

Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE): Reciclaje y movimiento transfronterizo

Naila López Llorens

Tutora: María Belén Almendro Candel

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

Área de Ingeniería Química



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Grado en Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias Experimentales

Curso 2018-2019

Resumen

Los RAEE son los residuos que están creciendo más rápidamente en todo el mundo. Sin embargo, la tasa de reciclaje es sólo del 20 %. Los componentes de estos desechos son muy escasos en el planeta, además de peligrosos para el medio ambiente y la salud humana. Por eso es importante tratar de recuperarlos para volver a utilizarlos, sobre todo los metales, que constituyen una media de alrededor del 60 % de la composición de los RAEE. Su recuperación supone el ahorro de recursos naturales y existen muchos procesos para extraerlos dentro de la pirometalurgia, la hidrometalurgia y la biometalurgia. También es necesario el tratamiento de los plásticos de estos residuos debido a su contenido en retardantes de llama bromados. La gestión de los RAEE abarca su recogida, el transporte, un pretratamiento que incluye la descontaminación antes de destinar los distintos componentes a su tratamiento específico y el reciclaje de estos. Muchas veces estos procesos se llevan a cabo en países en vías de desarrollo, que no son los productores de esos residuos, de manera inadecuada. Esto se conoce como movimiento transfronterizo y es un problema contra el que hay que luchar.

Abstract

WEE are the wastes which are growing most quickly in the world. However, the recycling rate is only 20 %. The components of these wastes are very scarce on the planet, as well as dangerous for the environment and human health. That is why it is important to recover them for reuse, especially metals, which constitute an average of around 60 % of the composition of WEE. Their recovery means the saving of natural resources and there are many processes to extract them in pyrometallurgy, hydrometallurgy and biometallurgy. It is also necessary to treat the plastics of these wastes due to their content in brominated flame retardants. The management of WEE involves its collection, transportation, pre-treatment that includes decontamination before allocating the different components to their specific treatment and the recycling of them. Often these processes are carried out inadequately in developing countries, where those wastes aren't generated. It's known as trans-boundary movement and it's a problem that we have to combat.

Palabras clave: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), reciclaje, recuperación, metales, plástico, movimiento transfronterizo.

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivo	8
3. Antecedentes: Responsabilidad en la producción y gestión de los RAEE	9
3.1. Obligaciones de los productores de AEE.....	9
3.2. Obligaciones de los distribuidores	10
4. Gestión de los RAEE.....	12
4.1. Recogida y transporte	12
4.2. Pretratamiento.....	14
4.3. Reciclaje.....	15
4.3.1. Reciclaje de plásticos	17
4.3.2. Reciclaje de metales.....	18
Pirometalurgia	20
Hidrometalurgia.....	21
Biometalurgia.....	23
4.4. Otras vías de tratamiento	24
4.4.1. Vertedero	24
4.4.2. Incineración.....	25
5. Movimiento transfronterizo de residuos electrónicos.....	27
5.1. Convenio de Basilea	29
6. Conclusiones.....	30
7. Bibliografía.....	31

1. Introducción

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) son los residuos que están creciendo más rápidamente en el planeta, con una tasa de crecimiento anual del 3-7 %, esto es, una tasa tres veces mayor que los residuos municipales generados a nivel mundial por año (Chatterjee y Abraham, 2017). Se estima que la generación de RAEE alcanzará las 52,2 toneladas al año en 2021 (Sahajwalla y Gaikwad, 2018). La producción de RAEE generados está incrementando debido al aumento en la demanda de aparatos eléctricos y electrónicos, que eleva la tasa de fabricación de los mismos, a la alta tasa de obsolescencia que acorta la vida de los aparatos y, finalmente, al escaso reciclaje (Ilankoon *et al.*, 2018).

Para 2016 el mundo ya había generado, aproximadamente, 44,7 millones de toneladas de RAEE. Actualmente sólo entre el 15 y el 20 % de los desechos electrónicos son reciclados a través de los canales apropiados (Ding *et al.*, 2019). A pesar de estos bajos porcentajes, la industria del reciclaje de RAEE ha crecido con una tasa promedio del 4,86 % al año. Además, se espera que este crecimiento continúe en el futuro y alcance en 2021 los 14,5 billones de dólares (Sahajwalla y Gaikwad, 2018).

En los Estados miembros de la Unión Europea el objetivo de recolección de la directiva sobre RAEE (Directiva 2012/19/UE), del 65% de la cantidad comercializada o, alternativamente, el 85% de los desechos electrónicos en flujos de residuos, es obligatorio a partir de 2019 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2012; Salhofer, 2017).

Dada la problemática existente con este tipo de residuos, estos últimos años se han implantado normativas exigentes en todo el mundo. En España se ha ampliado la legislación a partir de la publicación de la correspondiente Directiva Europea. Es en dicha legislación donde encontramos toda la información necesaria para entender el proceso de gestión de residuos. Pero antes de hablar de su gestión es importante definir qué son los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

El apartado a) del artículo 3 del Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, considera que los aparatos eléctricos y electrónicos o AEE “son 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 utilizarse con una tensión nominal no superior a 1.000 voltios en

corriente alterna y 1.500 voltios en corriente continua” (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a).

A partir del 15 de agosto de 2018, las categorías de AEE incluidas en el ámbito de aplicación del real decreto pasan a ser 7 (en lugar de las 10 que hasta entonces existían):

1. Aparatos de intercambio de temperatura con excepción de: Los aparatos de intercambio de temperatura que contienen clorofluorocarburos (CFC), hidroclorofluorocarburos (HCFC), hidrofluorocarburos (HFC), hidrocarburos (HC) o amoníaco (NH₃); los aparatos eléctricos de aire acondicionado y los aparatos eléctricos con aceite en circuitos o condensadores.

En este apartado encontramos frigoríficos, congeladores, equipos de deshumidificación, bombas de calor...

2. Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm².

Incluye pantallas, ordenadores portátiles, televisores, monitores...

3. Lámparas.

Por ejemplo, lámparas de descarga (mercurio), lámparas fluorescentes, lámparas LED.

4. Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm).

Estarían incluidas las lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas y hornos eléctricos, máquinas de hacer punto y tejer, máquinas tragaperras...

5. Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm).

Entre otros se encuentran aspiradoras, máquinas de coser, hornos microondas, planchas, tostadoras, relojes, maquinillas de afeitar eléctricas, básculas, calculadoras, aparatos para el cuidado del pelo y el cuerpo, aparatos de radio, videocámaras, instrumentos musicales, termostatos, detectores de humo...

En los apartados 4 y 5 se incluyen electrodomésticos, equipos de música, herramientas eléctricas y electrónicas, juguetes, equipos deportivos y de ocio, productos sanitarios, instrumentos de vigilancia y control, entre otros.

6. Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm).

Por ejemplo, teléfonos móviles, GPS...

7. Paneles fotovoltaicos grandes (con una dimensión exterior superior a 50 cm).

En el apartado f) del mismo artículo se definen los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos como: “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” siendo un residuo “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” según el mencionado artículo 3.a) de la Ley de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado, 2011).

El apartado l) clasifica los RAEE por su procedencia en:

«RAEE domésticos»: Procedentes de hogares particulares o de fuentes comerciales, industriales, institucionales y de otro tipo que, por su naturaleza y cantidad, sean similares a los procedentes de hogares particulares.

Por exclusión, los «RAEE no domésticos» tendrán la consideración de **«RAEE profesionales»**.

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos (conocida como Directiva Marco de Residuos), recoge el principio de jerarquía de gestión de residuos, en su artículo 4, siendo de mayor a menor prioridad (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008):

1. Prevención.
2. Preparación para la reutilización.
3. Reciclado.
4. Otro tipo de valorización, incluida la energética.
5. Eliminación.

Esta pirámide propone que la gestión de los residuos abarque todo el ciclo de vida de los aparatos, desde su fabricación hasta su desecho. Es importante señalar que las dos primeras opciones son las prioritarias. La prevención consiste en utilizar menos materiales y menos contaminantes en la fabricación, además de facilitar su posterior reciclaje y, al igual que la reutilización, alargar su vida útil, evitando así la obsolescencia programada.

Este principio va encaminado a potenciar una economía circular, definida por el Ministerio de Transición Ecológica como “aquella en la que se maximizan los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, para que permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo” (Ministerio para la Transición Ecológica, 2019). Así, se aspira a reducir todo lo posible la generación de residuos y

aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se haya podido evitar, recuperando materiales y sustancias que se reincorporan al proceso productivo, de manera segura para el medio ambiente y la salud de las personas.

Para que este modelo económico funcione ha de haber una correcta gestión de los RAEE. Es importante tener en cuenta a los agentes implicados en gestionar estos residuos: Desde el productor de los AEE, pasando por los distribuidores, hasta los consumidores y los gestores autorizados, ya que todos tienen obligaciones con respecto a los RAEE.

Según el artículo 3 apartado h) del RD 110/2015 sobre RAEE, un productor es cualquier persona, física o jurídica que (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a):

1. esté establecida en España y fabrique AEE bajo su propio nombre o su propia marca, o los diseñe o fabrique y comercialice bajo su nombre o marca en el territorio español; o
2. esté establecida en España y revenda bajo su propio nombre o su propia marca AEE fabricados por terceros, sin que pueda considerarse “productor” al vendedor si la marca del productor figura en el aparato; o
3. esté establecida en España y se dedique profesionalmente a la introducción en el mercado español de AEE procedentes de terceros países o de otro Estado miembro; o
4. venda AEE por medios de comunicación a distancia directamente a hogares particulares o a usuarios profesionales en España, y esté establecida en otro Estado miembro o en un tercer país.

En el apartado k) se define distribuidor como “cualquier persona física o jurídica de la cadena de suministro que, con independencia de la técnica de venta utilizada, comercialice un AEE” (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a). Un distribuidor puede ser al mismo tiempo productor si se corresponde con alguna de las situaciones indicadas anteriormente.

2. Objetivo

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es recoger información acerca del estado actual de la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Además se consultará bibliografía científica para conocer las últimas tendencias en las líneas de investigación sobre reciclaje de los materiales procedentes de dichos residuos, centrándonos, principalmente, en sus dos componentes más abundantes, metales y plásticos (61 y 20%, respectivamente) (Figura 1).

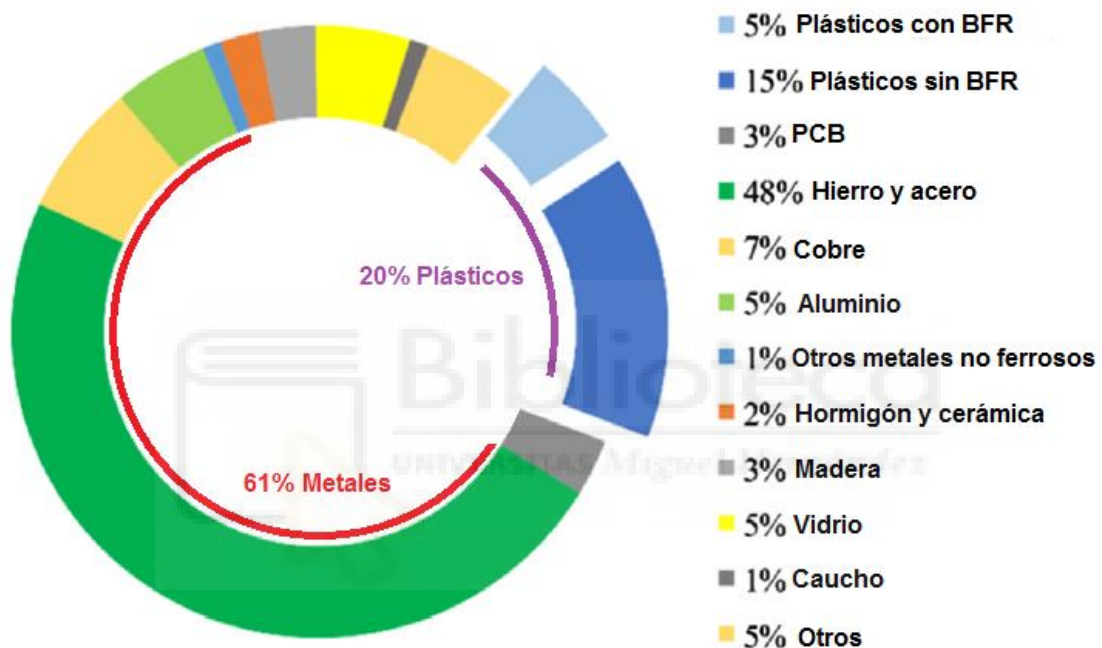


Figura 1: Composición media de los RAEE. Fuente: Adaptada de Ma *et al.*, 2016.

BFR: Retardante de llama bromado. PCB: Placa de circuito impreso.

Por otro lado, también se abordará el tema del movimiento transfronterizo de los RAEE a países en vías de desarrollo, donde se lleva a cabo el tratamiento de estos residuos, muchas veces de manera inadecuada, poniendo en peligro el medio ambiente y la salud de las personas.

3. Antecedentes: Responsabilidad en la producción y gestión de los RAEE

Antes de hablar de la gestión por sí misma es importante dejar claro qué obligaciones tienen todas las personas implicadas en ella. Gracias al desarrollo del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015b), en aplicación de la Directiva Marco de Residuos, se han cubierto los vacíos legales que antes existían, legislando las responsabilidades. Esto facilita que la gestión se haga de la manera más correcta posible y que sea más sencillo para el consumidor dar comienzo al proceso de gestión.

Como ya se ha dicho, todos los agentes por los que pasa un AEE (productores, distribuidores, consumidores y gestores de tratamiento) tienen unas obligaciones especificadas por Ley.

Si el consumidor del AEE usado lo desecha como residuo su responsabilidad concluye con su entrega en las instalaciones o puntos de recogida de las Entidades Locales, de los distribuidores, de los gestores de residuos o en las redes de recogida de los productores de AEE; y podrá exigir acreditación documental de la entrega.

Las redes de recogida de los productores de AEE son redes integradas por el conjunto de puntos, instalaciones, contenedores y sistemas de recogida de RAEE establecidas por los productores de AEE.

Son poseedores iniciales de RAEE los intermediarios entre el consumidor y los gestores de tratamiento, es decir, todos los agentes mencionados anteriormente a quienes el consumidor puede entregar el residuo. Serán responsables de los residuos recogidos y almacenados temporalmente hasta la entrega a los gestores de tratamiento.

Los productores de AEE son responsables de financiar la recogida separada, el transporte y el tratamiento respetuoso con el medio ambiente de los RAEE domésticos y profesionales, así como de informar en esta materia.

3.1. Obligaciones de los productores de AEE

Las obligaciones de los productores de AEE vienen especificadas en el Capítulo II Sección 1ª del RD 110/2015 sobre RAEE (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a). Deberán diseñar y producir sus aparatos de forma que se prolongue en lo posible su vida útil, facilitando entre otras cosas, su reutilización, desmontaje y reparación. Al final de su vida útil se facilitará la preparación para la reutilización y valorización de los RAEE, sus componentes y materiales, de manera que se evite su eliminación.

Las instrucciones de los AEE deberán indicar que antes del depósito de los RAEE en las instalaciones de recogida, deberán extraerse las pilas y ser depositadas separadamente para su adecuada gestión.

Los productores de AEE no impedirán la reutilización de los AEE usados y la preparación para la reutilización de los RAEE mediante características de diseño o procesos de fabricación específicos, salvo que dichas características o procesos presenten grandes ventajas en materia de seguridad o para la protección del medio ambiente.

Los productores marcarán con el símbolo ilustrado en el anexo V del RD sobre RAEE (Figura 2) los AEE que se introduzcan en el mercado con objeto de aumentar al máximo la recogida de los residuos correctamente separados. Este símbolo se incluirá de una forma visible en cada producto, y si por las dimensiones del producto esto no fuera posible entonces dicho símbolo se estampará en el envase, en las instrucciones de uso y en la garantía.



Figura 2: Símbolo que indica la recogida separada de AEE. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015a).

3.2. Obligaciones de los distribuidores

Las obligaciones de éstos se recogen en la Sección 2ª del RD 110/2015 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a). Los distribuidores de AEE que realicen tanto venta presencial como a distancia, difundirán la información relativa a la correcta recogida de RAEE en sus establecimientos y en la recogida efectuada en los hogares de los consumidores. Esta información se incluirá en la página web que dé soporte a la venta a distancia.

Además, la Directiva 2012/19/UE, que se aplica a nivel nacional con el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR), implica activamente a los distribuidores en la recogida de RAEE, obligándoles a la recogida 1x1 y 1x0 (en pequeños aparatos eléctricos). Esto significa que los distribuidores con una superficie mínima de venta de AEE de 400 m² deberán prever la recogida de RAEE muy pequeños en sus puntos de venta de modo gratuito para los usuarios finales y sin obligación de compra de un AEE de tipo equivalente. Independientemente de la superficie del establecimiento, los distribuidores aceptarán, cuando los usuarios adquieran un nuevo AEE doméstico, la entrega de forma gratuita de un RAEE de tipo equivalente.

Los distribuidores podrán organizar la gestión de RAEE recogidos en sus instalaciones a través de los productores de AEE o a través de la contratación directa de los gestores autorizados.



4. Gestión de los RAEE

4.1. Recogida y transporte

Cuando un AEE llega al final de su vida útil y se tiene intención de deshacerse de él, se convierte en un residuo que hay que gestionar correctamente por su potencial impacto sobre el medio. Como consumidores podemos entregar nuestros residuos eléctricos y electrónicos en las instalaciones de recogida de residuos locales (puntos limpios o ecoparques) o, también, en cualquier punto de venta de los distribuidores de este tipo de aparatos.

Tal y como se describe en el artículo 17 del Real Decreto 110/2015 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a): Las pilas extraíbles de los RAEE se extraerán de estos para su recogida separada siempre que no se necesite de un profesional cualificado para ello. En el caso de los RAEE que contengan mercurio, plomo, fósforo o cadmio o sustancias que agoten la capa de ozono (lámparas que contienen mercurio, CRT (tubos de rayos catódicos) o pantallas que no sean LED y aparatos con gases refrigerantes), su recogida y transporte cumplirá con los requisitos establecidos en el apartado B del Anexo VII:

- Se tomarán todas las medidas para evitar la rotura de los aparatos, y la consecuente liberación de las sustancias peligrosas que contienen, con la protección de los equipos con materiales que absorban impactos o sistemas de sujeción que eviten que se muevan durante el traslado.
- No está permitido el depósito en contenedores de grandes dimensiones que provoquen el apilado de estos RAEE.
- Los contenedores de las lámparas estarán tapados para evitar la salida de vapores de mercurio en caso de rotura accidental.
- Las lámparas compactas (fluorescentes) y las rectas (LED y de bajo consumo) se recogerán por separado (Figura 3).
- No se permitirán operaciones de volcado como método de vaciado del contenido del vehículo de transporte.



Figura 3: Contenedores para recogida de bombillas. Fuente: Ambilamp (2019).

Durante el transporte y almacenamiento de RAEE no se realizarán aperturas o desmontajes de los residuos. Estas operaciones se realizarán en los centros de preparación para la reutilización y en las instalaciones autorizadas de tratamiento específico. Así, los residuos se trasladan a plantas especializadas de gestores autorizados. En ellas se extraen los componentes contaminantes y los que se pueden aprovechar. Los residuos electrónicos contienen materiales como plásticos, metales y vidrio, que se pueden recuperar sistemáticamente, lo que convierte a este flujo de residuos en una fuente de materias primas (Ilankoon *et al.*, 2018), muchas de las cuales son escasas, como pueden ser los metales preciosos. Se pueden obtener hasta 60 elementos de los dispositivos electrónicos (Luhar y Luhar, 2019).

Sea cual sea el destino final de los residuos, tanto si van a ser incinerados como depositados en un vertedero, es importante eliminar previamente algunos componentes que son potencialmente peligrosos: Metales pesados; plásticos que al ser incinerados pueden emitir dioxinas y furanos, los cuales son carcinógenos (Luhar y Luhar, 2019); retardantes de llama bromados, aceites, hidrocarburos aromáticos policíclicos, entre otros.

En el Anexo XIII del Real Decreto 110/2015 sobre RAEE se especifican los componentes, sustancias y mezclas que se deben retirar (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015a):

- Condensadores que contengan policlorobifenilos.
- Componentes o RAEE que contengan mercurio.

- Pilas y acumuladores.
- Tarjetas de circuitos impresos para teléfonos móviles, en general, y otros dispositivos si la superficie de la misma tiene más de 10 cm².
- Cartuchos de tóner, de líquido y pasta, así como tóner de color.
- Plásticos que contengan materiales pirorretardantes bromados.
- Residuos de amianto y componentes que contengan amianto.
- Tubos de rayos catódicos.
- CFCs y demás gases que agotan la capa de ozono, hidrocarburos y amoníaco.
- Lámparas de descarga de gas.
- Cables eléctricos exteriores.
- Pantallas de cristal líquido de más de 100 cm².
- Componentes que contengan sustancias radiactivas, excepto si se encuentran por debajo de los umbrales establecidos.
- Aceites.

Todos estos componentes se envían a que sean tratados por gestores específicos mediante las técnicas adecuadas, por tanto, el destino de cada uno de ellos será distinto según el tratamiento requerido.

El proceso de extracción de materiales es relativamente sencillo en el caso de los RAEE, porque la mayor parte de sus componentes se puede separar por medios mecánicos y se puede recuperar hasta un 70 % de los mismos o incluso, en el caso de los teléfonos móviles, hasta un 90 % (Fundación ECO RAEE's, 2019).

4.2. Pretratamiento

El pretratamiento mecánico consiste en tres principales pasos: Desmantelamiento, reducción del tamaño y separación física. En el desmantelamiento, que puede hacerse manual o automáticamente, se separan selectivamente diferentes componentes como metales, plásticos, baterías, cables, cartuchos de tinta y tóner, etc. Es lo que se conoce como descontaminación previa y se utilizan herramientas como martillos y destornilladores (Ashiq *et al.*, 2019). La reducción de tamaño se lleva a cabo mediante la trituración de los RAEE y el tamaño de las partículas resultantes depende de las tecnologías de reciclaje que se vayan a emplear después (Ding *et al.*, 2019). Los aparatos se rompen en un tambor de rotación lenta o en una trituradora de flujo cruzado. La trituración resulta en la separación de los metales de los plásticos y también de los conectores y tornillos (Chatterjee y Abraham, 2017). Por último, la separación física consiste en clasificar los

componentes a través de diferentes mecanismos como los separadores magnéticos, los clasificadores ópticos, separador de corrientes de Foucault, etc. (Sahajwalla y Gaikwad, 2018). Con la separación física eliminamos el hierro y el aluminio (Ilankoon *et al.*, 2018), por lo que estos dos metales se recuperan fácilmente de los RAEE.

4.3. Reciclaje

Después del pretratamiento mecánico es el momento de pasar al reciclaje, que se realiza mediante el tratamiento de los diferentes materiales clasificados. El reciclaje de los RAEE tiene numerosas ventajas:

- Es una fuente de recursos limitados (reciclar ordenadores de mesa y portátiles ahorra respectivamente el 80% y el 87% de recursos naturales (Kumar y Holuszko, 2016)).
- Supone un ahorro energético en comparación con la fabricación de nuevos materiales (la energía producida por el reciclaje de un millón de ordenadores portátiles corresponde al uso de electricidad de 3.657 hogares al año (Chatterjee y Abraham, 2017)).
- Evita la contaminación del aire, el agua y el suelo por las emisiones que resultarían de una incineración y por la lixiviación de los componentes.
- Disminuye los riesgos para la salud que puede llegar a tener el tratamiento incorrecto de estos residuos.
- Genera creación de empleo en las empresas de reciclaje.

Es importante que el reciclaje sea responsable, es decir, que vele por la seguridad de los empleados y que funcione con respeto al medio ambiente. En los lugares donde el reciclaje de RAEE es inadecuado se ha detectado una contaminación atmosférica debida a las prácticas de quema y desmantelamiento, que son llevadas a cabo sin el debido control (Awasthi *et al.*, 2018).

El procesamiento final de los materiales de salida es una tarea que, a menudo, se asigna a empresas de tratamiento especializado. Las baterías se llevan a instalaciones de reciclaje de baterías; las placas de circuito impreso recolectadas del desmantelamiento se envían a instalaciones especializadas en tratamiento metalúrgico; los plásticos se vuelven a granular, después de la clasificación y la eliminación de componentes peligrosos en las instalaciones de tratamiento de residuos peligrosos, y los reciclables se llevan a reciclar; la chatarra de acero termina en las fábricas de acero para volver a fundirse; los materiales de salida de los aparatos pequeños, como los teléfonos móviles, representan un alto valor, especialmente de materiales no ferrosos y placas de circuito impreso (Salhofer, 2017).

Los procesos aplicados varían según la categoría del producto:

- Equipos de enfriamiento y congelación (como por ejemplo, frigoríficos y congeladores): Estos aparatos contienen líquidos refrigerantes, clasificados como sustancias que agotan la capa de ozono (ODS), que son extraídos en atmósferas controladas y se procesan en instalaciones dedicadas a eliminar los CFC. También se eliminan y, posteriormente, se tratan los aceites y las espumas aislantes. Los metales son recuperados y los plásticos pueden ser usados para fabricar nuevos productos (European Recycling Platform, 2019).
- Los equipos de iluminación, es decir, las lámparas, se tratan mediante trituración o corte en maquinaria encapsulada, para evitar la emisión de vapor de mercurio (Salhofer, 2017). El polvo de fósforo y el mercurio recuperado pueden ser reutilizados en la fabricación de lámparas nuevas; el vidrio triturado se puede utilizar en el recubrimiento de hornos o, si es suficientemente puro, en la fabricación de nuevas lámparas; las tapas de aluminio van a fundición y otros metales se reciclan también (European Recycling Platform, 2019).
- Para las pantallas se utilizan diferentes tecnologías según si son CRT (Tubos de Rayos Catódicos) o LCD (Pantallas de Cristal Líquido):
 - Los monitores y televisores CRT han desaparecido de las tiendas pero el número que ingresa en el flujo de residuos aún sigue siendo elevado en Europa (actualmente se recolectan entre 50.000 y 150.000 toneladas de CRT al año, lo que representa el 80% del total de RAEE generados). El reemplazo de los antiguos CRT de televisores y ordenadores por LCD ha generado un gran volumen de residuos de CRT obsoletos en los países desarrollados. El problema de los CRT es el vidrio con plomo que contienen. El plomo se agrega a la composición del vidrio para evitar el escape de radiación del tubo, ya que tiene la capacidad de absorber radiación ionizante. También se le añade bario por la misma razón. Hasta hace unos años, este vidrio se reciclaba para fabricar nuevas pantallas CRT pero en 2011 las ventas de esta tecnología cayeron hasta cerca de cero piezas. Por eso ya casi no quedan fabricantes de CRT que conviertan el vidrio de las pantallas en nuevos televisores. Así, se ha creado un sistema de circuito abierto que recicla el vidrio con plomo para hacer otros productos que pueden utilizar este tipo de vidrio como los azulejos, los ladrillos de arcilla, pilas, aislantes térmicos de espuma de vidrio y joyería, entre otros. Muchos estudios proponen el reciclaje de esta clase de vidrio en la industria de la cerámica. Además, los CRT también se utilizan en cajeros automáticos, máquinas de videojuegos, cámaras de vídeo, osciloscopios y pantallas de radar. Además del vidrio se pueden recuperar la placa base o placa de circuito impreso y metales (Singh *et al.*, 2016).

- Para pantallas LCD o planas se utilizan otras tecnologías porque contienen tubos fluorescentes con mercurio (Salhofer, 2017).

4.3.1. Reciclaje de plásticos

Uno de los constituyentes más significativos de los RAEE es el plástico, que representa el 20% de los mismos. El reciclaje de los plásticos que encontramos en los residuos electrónicos es un poco diferente al resto debido a la presencia de los retardantes de llama bromados (BFR) (Sahajwalla y Gaikwad, 2018). Se consideran los agentes retardantes más efectivos en la actualidad con una producción global de hasta 200.000 t/año. Son persistentes y bioacumulables, lo que resulta en una contaminación de la cadena alimentaria que produce efectos adversos en la salud humana (Ma *et al.*, 2016).

El procesamiento de plásticos que contienen BFR se rige por el Convenio de Estocolmo donde se establece que su reciclaje no debe conducir a la recuperación de los BFR para su reutilización. Por tanto, se separan los plásticos con BFR del resto y se intenta extraer el BFR para transformar esos plásticos en productos útiles (Sahajwalla y Gaikwad, 2018).

Los métodos de clasificación que se utilizan son fáciles y rápidos: Separación por densidad (sistema de flotación), en seco (separador de aire), o por métodos triboeléctricos. Con ellos separamos los plásticos comunes de los que contengan BFR. Adicionalmente existen tecnologías como los infrarrojos o rayos X que permiten identificar el polímero y el retardante de llama utilizado (Permanyer, 2013).

Para que los plásticos con BFR puedan tratarse por pirólisis se deben tomar medidas de deshalogenación, como la hidrobromación catalítica, que implica una conversión a baja temperatura del componente halogenado en inorgánico, dejando el compuesto en una forma reciclable relativamente no tóxica (Ma *et al.*, 2016).

Se han desarrollado procesos de extracción del BFR de los plásticos: Mediante tratamiento químico o con una combinación de disolventes y la posterior precipitación de los polímeros de la solución. El polímero libre de BFR precipitado se procesa mediante extrusión (Sahajwalla y Gaikwad, 2018). La extrusión es un proceso de compresión en el que se fuerza al material a fluir a través de un orificio a fin de obtener un producto largo y continuo. El proceso comienza con la fusión del polímero. Se utiliza mucho para la producción en masa de artículos como tuberías, mangueras, recubrimientos para alambres y cables eléctricos... Los plásticos también se pueden someter a moldeo por inyección. Al igual que la extrusión, el moldeo por inyección comienza con la fundición

del material hasta que alcanza un estado muy plástico y se le fuerza a que fluya a alta presión hacia la cavidad de un molde donde se solidifica (Groover, 2007). El uso de una técnica u otra depende del producto deseado.

Una tecnología muy interesante, que puede aplicarse al tratamiento de los residuos de plásticos, es la conocida como tecnología KDV, que consiste en una despolimerización catalítica de baja temperatura (inferior a 250 °C) que puede procesar todo tipo de plásticos, sin la formación de dioxinas, y convertirlos en combustible diésel para energía (Sahajwalla y Gaikwad, 2018). Esta tecnología ya está implantada en muchos países, incluyendo España. Por ejemplo, en 2010 se inició un proyecto LIFE, financiado por la Unión Europea, en la empresa GRIÑÓ ECOLOGIC, en Constantí (Tarragona), donde se desarrolló una instalación capaz de tratar 40.000 toneladas de residuos al año para convertirlos en diésel (Diesel R, 2019). Para la producción de diésel se pueden utilizar plásticos, aceites, residuos agrícolas... Sirve cualquier residuo pero no materiales como piedras, metales, cerámicas y vidrios (ECO-TRANSFAIR, 2019). En la Figura 4 se representa de manera esquematizada el procedimiento KDV.



Figura 4: Proceso de transformación de la basura en diésel. Fuente: ECO-TRANSFAIR (2019).

4.3.2. Reciclaje de metales

Los metales preciosos se utilizan en diversos campos, sobre todo en la industria electrónica, que junto con los catalizadores consume más del 90 % de los metales preciosos en la industria. Esto se debe a sus propiedades físicas y químicas, como la actividad catalítica, la buena conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión (Ding *et al.*, 2019).

En la industria electrónica, el oro y la plata se usan como contactos, cables de conexión e interruptores y el paladio se usa en unidades de disco duro de ordenadores. En 2015 la demanda mundial de oro, plata y paladio en el campo de la electrónica fue de 254, 12.816 y 40,18 toneladas, respectivamente (Ding *et al.*, 2019). En la Tabla 1 podemos observar el contenido de estos tres metales en algunos de los AEE más comunes.

Tabla 1: Contenido de metales preciosos por unidad de AEE (mg/unidad). Fuente: Ding *et al.*, 2019.

Metal precioso	Teléfono móvil		Ordenador		Pantalla plana o monitor de TV		Portátil	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Ag	232-319	261	1348-11408	6378	450-575	515	249-437	343
Au	24,1-29	26,1	-	92,7	110-200	161	104,5-219,8	160,8
Pd	8,7-14,5	11,6	-	39,9	40-44	42	-	40,2

De todos los componentes que constituyen los residuos electrónicos, la recuperación más rentable, desde un punto de vista económico, es la de los metales, principalmente cobre y oro por su alto valor en el mercado (Ilankoon *et al.*, 2018). Por eso el contenido de metales preciosos es crítico para la rentabilidad de los procesos de reciclaje, ya que hasta el 90 % del valor intrínseco de los residuos electrónicos reside en su contenido en oro y paladio. A partir de un millón de teléfonos móviles se podrían recuperar 24 kg de oro, 250 kg de plata, 9 kg de paladio y 9000 kg de cobre. El contenido total global de oro en los RAEE se estima que fue de 300 toneladas en 2014, valoradas en 10,4 billones de euros (Ilankoon *et al.*, 2018).

La recuperación de metales a partir de desechos electrónicos, en lugar de extraerlos de su fuente principal puede ahorrar el 41 % de los costos energéticos de la minería y reducir el consumo de agua en 391,5 m³/kg de metal (Pathak y Srivastava, 2019).

Hay que tener en cuenta que la tasa de recuperación de un metal particular, a partir de los residuos, es inversamente proporcional a la pureza del metal obtenido (Chatterjee y Abraham, 2017) y que entre el 10 y 35 %, aproximadamente, de los metales valiosos se pierden durante el proceso mecánico (Ding *et al.*, 2019).

Los metales pueden llegar a ser altamente contaminantes en el medio y causar daños en la salud del ser humano y de otros seres vivos. Por tanto, es preferible reciclarlos y evitar que sean llevados a ser depositados en vertederos o sean incinerados ya que, además de suponer pérdidas económicas, también se produce contaminación. La cantidad de cadmio presente en la batería de un teléfono móvil tiene el potencial de contaminar 600 m³ de agua (Kumar y Holuszko, 2016).

Estamos hablando de elementos muy escasos en el planeta, por lo que es importante tratar de recuperarlos en la medida de lo posible. Además, reciclar los metales de la basura electrónica sale hasta trece veces más barato que extraerlos de las minas (Baldé *et al.*, 2017). En las dos últimas décadas se han desarrollado diferentes tratamientos para extraer los metales de los RAEE. Entre ellos podemos destacar la pirometalurgia, la hidrometalurgia y la biometalurgia.

Pirometalurgia

La pirometalurgia es un método de extracción de metales que emplea altas temperaturas para quemar los materiales orgánicos, fundir y reducir el metal (Haccuria *et al.*, 2017). El uso de altas temperaturas da lugar a la formación y emisión de dioxinas, aunque esto puede controlarse trabajando bajo las condiciones de operación adecuadas (Ilankoon *et al.*, 2018). Los procesos pirometalúrgicos incluyen fundición en hornos y fusión alcalina.

La fundición en horno concentra los metales preciosos en ampollas de cobre o lingotes de plomo que, posteriormente, se procesan mediante lixiviación ácida con ácido sulfúrico. Este proceso genera grandes cantidades de gases peligrosos, aguas residuales y otros residuos, pero reduce el impacto ambiental derivado de grandes cantidades de desechos electrónicos (Ding *et al.*, 2019).

La fusión alcalina sirve para eliminar compuestos orgánicos con temperaturas por debajo de los 400 °C, lo que puede evitar la formación de dioxinas y furanos, usando un álcali fundido que reacciona con el plomo, el estaño y otros metales y forma sal fundida soluble. Las cadenas de hidrocarburos pueden romperse por compuestos alcalinos mientras que el cobre y los metales preciosos permanecen en el residuo sólido. Luego estos últimos se separan y recuperan por simple lixiviación (Ding *et al.*, 2019). Los baños ácidos son usados comúnmente para lixiviar oro (Ilankoon *et al.*, 2018).

La recuperación del metal de las soluciones lixiviadas se hace a menudo por cementación. La cementación es la precipitación de un metal desde una solución acuosa por efecto de otro metal presente en la solución (Elías *et al.*, 2009). Se suelen utilizar limaduras de hierro, que producen una matriz impura de cobre. Se introduce el hierro en el líquido, éste se calienta y el cobre de la solución se deposita sobre la superficie del hierro. Cuando se ha cementado lo suficiente, el hierro rico en cobre se lleva a fundición para recuperar el cobre por vía pirometalúrgica (McCann, 2001). Igualmente se utiliza la cementación con zinc para refinar el oro que se ha procesado separadamente.

El lixiviado también se puede someter a filtración o a electro-obtención (Ilankoon et al., 2018), proceso electrometalúrgico que utiliza una corriente eléctrica de baja intensidad que atrae los metales: Se disponen alternamente un ánodo (placa de plomo o de acero inoxidable) y cátodos (placa de acero inoxidable) dentro de la solución electrolítica previamente concentrada. Las placas metálicas están conectadas formando un circuito en que la corriente entra por los ánodos (polo positivo), viaja a través del electrolito y sale por los cátodos. La corriente de baja intensidad que se aplica provoca que los cationes de cobre (Cu^{2+}) sean atraídos hacia el polo negativo y se depositen sobre éste en forma metálica, con una pureza del 99,99% de cobre. (Ministerio de Minería del Gobierno de Chile, 2016).

Hidrometalurgia

La hidrometalurgia consiste en la extracción de un elemento metálico desde una solución líquida que lo contiene, por tanto, se basa en el principio de lixiviación. Así, las rutas pirometalúrgicas, como hemos visto anteriormente, emplean multitud de procesos hidrometalúrgicos (Ilankoon et al., 2018).

En comparación con la pirometalurgia, el método hidrometalúrgico tiene un costo relativamente bajo por funcionar en condiciones de baja temperatura. De hecho, el consumo principal de energía de las operaciones hidrometalúrgicas se asocia con la trituración que se suele hacer al principio del proceso. Asimismo, los procesos hidrometalúrgicos son tecnológicamente más simples y no emiten gases peligrosos. No obstante, las rutas hidrometalúrgicas producen una gran cantidad de líquido ácido residual que debe ser depurado (Ilankoon et al., 2018). Además, se requiere equipo especial hecho de acero inoxidable o caucho para el proceso de reacción química (Gu et al., 2019).

La trituración inicial en el proceso hidrometalúrgico (Haccuria et al., 2017) se realiza ya que se requieren partículas finas para conseguir una alta tasa de lixiviación de metales valiosos. Además, la concentración de metales preciosos en la fracción metálica aumenta después del pretratamiento mecánico (Ding et al., 2019).

Los procesos de hidrometalurgia tradicionales incluyen lixiviación con cianuro y lixiviación con agua regia. El oro y la plata pueden ser lixiviados en una solución de cianuro donde el ion cianuro es el ingrediente activo que disuelve los metales preciosos por complejación. Es el proceso más efectivo para la extracción de oro pero es muy importante que se lleve a cabo manteniendo un pH alcalino en todo el proceso, ya que si fuera ácido se formaría cianuro de hidrógeno, un gas tóxico (Pathak y Srivastava, 2019). Por otro lado, el agua regia, que es una mezcla de los ácidos clorhídrico y

nítrico caracterizada por su fuerte poder oxidante (Caselles *et al.*, 2004), se utiliza para lixiviar plata y paladio pero especialmente oro, ya que es una de las pocas mezclas capaces de disolver este elemento. La cloración es otro método viable para la recuperación de oro (Ding *et al.*, 2019).

El cobre es uno de los metales más importantes en los RAEE, ya que es el principal componente de la placa de circuito impreso (PCB), y es comúnmente encontrado en residuos relativamente limpios como, por ejemplo, los teléfonos móviles. La recuperación efectiva de cobre, mediante un proceso hidrometalúrgico, sigue siendo un desafío debido al alto contenido en otros metales. Sin embargo, recientemente se ha desarrollado un método con el que se puede extraer este metal de manera selectiva lixiviando a base de amoníaco (Haccuria *et al.*, 2017).

La PCB (Figura 5) es una placa lisa de material aislante, por ejemplo plástico o fibra de vidrio (en color verde), sobre la que se montan componentes electrónicos que se conectan eléctricamente mediante pistas de metal conductor, principalmente de cobre, impresas sobre la superficie de la placa (Hernández y Ricardo, 2006).

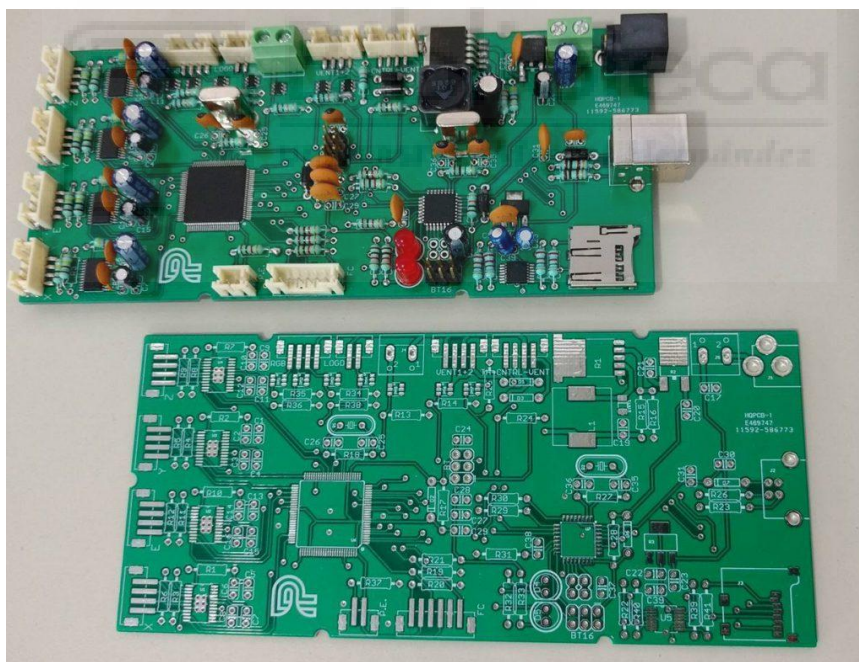


Figura 5: Placa de circuito impreso. Fuente: PCB central (2019).

También se puede extraer cobre de la placa de circuito impreso sumergiéndola en ácido sulfúrico concentrado durante unas doce horas. Otra opción es emplear soluciones potentes de ácido clorhídrico o nítrico. Después de empapar los circuitos electrónicos, la solución se hierve y precipita.

Finalmente se extrae sulfato de cobre. A este proceso se le llama método del baño ácido y también se utiliza para lixiviar oro (Luhar y Luhar, 2019).

Biometalurgia

El método biológico para la extracción de metales forma parte de la hidrometalurgia y se conoce como biolixiviación. La diferencia con el resto de métodos hidrometalúrgicos es que no se utilizan muchos reactivos ya que, en su lugar, se usan agentes biológicos, como hongos o bacterias, que pueden extraer metales además de degradar los contaminantes orgánicos persistentes que existen en los RAEE, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos o los bifenilos policlorados. Se suelen utilizar bacterias productoras de cianuro y hongos productores de ácidos orgánicos (Gu *et al.*, 2019).

Los hongos comúnmente utilizados para la eliminación de RAEE son *Aspergillus niger* y pueden producir ácido glucónico y ácido cítrico que actúan como agentes de lixiviación. Tanto el oro como la plata se pueden extraer mediante este proceso. Para obtener estos ácidos se prepara un medio de cultivo al que se agregan las esporas obtenidas de la mezcla de agua desionizada y *A. niger* (Gu *et al.*, 2019).

En el caso de las bacterias la más utilizada es *Desulfovibrio desulfuricans* para extraer paladio. Este microorganismo puede reaccionar con Au^{3+} en la solución para formar precipitado de oro. Luego se obtiene el precipitado mediante filtración. De la misma manera reacciona con Pd^{2+} y se obtiene paladio después de la filtración (Gu *et al.*, 2019).

El proceso hidrometalúrgico genera residuos en forma de lodos con altas concentraciones de metales. Estos metales se pueden extraer de los fangos empleando microorganismos. Uno de los más utilizados es la bacteria *A. Ferrooxidans* según las descripciones de la mayoría de los estudios (Gu *et al.*, 2019).

Este método tiene la ventaja de ser más respetuoso con el medio ambiente y también algo más barato, ya que no se utilizan apenas reactivos químicos y, como consecuencia, los residuos que resultan del proceso no son contaminantes.

4.4. Otras vías de tratamiento

Los componentes que no han sido reciclados (madera, materiales de aislamiento, materiales peligrosos) se envían a incineración, vertederos o tratamiento de residuos peligrosos (Salhofer, 2017).

Además, como sólo se recicla el 20 % de los RAEE generados, hay una fracción relevante que escapa del sistema de gestión y es muy probable que sea desechado y tratado con los residuos sólidos urbanos (Fiore *et al.*, 2019), los cuales terminan en vertederos o plantas incineradoras.

4.4.1. Vertedero

Los vertederos constituyen una de las prácticas más comúnmente utilizadas para la disposición global de residuos electrónicos (Kumar y Holuszko, 2016). Con frecuencia se considera el medio más económico para eliminar los residuos, en particular en Estados Unidos, donde disponen de grandes espacios abiertos. No obstante, existen una serie de inconvenientes con los que hay que llevar especial cuidado. Entre ellos destacamos la generación de lixiviados. Los más peligrosos son de cadmio, mercurio y plomo (Luhar y Luhar, 2019). Aunque el vertedero disponga de revestimiento, éste tiene una vida útil que, cuando finaliza, puede abrir paso a lixiviados que se filtran en las aguas subterráneas, provocando la contaminación de las mismas y del propio suelo.

Las características de impermeabilización que debe tener un vertedero se describen en el Real Decreto 1481/2001 (Ministerio de Medio Ambiente, 2002). Como se trata de residuos peligrosos, la barrera geológica natural sobre la que se depositan los residuos, y que impedirá la filtración de lixiviados, debe tener como mínimo una conductividad hidráulica equivalente al efecto combinado de una capa de 5 m de espesor de un material con una permeabilidad de 10^{-9} m/s. En caso de que no se cumpla esta condición, se pone una barrera geológica artificial, sobre la que se colocará un geosintético de refuerzo con un geotextil protector encima, seguido de una capa de drenaje, de medio metro como mínimo, para la recogida de lixiviados y, finalmente, la capa de filtro sobre la que se depositarán directamente los residuos.

Los lixiviados que son recogidos en la capa de drenaje se conducen por tuberías hasta una balsa impermeabilizada y, más tarde, serán tratados en una estación depuradora, normalmente específica para ellos.

La diferencia entre la impermeabilización para residuos peligrosos y no peligrosos reside en la barrera geológica natural, ya que en el caso de los residuos no peligrosos, su conductividad

hidráulica debe ser equivalente al efecto combinado de una capa de 1 m de espesor de un material con una permeabilidad de 10^{-9} m/s. Por tanto, si depositamos residuos de aparatos eléctricos y electrónicos junto con los residuos sólidos urbanos (RSU) y éstos van a parar a vertederos, es muy probable que dicha barrera no tenga las características adecuadas para proteger al suelo, ya que no se espera que los RSU sean peligrosos.

Otro problema es la aparición de vectores, como los mosquitos, en los alrededores del vertedero. Esto puede disminuir con la cobertura diaria de las capas superficiales (Luhar y Luhar, 2019) que, además, reduce el impacto visual.

En un estudio publicado en 2019 por Chen *et al.* se propone llevar a vertederos los RAEE cuyo tratamiento todavía se está investigando, hasta que se desarrollen las tecnologías adecuadas capaces de tratarlos. Mientras tanto se plantea la posibilidad de que el lugar donde se entierren estos desechos se convierta en un punto de información acerca de los mismos. También se pueden utilizar como espacios verdes urbanos para brindar servicios recreativos. Claro que para que esto sea posible, las condiciones de aislamiento del vertedero tienen que ser mucho más cuidadosas, debido a la presencia humana, lo que supone un alto coste de construcción y un mayor mantenimiento.

4.4.2. Incineración

La incineración es un proceso de combustión absoluto y organizado. Es un método de eliminación de desechos mediante una técnica controlada que abarca la pirólisis, proceso que calienta las sustancias mientras hay una falta de oxígeno. Los residuos se convierten en gases, carbón y aceites (Luhar y Luhar, 2019).

Se puede considerar beneficiosa porque supone la disminución del volumen de los residuos y, además, una generación de energía que se puede utilizar. Algunos elementos orgánicos que son una amenaza para los entornos pueden convertirse en menos peligrosos a través de este proceso.

Pero también tiene inconvenientes como la emisión de gases nocivos (Luhar y Luhar, 2019). En el caso de los RAEE es imprescindible que se sometan a un pretratamiento antes de llevarlos a incinerar. La eliminación del plástico y de la placa de circuito impreso puede reducir o eliminar la generación de dioxinas y furanos (Ding *et al.*, 2019). Si se llevan a incinerar sin una previa descontaminación, estos dos compuestos se emitirán debido a la presencia de los retardantes de llama bromados de los plásticos y de otros componentes como la PCB, además de emitirse metales pesados. Tanto las dioxinas y los furanos como los metales tienen efectos nocivos sobre la salud de los seres humanos y provocan la contaminación del medio ambiente.

Estas dos últimas opciones (vertedero e incineración) deben elegirse como último recurso, ya que si se desechan residuos en vertederos o se incineran sin ningún control estaremos perdiendo una gran cantidad de recursos.



5. Movimiento transfronterizo de residuos electrónicos

Los desechos electrónicos no necesariamente se procesan o reciclan en los mismos países donde se generan. El movimiento transfronterizo de RAEE ocurría más bien en el pasado y los desechos recolectados en países desarrollados tendían a exportarse a regiones asiáticas como China o India, por ejemplo. Sin embargo, aunque existen normas y leyes que regulan la exportación de residuos peligrosos, actualmente se sigue haciendo de manera ilegal y se han encontrado rutas transfronterizas alternativas a países del oeste de África (Ilankoon *et al.*, 2018).

Se estima que países asiáticos y africanos son los destinos finales de RAEE para el reciclaje de, aproximadamente, el 75-80% de la producción global y el 50% de la de Estados Unidos (Esmailian *et al.*, 2018). Una gran comunidad de procesamiento de desechos electrónicos vive en Guiyu (China), que con frecuencia se conoce como la capital mundial de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. La disposición de estos residuos en tan grandes cantidades en estos países, ocupa superficies que podrían ser destinadas a otros usos, además de contaminar el suelo en el que se terminan depositando o que se encuentra cerca de los lugares de tratamiento. En países con base en la agricultura como la India, la tierra fértil ya no puede ser más accesible para el vertido de residuos electrónicos (Luhar y Luhar, 2019).

Una de las razones por las que ocurre esto es que muchas veces el coste del tratamiento y la extracción de metales excede el valor potencial generado por los mismos si se realiza en los países de origen. Dado que los costes laborales son menores en los países en desarrollo, los impuestos generalmente se evaden y la disposición está mal controlada porque sus regulaciones ambientales son menos estrictas, las exportaciones a estos lugares son económicamente favorables (Ilankoon *et al.*, 2018).

A menudo se ha usado el argumento de que el movimiento transfronterizo es una forma de salvar la brecha digital existente entre países desarrollados y en vías de desarrollo. Pero se ha visto que esto no tiene ningún sentido porque el 75% de los artículos exportados son puramente materiales de desecho que terminan en depósitos de tierra causando impactos en el medio y en la salud de las personas (Ilankoon *et al.*, 2018). Los países receptores no disponen de las tecnologías adecuadas para tratar este tipo de residuos, por lo que el tratamiento no se hace de la manera adecuada y se produce contaminación.

Una vez que los residuos electrónicos llegan a los países en desarrollo el consumidor prefiere reutilizarlos en la medida de lo posible, aunque sea sólo algunos de sus componentes, o los trata en un taller de pequeño nivel y en un entorno abierto abandonado (Awasthi *et al.*, 2018). Los

trabajadores de reciclaje de desechos electrónicos y las personas que viven cerca del área de eliminación, corren un riesgo evidente de verse perjudicados por las toxinas presentes en los residuos. Se liberan metales pesados y compuestos químicos tóxicos al medio ambiente. Esto afecta no sólo al suelo, como hemos comentado antes, y al agua, sino también a las plantas y animales en gran medida, además de causar daños sobre la salud humana (Chatterjee y Abraham, 2017).

El tratamiento inapropiado de los RAEE se refiere al reciclaje informal que normalmente se practica usando métodos que no son seguros. Se ha detectado una alta concentración de cobre, antimonio, bismuto, cadmio y plata en las muestras de cabello y sangre de los trabajadores, causada por el reciclaje inadecuado (Pathak y Srivastava, 2019).

Las técnicas de eliminación respetuosas con el medio ambiente son caras y no están comunicadas a los restauradores locales en la India y demás países en desarrollo. La eliminación inadecuada de cenizas que contienen altas cantidades de policarbonos y metales pesados, directamente al río Ramganga (un afluente del Ganga) ha causado la contaminación del agua. Asimismo, los análisis revelan que las concentraciones de metales pesados en los suelos cerca de las áreas de reciclaje están por encima de los niveles aceptados. Las verduras y frutas cultivadas en estos suelos contaminados o regadas con agua contaminada pueden absorber fácilmente los contaminantes. Cuando se ingieren esos alimentos, los contaminantes ingresan en el cuerpo humano a través de una ruta indirecta, pero con los mismos efectos que la contaminación directa (Pathak y Srivastava, 2019).

Para evitar todos estos efectos negativos, los países han ido desarrollando legislación para regular el movimiento transfronterizo además de firmar acuerdos comprometiéndose a evitarlo, como es el caso del Convenio de Basilea.

Algunos ejemplos de políticas nacionales sobre residuos electrónicos (Pathak y Srivastava, 2019):

- Japón ya ha prohibido la exportación sin el consentimiento del país importador.
- Vietnam prohibió en 2005 la entrada de residuos peligrosos desde el extranjero.
- Pakistán no permite la importación de refrigeradores y aires acondicionados y los CRT pueden ser importados sólo con ordenadores usados desde 2009.
- Estados Unidos prohibió la exportación de RAEE en 2011 aunque no se trata de una política consistente y tampoco ha ratificado el Convenio de Basilea.
- Nigeria prohibió la importación de desechos electrónicos en 2011.

5.1. Convenio de Basilea

Se trata de un convenio que regula el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos. Los países que lo firmaron en 1972 pueden ejercer su derecho a prohibir la importación de desechos peligrosos. Los firmantes prohíben, o no permiten, la exportación de estos desechos a los que hayan prohibido la importación de los mismos. Si se trata de una exportación a un Estado que no haya prohibido la importación, sólo podrá hacerse si da su consentimiento por escrito (Secretariado del Convenio de Basilea, 2014).

Además, se comprometen a reducir la cantidad de residuos peligrosos que generan, “establecer instalaciones adecuadas de eliminación para el manejo ambientalmente racional de los desechos peligrosos y otros desechos” (Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 1972) y disminuir el movimiento transfronterizo, no permitiendo la exportación a países que hayan prohibido la entrada de residuos peligrosos desde el extranjero.

Tal y como se expone en el apartado 9 del artículo 4 del Convenio de Basilea, sólo se permitirá el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos si:

- a) el Estado de exportación no dispone de la capacidad técnica ni de los servicios requeridos o de los lugares de eliminación adecuados a fin de eliminar los desechos de que se trate de manera ambientalmente racional y eficiente; o
- b) los desechos de que se trate son necesarios como materias primas para las industrias de reciclado o recuperación en el Estado de importación; o
- c) el movimiento transfronterizo de que se trate se efectúa de conformidad con otros criterios que puedan decidir las Partes firmantes, a condición de que esos criterios no contradigan los objetivos de este Convenio.

El problema es que a los países importadores de residuos peligrosos no se les puede exigir que el tratamiento de los mismos se haga de manera respetuosa con el medio ambiente y con la salud de los trabajadores, tal y como exige el Convenio que se haga en los Estados firmantes. Por tanto, aunque una exportación se haga de manera legal, no siempre supondrá que el tratamiento de lo exportado vaya a ser el correcto.

Actualmente, 175 países han ratificado dicho convenio y tres países (EEUU, Afganistán y Haití) han firmado pero no ratificado (Permanyer, 2013).

6. Conclusiones

A partir de toda la bibliografía revisada podemos concluir que:

- A pesar de la baja tasa de reciclaje existen numerosas tecnologías capaces de recuperar los diferentes materiales que constituyen los RAEE. Estas tecnologías irán en aumento con el desarrollo de otras nuevas y con el perfeccionamiento de las actuales para mejorar su eficiencia.
- Los metales representan más de la mitad de la composición de los desechos electrónicos. Se trata de elementos muy escasos en el planeta y, por tanto, su precio es elevado. Por eso es importante extraerlos de los residuos para volver a utilizarlos. Así, ahorramos recursos naturales y la energía y el agua que se requieren para conseguirlos de sus yacimientos naturales.
- Las tecnologías utilizadas para extraer los metales se incluyen dentro de los procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos o biometalúrgicos según se utilice calor, soluciones líquidas o agentes biológicos, respectivamente. Además, muchas de las tecnologías tienen un porcentaje de recuperación superior al 90 %.
- Los plásticos de los RAEE necesitan un tratamiento especial por su contenido en retardantes de llama bromados. La incineración de estos componentes genera dioxinas y furanos, dos sustancias calificadas como carcinógenas.
- La incineración y la disposición de estos residuos en vertederos no sólo puede tener efectos negativos sobre el medio y sobre la salud humana, sino que también implica la pérdida de recursos.
- A pesar de la regulación del movimiento transfronterizo de RAEE, éste continúa llevándose a cabo en la actualidad. Por ello, debe ejercerse un mayor control sobre él, ya que tiene consecuencias negativas en los países en vías de desarrollo a los que van destinados.

7. Bibliografía

- Ashiq, A., Kulkarni, J., Vithanage, M. (2019). *Hydrometallurgical Recovery of Metals From E-waste*. En: Prasad, M.N.V., Vithanage, M. (eds.). *Electronic Waste Management and Treatment Technology*. p. 225-246. Ed. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-816190-6.00010-8
- Awasthi, A.K., Wang, M., Awasthi, M.K., Wang, Z., Li, J. (2018). *Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review*. *Environmental Pollution* 243, part B, 1310-1316. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.08.037
- Baldé, C.P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). Viena.
- Caselles, M.J., Gómez, M.R., Molero, M., Sardá, J. (2004). *Química aplicada a la ingeniería*. Ed. UNED. Madrid. 809 p. ISBN: 9788436233377.
- Chatterjee, A., Abraham, J. (2017). *Efficient management of e-wastes*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(1), 211-222. DOI: 10.1007/s13762-016-1072-6
- Chen, F., Li, X., Yang, Y., Hou, H., Liu, G.-J., Zhang, S. (2019). *Storing E-waste in Green Infrastructure to Reduce Perceived Value Loss through Landfill Siting and Landscaping: A Case Study in Nanjing, China*. *Sustainability* 11(7), 1829 (15 p.). DOI: 10.3390/su11071829
- Ding, Y., Zhang, S., Liu, B., Zheng, H., Chang, C.-C., Ekberg, C. (2019). *Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review*. *Resources, Conservation & Recycling* 141, 284-298. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.041
- Elías, X., Menéndez, J.B., Molina, J. (2009). *Los residuos mineros*. En: Elías, X. (ed.). *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. p. 637-696. Ed. Díaz de Santos. ISBN: 9788479788353.
- Esmailian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C., Behdad, S. (2018). *The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper*. *Waste Management* 81, 177-195. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.09.047
- Fiore, S., Ibanescu, D., Teodosiu, C., Ronco, A. (2019). *Improving waste electric and electronic equipment Management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment*. *Science of the Total Environment* 659, 928-939. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.417
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Ed. McGraw-Hill. Mexico. 1022 p.
- Gu, W., Bai, J., Feng, Y., Zhang, C., Wang, J., Yuan, W., Shih, K. (2019). *Biotechnological Initiatives in E-waste Management: Recycling and Business Opportunities*. En: Prasad, M.N.V., Vithanage, M. (eds.). *Electronic Waste Management and Treatment Technology*. p. 201-223. Ed. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-816190-6.00009-1

- Haccuria, E., Ning, P., Cao, H., Venkatesan, P., Jin, W., Yang, Y., Sun, Z. (2017). *Effective treatment for electronic waste – Selective recovery of copper by combining electrochemical dissolution and deposition*. Journal of Cleaner Production 152, 150-156. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.112
- Hernández, F.A., Ricardo, P.M. (2006). *Glosario de términos informáticos*. Miguel Sosa Flores (ed.). 102p. Ed. El Cid Editor. ISBN: 9781413564914.
- Ilankoon, I.M.S.K., Ghorbani, Y., Chong, M.N., Herath, G., Moyo, T., Petersen, J. (2018). *E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery*. Waste Management 82, 258-275. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.10.018
- Jefatura del Estado. (2011). *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. Boletín Oficial del Estado núm. 181, de 29 de julio, 85650-85705. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2011/07/28/22/con> (último acceso: 13/06/2019).
- Kumar, A., Holuszko, M. (2016). *Electronic waste and existing processing routes: A Canadian perspective*. Resources 5(4), 35 (19 p.). DOI: 10.3390/resources5040035
- Luhar, S., Luhar, I. (2019). *Potential application of E-wastes in construction industry: A review*. Construction and Building Materials 203, 222-240. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.080
- Ma, C., Yu, J., Wang, B., Song, Z., Xiang, J., Hu, S., Su, S., Sun, L. (2016). *Chemical recycling of brominated flame retarded plastics from e-waste for clean fuels production: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 61, 433-450. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.020
- McCann, M. 2001. *Metalurgia y Metalistería*. En: Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, volumen III. p. 82.1-82.66. Ed. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. ISBN: 84-7434-995-8.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015a). *Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Boletín Oficial del Estado núm. 45, de 21 de febrero, 14211-14312. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2015/02/20/110> (último acceso: 13/06/2019).
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015b). *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf (último acceso: 13/06/2019).
- Ministerio de Medio Ambiente. (2002). *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Boletín Oficial del Estado núm. 25, de 29 de enero, pág. 3507-3521. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2002-1697> (último acceso: 13/06/2019).

- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2008). *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Diario Oficial de la unión Europea L 312, de 22 de noviembre, 3-30. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2008/312/L00003-00030.pdf> (último acceso: 13/06/2019).
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2012). *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Diario Oficial de la unión Europea L 197, de 24 de julio, 38-71. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2012/197/L00038-00071.pdf> (último acceso: 13/06/2019).
- Pathak, P., Srivastava, R.R. (2019). *Environmental Management of E-waste*. En: Prasad, M.N.V., Vithanage, M. (eds.). *Electronic Waste Management and Treatment Technology*. p. 103-132. Ed. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-816190-6.00005-4
- Permanyer, O. (2013). *Situación e impacto de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Caso de estudio: los ordenadores*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Barcelona. 57 p.
- Sahajwalla, V., Gaikwad, V. (2018). *The present and future of e-waste plastics recycling*. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 13, 102-107. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.06.006
- Salhofer, S. (2017). *E-Waste Collection and Treatment Options: A comparison of Approaches in Europe, China and Vietnam*. En: Maletz, R., Dornack, C., Ziyang, L. (eds.). *Source Separation and Recycling. Implementation and Benefits for a Circular Economy*. p. 227-243. Ed. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-69072-8
- Secretariado del Convenio de Basilea. (2014). *Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Ed. Naciones Unidas. 123 p. Disponible en: <http://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-s.pdf> (último acceso: 15/06/2019).
- Singh, N., Li, J., Zeng, X. (2016). *Global responses for recycling waste CRTs in e-waste*. *Waste Management* 57, 187-197. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.03.013

Páginas web consultadas:

- Ambilamp. (2019). Entidad sin ánimo de lucro creada específicamente para la recogida y tratamiento final de los residuos de lámparas y luminarias contemplados en el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos (RD RAEE). URL: www.ambilamp.es (último acceso: 14/06/2019).
- Diesel R. (2019). Página web del Proyecto Life Diesel R, coordinado por la empresa Griñó Ecologic S.A. URL: <http://es.dieselr.com/> (último acceso: 14/06/2019).
- ECO-TRANSFAIR. (2019). Empresa consultora de transferencia de tecnología ecológica. URL: <http://www.eco-transfair.com/> (último acceso: 14/06/2019).
- European Recycling Platform. (2019). Sistema de responsabilidad ampliada del productor de ámbito paneuropeo que opera en España. Se dedica a la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y de pilas y baterías (RPA). URL: <https://erp-recycling.org/es-es/> (último acceso: 14/06/2019).
- Fundación ECO RAEE's. (2019). Sistema integrado de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. URL: www.eco-raee.com (último acceso: 13/06/2019).
- Ministerio de la Transición Ecológica. (2019). URL: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/> (último acceso: 13/06/2019).
- Ministerio de Minería del Gobierno de Chile. (2016). Glosario minero. URL: <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-e/> (último acceso: 14/06/2019).
- PCB Central. (2019). Empresa dedicada al diseño, fabricación y ensamble de circuitos impresos. URL: <https://pcbcentral.com/> (último acceso: 24/03/2019).