

# Nuevo método para el diseño optimizado de plantas semi-automatizadas de tratamiento de RAEE: Caso de TV y monitores



Arantxa Rentería-Bilbao\* Lda. Informática  
Esther Álvarez-de los Mozos\*\* Dra. Informática  
Jose Pérez-Larrazábal\* Ldo. CC. Físicas e Ingeniero Electrónico  
Dionisio del Pozo-Rojo\* Dr. Ingeniería Industrial

\* FUNDACIÓN ROBOTIKER, Parque Tecnológico, Ed. 202 - 48170 Zamudio ( Vizcaya).  
Tfno: +34 946 002266. arantxa@robotiker.es, jperez@robotiker.es,  
dioni@robotiker.es

\*\* UNIVERSIDAD DE DEUSTO, Facultad de Ingeniería, Avda. de las Universidades, 24.  
48014 Bilbao. Tfno: +34 944 139064. esther.alvarez@deusto.es

Recibido: 09/04/2010 • Aceptado: 10/05/2010

*New method for the optimized design of semi-automated workcells for WEEE recycling: TV and monitors case*

## ABSTRACT

- Waste coming from electric and electronic appliances is an increasing environmental problem. Their present recycling and reuse ratio are far from the targets defined in the European Directive for "Waste from Electrical and Electronic Equipment", WEEE, which tries to reduce the waste going to landfills. This research proposes a new method for selection and design of automated and semi-automated operations of a recycling plant for electronic appliances. An improved recycling of the obtained materials is expected, with a more profitable process for small or medium enterprises. An example of its applicability is proposed, focused on the separation of the materials of TVs and monitors. Because of the difficult reuse of glass coming from the cathode ray tubes, a specific solution is proposed. Economic, legal and technical issues concerning the level of the automation applied to a recycling line are studied, covering from the full automation of all the disassembling tasks, to a manual dismantling. This know-how is used by the proposed method as the input to a decision support system for optimization purposes. The parameters used by this system are: previous expertise of recycling companies, WEEE regulations and economic aspects (materials pricing, recycling costs, etc.). The simulation of the solution has been analyzed, with an economical assessment of the recycling process, to show the feasibility of the method. Finally the work is complemented with a real setting up of the proposed design in a recycling company, and with a new application of the obtained glass in a secondary market related to construction sector.
- **Key words:** optimization, automation, simulation, disassembly, recycling, waste, reuse.

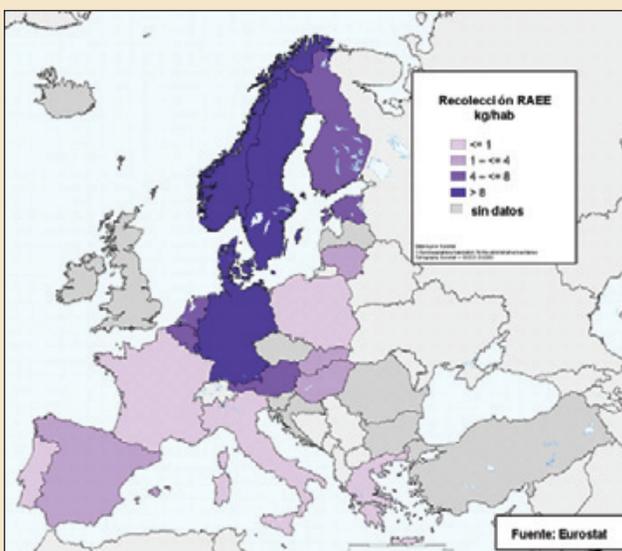
## RESUMEN

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos se están convirtiendo en un problema medioambiental cuando son desechados. Su reciclado y reutilización, separando materiales y componentes, está todavía lejos de los objetivos marcados por la directiva europea sobre "Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos" (RAEE), que también establece una normativa para reducir los residuos que acaban en vertederos. Para optimizar el proceso de reciclado se propone un nuevo método para el diseño de plantas automatizadas y semi-automatizadas de tratamiento de aparatos electrónicos. Los objetivos son un mejor reciclado de los materiales obtenidos y un proceso más rentable para las pequeñas y medianas empresas recicladoras. Se aplica el método propuesto al caso del reciclado de

materiales provenientes de televisores y monitores, en concreto al reciclado del vidrio proveniente de los tubos de rayos catódicos. Además de los aspectos normativos y económicos, se han estudiado los parámetros técnicos relacionados con el nivel de automatización a aplicar, desde la automatización completa hasta la opción de operaciones manuales para la separación. El método propuesto utiliza este conocimiento como dato de entrada a una simulación gráfica y a un sistema de ayuda a la decisión para optimizar el diseño de la instalación. Otros parámetros utilizados por este sistema son la experiencia previa de las empresas de reciclado, las regulaciones de la normativa RAEE y aspectos económicos (precio de venta de los materiales obtenidos, costes de reciclado, etc.). El método propuesto se ha validado por medio de análisis técnicos y económicos, incluyendo su

## CUMPLIMIENTO DIRECTIVA RAEE

La directiva sobre RAEE 2002/96/EC es un elemento muy importante en la política ambiental de la Unión Europea. Uno de sus objetivos es promover modificaciones en el diseño de productos que faciliten su futuro desensamblado, recuperación y reciclado, reducir la presencia de sustancias tóxicas en los aparatos eléctricos y electrónicos, y controlar la forma en que se tratan en su fin de vida. La directiva relativa a los RAEE 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 estableció que para el 31 de diciembre de 2006 se deberían 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%.

La directiva (y su transposición a legislación nacional) está actualmente implementándose por los Estados Miembros. La Fig. 1 muestra los diferentes ratios de recogida en los países.

Fig. 1: Ratios de recolección de RAEE por países

Tal como contemplaba la propia directiva, se ha llevado a cabo una revisión de la misma (en 2007-2008). El desglose de los aparatos recogidos, clasificados en las categorías y subcategorías descritas en la directiva, se muestra en la Fig. 2 .

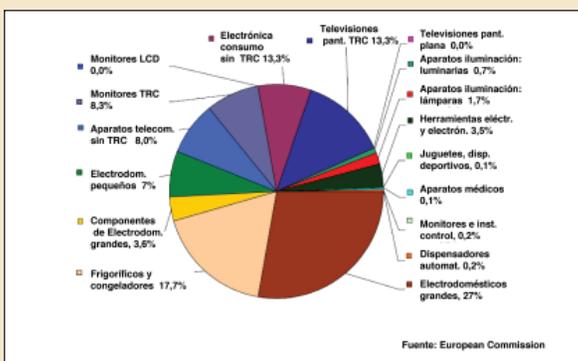


Fig. 2: Desglose de la recolección de RAEE según categorías de aparatos

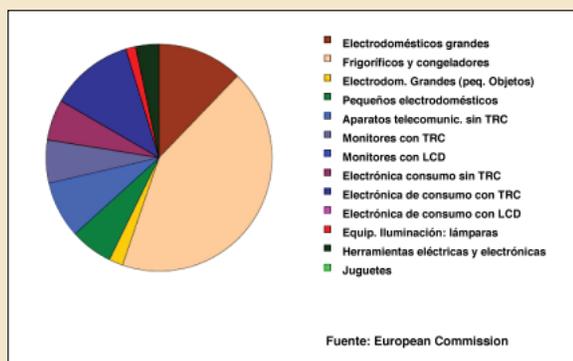


Fig. 3: Contribución de cada categoría de RAEE al impacto ambiental

En la Fig.3 se puede analizar la contribución al impacto ambiental que tiene cada categoría de aparatos.

Una de las conclusiones obtenidas en la revisión de la directiva es que la recogida y tratamiento de RAEE se ha basado en su composición en materiales (no según el uso del aparato, tal como contemplaba la normativa). La misma descripción de las categorías ha sido interpretada de forma diferente en los países, con lo que las estadísticas de recogida son difíciles de comparar. Como resultado de esta revisión, los nuevos objetivos se centran más bien en materiales, y no en productos, como se había planificado inicialmente. Los nuevos objetivos de reciclado (fijados en diciembre de 2008) han cambiado de los 4 Kg./hab-año, a lograr el 65% del peso medio de los productos puestos en el mercado en los dos años anteriores.

implantación práctica en una empresa recicladora. Por último, se ha propuesto una nueva aplicación del vidrio obtenido en un mercado secundario del sector de la construcción.

**Palabras clave:** optimización, simulación, desensamblado, reciclado, reutilización.

## 1. EL PROBLEMA DEL RECICLADO DE APARATOS ELECTRÓNICOS

Los residuos provenientes de los aparatos eléctricos y electrónicos en su fin de vida (RAEE) se componen de un rango creciente de productos, desde grandes electrodomésticos (frigoríficos, ordenadores, lavadoras, equipos de música, etc.) a pequeños dispositivos como teléfonos móviles, reproductores de música y agendas personales. Los usuarios ya no llevan un aparato estropeado a un taller de reparación porque su sustitución por un aparato nuevo es a menudo más barata que reparar o sustituir el componente averiado. Nuestro comportamiento actual como consumidores de productos tecnológicos tiende a la adquisición de dispositivos cada vez más baratos, rápidos y pequeños, con cortos períodos de renovación de los mismos. Las consecuencias son la cantidad creciente de residuos electrónicos y el problema medioambiental que se genera (Rahimifard, 2008). Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Europa sufren un incremento anual del 3% al 5%, 3 veces más rápido que el flujo de residuos “tradicional” (papel, basura orgánica, vidrio de envases, etc.). (Hischier et al., 2005).

### 1.1. MATERIALES RECICLABLES

Tradicionalmente, estos aparatos eran triturados en su totalidad y se obtenía una mezcla de materiales heterogéneos en forma de gránulos de mayor o menor tamaño. Esta mezcla necesitaba ser posteriormente clasificada por diferentes métodos, generalmente mecánicos o químicos, para obtener un mejor precio de venta de cada material por separado. Últimamente se han desarrollado métodos basados en análisis por visión artificial basados en imágenes hiperespectrales, que permiten diferenciar materiales que hasta ahora eran indistinguibles por técnicas tradicionales. Un ejemplo práctico de esta tecnología ha sido publicado recientemente en esta revista (Picón et al., 2010).

Pero las televisiones, ordenadores y otros residuos electrónicos, incluyendo las tarjetas de circuito impreso, contienen materiales y componentes de valor, que pueden ser reciclados y reutilizados sin llegar a la fase de trituración, siendo necesaria una extracción o separación más controlada. Por otro lado, existen también sustancias tóxicas y peligrosas que deben ser identificadas y separadas. La Tabla 1 muestra los materiales (valiosos y peligrosos) recuperados en un ordenador de sobremesa con un peso promedio de 27 Kg.

Material	Contenido (% del peso total)	Peso del material (kg)	Localización
Vidrio	24,88	6,80	Tubo de rayos Catódicos (TRC)
Plástico	22,99	6,26	Carcasa, cable
Hierro	20,47	5,58	Carcasa, TRC, PCBs
Aluminio	14,17	3,86	Carcasa, TRC, PCBs, conectores
Cobre	6,92	1,91	TRC, PCBs, conectores
Plomo	6,29	1,72	Vidrio de cono en el TRC
Zinc	2,20	0,60	PCBs, TRC
Estaño	1,00	0,27	PCBs, TRC
Níquel	0,85	0,23	Carcasa, TRC, PCBs
Bario	0,03	< 0,1	Vidrio de pantalla en el TRC
Manganeso	0,03	< 0,1	Carcasa, TRC, PCBs
Plata	0,02	< 0,1	PCBs, conectores
Otros materiales	0,15	0,27	

Tabla 1: Materiales reciclables recuperados en un ordenador de sobremesa de 27 Kg. (Swiss e-waste guide, 2008)

El vidrio representa la mayor proporción de material (25% en peso), en los aparatos de televisión y monitores que se están reciclando en la actualidad, y es el mayor componente de los tubos de rayos catódicos (TRC), según se ve en la Fig. 1. Generalmente es necesario separar las dos partes de cono y pantalla del TRC, ya que las dos fracciones se pueden reutilizar de forma distinta debido a su diferente contenido de plomo y otros materiales, lo cual restringe sus futuras aplicaciones.



Vidrio de cono

Mixto metal -vidrio

Vidrio de pantalla

Fig. 1: Tubo de rayos catódicos (TRC), con la parte de cono, hecho de vidrio plomado (24% de plomo), y vidrio de pantalla (con un máximo de 2% de plomo)

Las fracciones metálicas (hierro, aluminio, cobre...) forman el segundo grupo de componentes. Entre los metales no férricos se obtienen plomo, zinc y estaño. Los plásticos son el tercer grupo, pueden incluir componentes potencialmente peligrosos (CPP), mayormente plásticos halogenados utilizados como retardantes a la llama. Otros materiales son gomas, siliconas y, a veces, madera. La Fig. 2 muestra los materiales obtenidos y su potencial destino.

debe ser del 65% y el de recuperación o valorización, del 75%.

### 1.2. DIFICULTADES TÉCNICAS DEL DESENSAMBLADO

En los esquemas “tradicionales” de fabricación, el objetivo principal es completar un producto a tiempo y dentro de costes. Pero las prioridades del mundo del

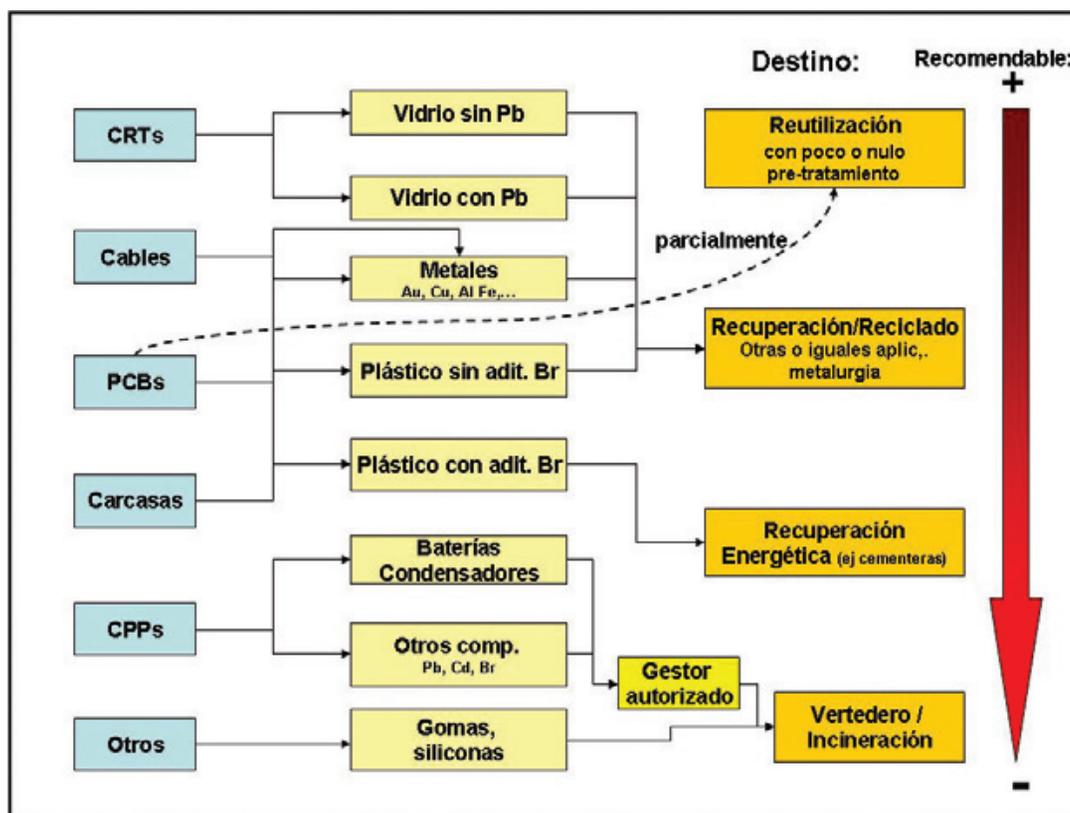


Fig. 2: Materiales obtenidos de la separación de residuos electrónicos, y posible destino por orden de interés

Las cantidades de RAEE recogidos cambian continuamente (debido a la inexistencia de incentivos en la mayoría de las ocasiones, a nuestra falta de concienciación o a los costes elevados), por lo que los sistemas de reciclado están sometidos a la incertidumbre de los flujos de retorno (recuperación de aparatos en su fin de vida). Las autoridades de la Unión Europea reconocieron la magnitud del problema y aprobaron dos directivas relacionadas con este tema: la directiva 2002/96/EC para los RAEE y la directiva 2002/95/EC para la restricción del uso de sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Según la primera de ellas, el ratio de componentes, materiales y sustancias reutilizadas y recicladas debe alcanzar un mínimo del 50-80%, dependiendo del tipo de aparato a reciclar, habiéndose establecido diez categorías de productos. Para el caso de televisores y monitores el ratio de reciclado y reutilización

reciclado son diferentes: no existe una fecha de entrega, el objetivo no es la fecha en que el “producto” final (materia prima o componentes desensamblados) se extrae del aparato desechado. En este caso el reciclador busca maximizar los ingresos por la venta de los materiales recuperados, y maximizar el espacio disponible en los almacenes de entrada, donde se reciben los residuos (parte de los ingresos provienen de la recepción de esos residuos).

Se han sugerido soluciones para resolver este problema y maximizar el ratio de reciclado, dando prioridades a diferentes tipos de residuos: procesar productos que se desensamblan rápidamente, procesar primero los aparatos más voluminosos (ocupan mucho espacio en los almacenes de entrada), o reciclar los aparatos más valiosos. Stuart y Christina (2003) han desarrollado un método para optimizar el flujo de materiales, desde la recepción hasta el área de separación. Krikke et al. (1999) han sugerido modelos de optimización para reducir los costes de reciclado para monitores, con un procedimiento a dos niveles (producto y grupo de productos) utilizando una programación estocástica. Posteriormente

esta propuesta ha sido generalizada por Teunter (2006), quien propuso un algoritmo de programación dinámica para permitir varios procesos de separación parciales. Gerner et al. (2005) han sugerido un método en dos pasos: el primero determina las secuencias automáticas de desensamblado (en un entorno virtual), en la segunda fase se identifican todas las posibles actividades.

La automatización del reciclado de residuos de aparatos electrónicos es complicada debido a la gran variedad de equipos a tratar. La Fig. 3 muestra diferentes métodos de manipulación de componentes utilizando sistemas robotizados para la manipulación (garras y herramientas de sujeción por vacío).



Fig. 3: Manipulación robotizada de componentes de aparatos electrónicos: garras (izda.) y ventosa de vacío (dcha.)

Los contenidos habituales de los residuos electrónicos incluyen metales y una larga variedad de resinas y plásticos, que pueden estar recubiertas, mezcladas con aditivos o contener retardantes a la llama (Cui and Forssberg, 2006). Se han propuesto algunas soluciones automatizadas para separar la mezcla de plásticos y otros elementos, por ejemplo análisis de imagen por medio de visión artificial (Renteria et al., 2009; Picón et al., 2010), o separación por densidades (Gent, 2009). Después de una correcta separación, sus propiedades (físicas y mecánicas) deben ser iguales a las de las materias primas equivalentes, si se pretende utilizarlas en productos de similar valor. La Fig. 4 muestra diferentes soluciones automatizadas para la separación de componentes.

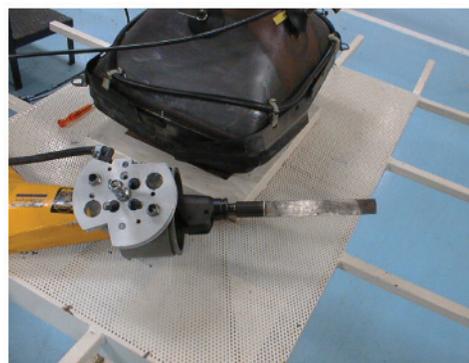
Para aumentar la tasa de reciclado de estos aparatos se pueden citar las siguientes recomendaciones (IHOBE, 2004; IPTS, 2006; Martin, 2006):

1. Aplicación de técnicas de eco-diseño y análisis del ciclo de vida para productos y componentes.
2. Nuevas tecnologías para identificación y operaciones de desensamblado. Aplicación de la simulación y pruebas en plantas piloto, (Renteria et al., 2007), y exportación de resultados a gran escala.
3. Modelos económicos y financieros más precisos. Hasta ahora, el reciclaje de residuos electrónicos se ha enfocado principalmente a la recuperación de metales preciosos. Sin embargo, es importante tener en cuenta los residuos que contienen otros metales de cierto valor.

Existe una necesidad, no cubierta, de una mejor separación y tratamiento más eficiente de los materiales y no sólo para cumplir la directiva RAEE. También es necesario poder acceder a una reutilización de éstos de forma que mejore la rentabilidad de las instalaciones de reciclaje y solucione los problemas técnicos existentes (Kang y Schowning, 2006). Actualmente la separación de componentes y materiales de los aparatos electrónicos no da como resultado una correcta separación de éstos, dada la complejidad en la composición interna de estos



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4: Separación de componentes del TRC con disco abrasivo, cincel neumático y tijeras hidráulicas de corte y separación (a, b, c) y extracción de componentes electrónicos en PCB (d)

dispositivos. En consecuencia, no se garantizan unos precios de venta mínimos del material obtenido y, por tanto, un beneficio que justifique el reciclado.

## 2. MÉTODO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECICLADO

Para optimizar el proceso de reciclado de aparatos electrónicos, principalmente televisores y monitores, se propone un nuevo método. Está orientado a instalaciones industriales (con operaciones tanto manuales como automatizadas), aprovechando la experiencia previa de las empresas industriales de reciclado. La Fig. 5 muestra el gráfico con el método propuesto:

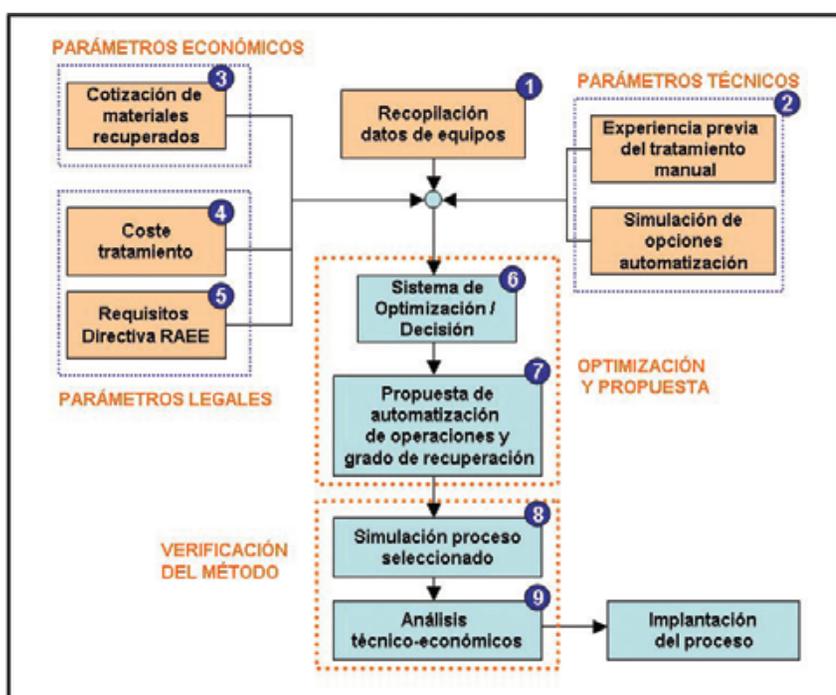


Fig. 5: Método propuesto

El objetivo es optimizar el ratio de reciclado, mejorando las instalaciones (automatizadas o semi-automatizadas) de separación y extracción de materiales y componentes, cubriendo las necesidades expuestas en el apartado anterior, principalmente las relacionadas con:

- Nuevas propuestas de configuración de las

instalaciones de separación, probadas con métodos de simulación y en plantas pilotos, extrapolando los resultados a escala industrial.

- Nuevos análisis económicos, teniendo en cuenta la potencial rentabilidad de materiales no apreciados en el pasado y la flexibilidad de las soluciones automatizadas propuestas.

### 2.1. FASE DE RECOPIACIÓN DE DATOS

La primera fase del método propuesto es un análisis preliminar que incluye (pasos del 1 al 5 indicados en la Fig. 5:

- Recopilación de datos técnicos de los equipos a reciclar.
- Una primera valoración sobre la viabilidad técnica del proceso de reciclado, basada en técnicas de simulación y en la experiencia previa del reciclador.
- Obtención de los precios de mercado de los materiales a recuperar.
- Cálculo del coste estándar de tratamiento en las operaciones de reciclado, dependiendo de la forma en que se realizan las operaciones: completamente automatizada, semi-automatizada o completamente manual (este coste se obtiene de los análisis de la simulación).
- Restricciones impuestas por la directiva RAEE sobre reciclado de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, que especifica los ratios mínimos de reciclado que se deben alcanzar (Unión Europea, 2003).

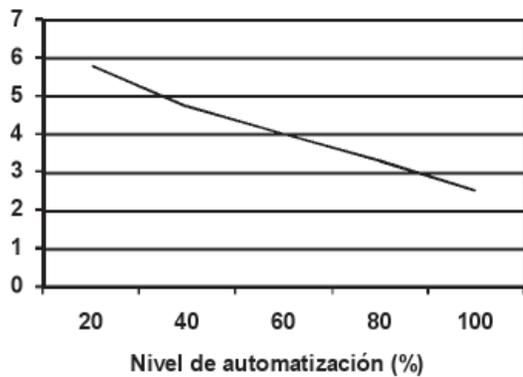
La experiencia previa y los resultados de la simulación (puntos 1, 2, 3 y 4 anteriores) de las alternativas para el diseño de la línea de reciclado son los datos de partida para obtener las correlaciones entre los costes unitarios de tratamiento, grados de separación de materiales obtenidos, y diferentes niveles de automatización de las operaciones. Estas correlaciones se han reflejado en la Tabla 2 y en las gráficas de la Fig. 6. Estos valores se utilizarán posteriormente en la fase de optimización.

Los datos sobre el ratio de automatización incluidos en la Tabla 2 se refieren al porcentaje del tiempo de ciclo del proceso de desensamblado que es realizado con operaciones automatizadas. Los datos de los tiempos de ciclo y coste de tratamiento se obtienen de los estudios de simulación y de

Nivel de automatización (%)	30	40	50	60	70	80	95
Coste tratamiento (euro / unidad)	5,3	4,4	3,9	3,4	3,1	2,9	2,7
Separación de materiales (%)	98	90	84	80	77	70	61

Tabla 2: Correspondencias entre nivel de automatización, coste unitario de tratamiento y grado de separación de los materiales

la experiencia previa del reciclador, mientras que el grado de separación se obtiene por pruebas en laboratorio con instalaciones prototipo.



*GE*: Costes anuales de explotación  
*P*: Producción anual  
 El segundo término de la resta en la ecuación anterior es el “coste unitario de tratamiento”, *TC*, de un aparato electrónico:

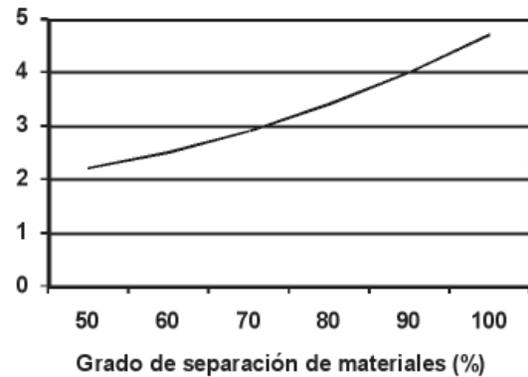


Fig. 6: Correlaciones entre coste de tratamiento, nivel de automatización y grado de separación de materiales

## 2.2. FASE DE OPTIMIZACIÓN Y SUGERENCIA DE CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Con los datos recogidos en la fase anterior, el método aplica un sistema de ayuda a la decisión (Decision Support System, DSS) (paso 6 de la Fig. 5). Se puede definir un DSS como “un programa que ofrece información en un dominio concreto de una aplicación, por medio de modelos de decisión analítica y accesos a bases de datos, para ayudar a la toma de decisiones efectivas en tareas no estructuradas (no programables)” (Klein and Methlie, 1995). Los sistemas de decisión ayudan a encontrar la solución que lleva al mejor resultado (mayor beneficio, resultado, productividad,...) o al menor coste. En general, un modelo de optimización está formado por los tres componentes siguientes:

*Función objetivo* – Fórmula que expresa exactamente lo que queremos optimizar. En modelos orientados a negocios, generalmente será una función del beneficio que debe ser maximizada, o una función de coste que se debe minimizar. En el caso del reciclado, la función objetivo calcula el beneficio de la empresa como una función de los ingresos (por la venta de los materiales obtenidos) y el coste de tratamiento:

$$PF = \sum_{i=1}^5 (M_i \times PR_i) - [(\sum_{j=1}^n AE_j + GE) / P] \quad (1)$$

Siendo:

*PF*: Beneficio

*M<sub>i</sub>*: Cantidad del material *i* obtenido en el proceso de reciclado (*i*=1, 2, 3, 4, 5, ya que la función tiene en cuenta los cinco materiales principales, como ejemplo).

*PR<sub>i</sub>*: Precio de venta del material *i* (*i*=1, 2, 3, 4, 5)

*AE<sub>j</sub>*: Depreciación anual del equipo de desensamblado *j* (*j*=1,..*n*)

*Variables* – Parámetros que están bajo control. El objetivo de la optimización es encontrar los valores de las variables de un modelo que generan el mejor valor para la función objetivo, sujeto a condiciones de limitación que afectan a las variables. En el caso del reciclado las variables se corresponden con las cantidades de materiales a obtener, y el tipo de tratamiento a aplicar (desde completamente automatizado a completamente manual, con sus niveles intermedios), representado por el coste de tratamiento.

$$TC = (\sum_{j=1}^n AE_j + GE) / P \quad (1.1)$$

*Restricciones* – Generalmente existirán algunos límites para los valores que pueden tomar las variables del modelo, al menos un recurso estará limitado (por ejemplo, tiempo, materias primas, presupuesto, etc.). Estos límites se definen mediante fórmulas que son funciones de las variables del modelo y se denominan restricciones. En el caso del reciclado las restricciones expresan las cantidades mínimas de los materiales que es necesario obtener para cumplir la directiva RAEE, junto con otras limitaciones relacionadas con datos técnicos de los aparatos a reciclar. En el ejemplo concreto de este artículo se ha trabajado con los cinco principales materiales presentes en una televisión o monitor: vidrio, plástico, aluminio, hierro y cobre. La fórmula matemática para estas restricciones es:

$$W \geq \sum_{i=1}^5 MX_i \geq \sum_{i=1}^5 M_i \geq \sum_{i=1}^5 MD_i \quad (2)$$

Siendo:

*W*: Peso total medio del aparato electrónico

*MX<sub>i</sub>*: Máxima cantidad del material *i* que se puede obtener

teóricamente con un ratio del 100% de reciclaje ( $i=1, \dots, 5$ )

$M_i$ : Cantidad del material  $i$  obtenido en el proceso de reciclaje. ( $i=1, \dots, 5$ )

$MD_i$ : Mínima cantidad del material  $i$  a obtener para cumplir la directiva WEEE ( $i=1, \dots, 5$ )

Con los parámetros mencionados anteriormente se ha desarrollado un modelo del proceso de reciclado para buscar el máximo beneficio para la empresa recicladora. El programa de ayuda a la decisión que se ha utilizado es el sistema LINGO, concretamente el módulo de Programación Lineal, versión 11.0.0.11. El objetivo ha consistido en la obtención de valores optimizados para los parámetros siguientes:

- La mejor forma de separar y reciclar el aparato, relacionándola con el coste de tratamiento unitario.
- Cantidades optimizadas para cada material a obtener, como resultado del proceso de separación y cumpliendo la directiva.

A partir de la optimización y utilizando los datos de la Tabla 2 y Fig. 6, la metodología propone un nivel específico de automatización para el proceso de reciclado y unas cantidades mínimas de materiales a obtener, con el fin de conseguir el máximo beneficio económico para el reciclador. (paso 7 de la Fig. 5). De esta forma, el grado de separación de cada material se deriva del resultado del método de optimización aplicado, y estos valores sugieren el nivel propuesto de automatización para cada fase de separación.

### 2.3. FASE DE VERIFICACIÓN DEL MÉTODO

Una vez propuesta la estrategia de operaciones más adecuada para la instalación y realizada la simulación de las estaciones previstas (paso 8 de la Fig. 5), llevamos a cabo las pruebas de funcionamiento y una evaluación técnica, económica (paso 9 de la Fig. 5) y medioambiental de la solución adoptada como resultado de la aplicación del método propuesto. Se realizan los siguientes análisis:

- Tiempo de ciclo y estimación del número de operarios necesarios.
- Nivel de automatización conseguido, analizando las operaciones manuales, semi-automáticas o completamente automatizadas.
- Estimación de la producción, prestaciones y rendimiento esperado.

- Evaluación técnica y económica, estimando la inversión necesaria, los costes de explotación y los ingresos.
- Evaluación medioambiental y del cumplimiento de la legislación vigente en materia de objetivos de reciclabilidad.
- Utilización del material obtenido en otras aplicaciones.

## 3. IMPLANTACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO

El método propuesto se ha aplicado en la definición e implementación de una línea de reciclado para aparatos de televisión y monitores de ordenador. El objetivo del sistema es lograr el mayor beneficio económico con la venta de materiales contenidos en los televisores y monitores. Además, en el caso estudiado existe un interés especial en la recuperación del vidrio de los tubos de rayos catódicos. El vidrio y los plásticos, al contrario que el hierro, cobre y aluminio, son materiales difíciles de extraer del aparato y su utilización en nuevas aplicaciones no está del todo conseguida. Hay experiencias en el aprovechamiento del vidrio triturado para la elaboración de cementos Portland (Shi and Zheng, 2007), aunque sigue habiendo problemas con la aparición de grietas y problemas de expansión, causados por los agregados del vidrio. Para este caso práctico se ha identificado como usuario potencial del vidrio obtenido a fabricante de azulejos vidriados, por lo que la línea de reciclado se ha diseñado y optimizado teniendo en cuenta sus requisitos de fabricación.

### 3.1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA

Siguiendo las fases propuestas en el método, primero se han obtenido los datos reales de producción con métodos tradicionales de una empresa de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos. Estos valores se muestran en la Tabla 3, e incluyen cantidades máximas a obtener de materiales con un reciclado teórico del 100%, las cantidades mínimas para cumplir los objetivos de la directiva RAEE y los precios de mercado de los materiales. Para simplificar el ejemplo práctico se han utilizado los 5 materiales con mayor presencia en peso en un televisor o monitor. Las filas 1 y 2 muestran los valores de las restricciones utilizadas en la ecuación (2), mientras que los valores de la fila 3 se incluyen en el cálculo de la ecuación (1). Estos datos de la Tabla 3

Datos de entrada al modelo de optimización	Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre
Cantidades máximas de materiales que pueden ser obtenidas teóricamente con un ratio del 100% de reciclado (kg / unidad)	9,5	3,1	1,6	0,04	0,8
Cantidades mínimas de materiales que deberían ser recuperadas para cumplir la directiva RAEE (kg / unidad)	7,1	2,3	1,2	0,03	0,6
Precios de mercado de los materiales (€ / kg)	0,12	0,26	0,32	1,69	4,84

Tabla 3: Datos técnicos relacionados con los materiales presentes en un aparato con un peso medio de 17 Kg.

son los parámetros de entrada para la función objetivo y restricciones del modelo de LINGO. Pueden ser introducidos directamente en el programa o utilizar una hoja de cálculo como fichero de datos de entrada.

### 3.2. FASE DE OPTIMIZACIÓN Y SUGERENCIA DE CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN

Se ha creado un modelo de la línea de reciclado y sus características utilizando el programa LINGO. Aunque en este caso se ha trabajado con los cinco materiales de mayor presencia en el televisor, el modelo propuesto es de aplicación general. Uniendo esta característica a la potencia del programa LINGO, se podría realizar la optimización de la instalación incluyendo tantos materiales como interese en cada caso concreto donde se aplique el modelo. La función objetivo de este modelo (ecuación 1) es la maximización del beneficio obtenido en la línea (ingresos menos gastos).

El sistema de ayuda a la decisión o de optimización necesita 7 iteraciones del motor de resolución para encontrar un valor óptimo para la función objetivo, tal como se muestra en la tabla 4. Se utiliza el módulo de optimización lineal de LINGO, el cual nos ofrece un “óptimo global” porque se trata de una solución viable con un valor objetivo que es igual o mejor que cualquier otra solución del modelo.

Soluciones propuestas	Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre
Cantidad objetivo de cada material (Kg/unidad)	7,3	3,1	1,6	0,04	0,8
% respecto al máximo teórico	76%	100%	100%	100%	100%

Tabla 4: Valores optimizados para el modelo de reciclado

Valor objetivo (beneficio obtenido por aparato reciclado):	2,8 €/unidad
Coste de tratamiento recomendado:	3,33 €/unidad

Tabla 5: Valores optimizados para los materiales a obtener

Para llegar a esos valores, el sistema también sugiere valores recomendados para las cantidades de materiales que deberían ser recuperados, según se muestra en la Tabla 5:

Los resultados mostrados en las Tablas 4 y 5 se deben interpretar junto a los gráficos de la Fig. 6, como se explica a continuación:

- El coste de tratamiento recomendado de 3,33 €/unidad indica que la mejor opción de tratamiento en la línea de reciclado es el semi-automatizado, para conseguir un beneficio óptimo. La decisión sobre qué tareas de desensamblado deben ser automatizadas se deriva de los resultados de la optimización, concretamente de las cantidades a obtener de cada material por separado.
- Se obtienen sugerencias sobre qué cantidad de cada material se debería obtener para conseguir los máximos beneficios y el mínimo coste para su extracción, lo cual da el resultado final de 2,8 €/unidad de beneficio. Las cantidades a obtener de

plástico, hierro, aluminio y cobre deberían alcanzar el máximo teórico (por lo tanto, se recomiendan tareas manuales de separación en estos casos). Por el contrario, la cantidad de vidrio está más cerca del umbral mínimo establecido por la directiva. Los gráficos de correlación de la Fig. 6 nos sugieren un nivel de automatización de un 70-75%, y un grado medio de reciclado y separación correcta de materiales del 80% (menor para el vidrio y mayor para los otros materiales, como se ha comentado).

Siguiendo la solución propuesta por el método, la línea de tratamiento está formada por las siguientes estaciones:

- Puestos operados manualmente para: identificación y clasificación de aparatos de TV y monitores, desensamblado de carcasas (plásticos), metales (hierro, aluminio, cobre), componentes orgánicos, elementos potencialmente peligrosos.
- Puestos automatizados para desensamblado del TRC. En este caso es necesario separar el vidrio de la parte de pantalla (sin plomo) de la parte de vidrio del cono (con plomo).

La Fig. 7 muestra la distribución en planta de la célula propuesta para el desensamblado del TRC (separación de los dos tipos de vidrio). Se ha utilizado el programa de simulación

Robcad (concretamente la versión 4.1 del módulo básico) para probar virtualmente las operaciones en la célula, detectar fallos en el diseño y optimizar la distribución de máquinas, herramientas, operarios, etc. Una vez finalizada la fase de análisis (la célula simulada cumple todos los requisitos), se traslada el diseño al mundo real. La Fig. 7a muestra el modelo de la simulación, y la Fig. 7b la imagen real de la instalación con la distribución de elementos en el taller, una célula automatizada con robot, cinta transportadora, estaciones de desensamblado, contenedores, etc.

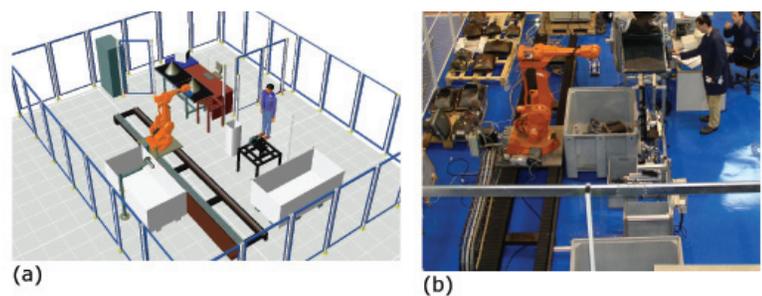


Fig. 7: Modelo utilizado en la simulación Robcad (a) y vista general de la célula de reciclado de TRC (b)

La operatividad en esta célula es la siguiente: los TRC entran en la célula en una cinta transportadora. Por medio de técnicas como los rayos-X o espectroscopia se identifica la

presencia de plomo en el vidrio de pantalla, lo cual determina su tratamiento futuro, enviando una señal apropiada al robot y otros dispositivos. Si la pantalla no contiene plomo, el TRC debe ser separado en cono y pantalla; en caso contrario se puede triturar sin separación previa. El robot utiliza una garra de vacío para manipular el TRC y transportarlo a las siguientes estaciones, donde una sierra circular corta el TRC a lo largo de la junta entre pantalla y cono. El vidrio de cono y partes mixtas (metal, silicona) caen en un contenedor. A continuación, el robot se desplaza a la siguiente estación con la parte de pantalla y banda metálica. Se realiza una operación similar para que la banda caiga a un contenedor, y el robot lleva el resto (pantalla) a un tercer contenedor. El proceso se aprecia gráficamente en la Fig. 8, a-f.

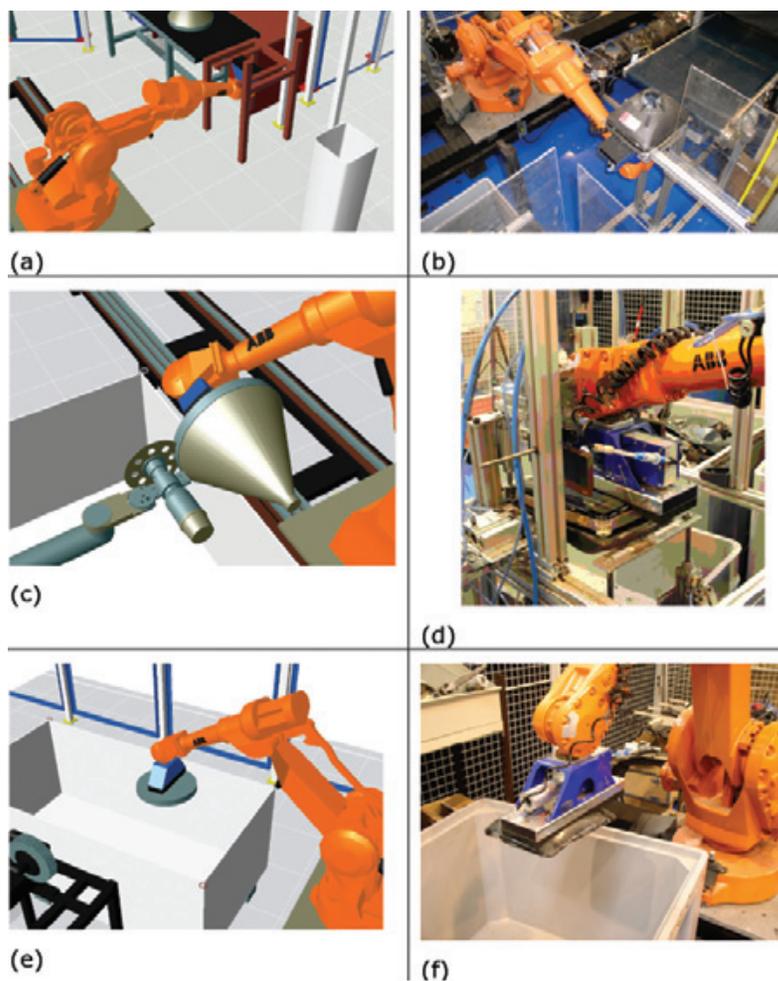


Fig. 8: Vistas detalladas de la manipulación del TRC con garra de vacío y corte del vidrio. A la izquierda (a, c, e) la instalación simulada, a la derecha (b, d, f) la instalación real

Una vez que se ha implementado la línea de reciclado, se han desarrollado varias pruebas de productividad. La Tabla 6 muestra las cantidades medias de materiales recuperadas de un aparato de TV o monitor en este caso práctico, y sus correspondientes precios de venta, que se utilizarán en un

análisis económico posterior. Para algunos componentes específicos (materiales tóxicos o peligrosos), las cifras representan el costo de un tratamiento complementario por parte de un gestor autorizado, previo a su depósito en un vertedero.

Material	Peso del material (kg)	Precio venta (euro / 1000 kg)	Costo de tratamiento complementario (euro / 1000 kg)
Vidrio de pantalla	5,39	97,8	
Vidrio de cono	2,50	122,5	
Hierro	1,47	320	
Aluminio	0,04	1.690,0	
Cobre	0,69	4.846,6	
PVC (Plástico valorizable)	0,5	101,7	
Condensadores	0,005	--	1.540,0
Plásticos para reciclado mecánico	1,50	284,7	
Plásticos para cementeras	0,84	67,8	
Polypropileno	0,47	882,0	
Mezcla de vidrio, silicona	0,45	87,6	
Madera	0,20	--	-23,4

Tabla 6: Cantidades medias de materiales recuperados en un aparato (TV / monitor con un peso medio de 17 kg) y su ingreso o costo por reciclado

El resultado más importante de esta fase es la comprobación de que la suma de los dos tipos de vidrios recuperados alcanza la cantidad de 7,9 Kg. / u, cifra que cumple el objetivo sugerido por el modelo (7,3 Kg. / u). A estas cantidades hay que sumar las obtenidas en las estaciones previas de desmontaje de carcasas y elementos internos del monitor o televisor, llevadas a cabo de forma casi completamente manual. Hemos comprobado que, en el caso del hierro, éste se queda un poco por debajo de los objetivos de la optimización (se obtienen 1,47 Kg. frente a los 1,6 Kg. recomendados). Para el resto de los materiales las cantidades obtenidas se acercan más al cómputo del modelo de optimización.

### 3.2. VERIFICACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO

Siguiendo con el último punto del método propuesto, junto con la simulación realizada en el apartado anterior en esta fase de verificación se han llevado a cabo estudios económicos sobre inversiones e ingresos del sistema desarrollado, así como un análisis de la viabilidad técnica del uso del vidrio recuperado en nuevas aplicaciones.

### 3.2.1. Evaluación económica convencional

En este estudio se han aplicado el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación (PR) (Soni et al., 1992). Con ellos se evalúa un objetivo económico asociado con la inversión en tecnologías de automatización.

1. El VAN permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. Se recomienda la ejecución de un proyecto si el VAN tiene un valor positivo.

2. La TIR es el ratio de descuento que hace cero el VAN, si su valor es mayor que un cierto límite.

3. El PR es el mínimo plazo de tiempo requerido para recuperar la inversión inicial, sin considerar el valor temporal del dinero.

La Tabla 7 muestra los datos utilizados en los cálculos y los resultados obtenidos.

Con los resultados obtenidos para estos tres indicadores, la solución propuesta para la línea de reciclado se puede considerar rentable y debería ser aceptada. Sin embargo, se han llevado a cabo análisis económicos complementarios para justificar la decisión.

### 3.2.2. Evaluación económica complementaria

La Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) ofrece una mejor indicación de la eficiencia de proyecto, contribuyendo al flujo de caja de descuento de la empresa. Además, Nilsson et al (1992) sugiere una nueva técnica, llamada “período de retorno de capital” (Capital-Back, CB), que contempla la flexibilidad de los equipos y máquinas para la automatización que forman la línea de reciclaje. Estos elementos flexibles se pueden utilizar para aplicaciones diferentes de las inicialmente diseñadas, un caso bastante habitual en el caso de reciclado de aparatos eléctricos y electrónicos donde el tipo, estado y modelo de los equipos varía continuamente. El índice CB tiene en cuenta la inversión inicial en maquinaria flexible (robots, sistemas de manipulación, ordenadores, etc.) y la inversión en componentes no flexibles (garras de robots, sistemas de fijación concretos, herramientas de desensamblado específicas, etc.). La fórmula para el cálculo del CB es:

$$CB = \frac{I_{nf}}{OCF - [(I_{if} - (I_{if} * Annuity(n, r))]} \quad (5)$$

Siendo:

$I_{if}$ : inversión inicial en componentes flexibles

$I_{nf}$ : inversión inicial en componentes no flexibles

Parámetro	Valor	Unidades
<b>PRODUCTIVIDAD</b>		
Capacidad de tratamiento de TRC	50.000	TRC/Año
Mano de obra requerida	4	Operario / turno
Número de turnos (1 turno = 1.600 h/año)	1	
Coste horario	19	Euro / h
<b>INVERSIÓN REQUERIDA (manipulación+desensamblado+limpieza)</b>	273.000	Euro
<b>COSTES DE EXPLOTACIÓN ANUALES</b>	123.680	Euro
<b>INGRESOS ANUALES POR MATERIAL RECUPERADO</b>	284.886	Euro
Coste medio de tratamiento	3,57	Euro / unidad
Cantidad media de materiales separados	14,06	Kg / unidad
Porcentaje de reciclado (en peso)	82	%
<b>RESULTADOS DE LOS PRINCIPALES INDICADORES ECONÓMICOS (5 años de duración del proyecto, 15% tasa descuento)</b>		
Periodo Retorno (PR):	1,69	Año
Valor Actual neto (VAN):	425.986	Euro
Tasa Interna de Retorno (TIR):	49,7	%

Tabla 7: Análisis económico de la planta de reciclado propuesta

*Annuity*: coste de amortización anual de los equipos de tratamiento

*OCF*: flujo de caja operativo en el año  $t$

$n$ : duración del proyecto (años)

$r$ : ratio de retorno requerido

Se debe utilizar este método como un complemento a los índices VAN, TIR y PR. La tabla 8 muestra los nuevos resultados, junto con el Índice de Rentabilidad (Profitability Index, PI), indicando el ratio coste / beneficio.

Estos resultados permiten un análisis más clarificador de la viabilidad económica de la línea de reciclado propuesta. El resultado obtenido para el índice CB muestra un periodo de recuperación más realista (0,98 años) que el valor ofrecido por el índice PR (1,69). El método del retorno de capital tiene en cuenta la incertidumbre de los componentes diseñados de forma específica para determinadas operaciones, así como los requisitos de rentabilidad para los componentes flexibles.

### 3.2.3. Evaluación técnica

En esta implementación práctica de la metodología se ha sugerido también una alternativa para el uso del vidrio reciclado en la construcción. Un fabricante de azulejos vidriados para la decoración de paredes está previendo futuros problemas en la obtención de materia prima (vidrio plano reciclado proveniente de ventanas). Los fabricantes de vidrio plano utilizan también grandes cantidades de este mismo material reciclado con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y cumplir el protocolo de Kyoto (Kyoto, 1998). Como consecuencia, el fabricante de baldosas necesita encontrar una fuente alternativa de materia prima, y el vidrio de pantalla proveniente de los TRC puede ser una solución. Se han realizado algunas pruebas y los primeros resultados, fig.(9), son prometedores, aunque todavía hay que resolver problemas de calidad de las piezas, principalmente los relacionados con el color resultante, impurezas (burbujas de aire) y riesgo de tensiones internas. Uno de los factores que influye son los diferentes grados de granulado del vidrio utilizados en las pruebas (desde 100 a 40  $\mu$ m).

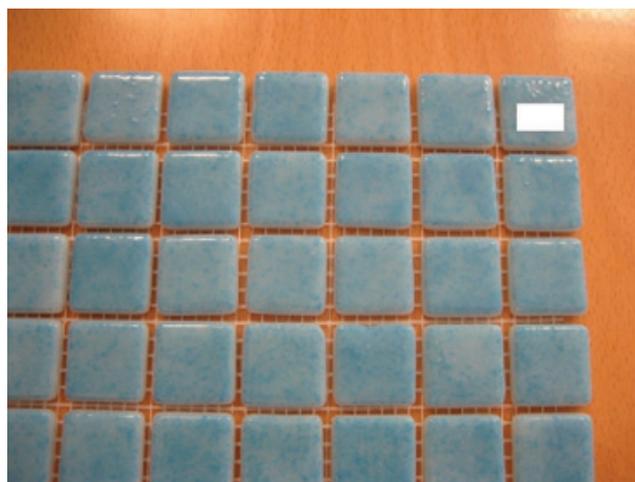


Fig. 9: Azulejos vidriados obtenidos del vidrio de pantalla del TRC

## 4. CONCLUSIONES

El nuevo método propuesto en este trabajo permite la optimización de un desensamblado selectivo de aparatos eléctricos y electrónicos, orientado al reciclado de materiales con un coste viable para la empresa recicladora. El método se ha aplicado a la definición y diseño de instalaciones para el desensamblado de aparatos de televisión y monitores. Las operaciones se han configurado de tal forma que se optimiza la separación de los materiales según su cotización y cumpliendo los objetivos de reciclado marcados por la directiva europea sobre RAEE. El método utiliza técnicas de simulación y sistemas de ayuda a la decisión, que aseguran la resolución del problema con la búsqueda de un conjunto de parámetros de producción óptimos. Los parámetros en los cuales se basa el método provienen de procesos de reciclado (separación, corte, manipulación, limpieza) experimentados previamente por el reciclador. No es, como ocurre en otras soluciones existentes, una programación automática basada en el análisis de la desmontabilidad teórica de un producto

INVERSIÓN REQUERIDA (manipulación+desensamblado+limpieza)	Valor	Unidades
Componentes flexibles:	114.400	Euro
Componentes no flexibles:	158.600	Euro
RESULTADOS DE LOS PRINCIPALES INDICADORES ECONÓMICOS (5 años de duración, 15% ratio de descuento)		
Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM):	24,03	%
Retorno de Capital (CB) (ecuación 5):	0,98	Año
Índice de rentabilidad (PI):	1,69	

Tabla 8: Análisis económico complementario de la planta de reciclado propuesta

según sus datos CAD, ya que no presentan una fiabilidad real.

La verificación de la solución propuesta, estudiando su viabilidad técnica (con nuevas propuestas de configuración de la línea de reciclado) y económica (con nuevos análisis económicos que tienen en cuenta la flexibilidad de los equipos de automatización y la valorización de materiales), demuestra la idoneidad del método, habiéndose implantado la solución sugerida en las instalaciones de una empresa recicladora después de una etapa de pruebas prácticas en los laboratorios de Robotiker-Tecnalia. Los resultados obtenidos ofrecen un porcentaje de reciclado del 82% (el modelo sugería un 80% aproximadamente). El resultado más importante es la comprobación de que la suma de los dos tipos de vidrios recuperados alcanza la cantidad de 7,9 kg/u, cifra que cumple el objetivo sugerido por el modelo (7,3 kg/u). A estas cantidades hay que sumar las obtenidas en las estaciones previas de desmontaje de carcasas y elementos internos del monitor o televisor, llevadas a cabo de forma casi completamente manual. Se ha comprobado que, en el caso del hierro, éste se queda un poco por debajo de los objetivos de la optimización (se obtienen 1,47 kg/u frente a los 1,6 kg/u recomendados). Para el resto de los materiales las cantidades obtenidas se acercan más al cómputo del modelo. También se ha propuesto una nueva aplicación del vidrio obtenido para la fabricación de azulejo vidriado. Los futuros desarrollos relacionados con este trabajo incluyen la investigación en tecnologías para la identificación automatizada de materiales, capacidades de aprendizaje automático del sistema de desensamblado y gestión del conocimiento integrada en los propios aparatos a reciclar.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero recibido de varios programas Intek del Gobierno Vasco y del programa Eureka financiado por la Comunidad Europea.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Cui J, Forsberg E. "Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery". *Waste Management*. 2006. Vol.17-3 p.415-424.
- Unión Europea. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE, D-2002/96/EC). Oficina de Publicaciones oficiales de las Comunidades Europeas, 2003.
- Unión Europea. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Oficina de Publicaciones oficiales de las Comunidades Europeas, 2003b.
- Gent MR. "Recycling of plastic waste by density separation: prospects for optimization". *Waste management & Research*. 2009. Vol.27-2 p.175-187.
- Gerner S, Kobeissi A, David B et al. "Integrated approach for disassembly processes generation and recycling evaluation of

an end-of-life product". *International Journal of Production Research*. 2005. Vol.43 p.195-222.

- Hirschier R, Wäger P, Gaughhofer J. "Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)". *Environmental Impact Assessment Review*. 2005. Vol.25 p.525-539.
- IHOBE. *Monografía de aparatos eléctricos y electrónicos*. Vitoria: Publicaciones Gobierno Vasco, 2004.
- IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). *Implementation of the Waste Electrical and Electronic Equipment Directive in the EU*. Bruselas: European Commission - Directorate-General Joint Research Centre, 2006.
- Klein MR, Methlie LB. *Knowledge-based decision support systems*. 1ª ed. Chichester: Wiley & Sons Ltd, 1995.
- Kang HY, Schowning JM. "Economic Analysis of Electronic Waste Recycling: Modeling the Cost and Revenue of a Materials Recovery Facility in California". *Environmental Science & Technology*, 2006. Vol.40-5 p.1672-1680.
- Krikke HR, Van Harten A, Schuur PC. "Business case Roteb: recovery strategies for monitors". *Computers and Industrial Engineering*. 1999. Vol.36 p.739-759.
- Martin I. "Europe en route to a recycling society". *Recycling International*. 2006. Vol. 24 p.38-43.
- Naciones Unidas. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático [en línea]. Nueva York, 1998, [20 enero 2008]. Disponible en web: [unfccc.int/essential\\_background/kyoto\\_protocol/background/items/1351.php](http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php).
- Nilsson CH, Nordahl H, Persson I. "Analysis and evaluation of flexible capital investment". En: Parsaei HR, Mital A (eds.). *Economics of advanced manufacturing systems*. Londres: Chapman & Hall, 1992. p.239-253.
- Picón A, Echezarra J, Bereciartua A. "Reciclaje de chatarra electrónica: Nuevo algoritmo para su clasificación por imágenes hiperespectrales. E-waste recycling: New algorithm for hyperspectral identification". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2008. Vol.85-2 p.148-157.
- Rahimifard S. "Barriers, Drivers and Challenges for Sustainable Product Recovery and Recycling". En: De Vin LJ, Ng AHC, Thorvald P et al (eds.). *FAIM 2008. Proceedings of the 18th Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. Skövde: University of Skövde, 2008. p.1-25.
- Rentería A, Álvarez E, López JM. "A systematic approach to define the reuse process of printed circuit board's components". *International Journal of Sustainable Engineering*, 2009. Vol.2 p.103-110.
- Shi C, Zheng K. "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete". *Resources, Conservation & Recycling*. 2007. Vol.52 p. 234-247.
- Soni RG, Parsaei HR, Liles DH. "Economic and Financial Justification Methods for Advanced Automated Manufacturing: An Overview". En: Parsaei HR, Mital A (eds.). *Economics of advanced manufacturing systems*. Londres: Chapman & Hall, 1992. p. 3-19.
- *Swiss e-waste guide*, 2008. <http://ewasteguide.info>. Accedido en 2008.
- Stuart JA, Christina V. "New metrics and scheduling rules for disassembly and bulk recycling". *IEEE Transactions on Electronic Packaging*, 2003. Vol.26-2 p.133-140.
- Teunter RH. "Determining optimal disassembly and recovery strategies". *International Journal of Management Sciences*. 2006. Vol.34 p.533-537.