

# Nueva metodología para la optimización del diseño de líneas de reciclado de aparatos electrónicos

Arantxa Rentería Bilbao<sup>1</sup>, Esther Álvarez de los Mozos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Automoción. Fundación Robotiker. Parque Tecnológico, 202.. 48170 Zmudio. arantxa@robotiker.es

<sup>2</sup> Universidad de Deusto. Av. Universidades 28. 48007 Bilbao. ealvarez@eside.deusto.es

## Resumen

*Para la optimización del reciclado de aparatos eléctricos y electrónicos se propone una metodología a aplicar en la fase de desensamblado y separación. Debido a la heterogeneidad de los aparatos electrónicos (modelos, orígenes, estado de conservación, antigüedad, tamaño y forma), el método sirve para lograr un sistema lo suficientemente flexible tanto en el hardware (dispositivos de manipulación, transporte, herramientas, garras, sistemas de fijación, sistemas de identificación, etc.) como en el software (control, procesado de imágenes, sistemas de ayuda al reconocimiento), y dimensionado para las características especiales de este tipo de proceso.*

*La metodología se ha aplicado en el desmontaje y reciclado de televisores y monitores, e incluye las fases de estudio de los aparatos a reciclar para agruparlos según tratamientos similares y verificar su viabilidad, identificación de los equipos, y diseño de las estaciones para el desmontaje de los componentes: carcasas, elementos internos, cables, tarjetas de circuitos impresos y pantallas de vidrio. En estas fases se utilizan técnicas de simulación para la optimización de la línea, para organizar la distribución en planta de las estaciones y simular en detalle las operaciones de separación, decidiendo sobre la idoneidad de una operación manual, semi-automática o totalmente automatizada.*

**Palabras clave:** reciclado, desensamblado, automatización, simulación

## 1. Introducción: marco económico y legal de los residuos electrónicos

Desde los años 70 y 80 se ha vendido un número creciente de aparatos electrónicos de consumo habitual. La vida útil de estos electrodomésticos es relativamente corta, y va decreciendo como resultado de los rápidos cambios en las características y capacidades de los equipos, e incluso siguiendo ciertas modas. Esto origina una cantidad ingente de basura electrónica que necesita ser procesada (7,5 millones de toneladas de basura electrónica se produjeron en Europa en el año 2006, representando el 4% de los vertidos urbanos, con un crecimiento anual de 3% a 5%) (Andreola, 2007). Inicialmente estos residuos se depositaban en vertederos, donde a veces eran incinerados. Pero debido al rápido crecimiento de este tipo de basura, y a los problemas medioambientales que provoca su depósito permanente en vertederos, se ha hecho necesario aplicar otros métodos de tratamiento para los aparatos en su fin de vida. Los equipos electrónicos están fabricados utilizando la integración de numerosas tecnologías y se componen de materiales muy diferentes entre sí. Este hecho implica que su reciclado y recuperación efectiva requiere nuevos y diversos métodos y técnicas.

### 1.1. Aspectos económicos de la recogida de residuos para reciclado

Cada producto eléctrico o electrónico consiste en una combinación de módulos: circuitos impresos, cables, conductores flexibles, alambres, plásticos con o sin retardantes de llama, aparatos visualizadores (tales como tubos de rayos catódicos y pantallas de cristal líquido), acumuladores y baterías, medios de almacenamiento de datos, elementos de generación de luz, capacitancias, resistores y relés, sensores y conductores. Las sustancias más problemáticas desde

el punto de vista medioambiental contenidas en estos componentes son los metales pesados (mercurio, plomo, cadmio y cromo), sustancias halogenadas tales como clorofluocarbonos, bifenilos clorados, cloruro de polivinilo y algunos retardantes de llama bromados, así como amianto y arsénico (Cui, 2006). Por otro lado, los dispositivos electrónicos contienen también materiales de alto valor, como oro, paladio, cobre y plásticos. Además, algunos aparatos obsoletos, que siguen siendo funcionales, pueden ser reutilizados (o parte de sus componentes).

En el contexto del reciclado de equipos electrónicos, las economías de escala se definen como la disponibilidad de grandes volúmenes de equipos a reciclar en una cierta área geográfica, con el objetivo de que las actividades de recogida, transporte y procesamiento sean rentables. Las economías de escala son importantes en la logística de recogida y procesamiento de equipos electrónicos, debido a varias razones:

- Sin la disponibilidad de grandes volúmenes de equipos a reciclar, los costos de recogida y transporte pueden ser muy altos para justificar la inversión. El impacto medioambiental asociado al transporte (uso de combustibles y material) tampoco se puede justificar si no se compensa con un gran volumen de reciclado.
- No se puede justificar el costo de grandes inversiones para las plantas de reciclado si no hay gran cantidad de equipos a tratar.
- Sin la disponibilidad de grandes volúmenes de equipos a reciclar podría no utilizarse toda la capacidad de las líneas de procesamiento y de las tecnologías disponibles, lo que llevaría a desventajas económicas (el coste del procesamiento por kilo sería demasiado alto, lo obtenido del material secundario podría ser insuficiente), pero también ecológicas (el impacto medioambiental por kilo procesado puede ser mayor). Un proceso de separación comprobado en laboratorio puede ser correcto, pero en producción industrial pueden darse costes desproporcionados debido al hecho de que hay poca disponibilidad de equipos a reciclar.

## 1.2. Aspectos legislativos del reciclado

En la organización de las plantas de reciclado también se debe tener en cuenta la actual legislación de aplicación nacional y europea. La Comisión Europea ha adoptado una Directiva relativa a los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, RAEE, (*Directives 2002/96/EC, 2003/108/EC on Waste from Electrical and Electronic Equipment, WEEE*). Tal como refleja el Institute for Prospective Technological Studies (IPTS, 2006), hay diversas razones para adoptar esta medida:

- La contaminación causada por la gestión de los RAEE es de naturaleza transfronteriza (especialmente con la contaminación del aire o agua resultante de la incineración, vertido o reciclaje inadecuado)
- El reciclaje de varias partes o componentes de los RAEE sólo es económicamente viable si se procesan cantidades significativas de material.
- Las restricciones al uso de sustancias peligrosas en los aparatos eléctricos y electrónicos conllevan varios problemas para el mercado interno, y sólo pueden ser atacados a nivel de la Comunidad.

La Directiva clasifica los aparatos eléctrico / electrónicos en 10 categorías: grandes y pequeños

electrodomésticos, aparatos de telecomunicación y computación, aparatos de consumo (radio, TVs, vídeo), aparatos ligeros (luminarias), herramientas eléctricas, juguetes, aparatos médicos e instrumentos de medida.

La Directiva exige a los Estados Miembros que establezcan esquemas de recogida de residuos separados, permitiendo a los distribuidores y usuarios finales devolver gratuitamente los RAEE procedentes de hogares particulares. Se establece que para el 31 de diciembre de 2006 se deben recoger por medios selectivos un promedio de 4 Kg/habitante de aparatos eléctricos y electrónicos procedentes de hogares familiares. El ratio de componente, material y sustancias reutilizadas y recicladas debe alcanzar un mínimo del 50-80%. De forma detallada, en la tabla siguiente se indican los objetivos según tipo de aparato. Se entiende por “Recuperación” a la reutilización más el reciclado (incluyendo incineración con recuperación de energía). Sin embargo, recientes revisiones de la Directiva sobre reciclado apuntan a orientar los objetivos más bien a materiales, y no a productos como se había planificado inicialmente (Martin, 2006).

## **2. Automatización de operaciones de desensamblado**

Los residuos de aparatos electrónicos son diversos y muy complejos en términos de estructura y materiales componentes, así como en su proceso de ensamblado. La caracterización de la basura electrónica es de vital importancia para desarrollar un sistema de reciclado compatible con el medio ambiente y económicamente viable. El desmontaje selectivo, orientado a filtrar los materiales peligrosos y los de valor económico, se convierte en un proceso imprescindible. De ello se deduce que la planificación del proceso de desensamblado y la innovación en las instalaciones son las áreas donde más se está investigando en nuevas tecnologías y métodos. Resulta muy costoso realizar el desmontaje manual, sobre todo teniendo en cuenta que inicialmente únicamente se podían obtener materiales de bajo coste como metales y cobre. Por ello, interesa desarrollar métodos mecánicos, automáticos o semi-automáticos, para mejorar el reciclado, ya que se lograría una casi completa recuperación de todos los materiales, incluidos los plásticos.

La aplicación de las Directivas sobre reciclado ha originado la figura de la “responsabilidad del fabricante” de aparatos electrónicos, que debe hacerse cargo de los productos en su fin de vida. Esto implica definir estrategias de recogida (logística inversa) y tratamiento, buscando los métodos óptimos entre las opciones existentes. Sin embargo, las prioridades que se deben tener en cuenta en los procesos de reciclado (desmontaje) cuando se aplican los métodos de planificación son diferentes a las utilizadas habitualmente para la fabricación (montaje) de productos. En este último caso lo normal es planificar cuidadosamente las secuencias de tareas para completar una pieza a tiempo. En el mundo del reciclado, en cambio, no hay fechas de entrega y el tiempo de desmontaje tiene un interés relativo. Es de mayor importancia disponer de suficiente espacio de almacenamiento para recibir cargamentos de productos a desmontar, a menudo de llegada imprevisible. El objetivo es vaciar el área de almacenamiento de recepción, para tenerla disponible para futuras llegadas de material a reciclar. Los parámetros de interés son el tiempo de desmontaje de los equipos, su tamaño, el valor final de los componentes que se obtienen, etc.

Siguiendo esta lógica se han propuesto varias alternativas de planificación de operaciones de desmontaje, como Stuart (2003), que ha desarrollado un método para optimizar el flujo de materiales desde el almacén de recepción a la zona de desmontaje. Krikke (1999) propone modelos de optimización para reducir los costes del reciclado de monitores de ordenador, mediante un procedimiento aplicado a dos niveles, *producto* y *grupo de productos*, aplicando un

modelo de programación estocástica. Posteriormente este método fue generalizado por Teunter (2005), que propuso un algoritmo de programación dinámica para permitir varios procesos de desensamblado, incluso parciales.

Gerner (2005) sugiere un método para reciclado basado en dos pasos: en el primero se determinan las secuencias automáticas de desensamblado (en un entorno virtual), y posteriormente se identifican todas las actividades posibles según el método de “aproximación a objetivo”, transformando un problema lineal multi-objetivo a una programación lineal. Esta solución de utilizar la programación lineal también está presente en la propuesta de Lambert (2002) para obtener la secuencia óptima de desensamblado.

### 3. Metodología

Con el objeto de conseguir una optimización del reciclado de los televisores y monitores se propone una metodología a aplicar en el diseño y montaje de líneas de desensamblado y separación, formadas por varias estaciones. Debido a que el conjunto de aparatos electrónicos es muy heterogéneo (diferentes productos, orígenes, estado de conservación, año de construcción, tamaño y forma), el método propuesto sirve para lograr un sistema lo suficientemente flexible tanto en el hardware (dispositivos de manipulación, transporte, herramientas, garras, sistemas de fijación, sistemas de identificación, etc.) como en el software (control, procesado de imágenes, sistemas de ayuda al reconocimiento). También se busca un correcto dimensionado de la planta de tratamiento, adecuado a las características especiales de este tipo de proceso.

En el gráfico siguiente (Figura 1) se muestra un esquema con la metodología propuesta:

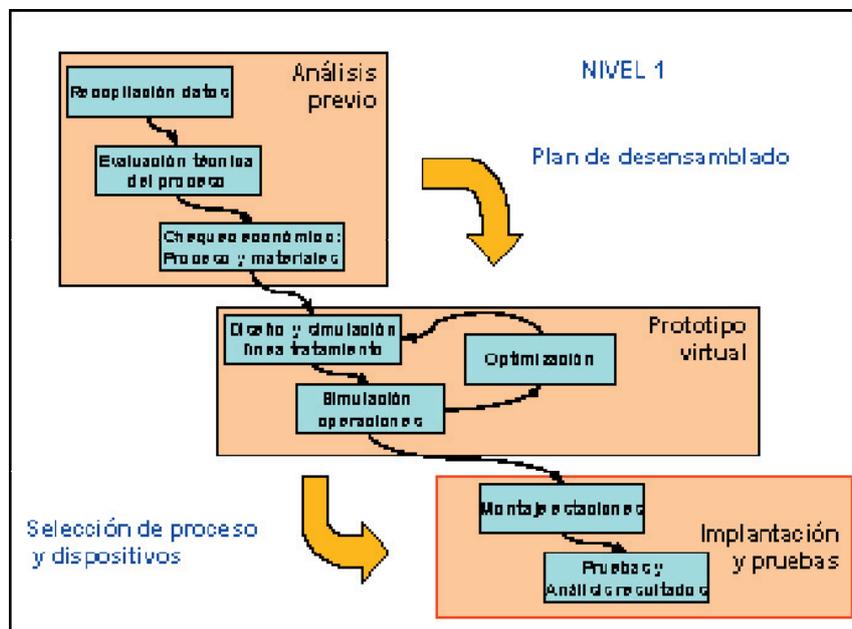


Figura 1. Esquema general de la metodología de desensamblado propuesta

Las sucesivas fases contempladas en la metodología se inician con un Análisis Previo, consistente en una recopilación de datos y un estudio de los aparatos a reciclar, para agruparlos según tratamientos similares y verificar inicialmente su viabilidad técnica y económica. Esta viabilidad técnica se basa en gran medida en pruebas anteriores de métodos de separación, por lo que se parte de un cierto conocimiento y experiencia previa sobre la forma de realizar dichas operaciones. También se realiza un estudio económico previo con el fin de valorar las

prioridades en la recuperación de materiales según su valor en el mercado. Una imagen gráfica de esta fase, en la cual también influye el cumplimiento legal de las Directivas de reciclado en vigor, se muestra en la figura 2.

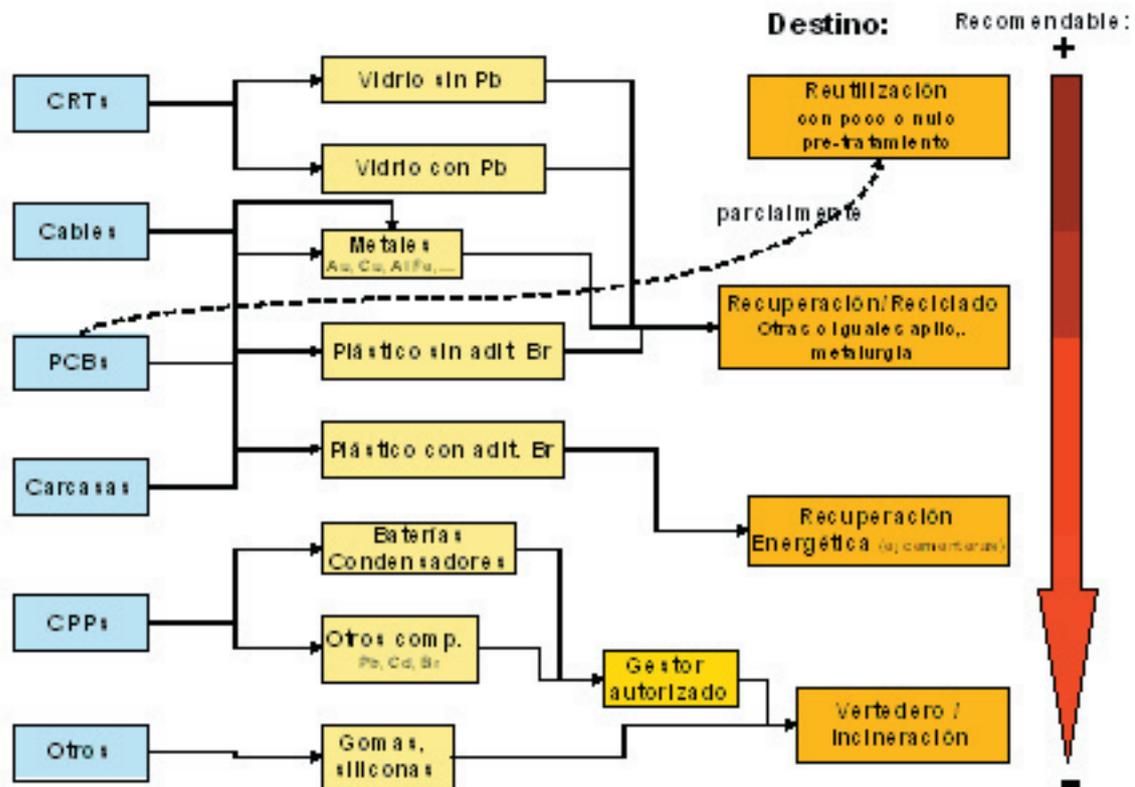


Figura 2. Esquema general de componentes y destino

La mayor proporción, en peso, del flujo de materiales proveniente de televisiones o monitores de ordenador está formado por el vidrio del tubo de rayos catódicos (TRC). Este vidrio puede dirigirse hacia un mercado secundario, y si contiene metales pesados u otros contaminantes permite la fundición del vidrio a temperaturas más bajas, por lo que es bien recibido por fabricantes de vidrio de menor calidad. Las fracciones metálicas constituyen el segundo grupo de componentes, siendo los principales el hierro, aluminio, cobre y metales preciosos. El destino más probable es la fundición. Entre los metales no férricos se obtiene plomo, zinc, estaño y otros. Los plásticos constituyen el tercer grupo de materiales. Entre ellos los más problemáticos dentro de los componentes potencialmente peligrosos (CPPs), a la hora de definir un tratamiento posterior son los plásticos halogenados, debido a su toxicidad, que se utilizan como retardantes a la llama y están incorporados de forma habitual en los productos electrónicos de consumo.

Como resultado de este Análisis Previo se obtiene un “Plan de Desensamblado” (Figura 3), en el cual se refleja la secuencia propuesta de desmontaje de componentes.

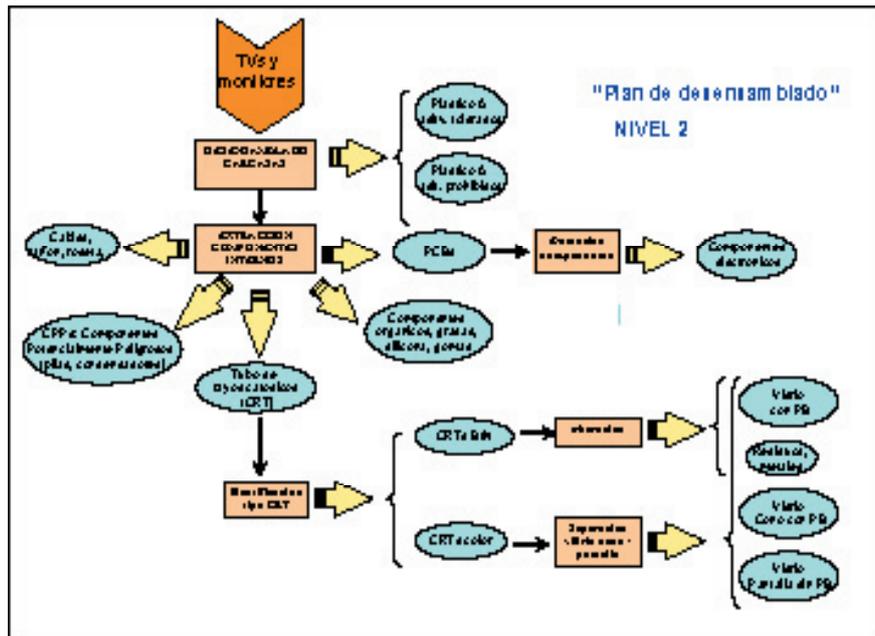


Figura 3. Esquema general del Plan de Desensamblado

A continuación se desarrollan las fases de simulación y optimización de las operaciones de desensamblado. El proceso planteado en las fases previas se traduce en un “Prototipo Virtual” (Figura 4), donde las operaciones están representadas por modelos y su funcionamiento se analiza mediante técnicas de simulación. El objetivo es estudiar diferentes alternativas de distribución en planta de operaciones, así como el detalle técnico de éstas, teniendo siempre presente los datos, limitaciones y conclusiones obtenidos en las fases anteriores del “Análisis Previo”. Como resultado se obtiene un proceso de reciclaje optimizado y acorde con los objetivos buscados.

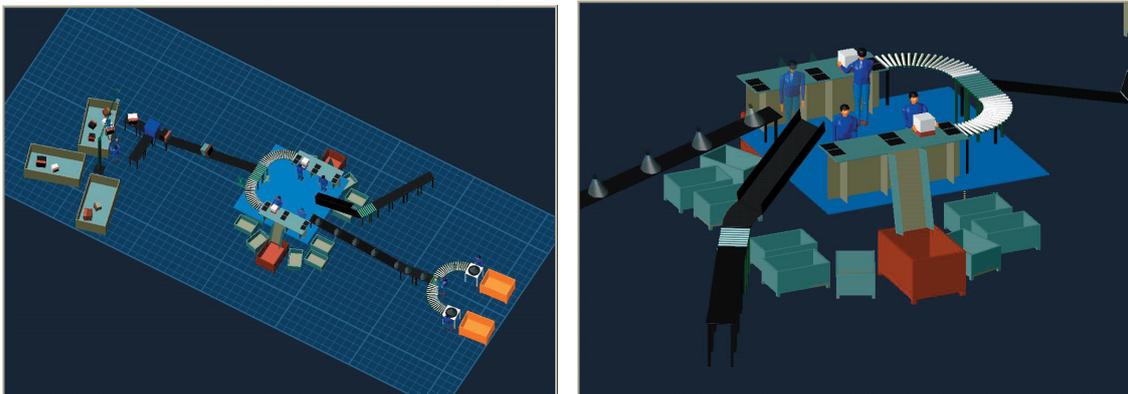


Figura 4. Simulación de la línea de desensamblado

Una vez seleccionada la secuencia optimizada, los dispositivos y operaciones más adecuadas, se procede a configurar la planta de reciclado de acuerdo al proceso seleccionado. En sucesivas estaciones se realiza el desmontaje de los diferentes componentes: carcasas externas, elementos internos, cables, tarjetas de circuitos impresos y pantallas de vidrio. Estas estaciones (manuales o semi-automáticas) pueden formar una línea secuencial o varias líneas paralelas dependiendo del método de desensamblado y aprovechamiento futuro de los componentes obtenidos. En esta fase se utilizan los resultados de las técnicas de simulación para la optimización de la línea. Una vez separados los primeros componentes se estudia su posible reutilización en algunos casos, mientras que en otros se realizan sucesivas operaciones de separación para obtener materiales de mayor valor, como es el caso de los vidrios componentes de las pantallas, diferentes tipos de

plástico de las carcasas, metales, etc.

Las últimas fases consisten en pruebas de funcionamiento del proceso planteado, y una evaluación técnica y económica de las soluciones adoptadas en cada fase del desmontaje, fragmentación y limpieza. Para ello se utilizan diferentes tipos de televisores y monitores con el fin de evaluar las etapas de identificación, etiquetado, desensamblado, realizando análisis relativos a: tiempo de ciclo, estimación del número de operarios necesarios, capacidades necesarias de almacenes (entrada, salida e intermedios), nivel de automatización conseguido, fallos que se puedan presentar en los diferentes tratamientos, problemas que se puedan dar en las operaciones debido a las diferentes características de los modelos de televisiones y monitores, estimación de la producción, prestaciones y rendimiento esperado, etc.

#### **4. Implantación práctica y resultados**

Se ha aplicado la metodología propuesta a una línea de reciclado de televisores y monitores de ordenador (Figura 5), compuesta por las siguientes estaciones:

- Estación de identificación y clasificación de TVs y monitores.
- Módulo de desensamblado, donde se obtienen:
  - Carcasas no recuperables (con aditivos prohibidos, madera, etc.)
  - Carcasas de plástico recuperable
  - Tarjetas de circuitos impresos
  - Metales
  - Componentes orgánicos
  - Componentes potencialmente peligrosos (CPPs)
  - Tubos de rayos catódicos (TRCs)
- Las carcasas recuperables pasan a una línea secundaria para la separación de los diferentes tipos de plástico y su posterior triturado.
- Los TRCs pasan a una línea de tratamiento automatizada donde se recuperarán diferentes tipos de vidrio y metales. Entre los TRCs se distinguen aquellos que contienen plomo o lámina de plástico/silicona, los cuales no se van a separar en sus dos componentes cono + pantalla; y el resto, con los cuales se realiza la operación de separar limpiamente el cono de la pantalla. Posteriormente se limpiarán los recubrimientos de la parte interior del cono y pantalla.



**Figura 5.** Detalle de la operación de corte robotizado del TRC y línea de salida de material de TRCs

Entre las ventajas que presenta la metodología propuesta cabe destacar el alto grado de separación de las diferentes fracciones de los materiales para reciclar, que permite obtener corrientes de alto valor añadido y alta aplicabilidad (tales como los vidrios libres de plomo o los plásticos de las carcasas), mientras que en las corrientes residuales esta pureza permite reducir las implicaciones ambientales de los diferentes tratamientos y buscar siempre la alternativa más adecuada.

### Referencias

Andreola, F., Barbieri, L., Corradi, A., Lancelloti, I. (2007). CRT glass state of art. A case study: Recycling in ceramic glazes. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 27, pp. 1623 – 1629

Cui, J., Forssberg, E. (2006). Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery. *Waste Management*.

Gerner, S., Kobeissi, A., David, B., Binder, Z., Descotes-Genon, B. (2005). Integrated approach for disassembly processes generation and recycling evaluation of an end-of-life product. *International Journal of Production Research*, Vol. 43, pp. 195 – 222.

IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). (2006 ). Implementation of the Waste Electric and Electronic Equipment Directive in the EU. European Commission – Directorate-General Joint Research Centre.

Krikke, H.R., Van Harten, A., Schuur, P.C. (1999). Business case Roteb: recovery strategies for monitors. *Computers & Industrial Engineering*, 36, pp. 739-759.

Lambert, A. (2002). Determining optimum disassembly sequence in electronic equipment. *Computers & Industrial Engineering*, pp. 553-575.

Martin, I. (2006). Europe en route to a 'recycling society'. *Recycling International*, pp. 38-43.

Stuart, J.A., Christina, V. (2003). New metrics and scheduling rules for disassembly and bulk recycling. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*.

Teunter, R. H., (2006). Determining optimal disassembly and recovery strategies. *International Journal of Management Science*, pp. 533-537.