

LOS APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Este documento es parte del estudio *Los Residuos de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos en Andalucía*, que los *Círculos de Innovación y Tecnología* de la Universidad de Cádiz realizaron para la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en el año 2002.

LOS APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (AEE)

De acuerdo con la *Propuesta de Directiva Del Parlamento Europeo y del Consejo sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (2000/0158 (COD))* se consideran Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) «*todos los aparatos que necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos para funcionar debidamente y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos*» (Artículo 3, Definiciones).

El ámbito de esta directiva es, pues, todo tipo de aparatos eléctricos o electrónicos, independientemente de que se destinen a uso doméstico o profesional. Además, se consideran AEE incluso los elementos o componentes eléctricos o electrónicos que de manera independiente se destinen a los consumidores, por lo que también ellos deberán cumplir en su totalidad con los requisitos de la directiva. Tal es el caso de material de alumbrado, hilos y cables, motores, transformadores, material eléctrico, etc.

Categorías de AEE contemplados en la directiva comunitaria sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (2000/0158 (cod))

Anexo la
Categorías de aparatos eléctricos y electrónicos que abarca la presente
Directiva

- (1) Grandes electrodomésticos
- (2) Pequeños electrodomésticos
- (3) Equipos de TI y telecomunicaciones
- (4) Aparatos electrónicos de consumo
- (5) Aparatos de alumbrado
- (6) Herramientas eléctricas y electrónicas
- (7) Juguetes
- (8) Materiales médicos (con excepción de todos los productos implantados e infectados)
- (9) Instrumentos de mando y control
- (10) Máquinas expendedoras

ANEXO IB

LISTA INDICATIVA DE PRODUCTOS COMPRENDIDOS EN LAS CATEGORÍAS QUE SE RECOGEN EN EL ANEXO IA

1. Grandes electrodomésticos

- Grandes equipos refrigeradores
- Frigoríficos
- Congeladores
- Lavadoras
- Secadoras
- Lavavajillas
- Cocinas
- Hornos eléctricos
- Placas de calor eléctricas
- Hornos de microondas
- Aparatos de calefacción
- Calentadores eléctricos
- Ventiladores eléctricos
- Aparatos de aire acondicionado

2. Pequeños electrodomésticos

- Aspiradoras
- Limpiamoquetas
- Planchas
- Tostadoras
- Freidoras
- Molinillos de café
- Cuchillos eléctricos
- Cafeteras
- Secadores para el cabello
- Cepillos de dientes
- Máquinas de afeitar
- Relojes
- Balanzas

3. Equipos de TI y telecomunicaciones

Proceso de datos centralizado:

Grandes ordenadores

Miniordenadores

Unidades de impresión

Sistemas informáticos personales:

Ordenadores personales (con unidad central, ratón, pantalla y teclado)

Ordenadores portátiles (con unidad central, ratón, pantalla y teclado)

Ordenadores portátiles tipo "notebook"

Ordenadores portátiles tipo "notepad"

Impresoras

Copiadoras

Máquinas de escribir eléctricas y electrónicas

Calculadoras de sobremesa y de bolsillo

Sistemas y terminales de usuario

Fax

Télex

Teléfonos

Teléfonos de pago

Teléfonos inalámbricos

Teléfonos celulares

Contestadores automáticos

4. Aparatos electrónicos de consumo

Aparatos de radio (radiorrelojes, radiocasetes)

Televisores

Videocámaras

Videos

Cadenas de alta fidelidad

Amplificadores de sonido

Instrumentos musicales

5. Aparatos de alumbrado

Luminarias

Lámparas fluorescentes rectas

Lámparas fluorescentes compactas

Lámparas de descarga de alta intensidad, incluidas las lámparas de sodio de alta presión y las lámparas de haluros metálicos

Lámparas de sodio de baja presión

Otros aparatos de alumbrado, inclusive lámparas de filamentos

6. Herramientas eléctricas y electrónicas

- Taladradoras
- Sierras
- Máquinas de coser

7. Juguetes

- Trenes eléctricos o coches de carreras en pista eléctrica
- Consolas portátiles
- Videojuegos

8. Material médico (con excepción de todos los productos implantados e infectados)

- Aparatos de radioterapia
- Cardiología
- Diálisis
- Ventiladores pulmonares
- Medicina nuclear
- Aparatos de laboratorio para diagnóstico in vitro
- Analizadores
- Congeladores

9. Instrumentos de mando y control

- Detector de humos
- Reguladores de calefacción
- Termostatos

10. Máquinas expendedoras

- Máquinas expendedoras de bebidas
- Máquinas expendedoras de botellas o latas frías o calientes
- Máquinas expendedoras de productos sólidos

Composición de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Los AEE están constituidos, básicamente, por tres grandes categorías de sustancias:

1. **Sustancias valorizables.** Aquellas sustancias o elementos que tras ser extraídos de los equipos poseen un cierto valor en el mercado, o que puede obtenerse de ellos energía mediante incineración de los mismos. Se trata, pues, de materiales que pueden ser vendidos, con lo que el proceso de extracción del equipo puede ofrecer una cierta rentabilidad económica.

Las sustancias más valorizables son los metales (férreos y no férreos), para los cuales no sólo existen métodos de recuperación suficientemente experimentados y eficientes, sino un buen mercado de materiales reciclados. Por ello, los AEE que contengan elevadas proporciones de metales son los que su reciclado presenta una mayor rentabilidad y los pocos para los que este proceso presenta un balance económico positivo.

2. **Sustancias peligrosas.** Aquéllas que han de ser necesariamente separadas del equipo y tratadas de modo especial, ya que de no procederse así, constituirían un peligro para la salud pública y/o para el medio ambiente. Este tratamiento mencionado puede ser -el deseable- su recuperación para una posterior reutilización en cualquier otra aplicación; se evitará así la nueva extracción de las mismas de los yacimientos naturales. En los casos en que ello no sea posible, deberán ser enviadas a vertederos controlados en los que quede garantizado que, en adelante, no van a suponer ningún riesgo. Sólo en el caso de recuperación para posterior utilización, este proceso puede llegar a ser rentable económicamente. No lo es, en ningún caso, cuando su único destino final es el vertedero controlado. Sólo en contadas ocasiones las sustancias peligrosas pueden ser incineradas y siempre habrá de hacerse bajo estrictos controles que garanticen la inocuidad del proceso. En este último caso es posible también una cierta rentabilidad, siempre que ocurra que el balance energético de la combustión sea positivo.

En la actualidad, los fabricantes de AEE han eliminado o se encuentran en proceso de eliminar la mayoría de las sustancias peligrosas de sus equipos o lo van a hacer próximamente, de modo que en un futuro próximo los AEE tendrán una muy baja cantidad de sustancias peligrosas respecto a las cantidades contenidas en los aparatos hasta hace poco tiempo fabricados. Sin embargo, en este momento el problema a que nos enfrentamos es la enorme cantidad de AEE fabricados hasta el día de hoy, sin que en los mismos se tomara en su momento ninguna prevención de naturaleza medioambiental. Estos aparatos son los denominados AEE *históricos*, los cuales, conteniendo en algunos casos importantes cantidades de sustancias peligrosas, están dando lugar -y lo harán aún durante años- a un importante flujo de residuos hacia los vertederos.

Normalmente es extremadamente costoso y difícil –cuando no imposible– extraer las sustancias peligrosas de los equipos, dado que se encuentran muy repartidas y muy íntimamente unidas a las diferentes partes integrantes de los mismos: en soldaduras, pigmentos y estabilizadores de plásticos, pinturas, componentes electrónicos, escorias contenidas en los contrapesos de algunos electrodomésticos de línea blanca, etc.

Por ello, la única solución razonable es, a partir de ahora, la realización de diseños que sustituyan dichas sustancias peligrosas por otras que no lo sean. La política comunitaria de hacer al fabricante de los aparatos responsable ambiental de los mismos en su ciclo de vida completo, pretende impulsar el diseño verde de los equipos. Se entiende que, en tanto los fabricantes puedan eludir esta responsabilidad, no se sentirán demasiado impelidos a desarrollar equipos más ecológicos.

3. Sustancias no valorizables, pero que no son peligrosas. Este tipo de sustancias pueden ser enviadas a vertederos normales, sin que ello suponga un riesgo para la salud ni para el medio ambiente. No obstante esta actuación presenta dos inconvenientes: en primer lugar, se ocupa espacio en vertederos y, además, no se recupera ninguna sustancia para una posterior utilización, por lo que habrán de extraerse de nuevo de los yacimientos naturales, contribuyendo ello al agotamiento de los recursos naturales. La rentabilidad de este proceso es, evidentemente, negativa pues en ningún momento del mismo se generan ingresos que compensen a los gastos de desmontaje, transporte hasta el vertedero y ocupación de espacio en el mismo. Estas sustancias podrían también ser incineradas -siempre en condiciones controladas-, sirviendo para generar energía. Al igual que en el caso anterior, ello proporcionaría una cierta rentabilidad del proceso, siempre que el balance energético de la combustión fuera positivo. Pero no dejaría de presentar el inconveniente de la destrucción de materia primas.

Las sustancias pueden ser consideradas como no valorizables por diferentes razones:

- § Porque aún no se han desarrollado técnicas de reciclado rentables o viables.
- § Porque el proceso de extracción de dichas sustancias de los AEE hasta su aislamiento, es extremadamente dificultoso y/o costoso, lo cual lo hace no rentable.

En cuanto a su composición, las sustancias que constituyen los AEE pueden, de un modo muy general, ser agrupadas en cuatro grandes categorías:

- § Metales (férreos y no férreos)
- § Vidrio
- § Plásticos
- § Otros (cartones, caucho, madera, etc)

La proporción de cada una de ellas dependerá del AEE de que se trate. Así, por ejemplo, un aparato de línea blanca está constituido principalmente por metales, mientras que en un equipo electrónico de consumo es el plástico su principal componente.

SUSTANCIAS CONTENIDAS EN LOS AEE (% EN PESO)						
	Metales férreos	Metales no férreos	Vidrio	Plástico	Otros	Fuente
Procesamiento de datos	35	19	19	22	5	(1)
Telecomunicaciones	62,3	26,7	0,3	10	0,7	(1)
Vídeo y audio	20	6	30	25	19	(1)
Lámparas	4,5	5,9	86,4	1,4	1,8	(1)
Línea Blanca	54	7	3	17	19	(2)
	50		12	24	14	(3)
Ofimática	70		2	32	1	(3)

(1) *Journal of the World Resource Foundation*, February 1996, no. 48
 (2) ANFEL, Proyecto EOLA
 (3) ZVEI (organización que agrupa a la industria alemana de AEE)

Componentes de los AEE

Los AEE pueden estar constituidos principalmente por algunos de los siguientes componentes:

- § Metales
- § Plásticos: carcasas y piezas de plástico conteniendo retardantes de llama
- § Placas de circuito impreso
- § Componentes eléctricos y electrónicos
- § Circuitos híbridos
- § Vidrio
- § Tubos de rayos catódicos
- § Pantallas de cristal líquido
- § Cables
- § Pilas y baterías
- § CFCs, HCFCs y HFCs
- § Aceites
- § Contrapesos de hormigón
- § Maderas y aglomerados
- § Toners

Naturalmente, dependerá del tipo de AEE de que se trate, el que estén presentes en él algunos de los elementos relacionados y no otros. Así, por ejemplo, en el caso de electrodomésticos de línea blanca, sus elementos constituyentes son los que se incluyen en la tabla que sigue:

MATERIALES QUE COMPONEN LOS ELECTRODOMÉSTICOS DE LÍNEA BLANCA	
Material	% en peso
Metales ferromagnéticos	53,78
Metales no ferromagnéticos	7,22
Termoplásticos	16,65
Elastómeros	1,21
Vidrio	3,17
Mat. Comp. Eléctr.	1,25
Material de cable	0,80
Hormigón	12,59
Aglomerado	1,53
Aceite	0,13
Gas refrigerante	0,23
Aislante	1,02
Fibras	0,29
Otros	0,13

Fuente: ANFEL, Proyecto EOLA

Metales

Los metales forman la mayor parte de algunos de los AEE; tal es el caso de los electrodomésticos de línea blanca: carcasas o muebles, cables, motores, etc. Estos metales son tanto ferromagnéticos (los más abundantes), como no ferromagnéticos (principalmente acero inoxidable, aluminio, latón, cobre,...).

No obstante, también se pueden encontrar en los AEE muchos otros metales, por ejemplo, formando parte de los componentes electrónicos. Incluso metales preciosos como oro y plata; eso sí, en cantidades mucho menores.

Algunos de estos metales como el plomo o el mercurio son considerados sustancia peligrosas cuya utilización estará prohibida a medio plazo, de acuerdo a la directiva comunitaria.

De todos los materiales que constituyen los AEE, los metales son los que alcanzan una más alta tasa de recuperación, especialmente los metales féreos. Como ya se ha comentado, existen técnicas de reciclado sobradamente experimentadas, así como un buen mercado para los metales recuperados.

El plomo en la soldadura blanda de los componentes electrónicos

Los componentes electrónicos se interconectan entre sí uniendo sus terminales a las pistas de un sustrato común (por ejemplo una placa de circuito impreso) mediante una aleación denominada soldante, que es la encargada de realizar la unión metalúrgica denominada soldadura blanda (en inglés *soldering*).

El soldante mayoritariamente usado en la soldadura blanda en el sector electrónico, es una aleación de estaño (Sn) y plomo (Pb) en una proporción 63/37 (63% de Sn y 37% de Pb). Las soldaduras, de color gris que podemos ver al abrir cualquier equipo eléctrico o electrónico son, normalmente, de esta aleación.

Y es el soldante masivamente empleado en electrónica por las importantes ventajas que posee. Las soldaduras realizadas con él presentan una gran resistencia, buena conductividad eléctrica y térmica, gran fiabilidad, son impenetrables a gases y líquidos, permiten una fácil reparación, es posible un control muy preciso de la cantidad de soldante, los procesos son fácilmente automatizables, existiendo diferentes métodos de soldadura automáticos. Además, se requiere una baja aportación de energía para fundir este soldante, fusión que se produce a la temperatura relativamente baja de 183°C, temperatura muy aceptable para la mayoría de los componentes electrónicos.

En realidad la unión metalúrgica la establece el estaño, pero soldaduras que se realizaran sólo con estaño no reunirían unas características mínimamente aceptables; entre otros inconvenientes, las soldaduras exclusivamente con Sn serían quebradizas. Por ello, al Sn se le añade Pb en la proporción mencionada, con lo que además de conseguir uniones más robustas, se baja la temperatura de fusión a los mencionados 183°C (desde los 232°C del estaño puro) e incluso, para más ventajas, se abarata el precio del soldante al tener el plomo menor precio que el estaño.

Ahora bien, el plomo es un elemento tóxico. Por ello, desde hace años, existe preocupación acerca del contenido de plomo existente en cualquier equipo eléctrico o electrónico. En consecuencia, ha surgido una gran presión para conseguir equipos realizados con soldaduras sin plomo (*leadfree electronics*). Así, la *Propuesta sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos* (2000/0159 (COD)) en su artículo 4, apartado 1, insta a la sustitución del plomo por otros materiales.

Es tan importante en electrónica esta soldadura, que el hecho de tener que prescindir de ella supone una gran convulsión para todo el sector. Mucho mayor, desde luego, de la que supuso hace ya hace unos años la prohibición de utilizar los CFCs para la limpieza de las placas de los circuitos impresos. Porque, además, en estos momentos no existe una soldadura sustitutiva que posea las prestaciones de la soldadura realizada con soldante SnPb.

En el sector electrónico, además de la dificultad de sustituir este soldante a corto plazo, se plantean varias preguntas acerca de su conveniencia:

¿Es el plomo contenido en los equipos electrónicos una fuente de contaminación importante?

Los soldantes sustitutivos sin plomo, ¿suponen realmente una mejora desde el punto de vista mediambiental?

El artículo, cuya traducción ofrecemos a continuación, ofrece su opinión respecto a estas cuestiones.

¿Es el soldante sin plomo la respuesta a nuestros problemas ambientales?

*Joseph Fjelstad, Pacific Consultants LLC
Electronic Design, Julio 2001*

En los últimos años hemos sido testigos de un gran empeño en todo el globo para fabricar equipos electrónicos utilizando soldantes sin plomo caros y problemáticos. La pregunta es «¿por qué?». Se han dado diferentes razones, de las que las más frecuentes son las demandas de los consumidores y los requerimientos legislativos por productos más compatibles ambientalmente. Estos empeños tienen su raíz en los

negativos efectos del envenenamiento de niños por plomo que lo ingirieron procedente de tintas de bolsas de chucherías que habían sido elaboradas con pigmentos basados en plomo. Pero la conexión con la electrónica se ha hecho sin pruebas científicas.

Paradójicamente, una ojeada cuidadosa a las alternativas libres de plomo revela que sus supuestos beneficios ambientales son muy débiles y defectuosos. En realidad, los soldantes sin plomo son un paso muy erróneo para la industria electrónica. Podemos estar considerando un hecho como un problema, cuando verdaderamente no lo es, pero creando una situación muy seria como consecuencia. Esto podría ser muy costoso para la industria en términos de fabricación y de fiabilidad de los productos.

Examinemos unos pocos puntos. ¿Es el plomo de los soldantes de electrónica una causa demostrable de contaminación ambiental?. No. Un estudio de la EPA (United States Environmental Protection Agency) en vertederos demuestra que sólo 2 de los 146 vertederos analizados eran realmente problemáticos en lo que al plomo se refiere. Y en dichos casos, las causas eran grandes depósitos de residuos industriales encontrados en los mismos. Actualmente, los niveles de plomo en la sangre humana han descendido drásticamente en los últimos 20 años debido a la eliminación de la gasolina con plomo. Nunca ha sido demostrada una relación directa entre el plomo encontrado en el cuerpo humano y los productos electrónicos. Sólo existen reclamaciones infundadas.

¿Es el plomo de los soldantes una de las principales utilidades de este elemento y, por lo tanto, un razonable objetivo en cuanto a su necesidad de reducción?. No. De acuerdo con los grupos industriales de estaño y plomo, el uso del plomo como soldante representa menos de un 0,5% de la totalidad del plomo consumido anualmente en todo el mundo. Dado que los soldantes electrónicos representan alrededor del 50% de todos los soldantes, menos del 0,25% de todo el plomo consumido procede del sector electrónico.

¿Son los soldantes alternativos realmente menos tóxicos?. No necesariamente y, en especial, para las larvas y diversos microorganismos de agua dulce. La plata, que también lixivía con el agua, es altamente tóxica para estas criaturas.

La mayoría de los soldantes propuestos como alternativos, ¿ayudan a ahorrar energía?. No. Estos soldantes funden a temperaturas, como media, 40°C por encima de los soldantes tradicionales. Y un estudio reciente de NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative, Inc) establece que la tasa de degradación con la humedad de las cápsulas de los circuitos integrados se degrada, típicamente, un nivel por cada 5°C a 10°C de incremento de temperatura de fusión del soldante. Como consecuencia de ello, para cumplir los requerimientos establecidos por la JEDEC (Join Electron Device Engineering Council) relativos a la

sensibilidad a la humedad, se hace preciso introducir una fase previa de calentamiento que consume aún más energía.

Más aún, y sin considerar este proceso de calentamiento, Karl Tiefert de Agilent Technologies recientemente estimaba que la conversión de los procesos actualmente realizados con el soldante con plomo a los otros soldantes sin plomo daría lugar a la emisión extra a la atmósfera de 1500 toneladas de dióxido de carbono.

En Febrero del año 2001, los tres principales fabricantes de semiconductores europeos, Infineon Technologies (anteriormente Siemens Semiconductors), Philips Semiconductors y STMicroelectronics acordaron aliarse para construir dispositivos semiconductores que no contuvieran plomo ni precisaran del mismo. La iniciativa tiene como finalidad el desarrollo de procesos tecnológicos que no precisen de la utilización del plomo ni de otros metales pesados. Estos fabricantes están decididos a la eliminación del plomo de sus productos aún antes de la fecha de entrada en vigor de la directiva comunitaria que lo prohibirá.

El soldante SnPb se utiliza también como recubrimiento de terminales de los componentes. En esta aplicación desde hace años se viene utilizando el estaño puro con resultados satisfactorios, como sustituto de dichas aleaciones SnPb. Actualmente, la mayoría de los terminales de los componentes de inserción (SIL, DIL,...) se fabrican con terminales con recubrimiento libre de plomo.

Por el hecho de ser el plomo un elemento tan tradicional y esencial en los procesos de soldadura blanda y tan común en cualquier equipo eléctrico y electrónico, su eliminación, así como la transición hacia otras soldaduras no es un hecho menor, ni tecnológicamente fácil. Por ello, aunque en la actualidad los fabricantes han logrado disminuir la cantidad de plomo presente en sus productos, queda aún un difícil camino por recorrer, eso sí, con la presión de la política decidida de la Unión Europea para la eliminación del plomo de los AEE en los próximos años.

Se han ensayado y se están ensayando en todo el mundo múltiples tipos de soldantes y procesos *lead-free* recurriendo a combinaciones variadas de diferentes elementos: estaño, plata, cobre, bismuto, indio, zinc, etc. Uno de los inconvenientes más serios que ha encontrado la sustitución del plomo ha sido la calidad y la fiabilidad que han presentado las tecnologías alternativas de soldadura («*lead-free technologies*») frente a la calidad y fiabilidad de las soldaduras con plomo con tantas décadas de experiencia. También, en la mayor parte de los casos, la temperatura necesaria para que tenga lugar la soldadura blanda es demasiado elevada, el coste excesivo, la fiabilidad escasa, la soldabilidad deficiente, etc. El soldante SnAg_{3,8}Cu_{0,7} (SAC) es una aleación eutéctica para propósito general. En la soldadura mediante ola, este soldante ha de alcanzar una temperatura de 260 °C, con un tiempo de soldadura de 3 segundos. Puesto que los componentes pueden verse dañados a temperaturas mayores de 245 °C, actualmente se trabaja en mejorar la resistencia de los mismos a las elevadas temperaturas.

En Europa, un borrador de directiva (*Restrictions on the use of Hazardous Substances, RoHS*) requiere la eliminación del plomo en electrónica, salvo en aplicaciones especiales, para el 1 de Enero de 2006. En Japón las leyes obligan a los fabricantes a eliminar o recuperar sus productos que contengan plomo. En EEUU, numerosas leyes prohíben o restringen el uso de plomo en muchos productos

Plásticos

Cuando se utiliza como sustantivo, la palabra *plástico* hace referencia a ciertos materiales orgánicos (es decir formados por átomos de carbono) de una naturaleza química determinada y con unas características estructurales comunes. En realidad, el nombre científico correcto de estos materiales es el de **polímeros**. Pero, cuando a estos polímeros se les añaden determinadas sustancias¹ (aditivos, cargas, etc.) con objeto de conseguir una modificación de sus propiedades, de modo que les hagan aptos para ser comercializados, pasan a denominarse **plásticos**.

En la naturaleza existen polímeros que han sido a lo largo de la historia utilizados por el hombre, y que provienen tanto del reino animal como del vegetal, denominados **polímeros naturales** o **biopolímeros**: caucho, proteínas, almidón, celulosa, etc.

A diferencia de ellos, el hombre ha desarrollado en el laboratorio diferentes polímeros denominados **polímeros sintéticos**, por haber sido obtenidos mediante reacciones químicas de síntesis. Para la obtención de los polímeros sintéticos se utilizan como materia prima los recursos fósiles.

Existen también **polímeros semisintéticos**, que son aquellos que se han formado a partir de biopolímeros, mediante tratamiento químico adecuado. Tal es el caso del caucho, el acetato de celulosa, etc.

Las propiedades de los plásticos son muy diferentes de los de las sustancias de partida y dependen tanto de éstas como del propio proceso de fabricación.

Los plásticos tienen una amplísima utilización en los AEE: carcasas de equipos, material base de las placas de circuito impreso, agente encapsulante de componentes electrónicos, cristales líquidos, adhesivos, recubrimientos (pinturas, barnices y lacas), ... La mayoría de los plásticos que se utilizan en los AEE son termoplásticos, los de mayor producción y utilización. Estos plásticos vienen caracterizados por la propiedad de reblandecerse con el calor, llegando incluso a fluir, volviendo a ser sólidos y rígidos una vez disminuye de nuevo la temperatura. Esto los distingue del otro gran grupo de plásticos, los termoestables, que no se reblandecen al aumentar la temperatura y que, incluso, llegan a descomponerse antes que fluir. Son plásticos termoplásticos, entre otros: el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliestireno expandido (EPS), copolímero estireno-acrilonitrilo (SAN), poliestireno de alto impacto (PS-HI), acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), policloruro de vinilo (PVC), politetrafluoretileno (PTFE), polióxido de metileno (POM), policarbonato (PC), politereftalato de etileno (PET), poliamidas (PA), etc. Entre los plásticos termoestables citemos a las resinas fenólicas (PF), las resinas de poliéster insaturado (UP), las resinas epoxi (EP), los poliuretanos (PUR), la melamina, ... Los **elastómeros** son polímeros de cadenas entrecruzadas como los termoestables, sólo que debido a la estructura de las cadenas que los

¹ Lubricantes, plastificantes, reforzantes, antiestáticos, colorantes, estabilizantes contra la radiación ultravioleta, retardadores de llama, biocidas, ...

constituyen, presentan propiedades elásticas. Son los componentes fundamentales de los cauchos: naturales, modificados, neopreno,...

Desde el punto de vista medioambiental, el principal problema que presentan los plásticos es su difícil o nula degradación. Dado que son productos de síntesis, no pueden ser degradados por la Naturaleza con la celeridad con que lo hacen las sustancias naturales, o bien nunca aquélla llega a hacerlos desaparecer. Realmente, para que un plástico se degrade ha debido ser sintetizado expresamente para que sea degradable, normalmente mediante fotodegradación o biodegradación.

Existen tres formas de valorizar los plásticos:

- § La valorización química. El reciclado de los plásticos se realiza actuando directamente sobre la estructura interna del polímero. Aún no existen aplicaciones industriales.
- § La valorización energética. Dado que los plásticos son compuestos orgánicos hidrocarbonados, poseen una buena capacidad calorífica, tan buena como la de los derivados del petróleo. Incluso, poseen sobre éstos la ventaja de que, al no poseer azufre, no generan gases compuestos de este elemento. No obstante, hay que tener en cuenta que contienen aditivos, especialmente sustancias ignífugas halogenadas o metales pesados, los cuales no sólo disminuyen su capacidad calorífica sino que en la combustión pueden dar lugar a la emisión de sustancias tóxicas, tales como dioxinas o furanos. Por ello, como en cualquier proceso de incineración, es preciso establecer un control muy severo del horno, de sus emisiones y de sus residuos. Así, se hace necesario disponer de filtros que retengan los gases y las partículas peligrosas, impidiendo que se liberen a la atmósfera. Además, realizando la combustión a temperaturas por encima de los 600 °C, no se generan ni dioxinas ni furanos.
- § El reciclaje mecánico. En este tipo de reciclado, a diferencia del químico, no se actúa sobre la estructura interna del plástico. Simplemente se reduce a trozos el plástico, para producir la granza de material reciclado. Presenta varios inconvenientes. El primero de ellos es como consecuencia de diversos factores tales como el tiempo, la utilización, el contacto con diferentes sustancias y otros, los plásticos van perdiendo progresivamente las propiedades que inicialmente poseían. Ello hace que no puedan ser utilizados de nuevo en la misma aplicación primitiva.

También, tras sufrir el proceso de reciclado, los plásticos suelen experimentar una variación de sus propiedades, por lo que han de destinarse a aplicaciones de menores exigencias que la aplicación original, ni tampoco pueden ser utilizarlos en contacto con alimentos o bebidas.

Pero el principal inconveniente del reciclaje mecánico es que previamente a él ha de realizarse ineludiblemente una separación total de los diferentes

tipos de plástico. Quiere esto decir que los productos finales no deben presentar mezclas de diferentes tipos de plásticos, especialmente de algunos de ellos con otros. Pues la mezcla de plásticos diferentes da lugar, en general, a un producto final que no presenta buenas propiedades mecánicas, bien por la no miscibilidad de los diferentes plásticos mezclados, bien por su incompatibilidad. En algunos casos, basta una pequeña cantidad de un plástico en otro tipo de plástico, para que la mezcla final se vuelva inservible. Así, por ejemplo, la presencia de un uno por mil de policloruro de vinilo en tereftalato de polietileno hace que el conjunto no pueda ser reciclado.

En la siguiente tabla vienen indicados los grados de compatibilidad de algunos de los plásticos más comunes en los AEE

COMPATIBILIDAD DE PLÁSTICOS												
	ABS	PA	PC	PE-HD	PE-LD	PET	PMMA	POM	PP	PS	PVC	SAN
ABS	5											
PA	0	5										
PC	4	0	5									
PE-HD	0	0	0	5								
PE-LD	0	0	0	0	5							
PET	1	1	5	0	0	5						
PMMA	5	0	5	1	0	0	5					
POM	1	0	0	0	0	0	1	5				
PP	0	0	0	0	0	0	0	0	5			
PS	0	1	0	0	0	1	2	0	0	5		
PVC	3	0	1	0	0	0	5	0	0	0	5	
SAN	5	0	4	0	0	0	5	0	0	0	4	5
Escala de compatibilidad: 0 = Incompatible 5 = Totalmente compatible												

También influye en el grado de reciclabilidad alcanzable para un equipo, el tipo de unión que presenten en el mismo los diferentes plásticos que lo constituyen; entre sí, o entre ellos y otros materiales. Puesto que para poder reciclar los plásticos con eficacia y eficiencia, es necesario realizar una separación total de los diferentes tipos, plásticos adheridos entre sí, o con cualquier tipo de unión que dificulte la separación y que haga al proceso lento (si no imposible), dará lugar a que disminuya el grado de reciclabilidad del AEE.

Evidentemente, es también un impedimento para la consecución de un reciclaje eficiente, el hecho de que existan en el equipo piezas pequeñas y/o muy numerosas. Por supuesto, mucho peor si, además, son de diferentes plásticos.

La presencia en los plásticos de agentes ignífugos, pigmentos, estabilizadores, cargas con cualquier finalidad, textiles (como ocurre en algunos elastómeros), etc., es, en todos los casos, un obstáculo para su reciclado. Siempre en el diseño de equipos deben analizarse las consecuencias que la inclusión que estos agentes pueden tener cuando llegue el momento de su reciclado. Por ello, desde hace años, algunos fabricantes de equipos y componentes electrónicos han dejado de utilizar plásticos con retardantes de llama bromados.

El proceso de reciclado de plásticos se ve muy facilitado por el marcado de los mismos. Este marcado –sea cual sea el sistema-, sin que presente ningún inconveniente, permite una fácil identificación de los plásticos, posibilitando la separación de los diferentes tipos. La simple diferente coloración de los diferentes tipos de plástico es ya una gran ayuda para el reciclado.

Puesto que hasta hace poco tiempo ninguna de estas medidas habían sido puestas en práctica, los equipos históricos suponen actualmente un enorme problema.

Componentes electrónicos

Dada la gran variedad de componentes electrónicos existentes, es amplísimo el número de elementos y sustancias que pueden encontrarse en ellos: plásticos, metales valorizables (oro, plata,...), silicio, sustancias peligrosas (mercurio, óxido de berilio,...), etc. No obstante, normalmente todas ellas siempre en pequeñas cantidades.

Las placas de circuito impreso

La placa de circuito impreso es el principal soporte, prácticamente el único, que se utiliza en la actualidad para la interconexión de los componentes electrónicos. Básicamente, una placa de circuito impreso (PCI, PCB ó PWB) consta de una lámina de material aislante sobre cuyas caras externas, y puede que en su interior, se han depositado pistas (láminas) conductoras. Se trata de una tecnología de interconexión utilizada en los equipos electrónicos desde mediados del siglo XX.

El material base de una placa de circuito impreso es un plástico, una resina, normalmente fenólica o epoxídica. Sólo en casos especiales se utiliza algún otro tipo de plástico tal como el politetrafluoretileno (PTFE, teflon[®]) en el caso de señales de alta frecuencia, poliamida cuando deban operar a altas temperaturas, etc. Pero, para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de estas resinas, se las mezcla con alguna o algunas otras sustancias tales como celulosa, vidrio, cerámica, etc. Y, además, con objeto de evitar que puedan arder en el caso de que en algún punto se llegara a alcanzar una temperatura suficientemente elevada, se les suele añadir alguna sustancia retardadora de llama.

Las pistas conductoras de las placas de circuito impreso son, en su práctica totalidad, de cobre. A estas pistas se unen los componentes electrónicos mediante una unión metalúrgica realizada con soldante, normalmente una aleación estaño/plomo en la proporción eutéctica 63/37.

En su conjunto, las placas de circuito impreso deben ser considerados elementos peligrosos, ya que sobre ellas se encuentran componentes que pueden contener sustancias peligrosas: plomo en las soldaduras, agentes ignífugos incluidos en el plástico de las propias placas o en el plástico encapsulante de algunos componentes, etc.

El primer paso en el reciclado de las placas de circuito impreso consiste en la separación de los componentes unidos a ella mediante soldadura blanda. Esta separación se realiza calentando el circuito impreso a una temperatura superior a la de fusión del soldante, como consecuencia de lo cual se desprenderán o será posible retirar los componentes electrónicos, así como recuperar la mayor parte del soldante. Aquellos componentes unidos a la placa mediante uniones de naturaleza química o mecánica, se separarán de ella por el método adecuado en cada caso.

Una vez que la placa esté libre de componentes y de la mayor parte del soldante, la forma de valorizarla es recuperando los metales que existan en ella, fundamentalmente el cobre, aunque también algunos otros, por ejemplo, oro en ciertos contactos. La mayor o menor valorización depende, básicamente, de la cantidad de dichos metales que puedan ser recuperados.

Existen diferentes técnicas para el tratamiento de las placas; principalmente técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. En cualquiera de ellas, el proceso ha de ser muy cuidadoso, debido a la presencia de sustancias peligrosas. Así, por ejemplo, en el caso de incineración, pueden generarse gases extremadamente tóxicos, no sólo por algunos de los metales que pueden contener las placas, sino también por el hecho de que el cobre de las pistas potencia –actuando como catalizador- la formación de dioxinas y furanos a partir de los retardantes de llama bromados del plástico. Por ello, en caso de incineración de las placas, ésta deberá realizarse siempre a altas temperaturas y con adecuados filtros, ya que la combustión incompleta a bajas temperaturas y sin un filtrado adecuado es extremadamente peligrosa. Los hornos de incineración deberán estar provistos de equipos de control de polución, de emisión de metales, VOCs y dioxinas.

Normalmente, el procedimiento de reciclado se basa en la trituración seguida de un proceso de lixiviación hidrometalúrgica. O, también, de incineración, a continuación del cual la cenizas resultantes se someten a proceso hidrometalúrgico. Un proceso hidrometalúrgico típico consiste en la utilización de una solución alcalina de cianuro para lixiviar los metales, los cuales se separarán posteriormente. Notemos que el uso del cianuro supone otro factor de riesgo del proceso.

La compañía NEC ha desarrollado un sistema de tratamiento de placas que denomina "eco-separación". Tras la separación de los componentes de la placa, ésta es pulverizada y el polvo resultante se separa mediante un vortex de aire y un sistema de separación electrostática a alto voltaje, que permite obtener polvos ricos en cobre así como polvos de resina y de fibra de vidrio.

Circuitos híbridos

Los circuitos construidos con tecnología híbrida utilizan un sustrato que en lugar de ser una placa de circuito impreso (basado en una sustancia orgánica, un plástico) es una lámina de material inorgánico; normalmente alúmina, aunque también, muy raramente, pueden encontrarse sustratos de nitruro de aluminio, cuarzo, etc. Los componentes electrónicos son los mismos que se utilizan sobre placas de circuito impreso pero, además, en los circuitos híbridos de capa gruesa (los más comunes), se construyen componentes pasivos, mediante la deposición sobre el sustrato de pastas que contienen diferentes sustancias: vidrio, cerámicas, óxidos de conductores, metales nobles, etc. Las soldaduras se realizan mediante estaño, plomo, plata,...

Vidrio

En los AEE pueden encontrarse vidrios de diferentes tipos:

- § Vidrios planos
- § Vidrios laminados, con materiales plásticos incorporados
- § Vidrios armados, con un enrejado de fibras de hierro
- § Vidrios con plomo, por ejemplo los de los TRCs
- § Vidrios cerámicos: el de las placas vitrocerámicas

El vidrio plano normal es de fácil reciclaje. No ocurre lo mismo con los restantes, ya que el proceso se ve dificultado por el hecho de encontrarse mezclado el vidrio con otras sustancias: plástico, metales, etc. Los vidrios cerámicos de las placas vitrocerámicas de cocina no son reciclables para ser convertidos en vidrio común, debido a su composición química y a su alto porcentaje de alúmina. Se ha propuesto la utilización de estos residuos para la obtención de gres.

En cuanto al vidrio de los tubos de rayos catódicos, que se tratará en el apartado siguiente, el principal inconveniente que presenta es la peligrosidad de las sustancias que incorpora.

Tubos de rayos catódicos (TRCs)

Los TRCs son unos de los elementos más peligrosos incluidos en los AEE, así como de los más difíciles de reciclar. De hecho, están contemplados en la Orden Ministerial del Ministerio de Medio Ambiente MAM/304/2002 de 8 de Febrero, BOE núm 43, en sus apartados 10 11 11 y 16 02 13, como residuos peligrosos, de conformidad con la Directiva 91/689/CEE.

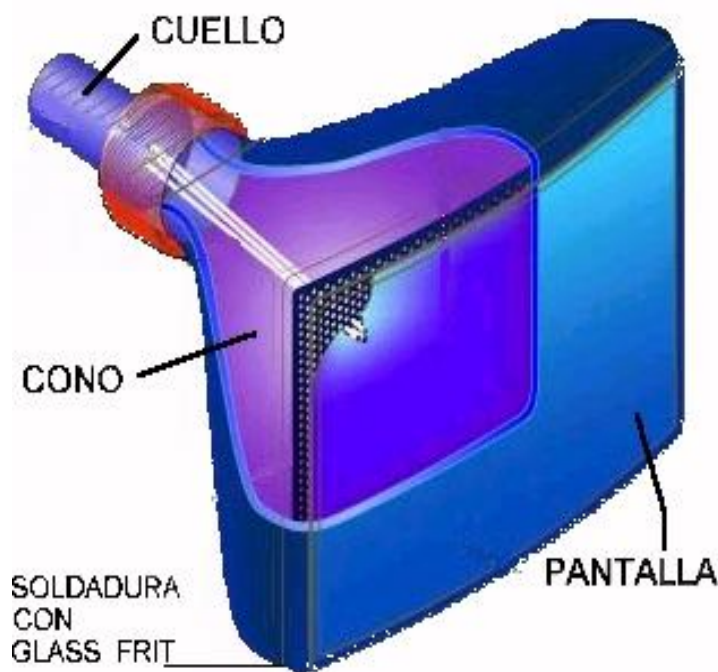
Forman parte de algunos equipos electrónicos más comunes; principalmente televisores y monitores de ordenadores, aunque también de osciloscopios y otros instrumentos de laboratorio. Suponen hasta el 60 % del peso de un televisor o de un monitor de ordenador. De hecho, representan un alto porcentaje de los RAEE; según el ICER, el 10%.

El vidrio del tubo de rayos catódicos de un ordenador personal contiene alrededor de 0,4 kg de plomo y el de un televisor 2 kg. En la actualidad representan la segunda fuente en importancia de residuos de plomo, tras las baterías de ácido-plomo.

Un TRC es un elemento pesado, complejo, delicado y compuesto por múltiples partes, materiales y sustancias. Su contenedor, básicamente, consta de tres piezas de vidrio de diferentes formulaciones, recubiertas de diferentes sustancias, encerrando en su interior diversos elementos metálicos.

Las formulaciones típicas de los vidrios que componen el tubo de rayos catódicos de color son las siguientes²:

- Vidrio de la pantalla: 60% SiO₂, 12% BaO, 8% Na₂O, 8% K₂O, 4% Al₂O₃ y 3% de CaO.
- Vidrio del cono: 55% SiO₂, 15% PbO, 8% Na₂O, 8% K₂O, 4% Al₂O₃ y 3% de CaO.
- Vidrio del cuello: 47% SiO₂, 37% PbO, 2% Na₂O, 11% K₂O, 3% Al₂O₃ y 2% de CaO.



En la parte interior de la pantalla se encuentra un depósito fosforescente compuesto por óxidos de zinc, de itrio y de europio, una lámina de aluminio y una banda de Cu o Fe. La unión entre la pantalla y el cono la proporciona un material con un contenido en plomo del orden del 70%. El cono tiene en su interior una capa de óxido de hierro, junto con otra de grafito.

Los TRCs presentan un grave problema para su reciclado: su falta de aplicaciones. Por una parte, difícilmente los TRC pueden ser reutilizados en su integridad en la construcción de nuevos equipos. Por otra, aunque el vidrio de las pantallas es de alta calidad, es bastante arriesgado fundirlo para a partir de él fabricar nuevas pantallas, ya que éstas son un elemento crítico, donde se visualiza la señal y un vidrio reutilizado podría no responder a los requerimientos que se le exigen. Lo único que cabe pensar hacer, pues, es utilizar el vidrio de los TRC en otras aplicaciones. Se ha ensayado incorporar dicho vidrio a cerámicas, debido al alto contenido en bario de las pantallas y de plomo del cono. También se ha probado separar las pantallas de resto del TRC y eliminar el material depositado en el interior de las mismas (el "fósforo"), pero ésto además de exigir gran cantidad de mano de obra, es de dudoso resultado.

La práctica totalidad de los TRCs acaban en vertederos. Una vez allí los elementos contenidos en sus vidrios acabarán lixiviando desde el vidrio. Y ello aunque pasen el TCLP test (Toxicity Characteristic Leachate Procedure). Pues, pese a superar este test, la lixiviación puede tener lugar, al efectuarse muy lentamente. Por lo tanto, en el caso del vidrio de los TRC, no es suficiente con que supere el test TCLP.

² IMU-Ingeniería Municipal, Madrid 1995, nº 98

Una vez que un equipo que incluye un TRC ha sido desechado por su usuario, los tubos de rayos catódicos deben ser tratados de acuerdo a alguna de las siguientes alternativas:

- Guardados completos en un almacenamiento de seguridad para su posterior tratamiento.
- Siguiendo alguna de las siguientes técnicas de tratamiento:
 - § Las que tratan al tubo en su conjunto: introduciendo los tubos completos en hornos, fundiendo el vidrio y separando las sustancias que se concentran en la fase insoluble, denominada escoria.
 - § Las que se basan en abrir el tubo y separar y clasificar los distintos elementos constituyentes del tubo. Se procede del siguiente modo:
 - Desmantelando los diferentes elementos que contiene un TRC
 - Separando los diferentes tipos de vidrio que se encuentran en un TRC y reciclándolos.
 - Eliminando los recubrimientos del vidrio. Se separa el recubrimiento fluorescente y se recicla o elimina de un modo ecológico.

Pantallas de cristal líquido

Los cristales líquidos son compuestos orgánicos mediante los cuales se generan las imágenes en las pantallas denominadas LCDs, tales como las de los ordenadores portátiles, teléfonos móviles, PDAs, etc.

Aunque existen algunas opiniones en contra, la creencia más extendida es que su nocividad es muy baja.

Cables

Están constituidos por cobre recubierto de algún aislante plástico (PVC, silicona,...), normalmente conteniendo algún agente ignífugo.

Pilas y baterías

Con la tendencia actual a los equipos electrónicos portátiles, el mercado de pilas y baterías se ha incrementado en los últimos años de manera alarmante.

Desde un punto de vista medioambiental, las baterías se prefieren a las pilas, ya que poseen múltiples ciclos de vida, frente a uno sólo de las pilas. No

obstante, en cualquiera de estas categorías, es preciso siempre considerar las sustancias que contengan, prestando especial atención a los metales pesados.

Como se indicó en el preámbulo, ni pilas ni baterías figuran entre los objetivos de este estudio, por lo que no se entrará en un tratamiento de las mismas.

CFCs, , HCFCs y HFCs

Se tratan con amplitud en el siguiente apartado «*Sustancias peligrosas contenidas en los AEE*». Añadamos aquí simplemente que la forma normal que se utiliza para su eliminación es la incineración controlada.

Los AEE que contengan CFCs están contemplados en la Orden Ministerial del Ministerio de Medio Ambiente MAM/304/2002 de 8 de Febrero, BOE núm 43, en su apartado 16 02 11 (*Equipos desechados que contienen clorofluorocarbonos, HCFC, HFC*), como residuos peligrosos, de conformidad con la Directiva 91/689/CEE.

Aceites

Los aceites se utilizan principalmente en los frigoríficos y aparatos de aire acondicionado, en los circuitos de refrigeración. Cuando se extraigan se podrán recuperar siempre que no contengan PCB's o CFC's. Si no es así, habrá que recurrir a la incineración controlada para su eliminación.

Hormigón

Este material se utiliza exclusivamente en los contrapesos de lavadoras y lavavajillas, por lo que es un residuo abundante en los electrodomésticos de línea blanca, pero exclusivamente en ellos.

Puede ser tratado como cualquier residuo de la construcción, salvo en el caso de que para conseguir una mejor operación del contrapeso, se haya aumentado su peso específico añadiéndole al hormigón escorias que contengan metales pesados tales como plomo, cromo y otros.

Maderas y aglomerados

En ambos casos, tras la trituración, podrán utilizarse los materiales resultantes para construir aglomerados o para generar energía mediante incineración. No obstante, conviene actuar con precaución, ya que en ocasiones pueden encontrarse impregnados con sustancias ignífugas peligrosas como PCPs.

Toners

El principal ingrediente del tóner negro es un pigmento denominado *carbon black*, el cual es clasificado por la *International Agency for Research on Cancer* como carcinógeno clase 2B, posible carcinogénico para humanos. Algunos informes indican que los toners de colores (ciano, amarillo y magenta) contienen metales pesados.