el cobre se extraen secuencialmente como óxido (s) de estaño, nitrato (s) de plomo y nitrato de cobre (ac.) Con una eficiencia del 77% al 97%, del 51% al 85% y del 100%, respectivamente.

○ **Flotación**

La eliminación se basa en hacer que las especies de metales iónicos sean de naturaleza más hidrófoba, mediante el uso de sustancias tensioactivas, y su posterior eliminación mediante burbujas de aire.

○ **Intercambio iónico**

Las resinas de intercambio iónico (IEX) se utilizan para la recuperación selectiva de metales preciosos y críticos de corrientes acuosas diluidas. En este proceso, la recuperación del metal se logra pasando la solución que contiene el metal sobre la resina IEX que contiene grupos funcionales ácidos o básicos disponibles para el intercambio iónico:⁹⁶ Muchos de los estudios que se han realizado sobre la recuperación de metales preciosos y críticos utilizando IEX se centraron en **matrices acuosas sintéticas y monometálicas**. Sin embargo, la composición del lixiviado o de las aguas residuales, que contiene los metales objetivo, suele ser mucho más compleja. Esto hace que la investigación de la recuperación de metales a partir de corrientes acuosas reales sea muy relevante y más ventajosa en términos de aplicabilidad práctica e industrial.

○ **Bio-adsorción**

El desarrollo de adsorbentes nuevos o la ampliación de los existentes debe tener como objetivo una mayor absorción o una mayor solidez del proceso. Dado que se observan grandes diferencias en el rendimiento de varios adsorbentes, se podría establecer un cierto umbral mínimo. Caso: Recuperación de oro de metales preciosos en medios ácidos mediante el uso de desechos de cabello

⁹⁴ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

⁹⁵ <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143>

⁹⁶ <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

humano como un nuevo material verde sin pre-tratamiento⁹⁷; La cisteína y la cistina en el cabello humano desempeñaron un papel clave en la adsorción y reducción de Au

○ **Electro-deposición**

La **electrodeposición** (electrowinning, EW) es una técnica de recuperación tradicional en la que los metales preciosos y críticos se someten a electrodeposición. Se aplica una corriente eléctrica a la solución que contiene el metal objetivo, lo que da como resultado la deposición sobre el cátodo.⁹⁸

El transporte de materia es crucial para la electrodeposición de metales a partir de lixiviados diluidos, provocando una disminución en el rendimiento de alrededor de un 30-50% para concentraciones entre 1-10 g/L. La optimización de los parámetros operacionales y la integración de las técnicas con materiales, tales como electrodeposición ciclónica y electrodos rotativos para el alivio del efecto de transporte de masa, líquidos iónicos y sales fundidas para la extensión de la ventana de potencial electroquímico, así como Los materiales novedosos para electrodos y membranas para facilitar la selectividad y la eficiencia, también pueden mejorar significativamente el rendimiento o incluso superar las limitaciones.⁹⁹

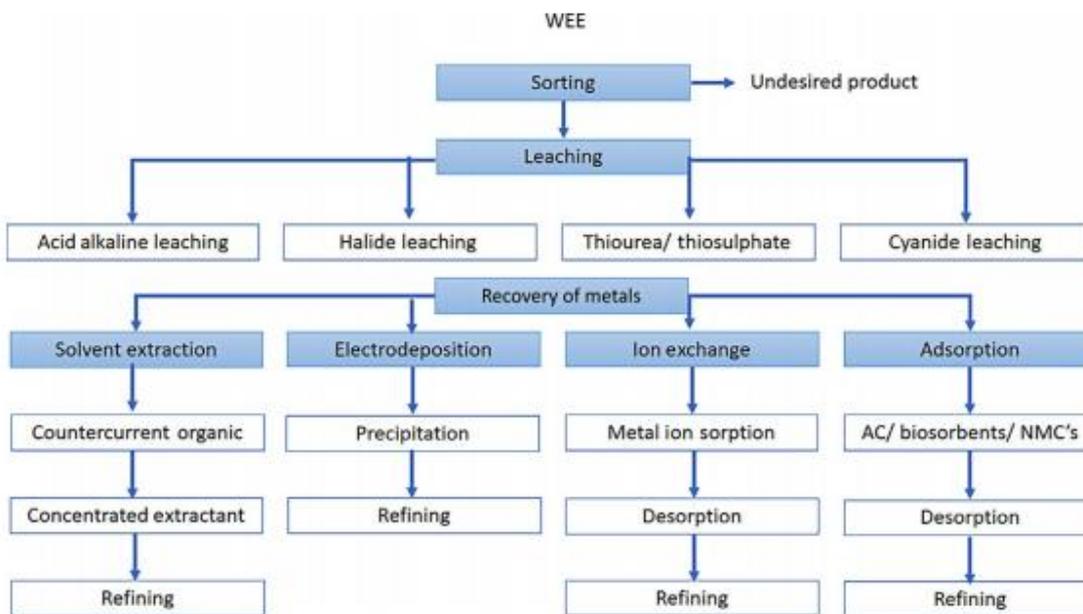


Figura 10. Esquema tratamientos hidrometalúrgico para RAEE¹⁰⁰

⁹⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104724>

⁹⁸ (Schlesinger et al., 2011) /<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>

⁹⁹ <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>

¹⁰⁰ <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816190-6.00010-8>

3.4 Alternativas de mejora. Proceso propuesto

3.4.1 Alternativas de mejora

La heterogeneidad es el principal inconveniente que dificulta la recuperación de material de RAEE. Por ello, se deben adoptar estrategias adecuadas en función del tipo de PCB, los costes de tratamiento y el valor real del contenido metálico. Esto da lugar a una propuesta de **estrategia híbrida** como el mejor enfoque disponible, basado en las evidencias anteriormente mencionadas.¹⁰¹

El estudio de la evolución tecnológica es esencial para comprender la relevancia del tema del reciclaje de PCB. Teniendo en cuenta los numerosos enfoques recogidos en la literatura (tanto patentes como artículos), la elección de la mejor opción es muy complicada y debe evaluarse en función de varios factores, entre ellos los costes medioambientales y económicos relacionados con la energía y las materias primas y los dispositivos necesarios.

Por lo general, las etapas de extracción comprenden procedimientos piro e hidrometalúrgicos que se combinan en **procesos híbridos** para el tratamiento de materiales complejos. En el caso de la pirometalurgia es necesaria una segunda etapa hidrometalúrgica para una mayor mejora y purificación de las corrientes de salida de la pirometalurgia inicial. Los procesos finales de **refino** de metales preciosos son principalmente hidrometalúrgicos.

El procesamiento únicamente mecánico supone un 10-30% de pérdida de metales durante la molturación cuando el tamaño de las partículas resultantes es de <2mm, además de ser un procedimiento intensivo energéticamente con una generación importante de polvo.¹⁰²

A pesar de que los procesos hidrometalúrgicos poseen inconvenientes como la necesidad de pre-tratamientos o selección de las entradas (no adecuado para las partes de baja riqueza), la selección de lixiviantes con altos rendimientos y bajos riesgos para los trabajadores y el medio ambiente. La razón de la preferencia de la hidrometalurgia sobre la pirometalurgia se debe a;

- bajo consumo de energía,
- baja o nula emisión de gas
- Sin polvo o poca generación de polvo
- alta tasa de recuperación
- sin generación de escoria excepto pocos plásticos
- fácil condición de trabajo
- selectivo para metales preciosos
- bajos costes de inversión

Además, los procesos pirometalúrgicos requieren también de una alimentación de alta riqueza en metales (Jadhav and Hocheng, 2015) y en estos procesos se liberan gases tóxicos (dioxinas / furanos) y metales volátiles, polvo, Cl₂, Br₂, SO₂ y CO₂ junto con otros Pb, Hg, Cr⁶⁺, Cd, procedentes de los retardantes de llama.

¹⁰¹ <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100035>

¹⁰² <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143>

Tras analizar los procesos que parecen ser más respetuosos con el medio ambiente y por no repetir estrategias ya investigadas sino buscar vías sostenibles para el reciclaje completo de los circuitos, la propuesta de trabajo debe comenzar por la creación de sinergias para un reciclaje eficiente. Se propone hacer un pre-tratamiento y separación de fracciones (realizado por talleres de las empresas especializadas) y posteriormente trabajar con procesos hidrometalúrgicos en las etapas de **extracción y recuperación** con tecnologías que incorporen reactivos valorizados a partir de residuos. Dentro de los procesos hidrometalúrgicos, se destacan en particular las **ventajas de los procedimientos electroquímicos** como potencial tecnología a ser empleada en estos procesos de recuperación por diferentes motivos^{103104 105}:

La electrodeposición es un método eficaz, selectivo y de fácil adopción para recuperar iones de metal /metaloides en el estado más valioso. No se requieren productos químicos adicionales debido al reactivo limpio de "electrón", mientras que también puede proporcionar una modulación precisa de la calidad del producto. Los iones se pueden recuperar en su forma metálica, por lo que están listos para ser reutilizados; el proceso no genera lodos residuales; no es necesario añadir productos químicos en exceso; el proceso se controla fácilmente, ya que la variable de control es la corriente eléctrica.

Es evidente que, en la perspectiva de la aplicación de un **enfoque de economía circular**, un método completo para la explotación de todas las fracciones valiosas es el más atractivo, sin embargo, la elección también podría ser impulsada por la posibilidad de implementar el proceso en plantas de recuperación existente, evitando los costos del transporte hacia los pocos sitios de tratamiento específicos existentes actualmente. En este contexto, se considera muy importante impulsar la creación de nuevas plantas de tratamiento, para disminuir los impactos asociados al transporte transfronterizo de los residuos.

3.4.2 Proceso propuesto

A partir de la bibliografía consultada, los pasos existentes para una recuperación de la mayoría de los elementos que componen estos residuos sería (ver **primer esquema** página siguiente)

En particular, dado que el cobre está presente en altas cantidades, debe considerarse el objetivo principal del proceso de recuperación (al menos para equipos pobres en oro, como módems o PCB mixtos); Para **reducir el consumo de productos químicos**, gran parte del contenido de cobre inicial podría recuperarse de los PCB limpios mediante un proceso mecánico o térmico, al reducir la especie mayoritaria por vía física, las posteriores fase de extracción y purificación se simplificarían pudiendo incrementar el rendimiento de cada etapa.

Debido a la necesidad de un proceso sostenible en línea con la economía circular, se propone utilizar un agente lixivante ácido agotado procedente de una empresa de tratamientos de superficie. También podría contemplarse, según bibliografía, una lixiviación conjunta químico biológica, con ácidos de decapado agotado y bacterias específicas (ver **segundo esquema**).

¹⁰³ <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.026>

¹⁰⁴ <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>

¹⁰⁵ <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.009>



3.5 Ensayos realizados

En este caso se va a actuar siguiendo la siguiente línea;

a) Triturado, cribado y tamizado de las placas

Se ha solicitado una muestra de circuitos impresos a una empresa gestora de residuos de componentes electrónicos. Cuando este tipo de residuos llegan a las empresas gestoras, se clasifican visualmente y según su origen entre fracciones de alta calidad o baja calidad.

Las placas introducidas en la trituradora para el presente caso de estudio han sido de alta calidad, entre las que se encuentran dispositivos militares y de telecomunicaciones, a los que se les ha retirado los componentes electrónicos soldados de la superficie.

Debido a la diferente composición que se puede encontrar en función de la granulometría de los circuitos triturados, se separan 3 fracciones mediante un tamizado, distinguiendo entre tres diferentes;

Grueso >1.7mm

Medio 0.25-1.7mm

Fino <0.25mm

b) Análisis cualitativo inicial

Para tener una orientación sobre la composición de las distintas fracciones, se realiza de forma preliminar un análisis mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) que es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X con el objetivo de distinguir los potenciales metales a recuperar.

c) Análisis cuantitativo

Una vez identificados los metales presentes en estas fracciones, se procede a hacer un análisis cuantitativo de los mismos empleando un ácido fuerte capaz de disolver metales preciosos; el agua regia. El agua regia es una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico en un ratio de 3:1. Es una mezcla fuertemente oxidante que disuelve muchos de los metales comunes, así como algunos del grupo platino. Esta lixiviación se realiza pesando 0.1 gramo de cada muestra y 20 mL de mezcla a alta temperatura, en vaso de precipitados tapado y añadiendo el preparado ácido cada según se evapora.

d) Separación no metales

Con el objetivo de realizar una separación de la fracción no metálica de la fracción media, se selecciona como tecnología la aplicación de ultrasonidos con un procedimiento análogo al encontrado en el estudio de patentes, con dos muestras de 0.5g;

- Muestra con agua destilada (40mL)
- Muestra con agua destilada y H₂O₂ (aditivo oxidante que además genera gas que favorece la separación) (11 mL H₂O₂ al 33% y 29mL H₂O)

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- Temperatura: 35 °C
- Baño de ultrasonidos: se trabajó con una potencia de 500 W

- Tiempo de ensayo: 20 minutos

e) E) Lixiviado con ácidos de decapado agotados

Dado que las condiciones necesarias para disolver los circuitos son muy agresivas debido a la naturaleza de los metales que lo componen, se plantea la posibilidad de emplear un residuo de otra empresa para realizar esta lixiviación en línea con los principios de la economía circular.

En este caso se ha seleccionado un ácido de decapado agotado procedente de la industria de tratamiento de superficies, la cual todavía cuenta con una fuerte acidez y un alto contenido ferroso del agua de desecho de decapado.

f) Electro-oxidación

El método de reciclaje incluye los pasos de llevar a cabo la lixiviación química mediante el uso de las **aguas residuales de decapado y la potenciar la oxidación vía electroquímica para incrementar la** tasa de lixiviación de los metales con el objetivo de reducir el uso de agentes químicos y aprovechar las ventajas ambientales de las operaciones electroquímicas.

3.6 Resultados

a) Triturado, cribado y tamizado de las placas



Figura 11. Imagen de distintos tamices tras el cribado

mm	%	%	MUESTRA
1,7	83,23	93	Grueso
1,5	4,65		
1	5,46		
0,25	5,63	6	Medio
0,2	0,79		
0,125	0,18		
0,106	0,05		
<0,075	0,01	<1	Fino
Total	100		



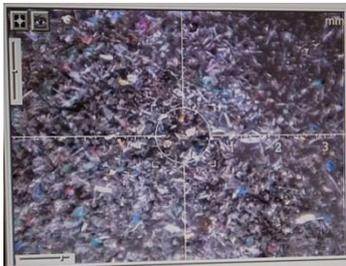


Figura 12. Muestras recogidas de la fracción gruesa, media y fina respectivamente

b) Análisis cualitativo inicial

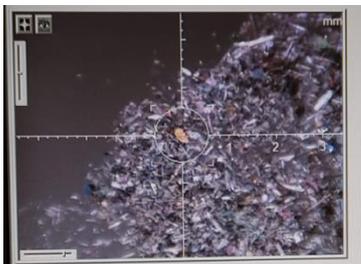
Imágenes extraídas del equipo FRX

➤ Fracción fina



Resultado del análisis: (%)

20	Ca	=	28.92
26	Fe	=	25.61
29	Cu	=	21.20
35	Br	=	8.18
50	Sn	=	2.20
22	Ti	=	8.40
82	Pb	=	0.67
23	V	=	1.33
28	Ni	=	1.13
30	Zn	=	2.18
38	Sr	=	0.18



Resultado del análisis: (%)

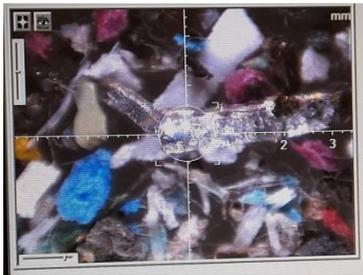
26	Fe	=	45.36
20	Ca	=	18.68
35	Br	=	9.70
22	Ti	=	9.58
29	Cu	=	9.33
50	Sn	=	1.49
82	Pb	=	1.16
30	Zn	=	3.60
28	Ni	=	0.92
38	Sr	=	0.20

➤ Fracción media



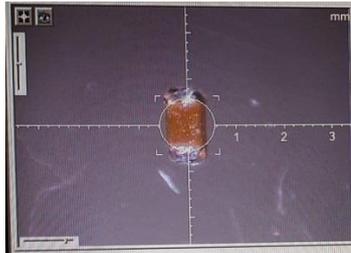
Resultado del análisis: (%)

29	Cu	=	71.39
28	Ni	=	14.85
79	Au	=	7.13
50	Sn	=	6.63



Resultado del análisis: (%)

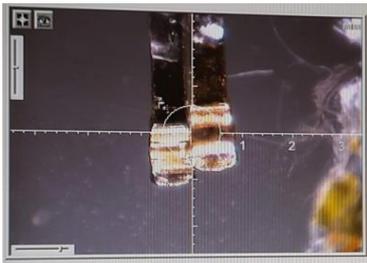
29	Cu	=	51.11
30	Zn	=	27.04
50	Sn	=	9.16
82	Pb	=	4.28
28	Ni	=	3.65
35	Br	=	4.76



Análisis [%]

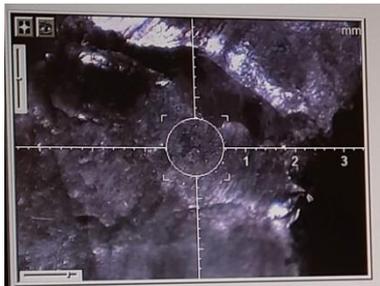
Ti	
Y	

➤ Fracción gruesa



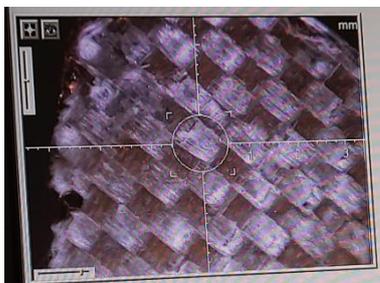
Análisis [%]

Au	15.24
Cu	59.14
Ni	19.49
Sn	6.13



Análisis [%]

Fe	69.82
Zn	30.18



Análisis [%]

Ca	41.20
Cu	30.62
Br	27.50
Sr	0.67



c) Análisis cuantitativo

En estos análisis se procedió a cuantificar los metales encontrados en las distintas fracciones según el procedimiento descrito en el apartado anterior. La fracción gruesa, debido a sus dimensiones, no es factible su lixiviación directa por lo que el procedimiento para su análisis fue el de la calcinación de 6.0296g de muestra y posteriormente la lixiviación de lo mismo con agua regia hasta la completa disolución de la misma



Figura 13. Análisis de fracción media y fina con agua regia

Elemento	%
Cu	4-25
Al	3-11
Ni	0,05-0,5
Ca	0,6-4
Cr	0,05-0,2
Zn	0,05-0,05
Pb	0,01-1,3
Au	0,001-0,02
Ag	0,001-0,06
Y, Pt, Rh, Pd	0,001-0,5



<15%



30%



38%

En todas las fracciones se encuentra mayoritariamente el cobre como metal principal por lo que se recomendaría separar este metal por procedimientos físicos preferentemente antes de proceder a la lixiviación de las partículas.

En la fracción gruesa solo se ha encontrado principalmente cobre y aluminio, además del plomo procedente de las soldaduras. Dada la complejidad encontrada en la disolución de estas partes por su tamaño, se descarta el estudio sobre esta fracción gruesa.

En la parte fina, se encuentra el Calcio que procede de la fibra de vidrio como elemento mayoritario, y respecto al cobre y otros metales tampoco se encuentran cantidades relevantes como para hacer cualquier procedimiento viable.

Por todo ello **se selecciona la fracción media** para proceder con el resto de ensayos.

d) Separación no metales

Con el objetivo de enriquecer la fracción metálica mediante la separación de los polímeros y fibra de vidrio del resto de materiales se ha procedido no solo a la separación densimétrica de los polímeros sino a la aplicación de ultrasonidos en la fracción media con el fin de promover la separación de las



**GENERALITAT
VALENCIANA**

ivACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL

partículas metálicas del resto de soportes plásticos de sus estructuras. Tal y como se ve en la primera imagen, la fibra está presente y cuando se mueve la fracción se forman aglomerados que dificultan la separación del metal.



Figura 14. Fracción media donde se aprecia el aglomerado de fibra



Figura 15. Separación para S:L = 50. Agua destilada y H2O2 respectivamente

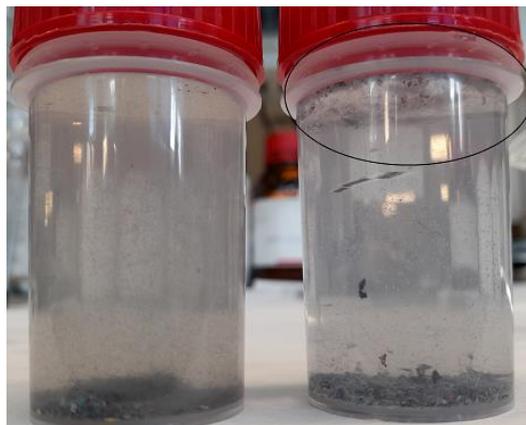


Figura 16. Separación para S:L = 12.5. Agua destilada y H2O2 respectivamente

Se hicieron varios ensayos, primero con una relación sólido:líquido de 50 y luego de 12.5 para agua destilada y agua con H2O2 según procedimiento anteriormente descrito. Los resultados salen considerablemente mejor para los del H2O2, siendo la separación de las fases mucho más sencilla en el caso del S:L 12.5.

Tras la separación y descarte de la parte superficial, se procedió al secado del fondo obteniendo una disminución en masa del 3.1% para el agua destilada y del 9.5% para el caso del peróxido.

e) Lixiviado con ácidos de decapado agotados

Se han realizado ensayos de lixiviación en distintas condiciones empleando como agente lixivante un residuo de decapado ácido de una empresa de tratamiento de superficies.

La composición del baño agotado es principalmente ácido clorhídrico y sulfúrico con hierro disuelto. El pH inicial es del orden de 1. Se realizaron los ensayos a temperatura ambiente, a 80°C y con electro oxidación simultánea. Todos ellos con agitación.

Las condiciones del ensayo electrolítico fueron de 40 mA/cm² y V=1.5-2, realizados con cátodo de musgo de cobre y ánodo MMO; de Titanio con un Revestimiento de Óxido de Metal Mezclado de Iridio (MMO). Tabla condiciones:

Test	Temperatura	Pretratamiento	Agitación	Electro-asistido	Tiempo
1	Ambiente	No	Sí	No	3 h
2	Ambiente	Ultrasonidos+H2O2	Sí	No	3 h
3	80 °C	No	Sí	No	3 h
4	Ambiente	No	Sí	Sí	3 h



Figura 17. Distintos ensayos con el ácido de decapado

En la figura anterior se ven a la izquierda los vasos con la fracción metálica sin y con pretratamiento de ultrasonidos respectivamente.

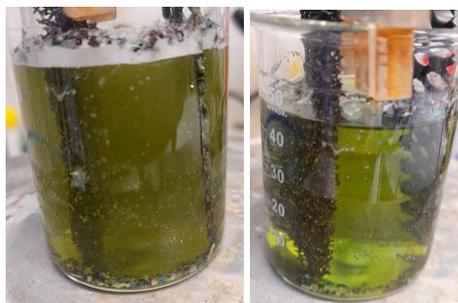


Figura 18. Momento inicial (izquierda) y final del ensayo asistido electroquímicamente

En las imágenes de la derecha se ve el ensayo con electrólisis en la cual se puede ver en la primera imagen que al inicio del ensayo antes de estabilizar el sistema se genera una gran cantidad de hidrógeno (reacción parasitaria) de forma que algunas partículas quedan flotando. Una vez se estabiliza, continúa la lixiviación sin incidentes.

Los resultados obtenidos son, en ppm:

(ppm)	1	2	3	4
Fe	32460	32840	31380	32140
Ni	2198	2124	2110	3546
Ca	548,2	416	498,8	527,6
Cu	411,6	518,2	1151,8	626,6
Al	174,6	123,2	192	120,2
Au *	~4	~4	~4	~4
Pt *	~4	~4	~4	~4
Y	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
Rh	<L.D.	<L.D.	<L.D.	<L.D.
* Bajas concentraciones				

El **hierro** encontrado se debe mayoritariamente al residuo ácido de decapado procedente del decapado de las piezas durante el proceso de la empresa. En los 4 casos es el mismo valor. El valor del **chromo** puede ser debido al origen del lixiviante también.

El **níquel, cobre y aluminio** procedente de las PCB son los siguientes metales contenidos en mayor concentración, siendo todos del mismo orden de magnitud para todos los ensayos, a excepción del Cu para 80°C, el cual es del orden de 2 veces superior al resto de ensayos.

El **Calcio** se asocia a los compuestos poliméricos que conforman las placas de los circuitos en particular porque suele emplearse en la **fibra de vidrio** que aporta rigidez, normalmente recubierto de silicato de calcio. El ensayo con el menor contenido en Ca es el numero 2, correspondiente al pretratamiento con peróxido y ultrasonidos.

A priori no se presentan mejorías considerables para las condiciones del **ensayo 4**, asistido por vía electroquímica, puede ser debido a un bajo contacto del polvo metálico con el ánodo. El ensayo podría mejorarse incluyendo mecanismos para incrementar el contacto del residuo mediante cestas anódicas y vibración del ánodo así como la introducción del polvo en una cesta anódica y agitación que garantice el contacto continuo del polvo con el electrodo.

La presencia de metales como el **Au** y el **Pt** en concentraciones de ppm en la disolución confirma la factibilidad de utilizar un residuo ácido de una empresa para valorizar los residuos electrónicos en línea con los objetivos de la economía circular.

Para futuras pruebas, se ejecutarían más ensayos introduciendo con un mayor volumen de muestra para que al recoger más gramos de polvo de forma que más metales pueden entrar en disolución (debido a la heterogeneidad del polvo) cambiando la configuración del reactor electroquímico como se menciona anteriormente.

Sería recomendable realizar una separación física previa a la lixiviación y así facilitar la posterior purificación del resto de metales de la solución lixiviada. Asimismo, se recomienda hacer una molturación más fina por un lado para incrementar la fracción media de los residuos a recuperar y así aprovechar una mayor cantidad de metales que se incluyen en las placas y por otro para facilitar la lixiviación de dicha fracción.

4 Alcance, colaboradores y público objetivo.

Los principales **sectores** interesados son aquellos cuya actividad se basa en la gestión de residuos, en particular aquellos que gestionan y/o reciclan residuos tecnológicos e informáticos. Por otro lado, la propuesta de economía circular amplía el alcance de las empresas objetivo, y dada la potencialidad de la utilización de los residuos ácidos para valorizar los residuos electrónicos, las actividades de tratamiento de superficie se consideran tanto colaboradores como futuro objetivo.

Todos ellos estarían interesados en conocer de primera mano la evolución del proyecto y avances hasta el resultado final y en los casos favorables, implantar las tecnologías planteadas.

Por todo ello, el **alcance** de este proyecto teniendo en cuenta la actividad empresarial a nivel nacional es de 4281 empresas, y en particular de la Comunidad Valenciana 483 según el INE en el año 2020.

Sectores **Objetivo**:

CNAE	Actividad	Nº de empresas objetivo (Fuente: INE ¹⁰⁶)
370	Recogida y tratamiento de aguas residual	606 (105 Comunidad Valenciana)
390	Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos	374 (43 Comunidad Valenciana)
3800	Recogida, tratamiento y eliminación de residuos, valorización	2.836 (294 Comunidad Valenciana)
	Tratamiento de superficies con cubetas > 30m3	465 (41 de la Comunidad Valenciana) ¹⁰⁷

	Total 2020
Total Nacional	
38 Recogida, tratamiento y eliminación de residuos; valorización	2.836
381 Recogida de residuos	1.814
382 Tratamiento y eliminación de residuos	520
383 Valorización	502
10 Comunitat Valenciana	
38 Recogida, tratamiento y eliminación de residuos; valorización	294
381 Recogida de residuos	189
382 Tratamiento y eliminación de residuos	58
383 Valorización	47

	Total 2020
Total Nacional	
390 Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos	374
10 Comunitat Valenciana	
390 Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos	43
Total Nacional	
370 Recogida y tratamiento de aguas residuales	606
10 Comunitat Valenciana	
370 Recogida y tratamiento de aguas residuales	105

¹⁰⁶ <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=298>

¹⁰⁷ Fuente: PRTR <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>

5 Acciones de difusión y transferencia.

Tabla de detalle de las acciones de difusión del proyecto:

Título	Medios utilizados	Enlace	Visitas	Fecha
"FGVA - ECO CIRWASTE"	Web AIDIMME Difusión de proyectos	https://www.aidimme.es/serviciosonline/difusion_proyectos/detalles.asp?id=30706	4679	01/2021
ESPECIAL - Difusión de Proyectos 2021	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 125	https://actualidad.aidimme.es/2021/06/14/especial-difusion-de-proyectos-2021/	No disponible	14/06/2021
Reciclaje de bajo impacto ambiental para residuos eléctricos y electrónicos	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 131	https://actualidad.aidimme.es/2021/09/20/cirwaste-recuperacion-desechos-tecnologicos/	546	20/09/2021
Economía circular aplicada al tratamiento de residuos	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 134	https://actualidad.aidimme.es/2021/11/10/cirwaste-economiacircular-residuos/	158	10/11/2021
AIDIMME: Proyectos en ejecución	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 135	https://actualidad.aidimme.es/2021/11/16/especial-difusion-de-proyectos-2021-2/	2226	16/11/2021
AIDIMME promueve más de un centenar de proyectos anuales para impulsar la innovación estratégica en las empresas	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 136	https://actualidad.aidimme.es/2021/11/30/aidimme-promueve-mas-de-un-centenar-de-proyectos-anuales-para-impulsar-la-innovacion-estrategica-en-las-empresas/	No disponible	30/11/2021
AIDIMME pone a disposición de las empresas y la sociedad los resultados de las investigaciones que ha desarrollado en 2021.	Prensa electrónica. Actualidad AIDIMME. Boletín informativo quincenal de AIDIMME. Número 138.	https://actualidad.aidimme.es/2021/12/17/aidimme-resultados-de-investigacion-2021/	382	17/12/2021

6 Resumen y conclusiones.

Los RAEE son una mezcla compleja de materiales y componentes que, debido a su contenido peligroso, pueden causar importantes problemas medioambientales y de salud si no se gestionan adecuadamente. Además, la producción de equipos eléctricos y electrónicos modernos requiere el uso de recursos raros y costosos. Para mejorar la gestión medioambiental de los RAEE, contribuir a una economía circular y mejorar la eficiencia de los recursos, el avance de la recogida, el tratamiento y el reciclaje de productos electrónicos al final de su vida útil es fundamental.

El gran interés por este tipo de RAEE no es despreciable teniendo en cuenta la relevante concentración de metales valiosos en los desechos, siendo incluso mayor que en los recursos minerales en algunos casos. Además, la presencia de PCB en muchos tipos de equipos electrónicos provoca un **suministro potencialmente continuo** de materia prima secundaria, lo que se conoce como minería urbana.

A pesar del **valor potencial** de este residuo, el número de plantas adecuadas para su tratamiento es bastante bajo en todo el mundo. Actualmente su tratamiento se realiza únicamente a través de procesos pirometalúrgicos de alto impacto ambiental. Además, el desarrollo de **tecnologías innovadoras, sostenibles y flexibles** se considera estratégico en el ámbito del reciclaje de RAEE. De hecho, los recicladores de residuos electrónicos no solo producen PCB, sino también muchos tipos diferentes de residuos después de los procesos de reciclaje, y

A partir del estudio del **estado del arte**, respecto a patentes y estudios científicos, una observación interesante es la comparación entre la evolución tecnológica y la literatura científica que muestra la posibilidad de una ampliación efectiva de los procesos. Se observa una tendencia diferente, ya que la literatura científica se centra en tres aspectos principales del reciclaje de circuitos: los métodos de separación, los procesos hidrometalúrgicos y la recuperación de no metales.

Del análisis de las patentes internacionales se desprende que **no existe un esquema universal** para el reciclado de PCB, y que los procesos de reciclado son una combinación de diferentes tratamientos dispuestos de distintas maneras. En cualquier caso, es necesario un **pretratamiento** basado en el desmontaje y cribado mecánico para eliminar los componentes reutilizables y peligrosos y enriquecer las fracciones antes de pasar a los siguientes tratamientos dirigidos a la recuperación de metales.

Teniendo en cuenta la información encontrada en bibliografía y la posibilidad de utilizar residuos de empresas para tratar los circuitos se han realizado ensayos de lixiviación con residuos de decapado con y sin complemento electroquímico dando lugar a la lixiviación de los metales objetivo. Mediante la adopción de este método de reciclaje, los residuos de los circuitos impresos y las **aguas residuales del decapado pueden ser utilizados de manera integral**, el principio de utilizar los residuos para eliminar los residuos se lleva a cabo plenamente, se logra el máximo reciclaje de recursos y el tratamiento de los dos residuos, no sólo el metal pesado en los residuos de los circuitos impresos, sino que también se lograría el tratamiento eficaz de las aguas residuales del decapado. La utilización de residuos es un punto clave para la sostenibilidad general del enfoque en base a los **principios de la economía circular**.

7 Anexos y bibliografía.

- 1) <https://www.elsevier.com/es-es/solutions/scopus>
- 2) <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jsp;jsessionid=T3nWJmsgpzscKGM9u1Svp7mo.srvvarsovia2>
- 3) Espacenet <https://es.espacenet.com/>
- 4) Patentscope <https://www.wipo.int/patentscope/es/>
- 5) <https://www.lme.com/>
- 6) <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jsp;jsessionid=T3nWJmsgpzscKGM9u1Svp7mo.srvvarsovia2>
- 7) <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/faces/busquedaInternet.jsp>
- 8) <https://ec.europa.eu/eurostat/>
- 9) [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electrical_and_electronic_equipment_\(EEE\)_put_on_the_market_in_the_three_preceding_years_\(2015-2017\)_and_waste_EEE_collected_in_2018_\(kilograms_per_inhabitant\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electrical_and_electronic_equipment_(EEE)_put_on_the_market_in_the_three_preceding_years_(2015-2017)_and_waste_EEE_collected_in_2018_(kilograms_per_inhabitant).png)
- 10) https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en
- 11) MITECO – Aparatos eléctricos y electrónicos.
<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/aparatos-electr/electricos-y-electronicos-que-son-sus-residuos.aspx>
- 12) Parlamento europeo
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/76/la-eficiencia-en-el-uso-de-los-recursos-y-la-economia-circular>
- 13) https://www.unicore.com/storage/migrate/2010CMD_Hoboken.pdf
- 14) Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants--A review <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 15) <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/eb044031/full/html>
- 16) <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/76/la-eficiencia-en-el-uso-de-los-recursos-y-la-economia-circular>
- 17) www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2020/Fraunhofer_ISI_Urban_Mining.pdf
- 18) <https://es.statista.com/estadisticas/619085/cifra-de-raee-recogidos-en-espana/#statisticContainer>
- 19) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 20) <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/08/el-precio-de-los-commodities-en-la-mineria-un-factor-fundamental-en-este-campo/>
- 21) <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=cobre&meses=60&moneda=eur>
- 22) https://www.kitco.com/charts/interactive-charts/?utm_source=kitco&utm_medium=banner&utm_content=20110407_iCharts_chdata&utm_campaign=iChart
- 23) <https://rodin.uca.es/handle/10498/16758>
- 24) Havlik et al., 2011; Tuncuk et al., 2012; Birloaga et al., 2013
- 25) Potentials, Trade-Offs and Supporting Factors for the Recovery of Raw Materials from the Anthroposphere. Luis Tercero Espinoza, Leon Rostek. Karlsruhe (2020)
- 26) Wildmer et al., 2005; Robinson, 2009; Yazici y Deveci, 2013
- 27) Zhang, S., Forssberg, E., 1998. Mechanical recycling of electronics scrap – the current status and prospects. Waste Manage. Res. 16 (2), 119–128. Zhang, Z., Zhang, F.-S., 2014. Selective recovery of palladium from waste printed circuit boards by a novel non-acid process.
- 28) Hagelüken, C., 2006. Recycling of electronic scrap at Umicore precious metals refining. Acta Metall. Slovaca 12, 111–120

- 29) F. Zhao, Y. Ma, Y. Zhu, Z. Tang, S.P. McGrath, Contaminación del suelo en China: estado actual y estrategias de mitigación, *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015) 750–759
- 30) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.161> Copper and gold recovery from CPU sockets by one-step slurry electrolysis. Chen et al. *Clean. Prod.* 213 (2019)
- 31) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124772> - Separation of Metals from Ni-Cu-Ag-Pd-Bi-Sn Multi-metal System of E-waste by Leaching and Stepwise Potential-controlled Electrodeposition
- 32) Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process
- 33) Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants – A review <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 34) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
- 35) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.104>
- 36) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
- 37) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.032>
- 38) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
- 39) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
- 40) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 41) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 42) <https://www.academia.edu/18893838/DCargo>
- 43) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 44) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 45) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 46) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.060>
- 47) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 48) <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2017.06.001>
- 49) <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>
- 50) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 51) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- 52) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 53) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.076>
- 54) <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.11.012>
- 55) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
- 56) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00023-1>
- 57) <https://www.isasmelt.com/es/smelt/Paginas/IsaSmelt-Design.aspx>
- 58) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.076>
- 59) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- 60) <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>
- 61) <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>
- 62) <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137937>
- 63) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- 64) <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.06.005>
- 65) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.112>
- 66) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.017>
- 67) <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.07.002>
- 68) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- 69) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- 70) <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143>
- 71) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.029>
- 72) <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104724>
- 73) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816190-6.00010-8>

- 74) <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100035>
- 75) <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100143>
- 76) <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.026>
- 77) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>
- 78) <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.009>