



UNIVERSIDAD DE DEUSTO

Facultad de Ingeniería

TESIS DOCTORAL

**Nuevo Método de Simulación de Estrategias Operacionales
para la Optimización de Procesos de Reciclado
Automatizado de Aparatos Electrónicos**

Dña. Aránzazu Rentería Bilbao

Bilbao, Mayo de 2010

Universidad de Deusto (tercer ciclo)

Programa: **Ciencia de la Computación**

Nuevo Método de Simulación de Estrategias Operacionales para la Optimización de Procesos de Reciclado Automatizado de Aparatos Electrónicos

Tesis doctoral presentada por Dña. **Aránzazu Rentería Bilbao**

Dirigida por la Dra. **Esther Álvarez de los Mozos**

La Directora

La Doctoranda

Bilbao, 14 de Mayo de 2010

“El residuo es un recurso en un lugar equivocado”

Proverbio chino

Resumen

Los aparatos eléctrico-electrónicos (AEE) al final de sus vidas se convierten en “basura electrónica” compuesta de un rango de productos de tipología y tamaño diferentes. La sociedad se va concienciando poco a poco de que dichos aparatos, ordenadores, televisiones, electrodomésticos en general, contienen componentes y materiales de valor que pueden ser reciclados y reutilizados. Una de las primeras dificultades en la gestión de residuos electrónicos es la recolección de los aparatos desechados debido a la incertidumbre de los flujos de retorno. Por otro lado, existe una necesidad de una mejor separación y tratamiento más eficiente de los materiales obtenidos del reciclado, con el fin de mejorar la rentabilidad de las instalaciones de reciclaje y solucionar los problemas técnicos existentes actualmente.

Las actuales soluciones para mejorar el desensamblado de los aparatos se han centrado en la optimización de la secuencia de desmontaje de cada componente, basándose en los datos geométricos disponibles y realizando cálculos de trayectorias para su extracción. También hay propuestas para integrar las tecnologías de simulación gráfica y los programas de optimización para la separación de componentes, pero estas soluciones están claramente orientadas a la simulación del producto, no a los procesos de simulación de reciclaje, que conllevan operaciones de manipulación, separación y corte.

Como solución alternativa proponemos un nuevo método para la optimización del reciclado de aparatos electrónicos, principalmente televisores y monitores, aplicando criterios de viabilidad técnica, económica, legal y medioambiental. El resultado final es una determinada estrategia de desensamblado y grado de recuperación de materiales que optimiza el beneficio de empresas recicladoras. El método utiliza las tecnologías de

simulación y optimización lineal, aplicándolas a las operaciones de desmontaje de aparatos (analizando tanto medios automatizados como operaciones manuales en diversas tipologías de líneas de tratamiento), recuperando específicamente los materiales de mayor interés económico para la empresa (sobre todo vidrio y componentes electrónicos), proponiendo su revalorización en función de la normativa legal, coste del desensamblado y de las cotizaciones en el mercado de materiales reciclados. El método propuesto ha sido validado mediante la implantación práctica en dos empresas recicladoras. El resultado principal que se ha obtenido ha sido la separación de materiales optimizada según su valor en el mercado, lo cual ha permitido la apertura de nuevas líneas de negocio para estas empresas. Esta innovación les permite implantar un nuevo proceso de tratamiento y reciclado del vidrio y la reutilización de componentes electrónicos obtenidos de tarjetas de circuitos impresos.

Abstract

Waste coming from disposed electric and electronic equipment (also called “e-waste”) contains a growing range of electronic appliances of different types and sizes. Computers, televisions and other electronic scrap contain valuable materials and components, which may be recyclable and reusable. One of the main problems in recycling of electronic waste is the lack of collection incentives and recycling infrastructure, as well as the high cost of material collection, handling and processing. The success of the recycling solution as an alternative to the disposal of electric and electronic waste, in order to become economically feasible, lies mainly on the way they are able to be disassembled and reused.

There are several approaches in order to maximize the recycling rate, for example, optimization of the disassembly sequence of each component, using available geometric data and computing the best trajectory for extraction. Other suggested methods determine automatic sequences of disassembly using graphic simulation and optimization algorithms, but they focus on the simulation of the product or component, not on the processes related to handling, separation and cutting.

As an alternative and improved solution, we propose a new method to optimize the recycling of electronic appliances, TV sets and monitors mainly, applying criteria related to technical, economic, legal and environmental parameters. The method is mainly focused on industrial solutions (both manual and automated operations), using off-the-shelf devices and taking advantage of the previous expertise of industrial recycling companies. The method makes use of a decision system with three kinds of inputs: technical data, economic information and legal rules regarding the recycling process. As a result, the method offers a proposal for a specific configuration of the recycling line. The feasibility of the proposed solution is assessed by means

of simulation techniques and economic and technical analysis. The method proposes a specific level of automation for the recycling process, in order to achieve the optimal benefit for the recycler and to comply with the legislation regarding the minimum quantities of materials to be obtained. In this way, the degree of separation of each material is derived from the output of the optimization process, and these values suggest the proposed level of automation to be applied to each separation phase.

Two recycling companies have benefited from this solution since the method has been used in the definition and implementation of two recycling lines: one for TV sets and monitors and a second one for electronic components of printed circuit boards. In addition, a potential final user of the obtained glass of the TV sets and monitors has been identified (manufacturer of glazed tiles).

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi directora de tesis, Esther Álvarez, sus consejos para el planteamiento de la tesis y la labor de soporte en la realización de este trabajo.

Mi agradecimiento al Centro Tecnológico Robotiker-Tecnalia por el apoyo recibido, especialmente a José Pérez Larrazábal como colaborador principal del equipo de desarrollo y a Dionisio del Pozo Rojo por sus consejos en la elaboración de esta tesis.

Finalmente quiero agradecer a mi familia y amistades por su paciencia y comprensión durante este tiempo.

ÍNDICE

Resumen	vii
Abstract	ix
Agradecimientos	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xxiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 La problemática del reciclado de aparatos	1
1.2 Objetivos de la tesis.....	5
1.3 Metodología aplicada.....	8
1.4 Estructura de la memoria.....	11
2. RECICLADO DE APARATOS ELÉCTRICO-ELECTRÓNICOS	13
2.1 Contexto en el que se desarrolla la tesis	13
2.2 Simulación y optimización de procesos	17
2.2.1 Simulación gráfica	18
2.2.1.1 Simulación de instalaciones automatizadas	23
2.2.1.2 Simulación aplicada al desmontaje y reciclado.....	31
2.2.2 Simulación económica y planificación	37
2.2.3 Optimización de procesos	40
2.3 Marco legal y social del reciclado	44
2.3.1 Logística inversa y concienciación social	46
2.3.2 Directivas y legislación	61
2.4 Automatización del reciclado	70
2.4.1 Descripción de un caso de estudio: reciclado de televisores y monitores.....	73
2.4.2 Separación de la banda anti-implosión.....	76
2.4.3 Métodos industriales de separación de vidrios de TRC.....	78
2.4.3.1 Sistema Ecomatic (Alemania).....	78

2.4.3.2	Método Sony (Japón)	79
2.4.3.3	Método Vicor (Alemania)	79
2.4.4	Métodos experimentales de separación de vidrios de TRC.....	80
2.4.4.1	Separación de cono y pantalla mediante microondas	81
2.4.4.2	Separación mediante corte	82
2.4.4.3	Separación mediante métodos térmicos.....	83
2.4.5	Reciclado de tarjetas de circuitos impresos	86
2.4.6	Reciclado de componentes plásticos	89
2.5	Aplicaciones de los materiales reciclados y requisitos de las empresas que los utilizan	90
2.5.1	Vidrio	94
2.5.1.1	Reciclado de vidrio en ciclo cerrado	96
2.5.1.2	Reciclado de vidrio en ciclo abierto	99
2.5.1.3	Agregados de vidrio	101
2.5.1.4	Aplicaciones basadas en el contenido en plomo	104
2.5.2	Componentes electrónicos	107
2.5.3	Plásticos	108
2.6	Resumen y conclusiones.....	111
3.	INVESTIGACIÓN	115
3.1	Introducción	115
3.2	Objetivos y modelo propuesto	118
3.2.1	Objetivos	118
3.2.2	Método propuesto.....	121
3.3	Análisis de los parámetros técnicos y datos de aparatos	124
3.4	Definición y programación de las opciones de automatización ..	127
3.4.1	Proceso de reciclado 100% manual	135
3.4.1.1	Entrada de aparatos e identificación.....	136
3.4.1.2	Estaciones de desensamblado	138
3.4.1.3	Separación de vidrios del TRC	139
3.4.1.4	Estimación del coste de tratamiento	141

3.4.2	Proceso de reciclado 100% automatizado	144
3.4.2.1	Entrada de aparatos e identificación.....	144
3.4.2.2	Estaciones de desensamblado	145
3.4.2.3	Separación de vidrios del TRC	147
3.4.2.4	Estimación del coste de tratamiento	150
3.4.3	Proceso de reciclado semi-automatizado	154
3.4.3.1	Entrada de aparatos e identificación.....	154
3.4.3.2	Estaciones de desensamblado	155
3.4.3.3	Separación de vidrios del TRC	156
3.4.3.4	Estimación del coste de tratamiento	157
3.5	Fase de optimización.....	164
3.5.1	Función Objetivo.....	166
3.5.2	Variables	167
3.5.3	Restricciones	168
3.5.4	Resultados	169
3.6	Validación técnica, económica y medioambiental	170
4.	EXPERIMENTACIÓN E IMPLANTACIONES PRÁCTICAS EN	
	DOS EMPRESAS RECICLADORAS	173
4.1	Análisis de parámetros	173
4.2	Programación del modelo.....	175
4.3	Configuración de la línea de reciclado.....	186
4.3.1	Entrada de aparatos e identificación	187
4.3.2	Estaciones de desensamblado.....	189
4.3.3	Separación del TRC	190
4.3.4	Desmontaje de PCB	197
5.	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	211
5.1	Evaluación técnica.....	212
5.1.1	Evaluación de la línea propuesta.....	212
5.1.2	Evaluación técnica de la reutilización del material recuperado	215
5.2	Análisis económicos	220
5.2.1	Análisis económico inicial.....	226

5.2.2	Análisis económico complementario	230
5.3	Análisis medioambiental	232
5.3.1	Control de vertidos	233
5.3.2	Almacenamiento de materias primas	233
5.3.3	Almacenamiento de residuos producidos en el proceso de desmontaje	234
5.3.4	Clasificación de Impacto Medioambiental	237
6.	APORTACIONES, CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS	239
6.1	Aportaciones y conclusiones	239
6.2	Contraste de resultados en foros científicos.....	244
6.3	Líneas futuras de investigación	246
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	249
8.	TERMINOLOGÍA.....	279
9.	APÉNDICE	283
9.1	Evolución de la cotización de diversos materiales y su consumo	283

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Objetivos de la tesis.....	6
Figura 1.2	Diagrama del modelo propuesto.....	7
Figura 1.2	Aplicación de la metodología de investigación.....	11
Figura 2.1	Diferentes formas de tratamiento de productos fuera de uso	16
Figura 2.2	Reducción de plazos utilizando la simulación	19
Figura 2.3	Coste de los cambios en función de la fase en que se realicen	21
Figura 2.4	Fase de modelado	24
Figura 2.5	Modelo 3D de un componente.....	25
Figura 2.6	Trayectorias de robot en la simulación.....	26
Figura 2.7	Proceso completo de simulación analítica y obtención del programa off-line.....	29
Figura 2.8	Pantalla de resultados de un programa de simulación aplicado a operaciones de desensamblado.....	33
Figura 2.9	Esquema de una solución en un entorno virtual.....	34
Figura 2.10	Diagrama de flujo de la simulación cinemática para el desmontaje.....	36
Figura 2.11	Componentes de un monitor o televisor: carcasa, tarjetas de circuitos impresos (PCB) y tubo de rayos catódicos (TRC).....	73
Figura 2.12	Izda.: Componentes internos de un televisor o monitor de ordenador. Dcha.: Sección del tubo de rayos catódicos	75
Figura 2.13	Detalle de cono, pantalla y banda anti-implosión (mixto metal –vidrio)	75
Figura. 2.14	Herramienta en forma de cuña, manipulada por un robot.....	78
Figura 2.15	Eliminación de la banda anti-implosión	78

Figura 2.16 Separación de vidrio de pantalla en microondas. Izda.: Empleando mella y malla metálica. Dcha.: Pantalla fracturada en trozos al desprenderse los cantos	82
Figura 2.17 Corte robotizado mediante disco abrasivo	82
Figura 2.18 Detalles de las fases de rotura de TRC por choque térmico.....	85
Figura 2.19 Diferentes resultados de la rotura de TRC por choque térmico	86
Figura 2.20 Reciclado en ciclo cerrado de TRC	97
Figura 2.21 El hormigón traslucido “Litracón”.....	101
Figura 2.22 Gravilla de vidrio.	102
Figura 2.23 Gravilla de vidrio utilizada como aislante en un tejado.....	102
Figura 3.1 Esquema general del modelo propuesto.....	123
Figura 3.2 Esquema general de la separación de componentes de un televisor.....	125
Figura 3.3 Esquema general de la secuencia de desensamblado.....	128
Figura 3.4 Manipulación robotizada del TRC con garra de diseño específico, para manipulador o robot.....	129
Figura 3.5 Cambios automáticos de herramientas de robot con varios diseños específicos para separación de componentes.....	131
Figura 3.6 Interfaz del sistema de simulación. Izda.: Opciones de programación de operaciones. Dcha.: Generación off-line de programas.....	133
Figura 3.7 Interfaz del sistema de simulación: tiempos de ciclo.....	135
Figura 3.8 Vista general de una instalación de reciclado manual	136
Figura 3.9 Área de entrada e identificación	137
Figura 3.10 Izda: esquema de un manipulador ingrávito. Dcha: manipulación de un televisor.	137
Figura 3.11 Detalle del transporte hacia desensamblado.....	138

Figura 3.12 Izda: detalle de las estaciones de desensamblado de carcasas y componentes internos. Dcha: sistema de almacenamiento por gravedad a dos niveles	139
Figura 3.13 Estaciones duplicadas para la separación de vidrios del TRC....	140
Figura 3.14 Operación manual de separación de vidrios del TRC. Izda: sujeción del TRC por vacío. Dcha: cizalla para separación de vidrios.....	141
Figura 3.15 Vista general de la línea automatizada al 100%.....	144
Figura 3.16 Vista lateral de la línea automatizada 100% mostrando los dos niveles	145
Figura 3.17 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores	146
Figura 3.18 (a) y (b): Detalles de herramienta con función de tijera y cizalla. (c): La misma herramienta adosada al robot de desensamblado.....	147
Figura 3.19 Operaciones robotizadas de manipulación del TRC y separación de vidrios	148
Figura 3.20 Detalle de la estación automática de separación de vidrios mediante cizallas neumáticas	148
Figura 3.21 Manipulación del TRC con garra de vacío en robot pórico.	149
Figura 3.22 (a) Evacuación de vidrios del TRC a contenedores inferiores. (b): Evacuación de materiales en las estaciones de carcasas	149
Figura 3.23 Cronograma con secuencia y duración de las operaciones automatizadas al 100%.....	150
Figura 3.24 Vista general de la línea semi-automatizada.....	154
Figura 3.25 Vista lateral de la línea semi-automatizada mostrando los dos niveles	155
Figura 3.26 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores	156

Figura 3.27 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores.....	156
Figura 3.28 Cronograma con secuencia y duración de las operaciones.....	157
Figura 3.29 Relación entre coste de tratamiento unitario y grado de separación (pureza) de materiales	163
Figura 3.30 Relación entre coste de tratamiento unitario y nivel de automatización del proceso de separación.....	163
Figura 4.1 Fichas técnicas de televisores marca Philips (izda.) e Hitachi (dcha.)	174
Figura 4.2 Pantalla inicial de resultados del programa de optimización.....	177
Figura 4.3 Pantalla con resultados detallados del programa de optimización	178
Figura 4.4 Vista general de la instalación	187
Figura 4.5 Área de entrada e identificación	188
Figura 4.6 Línea de reciclado mostrando los dos niveles.....	189
Figura 4.7 Estaciones de desensamblado manual de carcasas y elementos interiores.....	190
Figura 4.8 Diagrama de bloques del proceso de desensamblado de TRC	191
Figura 4.9 Envío de TRC a la fase de separación de vidrios.....	191
Figura 4.10 Simulación de la célula de desensamblado de TRC y obtención de vidrios	193
Figura 4.11 Vista general de la célula de desensamblado de TRC y obtención de vidrios	193
Figura 4.12 (a) Garra de vacío para manipulación de TRC. (b) Robot manipulando TRC	194
Figura 4.13 (a) Robot cogiendo el TRC por la pantalla. (b) Simulación de la misma operación.....	195

Figura 4.14 Simulación de operación de corte con sierra circular	195
Figura 4.15 Separación mediante cizallas neumáticas.....	196
Figura 4.16 (izquierda) Estación de extracción de fracción mixta	196
Figura 4.17 (arriba) Fracción de material mixto	196
Figura 4.18 Contenedor para vidrio de pantalla limpio	197
Figura 4.19 Vista general de la estación de desensamblado de PCB.....	198
Figura 4.20 (a) Tarjeta CPU-K265. (b) Identificación de los componentes a reciclar en el modelo virtual	199
Figura 4.21 Desoldado de componentes de PCB con chorro de aire caliente.(a) Aparato desoldador. (b) Aplicación aire caliente. (c) Extracción componente	200
Figura 4.22 Modelo en 3D del prototipo de estación para desensamblado de PCB	201
Figura 4.23 Cronograma con tiempos de ciclo de las operaciones de extracción de componentes en PCB.....	202
Figura 4.24 Subsistemas de la estación de PCB.....	203
Figura 4.25 Detalle del subsistema manipulador.....	204
Figura 4.26 Detalle del subsistema desoldador.....	205
Figura 4.27 Modelo 3D de la herramienta de manipulación de componentes.....	206
Figura 4.28 Detalle del subsistema herramienta	207
Figura 4.29 Detalle del subsistema con útiles de fijación	208
Figura 4.30 Vista general (a) y detalle (b) de la simulación de la instalación industrial.....	209
Figura 4.31 Imágenes de la instalación industrial: (a) Vista general del manipulador, (b) Vista lateral, (c) Detalle del cabezal, (d) Vista de los tres ejes de movimiento	209

Figura 5.1	Cronograma con la secuencia y tiempos de operación correspondientes al desmontaje del TRC.....	213
Figura 5.2	Vidrio de cono recuperado.....	217
Figura 5.3	Vidrio de pantalla recuperado.....	218
Figura 5.4	Vidrio de pantalla limpio.....	219
Figura 5.5	Resultados de las pruebas de reutilización del vidrio.....	220
Figura 9.1	Evolución del precio del plomo (€/t).....	283
Figura 9.2	Evolución del precio del hierro (€/t)	283
Figura 9.3	Evolución del precio del aluminio (€/t)	283
Figura 9.4	Evolución del precio del zinc (€/t)	283
Figura 9.5	Evolución del precio del cobre (€/t)	283

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Principales diferencias en las técnicas de estudio de instalaciones automatizadas	27
Tabla 2.2	Principales programas de simulación y características	30
Tabla 2.3	Beneficios de la reutilización de la chatarra de hierro y acero	39
Tabla 2.4	Ahorro de energía en materiales reciclados respecto a la materia prima	39
Tabla 2.5	Componentes tóxicos presentes en RAEE.....	45
Tabla 2.6	RAEE recogidos de distintos orígenes en Bilbao	52
Tabla 2.7	RAEE con televisores recogidos en Bilbao	53
Tabla 2.8	Cantidades anuales de RAEE recogidas por cada 1.000 habitantes en el distrito de Eindhoven	59
Tabla 2.9	Resultados de recogida de RAEE en toneladas por cada 1.000 habitantes en un año	60
Tabla 2.10	Objetivos de recuperación y reciclado, en peso, para el 31/12/2006	64
Tabla 2.11	Iniciativas legislativas por países.....	67
Tabla 2.12	Plásticos más frecuentemente empleados en fabricación de carcasas.....	89
Tabla 2.13	Materiales recuperados en televisores tratados por Sony en Japón	92
Tabla 2.14	Especificaciones de Schott Glass para vidrio de pantalla para ciclo cerrado.....	98
Tabla 2.15	Especificaciones de Schott Glass para vidrio de cono para reciclado en ciclo cerrado	99
Tabla 2.16	Aplicaciones existentes y potenciales de vidrio de TRC	105

Tabla 3.1	Material recuperado para un aparato con un peso medio de 17 kg, con la opción manual 100%.....	142
Tabla 3.2	Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea manual 100%	143
Tabla 3.3	Principales parámetros del análisis económico de la instalación manual 100%	143
Tabla 3.4	Material recuperado con la opción 100% automatizado, para un aparato con un peso medio de 17 kg.....	151
Tabla 3.5	Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea propuesta 100% automatizada	152
Tabla 3.6	Parámetros del análisis económico de la instalación automatizada. (Para un aparato con un peso medio de 17 kg).....	153
Tabla 3.7	Material recuperado en la opción semiautomática (Para un aparato con un peso medio de 17 kg)	158
Tabla 3.8	Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea semi-automatizada propuesta.....	159
Tabla 3.9	Principales parámetros del análisis económico de la instalación semi-automatizada. (Para un aparato con un peso medio de 17 kg)	160
Tabla 3.10	Resumen de métodos para tratamiento de televisores y monitores y grado alcanzado de separación de materiales	161
Tabla 3.11	Resumen de correspondencias entre coste de tratamiento, automatización y grado de separación	162
Tabla 3.12	Cotizaciones de materiales recuperados de un monitor	166
Tabla 4.1	Valores de los parámetros de entrada al sistema de optimización (aparato con un peso medio de 17 kg)	176
Tabla 4.2	Solución óptima del modelo de reciclado	179
Tabla 4.3	Valores óptimos para los pesos de materiales a obtener.....	179

Tabla 4.4	Valores resultado de la optimización aplicando cotizaciones ficticias de materiales y sin aplicar restricciones de la directiva RAEE	181
Tabla 4.5	Valores resultado de la optimización, aplicando precios reales de cotizaciones de materiales pero sin aplicar directiva	183
Tabla 4.6	Valores resultado de la optimización, aplicando precios reales de sucesivas cotizaciones de materiales y aplicando la directiva	184
Tabla 5.1	Resumen de RAEE valorizados generados	216
Tabla 5.2	Pesos de producto recuperado (promedio por aparato).....	221
Tabla 5.3	Valor de retorno en el mercado del producto recuperado (en €/ t)	222
Tabla 5.4	Ingresos por producto recuperado por aparato (en €/ /aparato).....	223
Tabla 5.5	Datos de producción y explotación.....	224
Tabla 5.6	Inversiones necesarias en la línea	224
Tabla 5.7	Principales parámetros del análisis económico de la instalación para el año 1	225
Tabla 5.8	Estimación de costes e ingresos de la línea propuesta para años sucesivos (euros).....	228
Tabla 5.9	Datos anuales de entrada para el análisis económico para el año 1	229
Tabla 5.10	Análisis económico complementario de la planta de reciclado ...	231

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo recoge una introducción a la temática tratada en esta tesis, incluyendo las razones de su elección, la problemática existente, los objetivos perseguidos y la solución propuesta. Así mismo, se explica la metodología de investigación utilizada y se finaliza con la descripción de la estructura de este documento.

1.1 La problemática del reciclado de aparatos

Los residuos provenientes de los AEE desechados (llamados “basura electrónica” o “e-waste” en inglés), se componen de un rango de productos de tipología diferente, 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 [Andreola et al., 2007]. Como consumidores de productos tecnológicos tendemos a la adquisición de dispositivos cada vez más baratos, rápidos y pequeños, con cortos períodos de renovación. En consecuencia, la cantidad creciente de basura electrónica se ha convertido en un serio problema medioambiental [Streicher-Porte et al., 2005, Rahimifard, 2008]. Estadísticas sobre Estados Unidos muestran que entre un 2 y un 5% de los residuos sólidos urbanos son basura electrónica, con un crecimiento anual del 8%. En Europa, este crecimiento se sitúa entre un 3 y un 5% anual, tres veces mayor que el incremento de la basura “tradicional” [Hischier, 2005].

Los 463 millones de habitantes de la Unión Europea producen una media de 10 a 12 kg de residuos de AEE (en adelante, RAEE) por habitante al año; unos 5,1 millones de toneladas [Zonneveld, 2007]. En diversos países existen programas de recogida selectiva de RAEE (un total de 16 diferentes), que recolectaron 428.600 Tm de desechos (3,3 kg por habitante). Estas cantidades crecen rápidamente por ejemplo porque el mercado de los ordenadores está todavía lejos de la saturación y la vida media de un ordenador decrece rápidamente: en 1997 era de 6 años, en 2005, 2 años [Kang y Schoenung, 2006].

Hasta hace unos diez años estos RAEE eran depositados en vertederos donde a veces eran incinerados. Pero debido a su rápido crecimiento y a los problemas medioambientales que generan se hacen necesarios nuevos tipos de tratamiento de los mismos. Poco a poco nos vamos concienciando de que contienen no sólo sustancias peligrosas y potencialmente tóxicas para el medio ambiente: plomo, cromo, bario, cadmio, mercurio, retardantes a la llama, etc., sino también componentes y materiales de valor que pueden ser reciclados y reutilizados.

Una de las primeras dificultades que aparecen en la gestión de RAEE es su recolección. Las cantidades de productos recogidos cambian continuamente (debido a la inexistencia de incentivos en la mayoría de las ocasiones, a la falta de concienciación o a los costes elevados), por lo que los sistemas de reciclado sufren la incertidumbre de los flujos de retorno (recuperación de aparatos desechados). 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, en inglés "*Waste from electrical and electronic equipment*", (WEEE) [European Commission, 2003a], y la directiva 2002/95/EC para la restricción del uso de sustancias peligrosas en AEE (*Directive 2002/95/EC on the Restriction of the use of hazardous substances in electrical and electronic equipment, RoHS*), [European Commission, 2003b]. Ambas directivas están relacionadas y

tienen como objetivo la disminución de la presencia de sustancias peligrosas en AEE y la reducción de sus residuos en vertederos.

La directiva 2002/96/EC 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 por habitante y año de AEE procedentes de hogares familiares. 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. Desde el punto de vista económico de las empresas recicladoras, la disponibilidad de grandes cantidades de RAEE a reciclar en un área determinada es un prerrequisito para garantizar el interés económico de su recolección, transporte y procesamiento.

La temática relacionada con los problemas y la gestión de la recolección y transporte de aparatos fuera de uso ha sido ampliamente tratada con numerosas propuestas tanto legislativas como técnicas que tratan de solucionar el problema de la logística inversa de la recogida de RAEE [Kang y Schoenung, 2006], la localización de plantas recicladoras [Alves et al., 2009; Ersoy, 2009; Ortega-Mier et al., 2007; Queiruga et al., 2008], y la responsabilidad de los fabricantes, como el caso de Hewlett-Packard [Hieronymi, 2007].

Por otro lado, los problemas técnicos de la separación y reciclado de materiales y componentes han sido estudiados desde varias perspectivas. Las soluciones propuestas se han centrado en gran medida en estudios de optimización de la secuencia de desmontaje de todos y cada uno de los componentes de un aparato determinado, basándose en los datos geométricos disponibles y realizando cálculos de trayectorias para extraer

cada componente [Krikke et al., 1999; Teunter, 2006]. Aplicando una gestión más compleja se han sugerido otras soluciones [Stuart y Christina, 2003], tratando de adaptar la planificación tradicional de empresas de producción a las características especiales del proceso de reciclado: no hay fecha de entrega de un producto, la entrada de materia prima (aparatos a reciclar) es impredecible en tiempo, la cantidad, homogeneidad, estado de conservación, los materiales y componentes que se pueden obtener del propio proceso no son fácilmente reconocibles ni evaluables. Dichas soluciones de planificación intentan integrar las tecnologías de simulación gráfica y los programas de optimización para la separación de componentes, utilizando también medios de desmontaje más o menos automatizados [Lambert, 2002; Gerner et al., 2005]. Sin embargo, las tecnologías de simulación propuestas para la actividad de reciclado están claramente orientadas a simulación de producto, no a los procesos de simulación de reciclaje, que conllevan operaciones de manipulación, separación y corte.

Es necesaria una mejor separación y un tratamiento más eficiente de los materiales para poder acceder a una reutilización de éstos de forma que mejore la rentabilidad de las instalaciones de reciclaje y solucione los problemas técnicos existentes [Tang y Zhou, 2001; Kang y Schoenung, 2006]. Actualmente no se realiza una correcta separación de componentes y materiales de los aparatos electrónicos por la complejidad en la composición interna de estos dispositivos. En consecuencia, no se garantizan unos precios de venta mínimos del material obtenido y, por tanto, un beneficio que justifique el reciclado. Las empresas del sector del reciclado deben gestionarse con criterio industrial, teniendo como objetivo el cliente (el futuro usuario de los materiales obtenidos en el reciclaje), la optimización de la calidad, el costo y el servicio. Además, debe aprovechar las ventajas que ofrecen las tecnologías para la gestión de la información y evaluación de procesos, adecuándolas al tipo de empresa pequeña y mediana que representa prácticamente el 100% de este sector. Estas necesidades son las que intentamos abordar en esta tesis.

1.2 Objetivos de la tesis

Una vez identificada la problemática y dadas las consecuencias no deseables de la incineración o depósito en un vertedero de estos residuos, tomaremos para nuestra investigación el criterio de “*reciclabilidad*”, entendido como el porcentaje de material que puede ser considerado como materia prima reutilizable. Para el caso de un televisor o monitor de ordenador su reciclabilidad media teórica, si el aparato es relativamente moderno, es del 90%, dependiendo de la aceptación por el mercado de los materiales reciclados y de las leyes (muchas de ellas emergentes y/o en adaptación), pero desciende a un 75-85% de reciclabilidad teórica en aparatos con una antigüedad de 10 a 20 años. Se trataría de obtener mejoras aplicadas al proceso de desmontaje, que redunden en una disminución de costes y en un aumento de materiales recuperados y, consecuentemente, en un aumento del ratio de reciclado.

El objetivo general de este trabajo de investigación es, por tanto, la optimización del reciclado de aparatos electrónicos, concretamente televisores y monitores, aplicando criterios de viabilidad técnica y económica, teniendo en cuenta aspectos legales y medioambientales y generando como resultado final una determinada estrategia de desensamblado y grado de recuperación de materiales que optimice el beneficio de las empresas recicladoras.

En concreto, pretendemos analizar y proponer las tecnologías y el proceso más adecuado, automatizado o semi-automatizado, para optimizar las operaciones de separación de materiales y componentes, recuperando específicamente el vidrio proveniente de los tubos de rayos catódicos y los componentes provenientes de las tarjetas de circuitos impresos para su posterior reciclado y valorización. La Figura 1.1 muestra los objetivos descritos de forma esquemática.

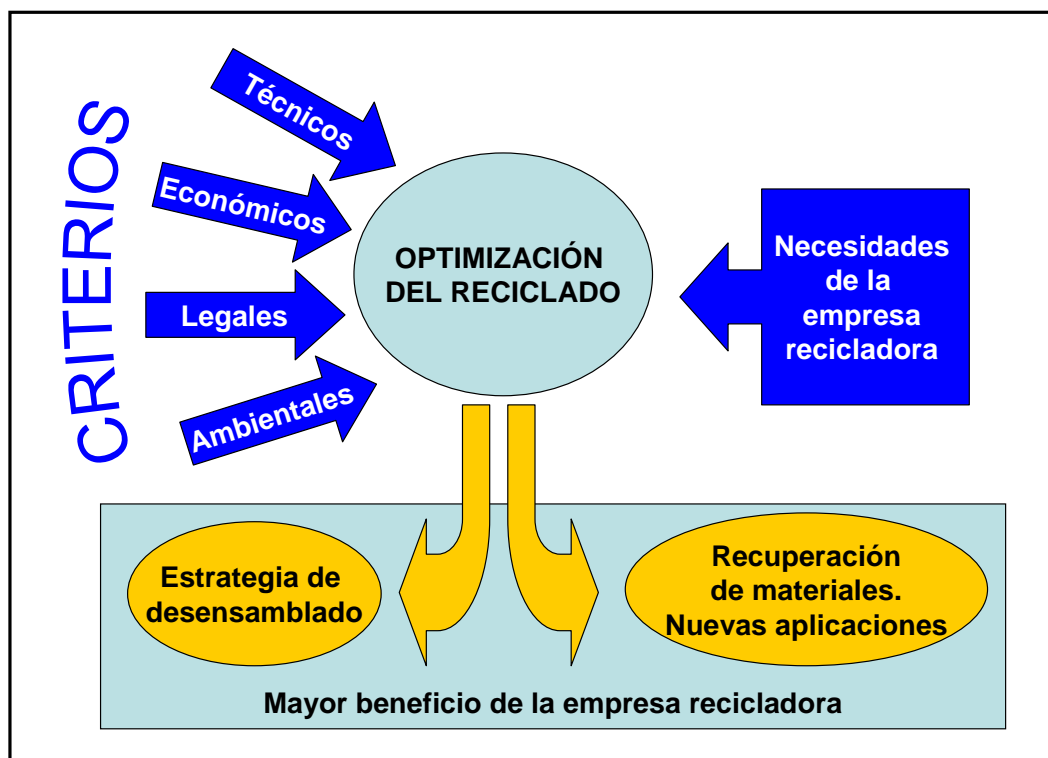


Figura 1.1 Objetivos de la tesis

Para conseguir esta optimización del reciclado proponemos un nuevo método (Figura 1.2) que mejora la planificación y selección de operaciones en líneas de desensamblado y reciclado, formadas por varias estaciones [Rentería y Álvarez, 2007b; Rentería et al., 2008; Rentería et al., 2009].

El método propuesto combina la utilización de dos técnicas aplicadas en los estudios de optimización: simulación de procesos (tanto automatizados como manuales) y optimización lineal de parámetros.

El propósito es definir la mejor alternativa y grado de automatización adecuada para optimizar el proceso de desensamblado y reciclado de aparatos electrónicos. Este método se orienta a maximizar el beneficio obtenido por las empresas recicladoras, obteniendo un determinado grado de separación de los materiales y componentes de mayor interés económico. Así mismo, respeta las restricciones legales en vigor y tiene en cuenta las consideraciones económicas y técnicas del proceso de reciclado y las experiencias previas del reciclador.

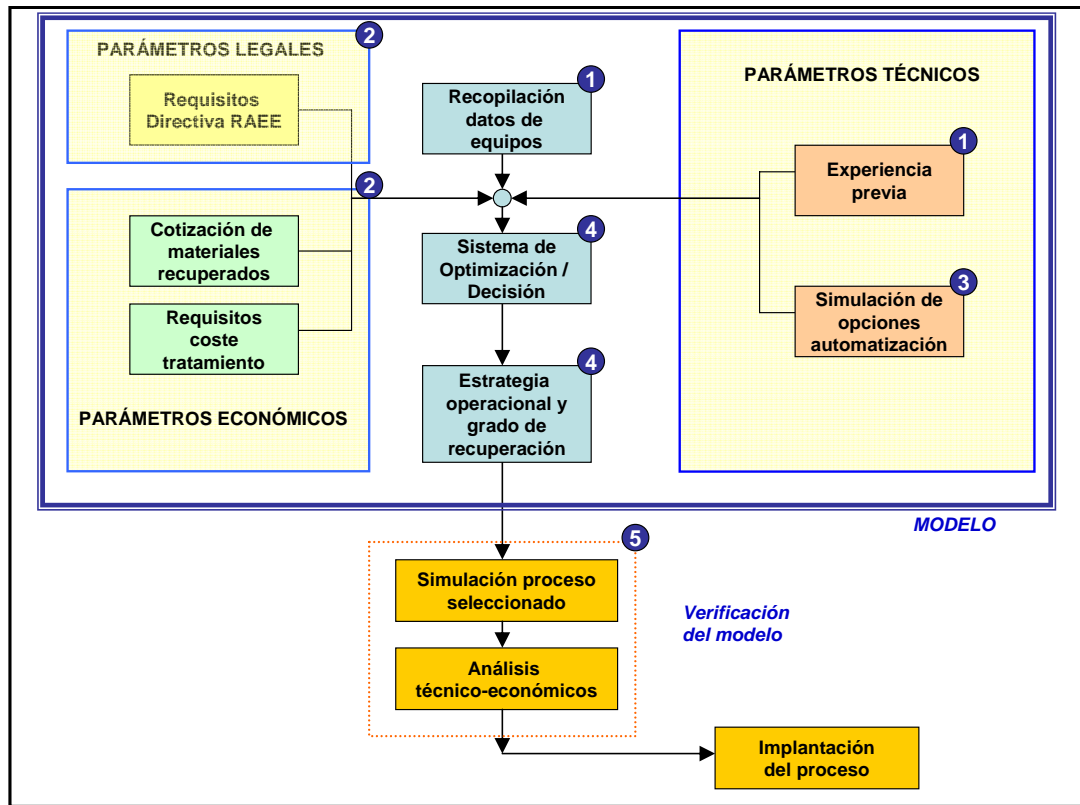


Figura 1.2 Diagrama del modelo propuesto

De forma general, las fases de nuestro método son las siguientes (su numeración se corresponde con la Figura 1.2):

1. Recolección de datos de los aparatos a reciclar. Se agrupan por familias de tratamiento similar. Esta etapa contempla una primera evaluación técnica de métodos de separación de componentes, basados en experiencias previas del reciclador integradas en un modelo virtual (representación gráfica) del proceso de reciclado.
2. Recolección de parámetros legales y económicos. Son los relativos a la legislación a cumplir en términos de porcentaje de reciclaje mínimos y cotización de los materiales que se obtendrán del desmontaje del aparato.
3. Análisis de opciones técnicas de reciclado. Se estudian, de mayor a menor nivel de automatización, las alternativas de distribución en

planta, los tiempos de ciclo, los medios de producción y los costes de tratamiento. En esta fase se aplica el modelo virtual de los diferentes procesos de desmontaje que se podrían utilizar, obteniendo mediante la simulación gráfica los parámetros de interés.

4. Programación de un modelo de optimización lineal. Con los parámetros y datos obtenidos en las fases anteriores se diseña y programa el modelo de optimización lineal, en el cual la función objetivo es el máximo beneficio en el proceso de reciclado, teniendo en cuenta también las restricciones técnicas, legales y económicas. Como resultado de esta fase se obtiene la configuración más adecuada del proceso de desmontaje.
5. Pruebas de validación del método. Realización de pruebas de funcionamiento y evaluación técnica y económica de la solución adoptada como resultado de la aplicación del método propuesto. Para ello, se utilizan diferentes tipos de televisores y monitores con el fin de evaluar las etapas de identificación de aparatos, desensamblado, separación de materiales y análisis de la posible reutilización de materiales (vidrio y componentes electrónicos de las tarjetas de circuitos impresos). Las pruebas se han realizado tanto a nivel de estaciones prototipo en laboratorio como en instalaciones industriales, implantándose las soluciones propuestas en dos empresas.

1.3 Metodología aplicada

Para la realización de esta investigación se ha aplicado una combinación de dos metodologías: *investigación-acción* (técnica cualitativa aplicada para la definición, optimización continua y validación de la solución planteada) [McTaggart, 1991] y la metodología basada en *experimentos de laboratorio* (técnica cuantitativa). Las principales diferencias entre las técnicas cualitativas y cuantitativas radican en la naturaleza de los datos y en el

análisis realizado. En el primer caso, los datos son poco estructurados y no se pueden utilizar de forma estadística, al contrario de lo que ocurre en el segundo tipo. Pero ambas metodologías no deben considerarse extremos opuestos ni incompatibles entre sí. De hecho, cada vez con mayor frecuencia están siendo utilizadas de forma combinada, como es el caso de este trabajo de investigación.

El método de investigación-acción tiene una doble finalidad: generar un beneficio al “cliente” de la investigación (en este caso las empresas recicladoras) y, al mismo tiempo, generar “conocimiento de investigación” relevante (en nuestro caso, nuevas técnicas de optimización de operaciones) [Kock y Lau, 2001].

El proceso de investigación seguido en esta tesis aplica los pasos recogidos en esta metodología [Padak y Padak, 2005] e integra los *experimentos de laboratorio* en una de las fases, tal como se explica a continuación:

- **Planificación:** Se identifican las cuestiones relevantes, directamente relacionadas con el objeto que se está investigando. En esta actividad se buscan soluciones alternativas, líneas a seguir o reforzar algo existente.

En esta tesis identificamos los parámetros de interés en el proceso de reciclado de aparatos electrónicos (tiempos de ciclo, coste, inversiones, etc.), diferentes soluciones técnicas (disposición de máquinas y medios de trabajo, métodos de separación de materiales, etc.) y planificación (definición del beneficio a conseguir por la empresa) para resolver el problema.

- **Acción:** Se propone una posible solución al problema.

En nuestro caso utilizamos las técnicas de simulación y optimización. Partiendo de los datos obtenidos en la fase de optimización lineal, sugerimos una configuración determinada de la instalación de reciclado. Se crea el modelo virtual de la instalación para comprobar su correcto funcionamiento y posteriormente se realizan implantaciones reales.

- **Observación:** Se recopilan datos y se documenta el desarrollo de la acción.

En esta tesis la información proviene de los resultados de las simulaciones por un lado y, por otro, de experimentos realizados tanto en laboratorio como en instalaciones industriales reales.

En este paso aplicamos técnicas cuantitativas. De estos experimentos tanto en laboratorio como en las empresas donde se ha implantado la solución se han obtenido datos estadísticos que han sido utilizados en la fase siguiente de la metodología.

- **Reflexión:** Se analizan los resultados validándolos frente a ciertos criterios.

En nuestro caso hemos aplicado criterios técnicos (validación del funcionamiento de la instalación de reciclado y de la reutilización de los materiales obtenidos en nuevas aplicaciones), económicos (viabilidad financiera del proceso obtenido), legales (cumplimiento de las directivas) y medioambientales.

La Figura 1.3 muestra cómo se ha desarrollado el método propuesto siguiendo las fases de las dos metodologías combinadas de investigación.

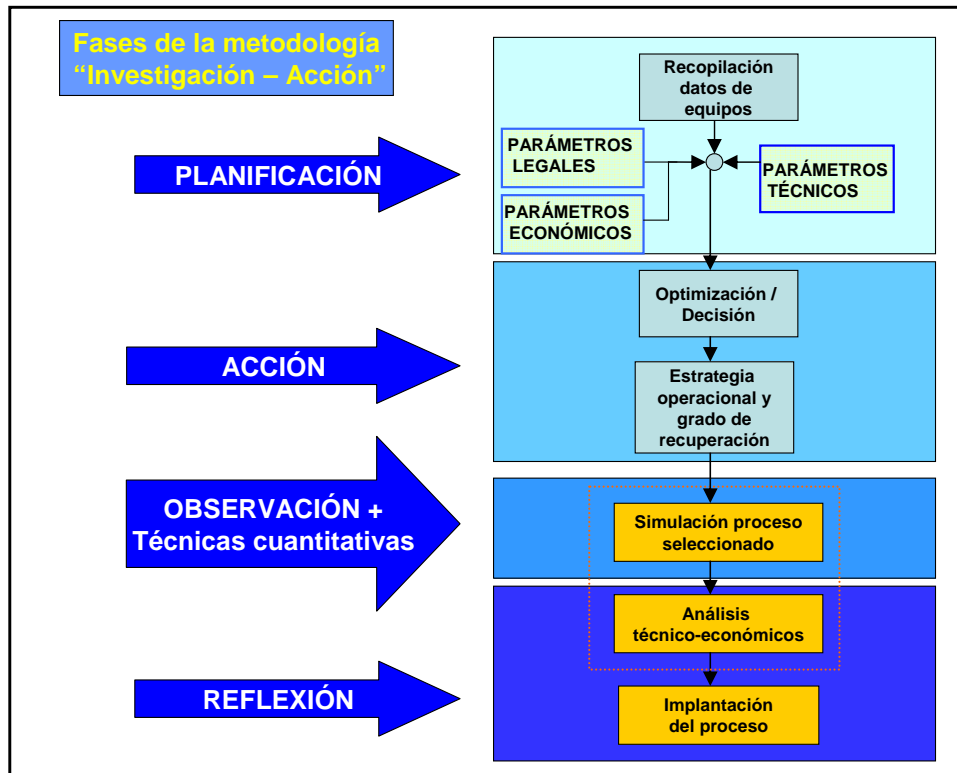


Figura 1.3 Aplicación de la metodología de investigación

1.4 Estructura de la memoria

La presente memoria se organiza en cinco capítulos, además de la Introducción, Bibliografía, Terminología y Apéndice. En el capítulo 2 abordamos los antecedentes y el contexto en el que se realiza este trabajo de investigación. Se revisan las soluciones basadas en la simulación para la planificación y optimización de procesos, aplicadas a la automatización de operaciones de reciclado en entornos de programación lineal y gráfica, los métodos existentes en las instalaciones de reciclado de AEE, la normativa legal en curso, la problemática de la recogida de residuos (logística inversa), y las aplicaciones potenciales de los componentes y materiales recuperados, indicando las limitaciones existentes.

En el capítulo 3 presentamos el método que aportamos desde el punto de vista conceptual, explicando las diferentes fases en las que se divide. Se

explica el propósito general de la tesis y los objetivos concretos a alcanzar. También se detalla cómo se van a validar los resultados.

El capítulo 4 recoge la experimentación e implantación práctica del método propuesto, mediante su aplicación en dos empresas industriales que realizan procesos de reciclado de aparatos electrónicos.

El capítulo 5 incluye la validación del método mediante el análisis de los parámetros técnicos, económicos, legales y medioambientales obtenidos de la implantación.

Nuestras aportaciones, las conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación se incluyen en el capítulo 6.

2. RECICLADO DE APARATOS ELÉCTRICO-ELECTRÓNICOS

En esta sección se explica la situación en la que se enmarca este trabajo de investigación, problemática existente y necesidades a cubrir, junto con una explicación del estado de la técnica en las materias que influyen en el tema desarrollado en esta tesis.

2.1 Contexto en el que se desarrolla la tesis

Desde los años 70 y 80 se ha vendido un número creciente de aparatos electrónicos de consumo habitual. Su vida útil es relativamente corta, va decreciendo como resultado de los rápidos cambios en sus características y capacidades e incluso siguiendo ciertas modas. Esto origina una cantidad ingente de RAEE 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 del 3 a 5% [Andreola et al., 2007]. Con la ampliación del número de países en la Unión Europea se estima que para el año 2020 la cantidad de AEE desechados alcanzará 12,3 millones de toneladas [European Commission, 2007].

Inicialmente estos residuos se depositaban en vertederos, donde a veces eran incinerados. Los riesgos que esto supone pueden resumirse en los siguientes puntos [Irasarri, 1994]:

- Volumen:
 - Saturación de vertederos, un bien escaso, provocando el llamado “efecto NIMBY”, del inglés “Not in my back yard”, (“No en mi patio trasero”), debido a la oposición ciudadana a su emplazamiento.
- Riesgos de contaminación incontrolados:
 - Existencia de sustancias peligrosas.
 - Riesgo de reacciones incontroladas.
 - Lixiviaciones. Contaminación de aguas subterráneas.
 - Incendios incontrolados. Emisión de contaminantes a la atmósfera.
 - Dispersión incontrolada de riesgos.
- Impacto en incineradoras:
 - Presencia de algunos de los productos que más pueden comprometer a sus sistemas de depuración.
- Desperdicio de recursos no renovables: metales, plásticos, energía.
- Contrario a los principios del desarrollo sostenible.

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. En 1994 se desecharon aproximadamente 20 millones de ordenadores (unos 7 millones de toneladas). En 2004 esta cifra se incrementó hasta los 100 millones de ordenadores. En el período 1994–2003 alrededor de 500 millones de ordenadores alcanzaron su fin de vida. Esta cantidad de aparatos contiene 2.872.000 Tm de plásticos, 718.000 Tm de plomo, 1.363 Tm de cadmio y 287 Tm de mercurio [Widmer et al., 2005].

Los aparatos electrónicos están fabricados utilizando la integración de numerosas tecnologías y se componen de materiales muy diferentes. Este

hecho implica que su reciclado y recuperación efectiva requiere nuevos y diversos métodos y técnicas. La Unión Europea promueve, entre sus actuaciones y normativas, el llamado “Principio de la escalera” [Irasarri, 1994]. Se recomienda no aplicarlo de forma dogmática, y sí como una multiherramienta de forma que, ante un problema determinado, se apliquen simultáneamente los escalones que aporten globalmente una mayor eficacia y eficiencia. Las actuaciones sobre las que se basa este principio son:

- **Prevención.** Evitar o reducir el impacto medioambiental (en términos de cantidad o nocividad para el medio ambiente) de los residuos originados como consecuencia de la fabricación, comercialización y uso de un producto, refiriéndose sólo a las actividades que son anteriores al momento de la recolección del residuo. En esta etapa son fundamentales el diseño y el proceso de fabricación.
- **Reutilización.** Se produce una reutilización cuando el producto, tal cual, se introduce en un nuevo ciclo de utilización, donde será empleado tanto para su aplicación original como para una nueva.
- **Recuperación.** Cualquier tratamiento después de la etapa de recolección, por el que son obtenidos componentes, materiales o energía, para un nuevo ciclo de utilización.
- **Reciclado.** Cualquier actividad recuperadora que reincorpora componentes o materiales (no energía) al ciclo de producción.
- **Combustión.** Ésta se realiza con recuperación energética en incineradoras adecuadamente preparadas y controladas.
- **Incineración.** En este caso no hay posibilidad de obtener energía.
- **Vertido.** En áreas específicamente acondicionadas.

La Figura 2.1 muestra una solución similar a este principio mencionado [Liu et al., 2002].

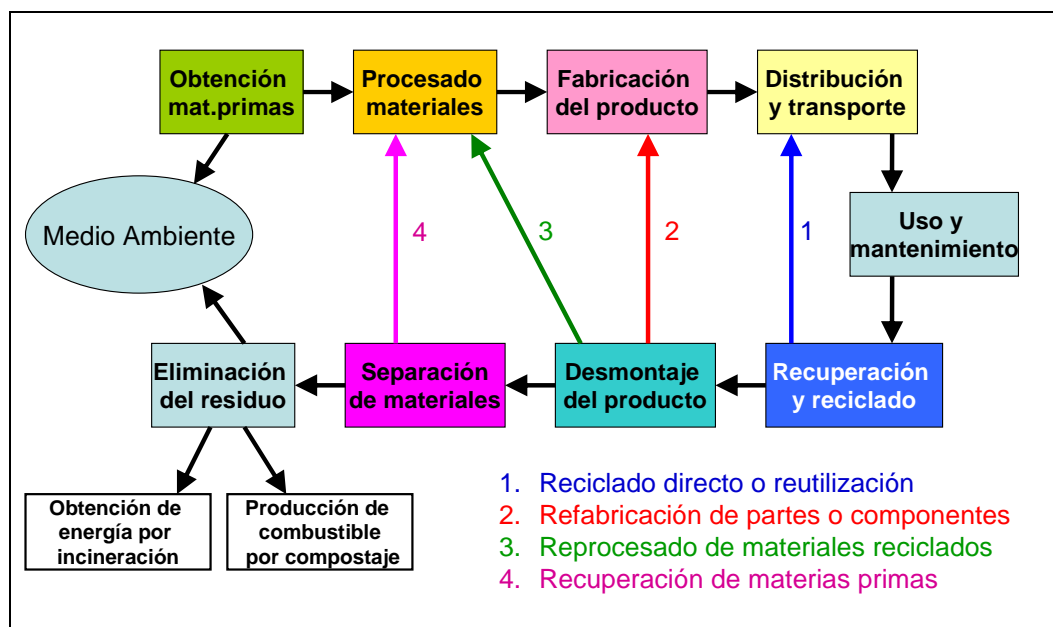


Figura 2.1 Diferentes formas de tratamiento de productos fuera de uso

Existe un consenso general acerca de la necesidad de dirigir los esfuerzos de la investigación e innovación hacia el logro de tecnologías favorecedoras de un desarrollo sostenible [Lettinga, 2008; Kralj y Markic, 2008; Seyfang, 2007]. Esta reflexión se hace no sólo por consideraciones éticas, sino más bien por salvaguardar intereses económicos, ya que los desequilibrios económicos globales, la obsesión consumista y el despilfarro de recursos podrían crear una escasez de materias primas que afectaría de lleno al actual sistema económico mundial [Lamela, 2005]. No hay más que ver la tendencia de los países emergentes como China e India, y extrapolar el futuro de sus vertidos comprobando el valor actual del vertido anual medio de metales y plásticos contenidos en los residuos de un país occidental hoy en día. Probablemente no habrá materias primas para todos y, si las hay, el impacto medioambiental derivado del esfuerzo minero e industrial correspondiente puede ser insoportable si se aplican los procesos tecnológicos que se están empleando actualmente.

Derivado de esta preocupación, se han iniciado pasos concretos para resolver la problemática de los RAEE. En los siguientes apartados de este capítulo se recoge la situación actual del tratamiento de desechos de esta tipología, cubriendo los diferentes aspectos relevantes:

- Modelos de simulación y planificación de procesos aplicados a la automatización de operaciones, y especialmente a la optimización del proceso de reciclado en entornos de programación lineal y gráfica.
- Procesos existentes en las instalaciones de reciclado de AEE, revisando las actividades manuales de separación de componentes y reutilización, las posibilidades de automatización de ciertas operaciones, la aplicación de nuevas tecnologías que optimicen el proceso, etc.
- Normativa legal en curso, tanto a nivel mundial en países desarrollados, como de forma específica la legislación europea y nacional. Se menciona la problemática de la recogida de residuos (logística inversa) y su relación con la concienciación social.
- Aplicaciones potenciales de los componentes y materiales recuperados, indicando las limitaciones existentes y el aprovechamiento en nuevas actividades.

2.2 Simulación y optimización de procesos

En este apartado realizamos una revisión de los sistemas y métodos actuales utilizados en la simulación gráfica de productos y procesos, su aplicación específica a la problemática del desensamblado, la planificación y simulación desde le punto de vista económico y la optimización de las tareas de reciclado.

2.2.1 Simulación gráfica

El proceso convencional de desarrollo de producto o proceso consiste en la realización de una serie de tareas específicas que deben ser desarrolladas habitualmente por diferentes equipos de trabajo en la empresa. Las fases del desarrollo cubren la generación de las primeras ideas, diseño conceptual, diseño detallado, análisis, elaboración de planos y documentación técnica, fabricación, puesta en servicio y mantenimiento. En un gran número de casos, cada una de las fases mencionadas debe finalizar antes de que la siguiente tarea pueda comenzar. Por ello el ciclo de vida del producto consta de una serie de etapas secuenciales independientes que van desde el diseño a la ingeniería, incluyendo el aprovisionamiento de materiales y componentes, la planificación de los procesos de fabricación, la producción en serie, etc. Con este método de trabajo aislado y secuencial, a medida que el proyecto va avanzando, los cambios en diseño e ingeniería resultan cada vez más costosos en términos de coste y retrasos en la salida del producto al mercado. Para afrontar cada cambio es necesario volver hacia atrás en las etapas de diseño e ingeniería, teniendo que repetir todo el proceso con el consiguiente consumo de recursos y el aumento de los plazos necesarios.

Con el fin de resolver los problemas de ineficiencia que presenta el método secuencial de desarrollo de producto la ingeniería concurrente y la utilización de técnicas de simulación plantean vencer las barreras existentes entre los diferentes departamentos participantes en este proceso, involucrando a las funciones clave dentro de la empresa desde los estadios más tempranos posibles en el desarrollo de producto. La Figura 2.2 muestra de forma gráfica el ahorro de tiempo que se produce en los plazos de un proyecto.

Como se muestra en la figura, mediante la simulación se pueden solapar tareas como *selección de equipos y diseño*, o *construcción y programación*. Las pruebas virtuales en entornos de simulación permiten también reducir el

tiempo dedicado a la *puesta a punto*, por lo que la puesta en ejecución del proyecto se puede adelantar un tiempo (representado por $-T$ en la figura) respecto a la fecha final que se obtendría utilizando los métodos tradicionales de tareas secuenciales.

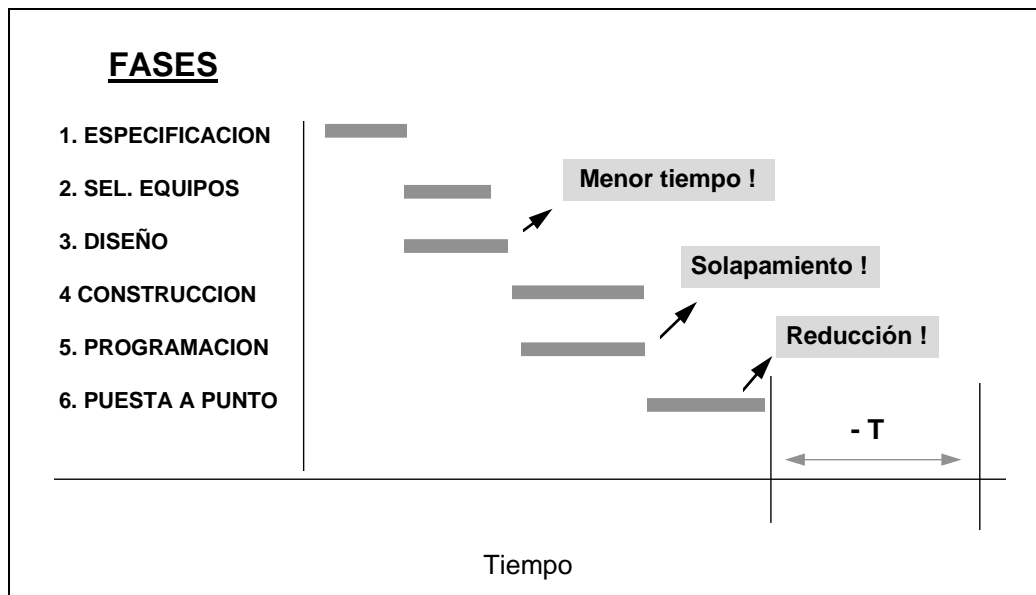


Figura 2.2 Reducción de plazos utilizando la simulación

En la medida en que la ingeniería concurrente se está convirtiendo en una práctica cada vez más extendida en la industria, resulta más crucial disponer de sistemas de modelado, simulación y gestión de datos de producto y proceso, que permitan a los diseñadores acceder a la información relativa al diseño y fabricación de modo integrado. Así mismo resulta muy importante disponer de herramientas que permitan definir y gestionar el flujo de trabajo de una función a otra, con el fin de mejorar la calidad global del producto y reducir tanto el tiempo de desarrollo de producto como el esfuerzo necesario para ello. Las tecnologías de apoyo a la función de diseño e ingeniería son un conjunto de herramientas (hardware y software) y procedimientos (metodología), desarrollados para recoger y canalizar las intenciones y necesidades de los diseñadores, de modo que permitan abordar el diseño y simulación de un producto o proceso de una forma eficiente y eficaz, relacionando correctamente todos los aspectos y personas que intervienen

en dicho diseño y estableciendo así el primer eslabón de la ingeniería concurrente. Dentro del ciclo de diseño y desarrollo de productos y procesos algunas de las principales tecnologías que intervienen son las siguientes:

- Diseño industrial del producto y modelización gráfica avanzada.
- Simulación del comportamiento del producto.
- Simulación de los procesos de fabricación.

Con el fin de realizar el diseño y desarrollo de productos con la mayor rapidez, agilidad, calidad y efectividad en costes, se manejan entornos virtuales de desarrollo y técnicas de modelado que agilizan el trabajo según las directrices de la ingeniería concurrente, facilitando el acceso a la información del producto que se va generando a lo largo de las diferentes fases de su ciclo de vida. Así, el prototipado virtual se define como una especialidad de la ingeniería que se apoya en los ordenadores para modelar un sistema mecánico con el fin de simular su comportamiento en tres dimensiones bajo las condiciones de servicio reales, refinando y optimizando su diseño mediante sucesivas iteraciones que pueden ser realizadas en menor tiempo, menor coste y mayor calidad y fiabilidad de resultados que si se realizaran sin la ayuda de los ordenadores [Nomden et al., 2006].

En la Figura 2.3 podemos observar las diferencias que experimentan los costes de los cambios realizados al producto en función del enfoque utilizado en su proceso de diseño, destacando el hecho de que el importe de las inversiones en las etapas iniciales de diseño e ingeniería, para construir prototipos virtuales y realizar análisis por ordenador de dichos prototipos virtuales, es menor que el coste de realizar modificaciones al producto en fases de desarrollo más avanzadas, siendo esta diferencia muy importante si los cambios sobre el producto se han de efectuar una vez iniciada su fabricación.

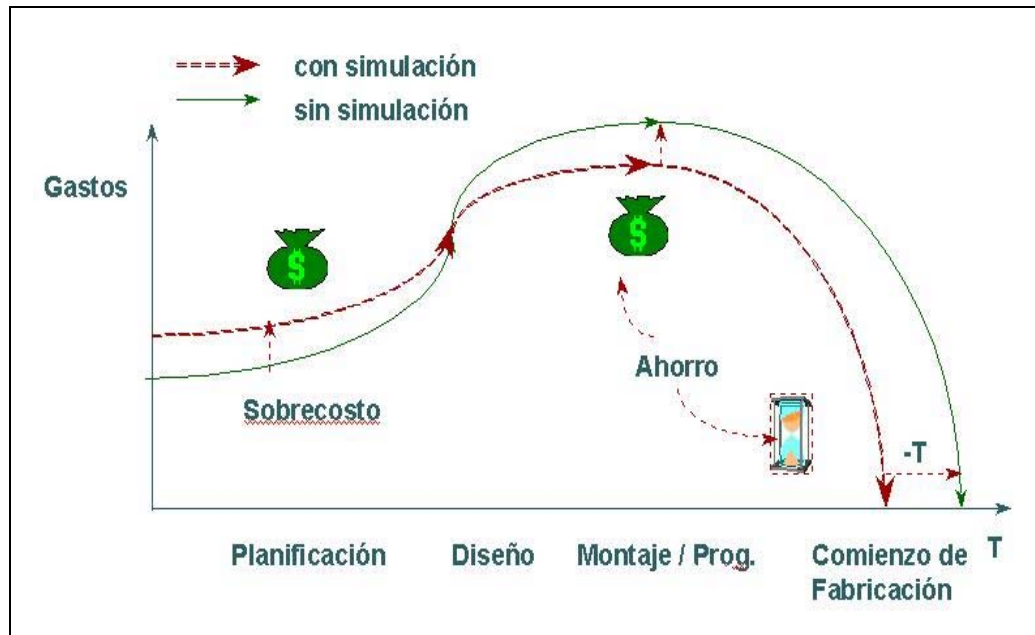


Figura 2.3 Coste de los cambios en función de la fase en que se realicen

Las tecnologías de diseño, modelado y simulación de producto existentes en la actualidad son indispensables para trabajar sobre modelos virtuales del producto en aspectos tales como diseño, fabricación, ensamblado, procesos de transformación, etc. Existen programas de ayuda al diseño (CAD, *Computer Aided Design*), a la fabricación (CAM, *Computer Aided Manufacturing*), a la ingeniería (CAE, *Computer Aided Engineering*) o a la planificación de la producción (CAPP, *Computer Aided Production Planning*). Cada una de estas tecnologías, por su parte, ha evolucionado mucho y ha alcanzado un alto grado de madurez, no sólo por el gran número de sistemas comerciales existentes en el mercado, sino también por la gran fiabilidad y calidad de los resultados que ofrecen. Por su parte, el equipamiento hardware necesario para trabajar con estas herramientas de diseño es un factor crítico a la hora de hacer realmente operativas estas tecnologías de diseño. Hoy en día se dispone de ordenadores de altas prestaciones capaces de agilizar enormemente el trabajo con herramientas de diseño manejando prototipos virtuales en tres dimensiones que, junto a potentes redes de cálculo, permiten realizar en un corto espacio de tiempo numerosas iteraciones del ciclo de diseño e ingeniería de producto o proceso. Se pueden

distinguir dos grandes grupos de aplicaciones y sus correspondientes programas comerciales, que se detallan a continuación:

A. Simulación de comportamiento del producto:

- Análisis de mecanismos (cinemática, dinámica, aceleraciones,...). Por ejemplo: *DADS, DesignWorks, CATIA, PRO/ENGINEER, I-Deas, SolidWorks, SolidEdge.*
- Análisis estructural. Por ejemplo: *I-DEAS FEM, Pro/Mechanica, CATIA FE, ANSYS, ABAQUS.*
- Análisis del comportamiento de fluidos. Por ejemplo: *FLUENT, STAR CD, PAM-FLOW, ICEM CFD, FEATFLOW.*

B. Simulación de procesos:

- Simulación de tolerancias de montaje. Por ejemplo: *VSA, VALYSIS y TASYs.*
- Simulación de procesos de conformado. Por ejemplo: *PAM-STAMP, ABAQUS, DYNA3D, AUTOFORM.*
- Simulación del proceso de hidroconformado. Por ejemplo: *PAM-STAMP.*
- Simulación de procesos de soldadura y tratamientos térmicos. Por ejemplo: *SYSWELD, FRAMASOFT.*
- Simulación de aplicaciones robotizadas/automatizadas: Por ejemplo: *ROBCAD, IGRIP, GRASP, RobotStudio.*

En las siguientes secciones se detallan las características de este último tipo de simulación (que será la utilizada en esta tesis), así como su estado de aplicación en operaciones relacionadas con el desensamblaje de RAEE.

2.2.1.1 Simulación de instalaciones automatizadas

La validación de los diseños de las instalaciones automatizadas antes de su implantación física proporciona un gran ahorro de tiempo y dinero. Hasta fechas recientes, el diseño de nuevas instalaciones se realizaba en función de experiencias anteriores y con personal muy especializado, con una alta probabilidad de que una vez implantada la instalación existieran partes para las que se precisaran retoques y modificaciones, y un incremento en el coste difícilmente previsible. Las técnicas de simulación permiten la creación de distribuciones en planta (*layout*) virtuales [Sankar et al., 1999; Mitsi et al., 2007], y la depuración de los programas de robots (u otras máquinas de producción) fuera de la línea de producción (programación *off-line*), sin interrumpir el flujo normal de trabajo. Esto proporciona notables ventajas, incluyendo la reducción del tiempo improductivo del robot, mayor seguridad del operador y generación rápida de programas, incluso permitiendo optimizar y minimizar los tiempos de ciclo de las tareas.

El software de simulación es la clave para la optimización del diseño. El modelo de la instalación se comienza a fabricar virtualmente en el ordenador, así el diseñador puede analizar gráficamente los siguientes elementos:

- Alcance de los robots y maquinaria móvil en general.
- Colisiones de los mecanismos en movimiento.
- Tiempos de ciclo.
- Geometría de los utillajes.
- Distribución de operaciones en células multi-robot y multioperario.

Los párrafos siguientes recogen las fases necesarias para realizar la simulación de un proceso automatizado [Rentería y Rivas, 2000]. La primera actividad de la simulación es la fase de diseño, cuyo propósito es obtener el

modelo tridimensional de la instalación. El proceso de simulación comienza con una primera etapa de modelado geométrico, en el que se realiza la representación gráfica de los elementos componentes de la célula de trabajo como pueden ser el sistema de transporte, mesas estáticas y de volteo, utillajes de fijación y posicionado, herramientas, piezas, robots, etc.

Esta etapa admite normalmente el intercambio de datos geométricos con otros sistemas de CAD utilizando formatos neutros como son IGES, VDA-FS, SET, STEP, etc. Los sistemas de simulación disponen de traductores directos de los programas más utilizados de CAD. Estos interfaces posibilitan la reutilización de la información de la geometría de los componentes ya diseñados en otro sistema de CAD, consiguiendo mayor rapidez y exactitud en el modelado (Figura 2.4).

La Figura 2.5 muestra una simulación con el modelo de una máquina que ha sido directamente importado de un sistema CAD, junto con un modelo de robot extraído de las librerías existentes en el propio sistema de simulación.

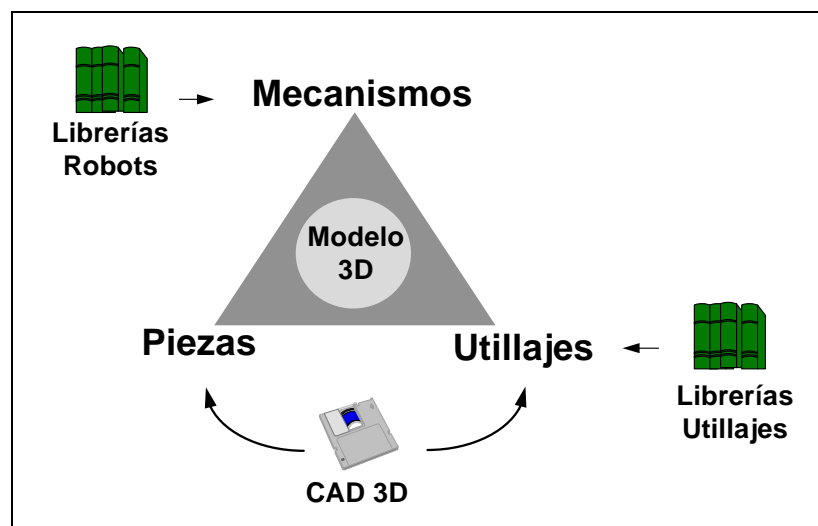


Figura 2.4 Fase de modelado

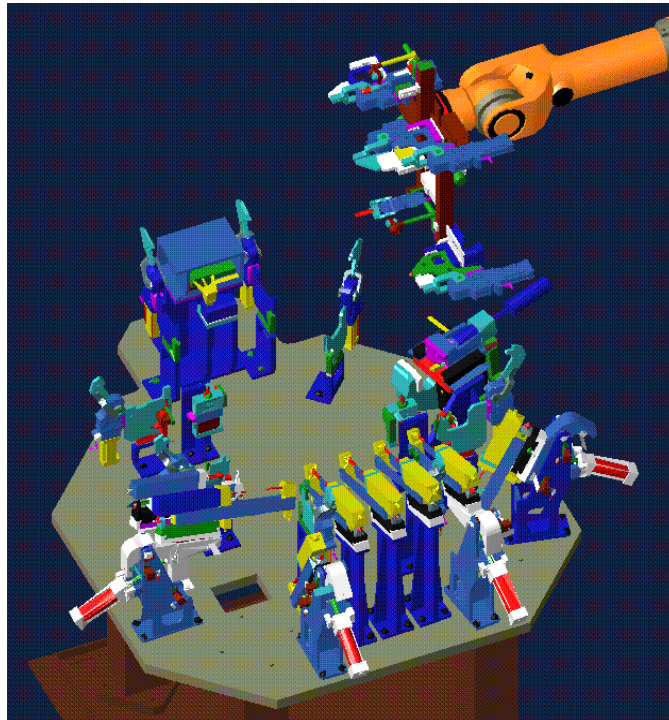


Figura 2.5 Modelo 3D de un componente

Los sistemas de simulación de proceso disponen de herramientas que, además del diseño geométrico, permiten definir las características cinemáticas de los robots y componentes móviles. Así mismo, en algunos programas existen librerías de la mayoría de los robots comerciales con todas sus características ya definidas. También es posible simular los movimientos de operarios para realizar estudios ergonómicos.

Una vez definido el layout de la planta, se inicia el proceso de definición de trayectorias a seguir por el robot, es decir, la localización exacta de los puntos de paso, su secuencia, velocidades, etc. (Figura 2.6). La definición de trayectorias de los robots se realiza controlando el movimiento de cada uno de los ejes del robot independientemente o definiendo las posiciones a alcanzar por la herramienta del mismo.

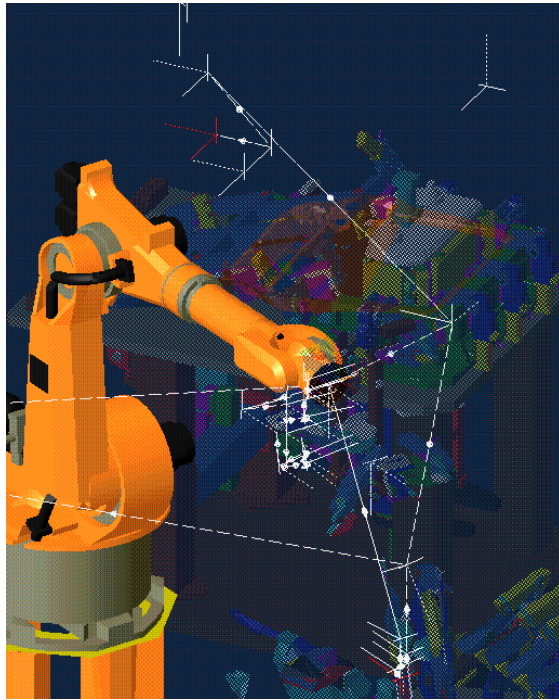


Figura 2.6 Trayectorias de robot en la simulación

Mediante la simulación se observa el movimiento gráfico del robot a lo largo de las trayectorias y de todos los mecanismos que intervienen en la célula de forma paralela.

En esta etapa se detectan colisiones entre los elementos, diseños incorrectos en utillajes, garras, pinzas, errores de posicionamiento, etc. y se analiza el tiempo de ciclo, con la posibilidad de optimizar tanto el diseño como la secuencia de movimientos para mejorar el proceso y disminuir tiempos de ciclo.

Este método de simulación como paso previo a la implantación representa un salto cuantitativo y cualitativo en la forma de diseñar una planta de producción. La Tabla 2.1 muestra las principales diferencias entre los métodos tradicionales utilizados para el diseño de sistemas de fabricación frente a los métodos de simulación:

Tabla 2.1 Principales diferencias en las técnicas de estudio de instalaciones automatizadas

	Proceso convencional	Simulación
Información	Planos 2D	Modelo 3D
Tiempo de ciclo	Estimado	Obtenido
Accesos, colisiones	Experiencia	Gráficamente
Rediseño	Difícil	“Intuitivo”
Programación	“In situ”	Simultánea

Las principales ventajas del uso de las técnicas de simulación se pueden analizar según dos tipos de empresas usuarias: las ingenierías y las empresas de producción [Rentería y García-Tejedor, 1996]. Las principales ventajas para las ingenierías son las siguientes:

- Realización de estudios de viabilidad rápidos y fiables.
- Presupuestos más exactos.
- Seguridad en el diseño.
- Reducción del plazo de entrega de la instalación, debido a tres factores: menor tiempo de diseño, solapamiento de la tarea de programación y reducción de la puesta a punto.

Para las compañías fabricantes se pueden citar las siguientes ventajas:

- Rápidos estudios de viabilidad.
- Seguridad de la inversión en sistemas de fabricación debido al estudio de viabilidad y a la seguridad del diseño.

- Niveles de producción más altos debido a una mayor optimización de la instalación.
- Mayor flexibilidad y disponibilidad de la instalación debido a la programación off-line.

Pero también se han identificado algunos inconvenientes en ambos tipos de empresas:

- Se necesita personal especializado en el manejo del software.
- Carestía del software y hardware (precios muy variables, a los que hay que añadir también altos costes de formación y mantenimiento).
- Diseño lento si no se dispone de modelado previo en 3D en un sistema CAD.

En el mercado actual de programas de simulación de aplicaciones automatizadas existen sistemas orientados hacia dos tipos de estudios: simulación de flujos en planta (eventos discretos) y simulación analítica, más detallada, de operaciones concretas (automatizadas o manuales).

- **Simulación de eventos discretos:** también llamada simulación de flujos. Incluye el estudio de la distribución de máquinas en planta, diseño de almacenes, logística de distribución, gestión de colas de espera, estudio de cuellos de botella, optimización del ciclo de proceso, asignación de recursos, etc. Existe un gran número de programas que cubren una o varias de las materias citadas anteriormente. Generalmente resaltan más la parte algorítmica y matemática del estudio, como por ejemplo: necesidad de introducir datos a la simulación en forma de distribuciones estadísticas y parámetros, resultados numéricos en forma de histogramas o tablas y utilización de gráficos animados de forma simplificada.

- Simulación analítica:** hace referencia más bien a la simulación detallada de una aplicación específica, dentro del proceso global de fabricación de un producto. Generalmente se utiliza en estudios de procesos automatizados (sobre todo robotizados), en los cuales tienen gran importancia los problemas “geométricos” de la instalación: distribución en planta de los elementos de producción, posibles colisiones entre elementos móviles, problemas de accesos, orientaciones de las piezas a montar, optimización del tiempo de ciclo, estudio de alternativas con modelos diferentes de robot, generación de trayectorias, etc. (Figura 2.7). Los sistemas que ofrecen este tipo de simulación son sobre todo programas gráficos, orientados a la animación, que no precisan muchos datos numéricos, pero sí mucha información geométrica.

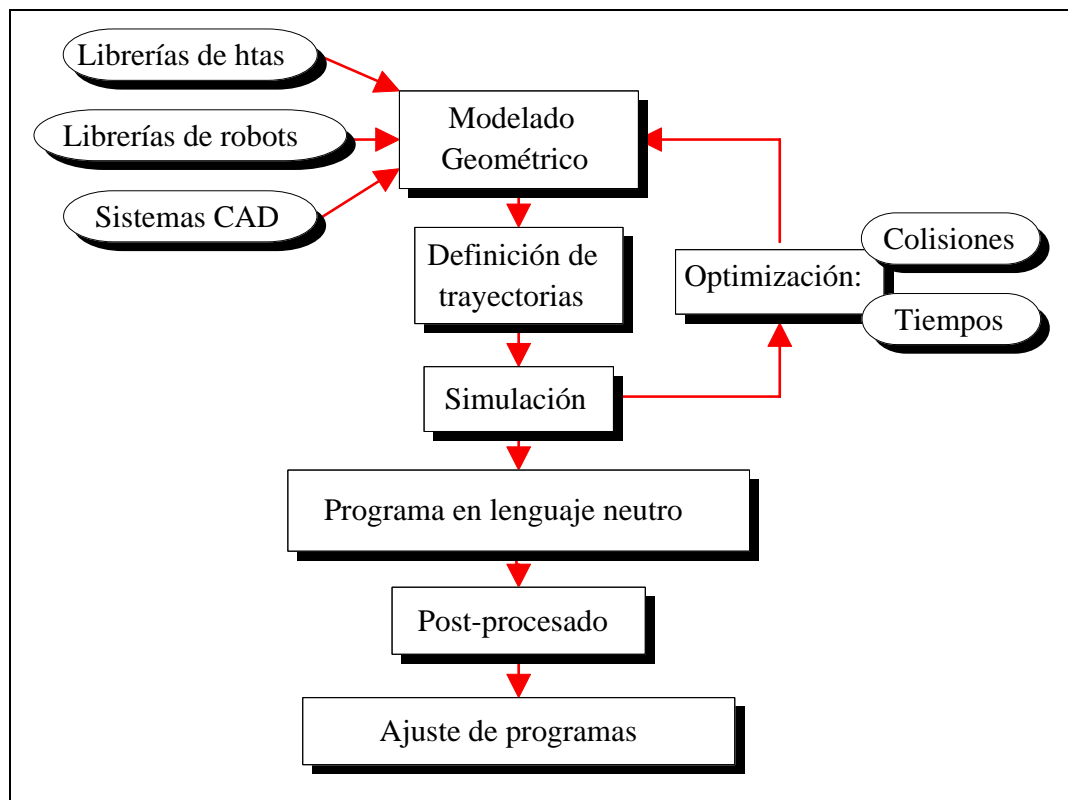


Figura 2.7 Proceso completo de simulación analítica y obtención del programa off-line

Estos productos presentan gran diversidad (aplicación, funcionalidad, prestaciones, etc., tal como se refleja en la Tabla 2.2), pero se detecta una tendencia a unificar estos dos tipos de simulación para obtener un sistema que permita un estudio de una instalación a todos los niveles de detalle. Existen métodos para integrar estos dos tipos de programas de simulación (representados por los paquetes Witness y Superscape VRT), con el objetivo de facilitar el diseño y planificación de una factoría, superando las limitaciones de cada uno por separado [Mujber et al., 2005]. Otros autores [De Vin et al., 2005] van un paso más adelante y defienden la fusión de la simulación con los sistemas de información de la empresa (no sólo en forma de bases de datos, sino también incluyendo la monitorización on-line de máquinas), para un mejor apoyo a los sistemas de planificación y mantenimiento.

Tabla 2.2 Principales programas de simulación y características

Nombre	Tipo /Aplicación	Funcionalidad	Comentario
Workplace/ ROBCAD	Automatización Aeronáutica	Simulación Mecánica Módulos Especiales	Uno de los programas estándar en sector automóvil
SIMPLE++	Logística Distribución	Eventos Discretos Interconexión con otros programas	Muy potente. Integrable. Escalable
WITNESS (=Taylor, SimFactory)	Logística Distribución	Eventos Discretos Datos numéricos	Módulos realidad virtual (VR)
GRASP	(= Robcad)	Similar a Robcad, pero con prestaciones inferiores	Módulos VR y Run-Time
IGRIP	(= Robcad)	Simulación Mecánica Módulos Especiales	Uno de los programas estándar en sector automóvil

En el mercado de sistemas de simulación analítica (generalmente también incluyen programación off-line) pueden destacarse los siguientes sistemas comerciales:

- *Robcad*, desarrollado por Tecnomatix (Israel).
- *Igrip*, desarrollado por Deneb (Dassault Systèmes) (EEUU).
- *Grasp*, de BYG Systems (Gran Bretaña).
- *RobotStudio*, de Digital Plant Technologies (Suecia), específico para robots del fabricante ABB.

Estos programas permiten simular cualquier modelo de robot, mecanismo o dispositivo móvil, aunque también existen sistemas de simulación y programación off-line asociados a un fabricante de robot específico. La mayoría de estos sistemas necesitaban estaciones gráficas de trabajo para poder manipular con agilidad gran cantidad de información geométrica, funcionando generalmente en entornos Unix. Sin embargo, el software está migrando hacia plataformas tipo PC bajo Windows o Linux, sistemas más baratos, amigables y cercanos a los usuarios. Éstos están formados en su mayoría por ingenierías, grandes fabricantes del sector del automóvil, universidades y centros de investigación.

2.2.1.2 Simulación aplicada al desmontaje y reciclado

Como se ha explicado, las herramientas de simulación se han aplicado a la fabricación de productos. Varios autores han utilizado técnicas de simulación y prototipos virtuales orientándolas al producto a desensamblar. Algunas de ellas [Kim et al., 2006] se basan en información relativa al producto a reciclar, desarrollando un algoritmo para generar la secuencia de desensamblado teniendo en cuenta la viabilidad técnica del proceso, las condiciones reales del aparato y las del propio sistema de desmontaje. Este planteamiento requiere de un sistema de información relativa a:

- Estado de cada componente del aparato y de éste mismo.
- Configuración.

- Elementos de unión internos.
- Legislación aplicable en cada caso.
- Información económica (demanda que tiene en el mercado el componente a reciclar).

Se ha propuesto que esta información, variable con el tiempo, esté integrada en el aparato electrónico a desmontar, en forma de dispositivos de codificación y marcado, y sea gestionada por una instalación automatizada de reciclado, con capacidad de replanificación para adaptarse a las diferentes condiciones de trabajo (variación del estado del producto, fallo de alguna parte de la instalación, necesidad de operaciones manuales). Estos algoritmos de planificación se comprueban mediante el software de simulación AutoMod.

En una primera fase del problema podemos citar los sistemas que facilitan el “diseño para el desensamblado” (“*Design for Disassembly*”, DFD), que tratan la optimización de las fases previas del diseño geométrico del producto pensando en la futura secuencia de su desmontaje cuando llegue a su fin de vida (Figura 2.8) [Srinivasan et al, 1999]. Las características y tendencias de los métodos existentes han sido ampliamente estudiadas y revisadas [Langella, 2007; Bogue, 2007; Williams, 2007; Kim et al., 2007; Ilgin y Gupta, 2010; Lee et al., 2001] que examinan los programas software disponibles. Varios autores han propuesto métodos basados en diferentes parámetros relacionados con la dificultad del desensamblado: evalúan la influencia de los costes de diferentes diseños [Sundin y Bras, 2004], desarrollan un método de clasificación según el índice de dificultad de cada tarea de desmontaje [Chu et al., 2009], o introducen los conceptos de entropía y energía para el desensamblado [Pandey y Thurston, 2009].

También existen propuestas de métodos y aplicaciones específicas para reciclado y gestión medioambiental, con la introducción del factor llamado

“diseño para el medioambiente” (“*Design for Environment*”, DFE) [Choi et al., 2006], para ser tenido en cuenta en la fase de diseño. Otro autor evalúa la reciclabilidad y el grado de recuperación de materiales de un producto determinado [Aoe, 2007]. El aspecto de *fin de vida* ha sido investigado para ser aplicado al desmontaje y al diseño para el desmontaje [Gehin et al., 2008; Rao y Padmanabhan, 2008; Grochowski y Tang, 2009]. Por otro lado, otros autores han desarrollado el modelado relacionado con el diseño para el ensamblado (“*Design for Assembly*”, DFA) [Mo et al., 1999].

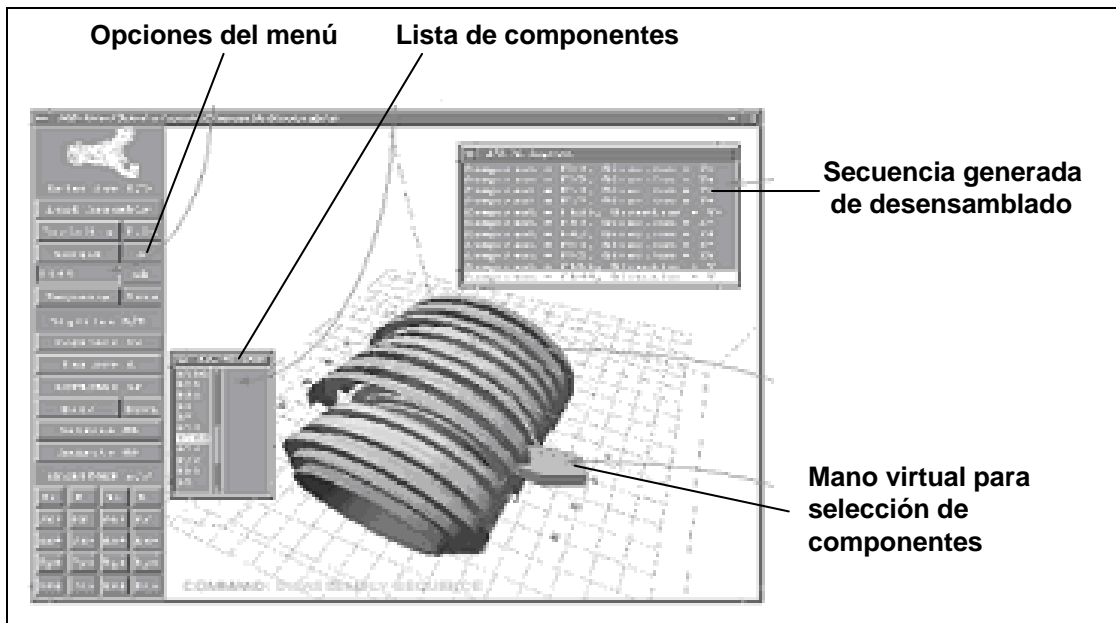


Figura 2.8 Pantalla de resultados de un programa de simulación aplicado a operaciones de desensamblado

La Figura 2.9 muestra una propuesta de método automatizado (en una primera fase) e interactivo (en una segunda fase apoyada por el diseñador) para generar el proceso de desmontaje de un producto, todo ello en un entorno virtual generado a partir de datos CAD del aparato a reciclar [Siddique y Rosen, 1997].

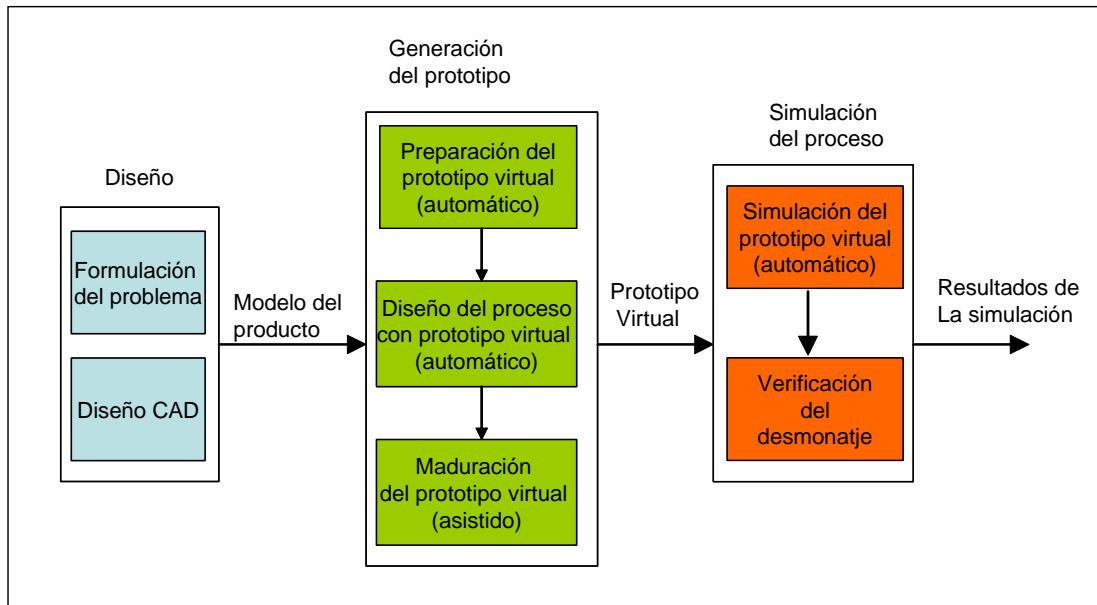


Figura 2.9 Esquema de una solución en un entorno virtual

Para ello, se utilizan tablas y registros de las diferentes partes, materiales, componentes, fijaciones, herramientas necesarias para desmontaje y tiempos necesarios, tal como se recoge en [Güngör, 2006]. Los procesos iterativos han sido propuestos por varios autores para generar la secuencia de desmontaje en cada etapa del desensamblaje, actualizando el modelo cada vez que un componente es retirado [Herrmann et al., 2008], a veces complementados con gráficos AND / OR [Lambert, 2007] para determinar la secuencia de desensamblado.

Las soluciones basadas en representaciones gráficas de las relaciones en el ensamblaje se aplican para determinar automáticamente los conjuntos de sub-ensamblajes, evaluarlos y construir un árbol de desmontaje, añadiendo técnicas de realidad virtual a la metodología de simulación propuesta [Mo et al., 2002; Zwolinski et al., 2007; Li et al., 2006].

Algunos autores recurren a la representación de los límites físicos de los componentes y a partir del modelo CAD se genera el árbol de desensamblado [Peng y Chung, 2007]. Profundizando más en las

interrelaciones entre los sub-componentes y aplicando algoritmos más avanzados, existen soluciones [Lozano-Pérez y Wilson, 1993] que identifican un subcomponente que puede ser extraído del aparato a reciclar, utilizando unos diagramas de interferencias por cada subensamblado y buscando un camino que conecta una región inicial con otra más externa de dicho diagrama. Dicha búsqueda requiere el desarrollo de complejos algoritmos [Kim et al., 2009; Tripathi et al., 2009; Hui et al., 2008; Peng y Chung, 2007], que utilizan cálculos y propiedades de los vectores normales a la superficie de las caras de un componente para determinar si éste es desmontable.

De forma similar, se han propuesto algoritmos de agrupación y clasificación de RAEE, basados en las condiciones de los contornos geométricos de los componentes, con una determinada distribución en planta de la línea de reciclado [Hesselbach y Westernhagen, 1999].

Existe una solución parecida, aplicada al desensamblado en general y a la cual se le añade información proveniente de sensores que identifican el estado del aparato a reciclar [Jun et al., 2009]. Esta propuesta genera secuencias de desensamblado de los componentes de un producto que estén unidos exclusivamente por métodos reversibles.

Otros autores [Dini et al., 2001] amplían los datos del modelo CAD con una simulación de la cinemática de los componentes del aparato, analizando las posibilidades de desmontaje con el cálculo de movimientos, teniendo en cuenta incluso la influencia de la gravedad en el proceso. El proceso propuesto se muestra en la Figura 2.10.

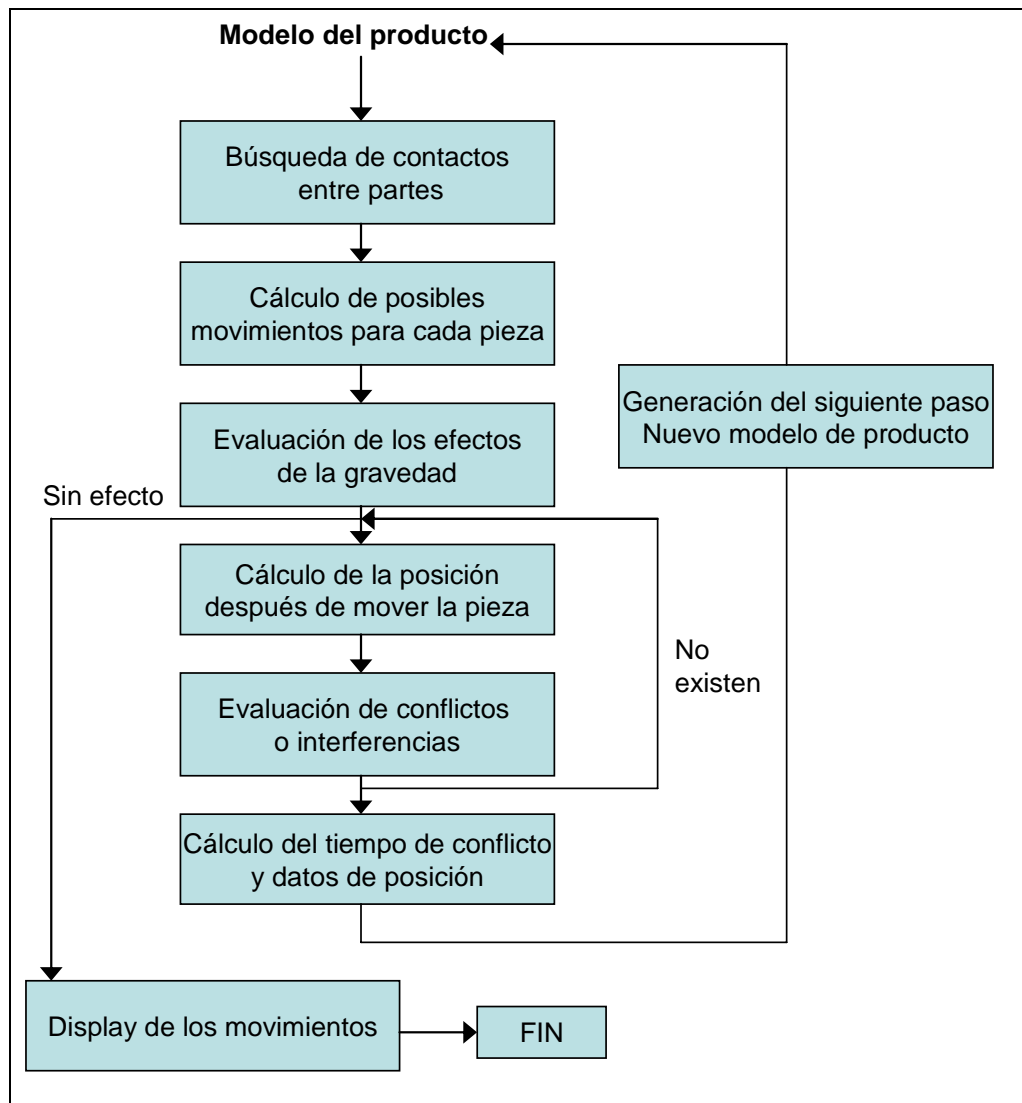


Figura 2.10 Diagrama de flujo de la simulación cinemática para el desmontaje

Los trabajos más directamente relacionados con la temática presentada en esta tesis proponen sistemas de desensamblado automatizado a nivel de laboratorio. Por ejemplo, se ha presentado una célula prototipo compuesta por sistemas de visión artificial, escáner láser, dos robots (uno para reconocimiento y otro para desensamblado con garra táctil), todo ello controlado por dos ordenadores [Hohm et al., 2000]. Basado en gran parte en el reconocimiento por técnicas de visión artificial de los componentes de un ordenador, el sistema es capaz de extraer las tarjetas de circuitos impresos (tipo “plug-in”), y de cortar los cables. Una solución similar ha sido planteada

para extraer las tapas o cobertores de AEE, desmontando los sistemas de fijación por tornillos [Bailey-Van Kuren, 2002].

Otro proceso se basaba en un sistema CAD para el diseño de la distribución de una célula de desensamblado de aparatos, clasificándolos según sus condiciones para un reciclado automatizado y en la disponibilidad de bases de datos con características técnicas y geométricas de los aparatos a desmontar [Gil et al., 2007].

También el problema de la logística inversa ha sido objeto de diferentes estudios relativos a la simulación del comportamiento de las redes de recogida de residuos, tal como se refleja, en parte, en el apartado 2.3.1. Se ha propuesto una solución integral, la simulación de flujos multinivel, enfocada en la planificación tanto de la planta como inter plantas (varias localizaciones para plantas de reciclado), teniendo en cuenta diferentes situaciones de llegada de productos, costes de transporte, etc. [Hesselbach et al., 2001].

2.2.2 Simulación económica y planificación

La planificación y operatividad de sistemas de desmontaje principalmente manuales ha sido un campo de investigación intensiva en los últimos diez años. Al mismo tiempo, ha habido un desarrollo de nuevos equipos para lograr una mayor automatización de las operaciones. En comparación con el desensamblado manual, el desmontaje automatizado debe centrarse más en la planificación de capacidades de máquinas, en las inversiones de equipos de automatización y en los costos operativos, ya que es menos flexible que los operarios en sus operaciones manuales.

Debido a la alta proporción de costos fijos en los sistemas automatizados y al alto riesgo de que éstos sean infrautilizados, gana importancia el

planteamiento de sistemas híbridos, manuales y automáticos, que permitan una mayor flexibilidad y que a la vez reduzcan los costos de mano de obra.

Cabe destacar un estudio sobre los costes de los procesos de reciclado de televisores y monitores en Estados Unidos utilizando el método TCM (*Technical Cost Modelling*, Modelo Técnico de Costes) [Kang y Schoenung, 2006]. Las conclusiones obtenidas muestran que el principal coste, 37%, está representado por el coste de los materiales, el cual incluye el tratamiento específico de los tubos de rayos catódicos (TRC); el segundo mayor coste es la mano de obra (28% del coste total, excluyendo indirectos). Otros costes incluyen el transporte, edificios y maquinaria. La unidad de proceso de mayor coste es el reciclado del vidrio de los TRC, seguido de las operaciones de clasificación, recolección y desmontaje. El mayor ingreso económico obtenido por las empresas recicladoras lo constituye la tasa que se cobra a los usuarios que llevan los aparatos a reciclar, seguido de los ingresos por la venta de los materiales metálicos.

Desde el punto de vista del ahorro incurrido y beneficios económicos obtenidos de las tareas de reciclado, en las tablas siguientes se ofrecen datos significativos [Cui y Forssberg, 2007]. La Tabla 2.3 muestra el ahorro en energía y materia prima que representan las actividades de reciclado y la reducción de parámetros considerados nocivos para el medio ambiente.

Los datos detallados del ahorro en energía para la obtención de materiales se muestran en la Tabla 2.4, en forma de porcentaje de ahorro respecto a la energía necesaria para obtener ese producto como materia prima.

Tabla 2.3 Beneficios de la reutilización de la chatarra de hierro y acero

Beneficio	Porcentaje
Ahorro en energía	74
Ahorro en materia prima	90
Reducción de contaminación	86
Reducción del consumo de agua	40
Reducción de la contaminación de agua	76
Reducción en desechos de minería	97
Reducción de desechos generados por el consumidor	100

Tabla 2.4 Ahorro de energía en materiales reciclados respecto a la materia prima

Material	Porcentaje
Aluminio	95
Cobre	85
Hierro y aluminio	74
Plomo	65
Zinc	60
Papel	64
Plásticos	>80

Al realizar análisis económicos del tratamiento de RAEE hay que tener presente la aplicación de las directivas sobre reciclado (recogidas en la sección 2.3), que han originado la figura de la “*responsabilidad del fabricante*” de aparatos electrónicos, el cual debe hacerse cargo de los productos al final de su vida útil. 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. La razón es que las industrias recicladoras frecuentemente logran parte de sus ingresos por la recepción de esos residuos. 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 aparatos, su tamaño y el valor final de los componentes que se obtienen.

2.2.3 Optimización de procesos

Siguiendo esta lógica, se han propuesto varias alternativas de optimización de operaciones de desmontaje. La optimización sirve para encontrar la respuesta que proporciona el mejor resultado, la que logra mayores ganancias, mayor producción o felicidad o la que logra el menor costo, desperdicio o malestar. Con frecuencia estos problemas implican utilizar de la manera más eficiente los recursos, tales como dinero, tiempo, maquinaria, personal, existencias, etc. [Arsham, 2003].

La optimización ayuda a tomar la decisión sobre la mejor alternativa a aplicar para la resolución de un problema. Se distinguen los siguientes tipos de modelos de toma de decisiones [Bellini, 2004]:

- **Determinísticos:** se caracterizan porque las buenas decisiones se basan en sus buenos resultados, se consigue lo deseado libre de riesgo. Algunos de los métodos utilizados para su aplicación son: programación lineal, programación entera, programación no lineal,

teoría de localización o redes, probabilidad de asignación y programación por metas.

- **Probabilísticos:** en este caso lo importante no sólo son los resultados sino la cantidad de riesgo. Los modelos probabilísticos están basados en aplicaciones estadísticas para la evaluación de eventos incontrolables (o factores), así como la evaluación del riesgo de sus decisiones. Como ejemplo de su aplicación se pueden citar las cadenas de Markov, la teoría de juegos y las líneas de espera.
- **Híbridos:** son una combinación de los métodos determinísticos y probabilísticos, un ejemplo es la teoría de inventarios.
- **Heurísticos:** son los modelos en los que las soluciones están basadas en la experiencia.

Los pasos que se dan en la resolución de los procesos de optimización y toma de decisiones son los siguientes [Arsham, 1996]:

1. Simplificación del problema real que se pretende optimizar. Este paso se concentra en la identificación de las relaciones fundamentales, ignorando las irrelevantes. De esta forma, se entiende con mayor facilidad que un suceso empírico (observado), por lo tanto permite que el problema sea resuelto con mayor facilidad y con un mínimo de esfuerzo y pérdida de tiempo.
2. Construcción de un modelo de decisión que represente el problema a optimizar. No necesita estar completo o exacto en todas las relaciones, ya que el modelo es una representación simplificada de la situación real.
3. Prueba del modelo para comprobar que representa correctamente el problema original.

4. Utilización del modelo para encontrar soluciones. El modelo puede ser usado repetidas veces para problemas similares y además puede ser ajustado y modificado.

Un modelo de optimización matemática consiste en una *función objetivo* y un conjunto de *variables* y *restricciones* en la forma de un sistema de ecuaciones o inecuaciones, tal como se describe a continuación:

1. La función objetivo es la fórmula que expresa exactamente lo que se pretende optimizar en el problema de computación. En modelos económicos esta función es generalmente una función de beneficios que se quiere maximizar o una función de costes que se quiere minimizar.
2. Las variables son las cantidades que están bajo control en el modelo de optimización, por lo cual se les suele llamar variables de decisión.
3. Las restricciones son los límites en los posibles valores que las variables de un modelo pueden tomar. Seguramente un recurso, como mínimo, estará restringido (por ejemplo el presupuesto, personal disponible, tiempo, etc.). Estos límites se expresan en fórmulas que son funciones de las variables del modelo.

Dentro de los modelos determinísticos se engloban la optimización lineal y no lineal, según si las relaciones del problema son lineales o no con respecto a las variables. La programación lineal aborda una clase de problemas de programación donde tanto la función objetivo a optimizar como todas las relaciones entre las variables correspondientes a los recursos son lineales.

En el mercado existen varios programas de software para resolver problemas de optimización. Por ejemplo, LINDO o WinQSB resuelven modelos de programas lineales y LINGO y What'sBest! resuelven problemas lineales y no lineales. El software LINGO (*LINear Generalize Optimizer*) es

una herramienta simple para formular problemas, resolverlos y analizar su solución. El resultado que proporciona LINGO es la optimización que ayuda a encontrar la mejor solución: la ganancia más alta o el costo más bajo. A menudo estos problemas involucran el uso más eficiente de los recursos. Una de las características más importantes de LINGO es su aplicación en el lenguaje de modelo matemático, ya que permite expresar un problema de una manera muy similar a la anotación matemática normal. Además también puede expresar una serie entera de restricciones en una declaración compacta. Esto lleva a modelos que son mucho más fáciles de mantener.

Estos métodos de optimización y ayuda a la toma de decisiones han sido utilizados ampliamente en el campo de los procesos de separación y reciclado de productos. Se ha propuesto un método para planificar el flujo de materiales desde el almacén de recepción a la zona de desmontaje [Stuart y Christina, 2003]. Existen 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 [Krikke et al., 1999]. La propuesta de separarlos en dos niveles reside en la posible sinergia o competencia entre aparatos pertenecientes a un mismo grupo, ya que dependiendo de la legislación nacional que se aplique, la distribución de aparatos en grupos genéricos puede variar y los objetivos de reciclado afectar de forma diferente. Posteriormente este método fue generalizado por medio de un algoritmo de programación dinámica para permitir varios procesos de desensamblado, incluso parciales [Teunter, 2006].

Estudios adicionales [Zuidwijk y Krikke, 2008] han mostrado que se puede conseguir una reducción de costes mejorando la logística interna y las tecnologías de desensamblado, y con una selección de ubicaciones de bajo precio para las instalaciones. Se han propuesto métodos heurísticos [Tang y Zhou, 2001], utilizando redes de Petri para maximizar el valor del material

recuperado y minimizar el tiempo de ciclo, la técnica ha sido ampliada para incluir el factor humano de las operaciones manuales [Tang y Zhou, 2004].

En una aproximación más probabilística se ha sugerido la utilización de un sistema experto [Grochowski y Tang, 2007], basado en una combinación de redes de Petri para desensamblado y redes bayesianas híbridas, con el objetivo de lograr un nivel de desmontaje optimizado con una estimación de varios parámetros (probabilidades de componentes defectuosos en los aparatos a reciclar, habilidades de un operario, características de un componente, etc.). Se han introducido redes de Petri difusas y métodos de aprendizaje adaptativo con el objeto de modelar factores humanos y la incertidumbre de los aparatos a reciclar [Turowski et al., 2005].

Existen métodos para un reciclado completamente automatizado, algunos basados en dos pasos: en el primero se determinan las secuencias automáticas de desensamblado (en un entorno virtual, partiendo de la definición teórica de componentes y sistemas de unión entre ellos) y posteriormente se identifican todas las actividades posibles según el método de “*aproximación a objetivo*”, transformando un problema lineal multi-objetivo en una programación lineal [Gerner et al., 2005]. Esta solución de utilizar la programación lineal también ha sido aplicada para obtener la secuencia óptima de desensamblado de cada componente del aparato a reciclar [Lambert, 2002].

2.3 Marco legal y social del reciclado

Cada RAEE consiste en una combinación de módulos: circuitos impresos, cables, conductores flexibles, alambres, plásticos con o sin retardantes de llama, aparatos visualizadores (tales como TRC 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 se muestran en la Tabla 2.5 [Cui y Forssberg, 2003]. 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).

Tabla 2.5 Componentes tóxicos presentes en RAEE

Materiales y componentes	Descripción
Baterías	Materiales pesados (plomo, mercurio, cadmio)
Tubos de rayos catódicos	Plomo en el vidrio de cono y recubrimientos fluorescentes
Componentes con mercurio	Utilizados en termostatos, sensores, relés e interruptores
Residuos de asbesto	Debe tratarse de forma selectiva
Cartuchos de tóner	Deben retirarse de todos los aparatos electrónicos
Tarjetas de circuitos impresos	Presencia de cadmio en resistencias y semiconductores
Condensadores conteniendo Bifenil Policlorado	Deben retirarse de todos los aparatos electrónicos
Pantallas de cristal líquido (LCD)	Las pantallas de más de 100 cm ² deben retirarse de todos los aparatos electrónicos
Plásticos conteniendo retardantes a la llama	Durante la incineración de los plásticos, los retardantes a la llama halogenados pueden producir componentes tóxicos
Equipos con componentes clorados (CRC, HCFC, HFC)	Los componentes, presentes en espumas y circuitos de refrigeración, deben retirarse
Lámparas de descarga de gas	Se debe retirar el mercurio

Como se observa, los RAEE representan una mezcla compleja de materiales y componentes. A esto se une el hecho del constante desarrollo de materiales y productos químicos que representan amenazas al medio

ambiente, y conducen a la aparición de problemas cuando llegan a la etapa de convertirse en residuos.

2.3.1 Logística inversa y concienciación social

La recuperación de los residuos que se producen al finalizar la vida útil de un producto se ha convertido en una tarea cada vez más extendida en la industria. Esto es debido en parte a que los fabricantes de AEE son los responsables de la gestión de los residuos que se generan, pero también el tratamiento de dichos residuos se ha convertido en una actividad que puede ser rentable si se realiza adecuadamente [Rubio, 2003].

Un factor crítico para lograr la expansión de la industria recicladora es el reconocimiento por parte del consumidor de la necesidad de reciclar. Muchas personas no reciclan sus aparatos electrónicos cuando se convierten en obsoletos. Hasta un 70% se guardan almacenados de 3 a 5 años, ya que el consumidor cree que todavía tienen alguna utilidad. Sin embargo, con el rápido crecimiento de las tecnologías electrónicas ese valor residual decrece muy rápidamente, tanto la posibilidad de reutilización de componentes como el precio de reventa (el valor de un ordenador se aproxima a cero si la tecnología tiene una antigüedad mayor que dos generaciones). A esto se añade el hecho de que el reciclado de un aparato antiguo es más complicado que el de uno más actual.

La logística inversa es la recolección de aparatos fuera de uso procedentes de los consumidores. Engloba las actividades logísticas necesarias desde que un producto deja de ser útil para el consumidor hasta que se convierte en un producto con valor añadido para el mercado. Algunos autores han propuesto distintos términos aplicables en la recuperación de residuos [Kumar y Putnam, 2008; Fleischmann et al., 2001; Fleischmann y Kuik, 2003]:

- **Reutilización:** el producto recupera su valor, después de realizar operaciones de limpieza y mantenimiento.
- **Recuperación / Refabricación:** algunos de los componentes del producto se recuperan para fabricar nuevos productos.
- **Reciclaje:** se realiza una recuperación del material del producto de tal forma que pierde su identidad durante el proceso.

Existen varias estrategias operativas para la logística inversa:

- Recogida periódica en determinados sitios, no controlados, y/o bajo petición de los consumidores. Este método lo llevan a cabo algunos ayuntamientos.
- Organización de eventos especiales para recogida, por ejemplo durante un fin de semana.
- Sitio permanente de recogida, abierto de forma habitual pero bajo control, con contenedores para clasificación de residuos. En el País Vasco esta solución está implementada con el sistema de Garbigune.
- Entrega de los aparatos en el sitio de compra, junto con el compromiso del vendedor de aparatos nuevos de gestionar su reciclado adecuadamente.

Cada opción tiene sus ventajas desde diferentes puntos de vista: comodidad del consumidor, distribución geográfica, coste económico de personal y transporte, seguridad, volumen de lo reciclado, necesidades posteriores de clasificación, etc. Se han desarrollado diferentes métodos para el problema de la localización dinámica [Saldanha y Captivo, 1998; Antunes y Peeters, 2000; Hinojosa et al., 2000; Bose et al., 2005; Ortega-Mier et al., 2007], aplicables a los lugares de recogida de residuos. Para el caso español de recogida de RAEE se ha propuesto un método para clasificar los

municipios según su idoneidad para acoger plantas de reciclado [Queiruga et al., 2008].

También se está reflejando cada vez en mayor medida las actividades de las grandes empresas de cara a su responsabilidad social en referencia al reciclado de sus propios productos. Cabe citar algunos ejemplos como el de Deutsche Telekom que recoge diariamente 25.000 teléfonos móviles fuera de uso. Xerox ha implantado un sistema de alquiler de productos al usuario y se encarga por completo de su reutilización y reciclado. Dell recoge gratuitamente los aparatos obsoletos de sus clientes. Similar ejemplo se da en Apple, aunque la recogida se realiza cuando el cliente compra un nuevo ordenador de la marca. Hewlett-Packard ofrece varias alternativas: mercado de segunda mano, pago por aparato recibido (no aplicable a particulares), gestión del reciclado (no siempre gratuita) o la donación. Hasta 2007 Hewlett-Packard ha reciclado más de medio millón de toneladas de productos electrónicos [Hieronymi, 2007]. Más allá de estas iniciativas, cabe citar la creación en Europa de empresas específicas para reciclado, siendo un ejemplo de ello la cooperación entre Sony, Braun, Hewlett-Packard y Electrolux.

En el contexto del reciclado de aparatos electrónicos las economías de escala se definen como la disponibilidad de grandes volúmenes de aparatos 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 aparatos electrónicos debido a varias razones:

- Sin la disponibilidad de grandes volúmenes de aparatos 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.

- Sin grandes cantidades de aparatos 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 probado en laboratorio puede ser correcto, pero en producción industrial pueden darse costes desproporcionados debido a que hay poca disponibilidad de aparatos a reciclar.

Estas razones hacen que la ausencia o presencia de economías de escala sea el factor determinante en la puesta en marcha de una logística de recogida e infraestructura para el reciclado. Los procesos de reciclado tienen un alto grado de incertidumbre en la cantidad, calidad y frecuencia de retorno de los productos a tratar [Guide, 2000]. Esta incertidumbre influye en los procesos de planificación de producción [Prahinski y Kocabasoglu, 2006], y existen ya métodos para calcular la capacidad de fabricación y refabricación que optimizan un sistema productivo, analizando cuáles son los efectos que producen los factores aleatorios de esa refabricación [Benedito y Corominas, 2008].

La Unión Europea produce unos 10 kg de RAEE por habitante al año, de los cuales se recogieron de forma selectiva 3,3 kg. En las siguientes secciones se mencionan ejemplos de los diferentes programas y esquemas de recogida de residuos que están en activo en diferentes países y ciudades de la Unión Europea: Bilbao, Weiz y Bregenz (Austria), West Sussex y Croydon (Reino Unido), Eindhoven (Holanda) y varias ciudades de Alemania.

Proyecto piloto de Bilbao

Entre octubre 1994 y diciembre 1996 la Viceconsejería de Medio Ambiente del Gobierno Vasco impulsó la implantación de la experiencia “*Recogida y*

tratamiento de aparatos eléctrico-electrónicos en su fin de vida” dentro del área de la ciudad de Bilbao (41,3 km², 375.000 habitantes), con los objetivos de recoger datos experimentales que permitieran establecer un modelo para ser aplicado a otros municipios y a la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) en su totalidad, crear una experiencia mixta con RAEE de origen doméstico e industrial y sensibilizar a la población. En dicho proyecto colaboraron, además del Gobierno Vasco, el Ayuntamiento de Bilbao, la empresa contratista para la recogida de residuos sólidos urbanos (RSU) en Bilbao, una cadena de grandes superficies (Eroski) y una empresa recicladora (Indumetal Recycling, S.A.) [Gobierno Vasco, 1996]. El Ayuntamiento de Bilbao puso a disposición de la experiencia los tres centros de recogida selectiva (“Bilbogarbis”) existentes en la ciudad en aquel momento. La cadena de grandes superficies dispuso puntos de recogida en cuatro centros comerciales. Los sistemas de recogida empleados fueron tres, dependiendo de la procedencia de los desechos:

- Flujo doméstico.
- Flujo industrial.
- Flujo de gran superficie.

(1) Flujo doméstico

Consiste en la recogida gratuita de RAEE basada en el sistema de recogida de desechos voluminosos preexistente. Con un pequeño incremento de costo se atendía al ciudadano que solicitaba la retirada de RAEE en su domicilio. En el centro de recogida selectiva se aceptaban los enseres entregados por particulares y los retirados gratuitamente por pequeños distribuidores locales a cambio de la compra de nuevos aparatos y se almacenaban ordenadamente hasta que alcanzaban un cierto volumen, momento en el que se gestionaba un transporte especial hasta las instalaciones del reciclador.

(2) Flujo industrial

Las empresas debían financiar el almacenaje, clasificación, envío y tratamiento de sus bienes de inversión obsoletos siguiendo algunos de los tres modelos propuestos:

- Modelo I. La empresa gestionaba y garantizaba la posible reutilización de aparatos y la recuperación de los componentes utilizables. Posteriormente contrataba a un gestor-reciclador que descontaminara, desmantelara, clasificara y gestionara las fracciones procedentes de RAEE en sus propias instalaciones.
- Modelo II. La empresa enviaba los aparatos a las instalaciones del gestor-reciclador con o sin instrucciones especiales.
- Modelo III. La pequeña empresa o comercio llegaba a un acuerdo con su ayuntamiento, que se encargaba de la recogida (gratuita) y envío de los RAEE al gestor-reciclador para su tratamiento, junto con los de origen doméstico.

(3) Flujo gran superficie

La empresa propietaria de los centros comerciales que intervinieron hacía llegar directamente al reciclador los RAEE que retiraban a sus clientes. En la práctica seguía el modelo II anterior.

La cantidad total de material recogido ascendió a 494 Tm, procedentes de los flujos municipales, industriales y de grandes superficies, según se desglosa en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6 RAEE recogidos de distintos orígenes en Bilbao

Origen	Equipos recogidos	
	unidades	toneladas
Municipal	5.048	105,7
Grandes superficies	520	14,8
Industrial	110.747	374,0
TOTAL	116.315	494,5

Los televisores y monitores representaron más del 95% del flujo municipal y prácticamente la totalidad del flujo de grandes superficies.

Se consideró imprescindible acompañar la experiencia de campañas de sensibilización durante 1995-96, orientadas tanto al flujo doméstico (anuncios en la televisión local y cuñas en radio, carteles, folletos y pegatinas en distribuidores de AEE y en los establecimientos de la empresa propietaria de las grandes superficies participantes, conferencias en la universidad, etc.), como al de origen industrial (folletos, mailing, ponencias en congresos, jornadas de presentación, artículos en revistas técnicas). La sensibilización de los ciudadanos es esencial, lenta y costosa, y los resultados se logran a medio/largo plazo. La Tabla 2.7 muestra la distribución por tipo de televisor y monitor de los residuos recogidos en el área de Bilbao.

La experiencia de recogida selectiva de RAEE en Bilbao se ha consolidado en años posteriores, observándose un importante aumento de las cantidades recogidas. En el año 2000 se recogieron 135,7 Tm de aparatos de la *línea marrón* (televisores, monitores, aparatos de música, etc.) en los Bilbogarbis, lo que supone un 0,41% del total de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) con recogida gestionada por el Ayuntamiento de Bilbao.

Tabla 2.7 RAEE con televisores recogidos en Bilbao

Origen		Equipos recogidos	
		unidades	toneladas
Municipal	Televisor color	2.550	77,83
	Televisor monocromo	879	15,64
	Monitor	685	8,18
	Total	4.114	101,65
Grandes superficies	Televisor color	441	14,08
	Televisor monocromo	23	0,40
	Monitor	9	0,10
	Total	473	14,60
Industrial	Televisor color	48	1,62
	Televisor monocromo	10	0,15
	Monitor	7.436	101,90
	Total	7.494	103,68
TOTAL televisor color		3.039	93,54
TOTAL televisor monocromo		912	16,20
TOTAL monitor		8.130	110,19
TOTAL		12.081	219,94

Con posterioridad, y enmarcado en el Plan Integral de RSU 1997-2001 del Territorio Histórico de Bizkaia, la experiencia se extendió a la totalidad de Bizkaia, comenzándose a instalar en dicho territorio los denominados *Garbiguneak* o Centros de Recogida Selectiva (CRS), infraestructuras en áreas de aporte voluntario, accesibles mediante vehículo, para la recogida

selectiva y separada de pequeñas cantidades de Residuos Domésticos (RD), Residuos Industriales, Comerciales e Institucionales Asimilables (RICIA), y Residuos de Construcción y Demolición (RCD) de origen doméstico o generados por profesionales autónomos o pequeños comercios.

De acuerdo con los últimos datos disponibles de la Viceconsejería de Medio Ambiente [Gobierno Vasco, 2003], la cantidad de residuos provenientes de AEE (línea blanca y marrón) en 2003 fue de 1.377,85 Tm en la CAPV.

A nivel europeo cabe citar las siguientes experiencias:

Weiz y Bregenz (Austria)

En un estudio llevado a cabo por la Asociación Austriaca de Industrias Eléctricas y Electrónicas (FEEI), basado en los resultados de experiencias piloto en Weiz y Bregenz, se evalúan tres sistemas de recogida de RAEE en términos de coste económico [FEEI, 1996; Lohse et al., 1998]:

- Sistema comunitario.
- Sistema basado en el distribuidor.
- Sistema mancomunado.

(1) Sistema comunitario

Las comunidades locales tienen obligación legal de recoger los RAEE, transferirlos a un gestor o reciclador y financiar completamente la operación. Las grandes ventajas del sistema comunitario son la amplia red de infraestructuras preexistentes. La principal desventaja es que, dado que los

RAEE no son separados por marca durante la recogida, no se estimula directamente al fabricante hacia el eco-diseño.

(2) Sistema basado en el distribuidor

Se trata de un sistema en que los agentes que colocan los AEE en el mercado tienen la obligación legal de recoger los RAEE. La recogida se realiza a través de los comercios, donde se separan los productos por marca, de forma que sean devueltos a sus respectivos fabricantes. Las ventajas del sistema son la amplia cobertura nacional y ser el único sistema que ofrece un estímulo directo hacia el eco-diseño. Las desventajas son el alto coste y la falta de espacio de almacenamiento de muchos pequeños comercios, y los electrodomésticos de marca desconocida.

(3) Sistema mancomunado

Son posibles dos alternativas: consorcio comunitario y consorcio de comercios.

- El sistema de consorcio comunitario es un sistema en el que las comunidades locales son responsables de la logística y los distribuidores son responsables del reciclado y gestión de RAEE. La financiación de un sistema mancomunado se puede obtener del consumidor final a través de una recarga en la tarifa del suministro eléctrico o del minorista o distribuidor final a través de una tasa de consorcio. Las ventajas de un sistema de consorcio comunitario son su simple organización (la logística de recogida ya existe en gran medida en las comunidades) y la simplicidad de la devolución. Como desventaja está el hecho de no proporcionar un estímulo directo hacia el eco-diseño para el fabricante.

- El sistema de consorcio de comercios es un sistema con responsabilidad compartida de recogida y reciclado y de organización y financiación. El minorista es responsable de la recogida de RAEE, el consorcio organiza el transporte, reciclado y gestión posteriores. La financiación corre a cuenta del consumidor final a través de una recarga en la tarifa del suministro eléctrico o del minorista o distribuidor final a través de una tasa de consorcio. Las ventajas son su método de devolución simple en cualquier comercio. Como desventaja está el hecho de no proporcionar un estímulo directo hacia el eco-diseño para el fabricante.

West Sussex y Croydon (Reino Unido)

El gobierno británico solicitó en 1993 al Consejo industrial para el reciclado de aparatos electrónicos (ICER - *Industry Council For Electronic Equipment Recycling*) preparar un plan nacional encaminado a incrementar la recuperación de aparatos domésticos y comerciales. Debido a la falta de datos en el sector doméstico, en octubre de 1995 se implantó una experiencia piloto en dos áreas de West Sussex (Midhurst, 50.000 hogares y London Borough of Croydon, 50.000 hogares), que se prolongó hasta abril de 1997 [ENVIROSRIS, 2000].

El alcance de la recogida abarcó todos los AEE. La experiencia tenía como objetivos:

- Estimar cuántos y qué tipos de aparatos llegarían a un servicio de reciclado de las autoridades locales.
- Estimar cuántos y qué tipos de aparatos se introducían en el ciclo de reciclado.
- Evaluar los costes y eficiencia de la recogida de RAEE para reciclado a través de los sistemas de autoridades locales existentes.

- Medir la opinión pública.

La recogida de los RAEE se efectuó por dos métodos:

- (1) Vía instalaciones de servicios municipales (Instalaciones de Residuos Domésticos), usando contenedores que, una vez llenos, eran transportados a un reciclador.
- (2) Vía recogida en acera (complementaria al plan ya existente en Worthing): en bolsas de plástico para tirar pequeños RAEE.

Las cantidades recogidas durante los primeros 6 meses representaron aproximadamente una cifra de recogida de 3 kg/hab./año (una tasa de reciclado de alrededor del 11%). El perfil de antigüedad de los aparatos recogidos oscilaba entre 5 y 40 años, con una antigüedad media de unos 15 años. Esto indica que los aparatos desechados son mucho más viejos que los períodos de vida previstos por los fabricantes, por lo cual la restauración y reutilización no son buenas opciones para aparatos tan viejos.

Eindhoven (Holanda)

En octubre de 1994, asociaciones de fabricantes, importadores, proveedores y agentes del sector eléctrico-electrónico en Holanda (FIAR — *Fabrikanten, Importeurs en Agenten op Radiogebied*) y la Asociación de proveedores de aparatos eléctricos domésticos (VLEHAN — *Vereniging Leveranciers Elektrische Huishoudelijke Apparaten*), junto con la Agencia Medioambiental del distrito de Eindhoven decidieron ejecutar un proyecto piloto en el distrito de Eindhoven, denominado Apparetour [Nagel, 1998; FIAR, 1997], centrado en la recogida, reciclado y reparación de RAEE.

La iniciativa partía de la necesidad de procesar los residuos domésticos y pretendía establecer adecuadamente la responsabilidad legal de los

fabricantes e importadores que han introducido en el mercado los AEE que se encuentran en la etapa de residuos.

El proyecto se desarrollaba en tres fases: (i) recogida y logística; (ii) desmantelamiento y reciclado; (iii) selección y reutilización de los aparatos domésticos y AEE en el distrito de Eindhoven. Su objetivo era el desarrollo de un proceso de eliminación económicamente viable y medioambientalmente responsable de los aparatos domésticos y AEE, con un óptimo rendimiento de reutilización. Estaba encaminado a obtener un coste mínimo para los ciudadanos y a la determinación de los efectos de la tecnología del reciclado para una óptima reutilización.

Fueron investigadas las siguientes rutas de recogida: depósitos municipales y recogida periódica en domicilios y comercios. El mayor número de RAEE fue recogido vía depósito municipal (68-98% de las cantidades totales, según áreas), que resultó ser, además, la ruta menos costosa.

La segunda ruta de recogida más popular y menos costosa fue aquella en la que los aparatos viejos devueltos, al comprar nuevos en los comercios, eran recogidos con cierta frecuencia. Por su parte, la ruta de recogida a través de las tiendas de segunda mano proporcionó gran número de artículos recogidos.

La ruta de recogida de RAEE a domicilio de frecuencia baja (mensual o cuatrimestral) resultaba costosa, ya que generaba pocos artículos. El detalle del número de aparatos recogidos de acuerdo a diferentes categorías se incluye en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Cantidades anuales de RAEE recogidas por cada 1.000 habitantes en el distrito de Eindhoven

Categoría	Cantidad Teórica (CT) de RAEE. N° aparatos / año /1.000 hab.	Cantidad recogida por cada 1.000 habitantes en el distrito de Eindhoven	
		N° aparatos por año	% de CT
Contienen CFC	29,9	12,8	42,8
Grandes electrodomésticos	41,2	4,6	11,2
Electrónicos con pantalla	43,2	19,1	44,2
Televisores	35,9	15,6	43,5
Monitores	7,3	3,5	48,0
Total de grandes AEE	114,3	36,5	31,9
Pequeños electrodomésticos	12,0	3,2	26,8
Electrónicos sin pantalla	136,3	15,3	11,2
Otros	129,0	12,5	9,7
Ordenadores	7,3	2,8	38,4
Domésticos pequeños	214,0	14,7	6,9
Total de pequeños AEE	362,3	33,2	9,2
Total de AEE	476,6	69,7	14,6

En cuanto a los medios de recogida, se presentaban varias alternativas, teniendo cada una sus ventajas e inconvenientes desde el punto de vista tanto del consumidor como de las empresas recicladoras. Como se verá en capítulos posteriores, éstas necesitan que los aparatos lleguen con unas condiciones determinadas para poder ser procesados y reciclados. En el desarrollo del proyecto se recogió un promedio de 880 toneladas anuales, de las cuales el 86% correspondieron a grandes electrodomésticos. El resumen de las toneladas recogidas se muestra en la Tabla 2.9. Los porcentajes se

han calculado con referencia a la cantidad teórica disponible de RAEE de cada tipología de aparato.

Tabla 2.9 Resultados de recogida de RAEE en toneladas por cada 1.000 habitantes en un año

Categoría	Cantidad Teórica (CT) de RAEE /1.000 hab. (Tm)	Cantidad por cada 1.000 habitantes en Eindhoven	
		Tm/año	% de CT
Grandes AEE	4,28	1,19	28
Pequeños AEE	1,82	0,18	10
Total de AEE	6,11	1,38	23

Alemania

Los resultados de una serie de proyectos piloto en varias ciudades alemanas mostraron una tasa de recogida muy baja, de aproximadamente el 5% para pequeños electrodomésticos y de un 30% para televisores. Cuando el sistema de recogida resultaba sin cargo para el usuario final las tasas de recogida eran más altas. Como ocurrió en otras experiencias, los artículos recogidos resultaron mucho más antiguos de lo previsto [Nagel, 1998].

De los casos concretos citados anteriormente se deduce que existen factores, diferentes en cada país, que tienen impacto en los esquemas de recogida y de reciclado en general:

- Distancia geográfica: las distancias pequeñas favorecen el transporte y la logística reduciendo los costes.
- Tamaño y densidad de la población: a mayor densidad de habitantes mejor eficiencia económica y posibilidad de economías de escala.

- Costes laborales de la recolección, clasificación y tratamiento de los residuos.
- Estabilidad en el tiempo de los sistemas de recogida y reciclado, para permitir una mejor negociación con los suministradores, afinar el sistema, mejorar la capacidad, etc.
- Comportamiento del consumidor en relación a su responsabilidad con las políticas de reciclado.

2.3.2 Directivas y legislación

Con el objeto de armonizar a nivel europeo la recogida y tratamiento de RAEE, la Comisión Europea ha adoptado una directiva [European Commission, 2003a], relativa a los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (*Directives 2002/96/EC, 2003/108/EC on Waste from Electrical and Electronic Equipment, WEEE*). 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 AEE conllevan varios problemas para el mercado interno, y sólo pueden ser atacados eficientemente a nivel de la Unión Europea.

La Comisión Europea aprobó en 1994 el primer “Catálogo Europeo de Residuos” (CER), el cual clasifica en uno de sus apartados los RAEE.

Posteriormente, en los años 2000 y 2002, se han publicado nuevas decisiones ampliando y reordenando las categorías consideradas, y modificando el carácter peligroso de alguno de los residuos.

La lista de las 10 categorías de aparatos recogida en la directiva es la siguiente:

1. Electrodomésticos de gran tamaño, tales como frigoríficos, congeladores, lavadoras, lavavajillas, etc.
2. Electrodomésticos de pequeño tamaño, tales como aspiradoras, planchas, secadores de pelo, etc.
3. Aparatos de telecomunicación y computación, tales como ordenadores, impresoras, máquinas copadoras, télex, teléfonos, etc.
4. Aparatos de consumo, tales como aparatos de radio, televisores, cámaras de vídeo, etc.
5. Aparatos ligeros, tales como luminarias, tubos fluorescentes, lámparas de descarga de alta intensidad, etc.
6. Herramientas eléctricas y electrónicas, tales como taladros, sierras y máquinas de coser.
7. Juguetes, tales como trenes y coches eléctricos, consolas de vídeo y juegos de vídeo.
8. Aparatos médicos, tales como dispositivos de radioterapia, cardiología, diálisis, etc.
9. Instrumentos de medida y control, tales como termostatos, detectores de humo o reguladores de calor.
10. Máquinas dispensadoras automáticas de bebidas calientes, botellas, latas, o productos sólidos.

Algunas de las categorías clasificadas en el CER se muestran a continuación:

- Transformadores y condensadores que contienen PCB (bifenil policlorado) o PCT (terfenil policlorado).
- Aparatos desechados que contienen PCB o PCT o están contaminados por ellos.
- Aparatos desechados que contienen clorofluorocarbonos (CFC).
- Aparatos desechados que contienen amianto libre.
- Componentes peligrosos retirados de los aparatos desechados.
- Tubos fluorescentes que contienen mercurio.

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 AEE 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 2.10 se indican los objetivos según tipo de aparato [IPTS, 2006]. Se entiende por “recuperación” a la reutilización más el reciclado (incluyendo incineración con recuperación de energía).

Tabla 2.10 Objetivos de recuperación y reciclado, en peso, para el 31/12/2006

Categorías	Recuperación	Reciclado
	%	%
Electrodomésticos grandes	80	75
Electrodomésticos pequeños	70	50
Informática y telecomunicaciones	75	65
Aparatos de consumo (radio, televisión, vídeo)	75	65
Aparatos ligeros de iluminación	70	50
Herramientas eléctricas y electrónicas	70	50
Juguetes eléctricos y electrónicos	70	50
Aparatos médicos	70	50
Instrumentos de medida y control	70	50
Máquinas dispensadoras automáticas	80	75

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]. Los nuevos objetivos de reciclado (fijados en diciembre de 2008) han cambiado de los 4 kg por habitante y año, a lograr el 65% del peso medio de los productos puestos en el mercado en los dos años anteriores.

En relación a la financiación, la directiva exige a los estados miembros que los poseedores de los RAEE domésticos no corran con los gastos de devolver los residuos. Los fabricantes son los que deben hacerse cargo del coste del tratamiento, recuperación y eliminación en condiciones medioambientalmente adecuadas. Para el caso de RAEE no domésticos la financiación de la recogida, valorización y eliminación se debe acordar entre los fabricantes y el usuario del aparato al hacer la compra.

Incluso para la opción de incineración de residuos se establece que éstos deben ser pre-tratados. La potencial recuperabilidad de los residuos producidos en la incineración (escorias, cenizas volantes y tortas de filtración) depende de su contenido en metales pesados, el cual va ligado a la calidad del material introducido en el proceso de incineración.

Como complemento a esta directiva sobre los RAEE, se ha elaborado otra (*Directive 2002/95/EC on the Restriction of the use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, RoHS*, directiva 2002/95/EC para la Restricción del uso de sustancias peligrosas en AEE), [European Commission, 2003b], con objeto de prohibir la utilización de sustancias peligrosas en AEE, de forma que se facilite la valorización y eliminación correcta desde el punto de vista medioambiental. Establece la prohibición de utilización de plomo, mercurio, cadmio, cromo-6, PBB (*Bifenil polibrominado*) y PBDE (*Eter difenil polibrominado*) a partir del 1 de julio de 2006 en algunos AEE.

Sin embargo, existen factores limitativos a la hora de conseguir los objetivos marcados por la Comisión Europea. La directiva sobre RAEE se ha adoptado bajo el artículo 175 del Tratado de la Unión Europea, que sólo prevé una “armonización mínima” entre los estados miembros. Esto quiere decir que cada estado puede imponer reglas adicionales, diferentes a las de otro estado, o adoptar diferentes interpretaciones, siempre que no entren en contradicción con el texto de la directiva.

El resultado, como lo reflejan varios autores [Vollrath, 2006; Stone, 2006; Zonneveld, 2006; Vollrath, 2006b] es que el panorama del tratamiento de los RAEE en Europa no es homogéneo. Anteriormente a la aplicación de esta ley el tratamiento se basaba únicamente en los costes de depositar en vertedero o reciclar, respecto al valor del material recuperado, y así existía un mercado mundial regido por la oferta y la demanda, según los precios libres de los materiales, principalmente metálicos.

Como consecuencia de ello, se han dado casos de países miembros de la Unión Europea que ya disponían de legislación sobre tratamiento de residuos electrónicos, por lo que la adaptación (transposición) de las directivas europeas ha sido más o menos directa. Para el resto de países las soluciones adoptadas han sido diversas, siendo la más común la simple traducción de la directiva, pero sin especificar cómo se debe aplicar en la práctica la legislación nacional.

En general, hay un retraso en la puesta en marcha de estas regulaciones (la fecha límite era agosto de 2004), ya que existe un solapamiento con otras áreas de la legislación (leyes sobre materiales peligrosos, regulaciones aduaneras, mercado de productos, etc.). Además, en los casos de países vecinos con fuerte mercado transfronterizo de este tipo de productos hay una resistencia a dar el primer paso en el cumplimiento pleno, por miedo a perder situaciones ventajosas.

Al mismo tiempo, la directiva sobre RAEE requiere reciclar no sólo metales, sino también plásticos, vidrio, etc., y tratar muy específicamente ciertos componentes peligrosos. Todas estas demandas incrementan el coste de reciclado, pero el impacto económico es diferente en cada país debido a la diversa implantación nacional derivada de la legislación europea.

En la Tabla 2.11 se muestra un resumen de la situación por países [IPTTS, 2006]. Generalmente son necesarias nuevas legislaciones complementarias, así como las sanciones que se prevén por su incumplimiento, y a partir de ese punto se observan diferencias en cada país.

Tabla 2.11 Iniciativas legislativas por países

País	Situación legislativa: Legislación anterior, transposición de directivas EC		
EU	Fecha transposición de directiva	Establecimiento de tasas (hasta)	Observaciones
Alemania	03/05	Permitido (2011)	
Austria	12/04	Permitido (2011)	
Bélgica	12/04	Permitido (2011)	Existía legislación
Rep. Checa	06/05	Permitido (2011)	
Dinamarca	05/05	No permitido	Existía legislación
Eslovaquia	12/04	Permitido (2011)	
Eslovenia	06/05	Obligatorio (2011)	
España	02/05	Obligatorio (2011)	Adaptación con RD 208/05
Estonia	09/05	No permitido	
Finlandia	09/04	Permitido (2011)	
Francia	2005	Permitido (2011)	
Grecia	04/04	Permitido (2011)	
Holanda	07/04	Permitido (2011)	Existía legislación
Hungría	01/05	Permitido (2011)	
Irlanda	07/05	Permitido (2011)	
Italia	11/05	Permitido (2011)	
Letonia	12/04	No Permitido	
Lituania	10/04	Permitido (2011)	
Polonia	09/05	Permitido (2011)	

(Cont.)

PAÍS	Situación legislativa: Legislación anterior, transposición de directivas EC		
EU	Fecha transposición de directiva	Establecimiento de tasas (hasta)	Observaciones
Portugal	09/04	Permitido (2011)	
Polonia	09/05	Permitido (2011)	
Portugal	09/04	Permitido (2011)	
Reino Unido	2/06	Permitido (2011)	
Suecia	04/05	Obligatorio (2011)	Existía legislación
No EU			
Australia	Sin legislación específica. Hay varias iniciativas voluntarias de productores, asociaciones.		
Canadá	Legislación en activo desde 2004, similar en todas las provincias. La legislación de Alberta es muy similar a la europea. Los grandes productores de aparatos se han unido para crear gestores de residuos.		
China	Han adaptado la directiva europea a últimos de 2005, aunque la puesta en marcha de la legislación es todavía muy básica.		
Japón	Primeras leyes en 1998, reforzadas en 2001. Tiende a seguir la legislación europea.		
Estados Unidos	Iniciativas legislativas en California, Florida, N. York, Texas y estados del nordeste.		

De los 5 millones potenciales de toneladas de aparatos electrónicos que finalizan su vida útil anualmente en Europa, sólo 1 millón han sido recogidos de los hogares en 2005. Y de esa cantidad sólo el 60% ha sido tratado en Europa según la directiva, el resto se ha exportado a Asia y África, principalmente.

En efecto, existe preocupación por el posible mercado ilegal de RAEE para reutilización, particularmente en el sector de la informática y comunicaciones. Por ejemplo, en el Reino Unido se exportaron 133.000 Tm de equipos

informáticos para su reciclado y reutilización [IPTTS, 2006], de ellas 23.000 Tm salieron del país sin la documentación necesaria, aunque existen leyes europeas que, desde enero de 2002, prohíben este tipo de exportación a países fuera de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (*Organization for Economic Co-operation and Development*, OECD) [Zonneveld, 2007; Huijbregts, 2007]. Generalmente estos residuos acaban en países subdesarrollados donde son desmontados en pobres condiciones laborales y sanitarias o depositados en vertederos.

Igualmente, en el período de tiempo en el cual la directiva se ha ido aplicando en varios países europeos, se ha constatado que el impacto ha sido negativo en las pequeñas y medianas empresas recicladoras que ya tenían un historial en este sector. La burocracia, entresijos legales, necesidad de certificaciones, nuevas tecnologías de reciclado e incluso cambios en la política del transporte del material a reciclar hacen necesaria una estructura de funcionamiento que generalmente sólo está implementada en las grandes empresas [Vollrath, 2006].

La diferente aplicación a nivel nacional de las directivas europeas puede originar una gran diversidad de esquemas de gestión de los residuos, con las consiguientes distorsiones en los mercados de países vecinos. Después de pasar algunos años desde la entrada en vigor de la directiva sobre RAEE los datos muestran resultados que varían según los países: desde los 5,4 kg / habitante reciclados en Holanda y 6,8 en Bélgica, hasta cifras más bajas en países como España, Francia, Reino Unido, Italia y Polonia, que no han implementado completamente la directiva a nivel nacional. Ya han surgido varias recomendaciones [IHOBE, 2004] para promover la cooperación en la Unión Europea de los agentes implicados en el reciclado de los aparatos electrónicos, garantizando unas operaciones ecológica y económicamente viables.

A este respecto, la directiva sobre RAEE ha estado bajo revisión por la Comisión Europea, proceso que se ha llevado a cabo durante 2006 y 2007 [Van den Hertem, 2007]. La propia directiva contemplaba efectuar un estudio sobre su aplicación y resultados conseguidos, con el fin de efectuar propuestas para su revisión en lo concerniente a recolección separada de residuos, tratamiento, recuperación y financiación. Se persigue examinar las posibilidades para incrementar la eficiencia y eficacia de la directiva para conseguir objetivos medioambientales, y eliminar costes innecesarios a consumidores, empresas, organizaciones y autoridades.

Otro aspecto a tener en cuenta, en relación a la logística inversa, son las consecuencias medioambientales de dicha recogida. La propia actividad del transporte de los residuos hasta las plantas de reciclaje puede tener consecuencias medioambientales negativas, hasta el punto de que bajo determinadas circunstancias, el impacto de las redes de recogida puede ser mayor que el impacto de no recoger y reciclar los residuos [Barba-Gutiérrez et al., 2008].

2.4 Automatización del reciclado

Los RAEE 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 alto 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 modelos de proceso.

Los RAEE se pueden reciclar de forma más o menos efectiva según los materiales recuperados [Cui y Forssberg, 2003]. Habitualmente este tipo de basura contiene materiales de valor: metales, plásticos, vidrio y materiales cerámicos. El tratamiento aplicado tradicionalmente se enfocaba en la recuperación de metales preciosos (oro, plata), cobre y recuperación energética. Los métodos utilizados son la separación magnética, por gravedad, por densidad [Gent, 2009], filtros mecánicos, corrientes de Eddy (basadas en el movimiento de un campo magnético a través de un material conductor), etc. Como una mejora a estos tratamientos, se propone un método de separación de materiales, provenientes de aparatos ya triturados en molinos, basado en estudios de la granulometría del material por métodos microscópicos [Zhan y Forssberg, 1999]. El objetivo era buscar un tamaño y forma adecuada de las partículas para ser clasificadas por corrientes de Eddy, ya que era significativa la influencia de estos dos parámetros en el posterior proceso de separación, tal como demostraba la caracterización y cuantificación de las partículas.

La mayor parte de las operaciones de desensamblado se han realizado de forma preferentemente manual [Boyce et al., 2002]. En la industria manufacturera se ha alcanzado un alto nivel de automatización y robotización, pero sólo en la fase de ensamblado de aparatos, para desensamblado únicamente existen algunas plantas piloto de demostración, sólo para efectos de investigación [Rentería y Álvarez, 2007]. Sin embargo, la previsión de futuras necesidades de reciclaje para los aparatos que se quedarán obsoletos en los próximos años hace necesaria una mayor automatización de las operaciones. De todas formas, la automatización completa, que obligatoriamente estaría enfocada hacia un único tipo de producto, no es económicamente viable debido a la falta de material de entrada, lo que a su vez se debe a la incertidumbre de la recolección de aparatos. Para resolver este problema han propuesto un sistema semi-automatizado [Knoth et al., 2001] que se basa en:

- Un sistema modular para desarrollar un desensamblado flexible.
- El concepto de familias de desensamblado, también sugerido por otros autores [Cui y Forssberg, 2003].

Propone el uso de robots industriales, sistemas especiales de manipulación y desmontaje, transporte y alimentación, e identificación. La línea de reciclado estaría formada por estaciones modulares, tanto manuales como automáticas, con sistemas de control y decisión basados en bases de datos conteniendo las características de los aparatos a reciclar. Los diferentes módulos pueden ser seleccionados y combinados para cubrir las necesidades de desmontaje de una familia específica de aparatos.

En la práctica en la mayoría de las plantas de reciclado se efectúan operaciones iniciales de forma manual o con bajo nivel de automatización. A continuación se muestran una serie de operaciones que forman parte de las operaciones tradicionales de separación de componentes en plantas de reciclado de aparatos electrónicos.

La tarea inicial consiste en una primera clasificación de los aparatos recibidos en la planta, atendiendo al fabricante, modelo y estado de conservación del aparato. Es una labor realizada por un operario, en la cual es importante la experiencia adquirida. Seguidamente es necesario eliminar las pinturas y recubrimientos exteriores, con el objeto de intentar recuperar las carcasas de plástico, o madera en los modelos más antiguos de AEE.

Se ha seleccionado el caso de los televisores y monitores porque son representativos en el conjunto de dispositivos electrónicos, en términos de construcción y composición de diferentes materiales, con diferentes problemáticas de separación y posibles destinos del material recuperado.

2.4.1 Descripción de un caso de estudio: reciclado de televisores y monitores

El tubo de rayos catódicos (TRC) es el componente más pesado (50-60% en peso) que forma parte de los monitores y televisores y se emplea para la producción de imágenes sobre una pantalla recubierta de una capa de sustancias fluorescentes. Un TRC (Figura 2.11 y Figura 2.12) está formado básicamente por dos tipos principales de vidrio, uno para las pantallas y el otro para el cono. El vidrio de cono que rodea el cañón de electrones se diferencia del resto del vidrio de cono por presentar un mayor contenido en plomo.

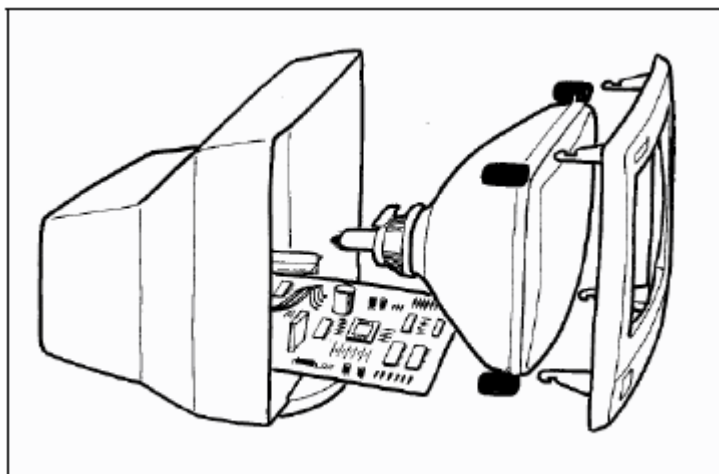


Figura 2.11 Componentes de un monitor o televisor: carcasa, tarjetas de circuitos impresos (PCB) y tubo de rayos catódicos (TRC)

Un tubo de rayos catódicos en color consta de las siguientes partes:

- Electrónica externa: bobinado de cobre alrededor del cuello del cono.
- Cañón de electrones: situado en el extremo del cuello del cono.
- Pantalla: el vidrio de pantalla, en general, no contiene óxido de plomo, salvo en algunos casos que puede llegar hasta un 4%. Representa 2/3 del peso del tubo de rayos catódicos.

- Cono: está formado por un vidrio con un alto contenido en óxidos de plomo (20% de media) como protección frente a la radiación. Representa 1/3 del peso del tubo de rayos catódicos.
- Frita: junta de unión entre el vidrio de pantalla y el vidrio de cono. Presenta un alto contenido en óxido de plomo.
- Banda anti-implosión: banda de metal férreo situado a lo largo del perímetro de la pantalla justo debajo de la frita. En algunos TRC va fijada al vidrio de pantalla mediante una cinta adhesiva.
- Partes metálicas internas (máscara y marco): forman una sola estructura unida a la pantalla a través de cuatro flejes metálicos situados sobre los lados del marco.
- Recubrimiento fluorescente: en forma de polvo está depositado sobre la cara interna de la pantalla, en cuya composición destaca la presencia de lantánidos, sulfuros de zinc y cadmio. Sobre los recubrimientos fluorescentes se sitúa una lámina de aluminio.
- Recubrimientos del cono: recubrimientos externos en base a grafito y los internos en base a óxidos de hierro.
- Elemento interno cuya función es mantener el vacío del TRC, absorbiendo gases y humedad que pudieran penetrar.

Una de las principales diferencias de un TRC en color de un TRC en blanco y negro es que este último consta de una sola parte de vidrio, es decir el cono y la pantalla están fabricados del mismo vidrio aunque presentan diferentes recubrimientos, mientras que en un TRC en color la pantalla y el cono están fabricados de vidrios de diferente composición. Además el TRC en blanco y negro no presenta partes metálicas internas como ocurre con el TRC en color. Los TRC en blanco y negro contienen hasta un 3% de óxido de plomo y hasta un 14% de óxido de bario.

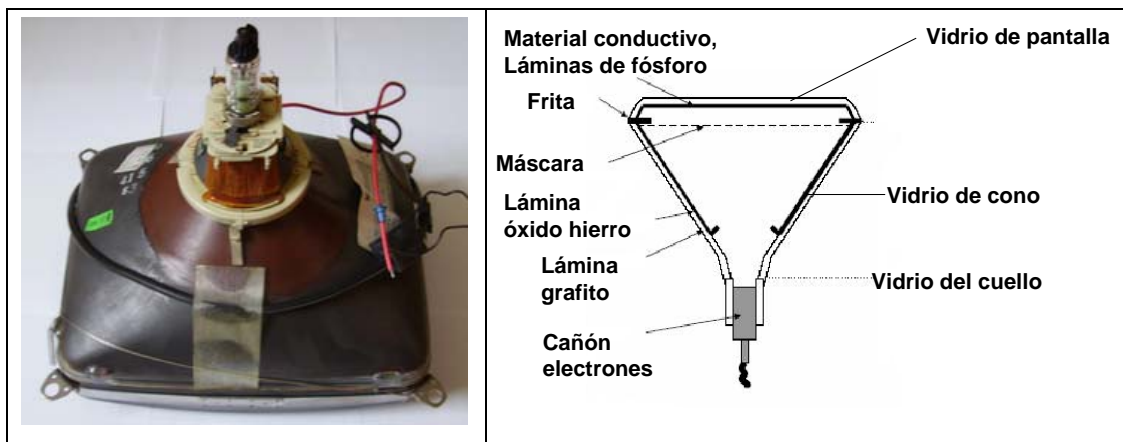


Figura 2.12 Izda.: Componentes internos de un televisor o monitor de ordenador.
Dcha.: Sección del tubo de rayos catódicos

En los tubos de rayos catódicos en color, el vidrio de pantalla contiene aproximadamente un 12% de óxido de bario, algo de estroncio, e incluso en algunos casos óxido de plomo (no superior al 4%, pero generalmente entre 0% y 2,5%). El vidrio del cono es diferente al vidrio de pantalla y tiene un contenido de óxido de plomo de hasta el 24%, además de otros óxidos metálicos. La parte de vidrio correspondiente al cañón de electrones puede contener hasta un 30% de óxido de plomo. El vidrio de cono y el de pantalla se unen a través de la frita, soldadura de vidrio altamente plomado (60-85%) (Figura 2.13).

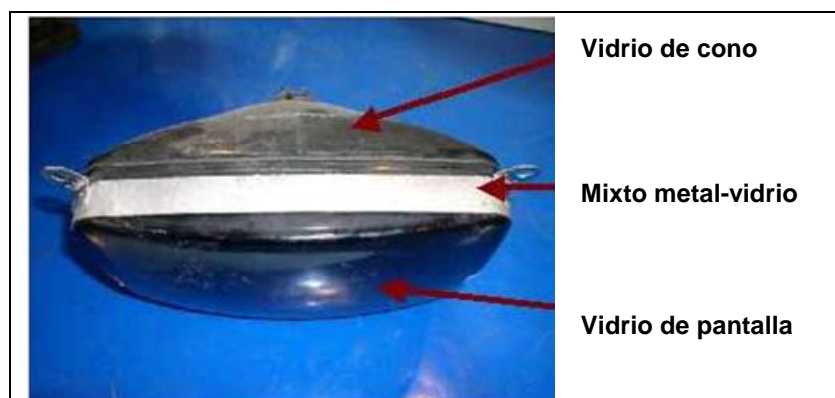


Figura 2.13 Detalle de cono, pantalla y banda anti-implosión (mixto metal –vidrio)

Cada uno de los tipos de vidrio de un TRC presenta composiciones y características diferentes que varían según el fabricante y la fecha de producción. Existen en el mercado europeo diferentes composiciones químicas tanto para el vidrio de cono como para el de pantalla. Entre los fabricantes a nivel europeo de vidrio de TRC se encuentran: Philips-Aachen, Thompson-Videoglass, Philips-Simonstone y Schott-Mainz. Ante el avance de las pantallas planas, la tendencia es desviar la fabricación a países asiáticos, porque todavía hay demanda de televisores con tecnologías de TRC en Europa del este y sur, y en países en desarrollo en general.

Los televisores y monitores de ordenador que están siendo desmantelados en la actualidad tienen menor contenido en metales y, sin embargo, ha aumentado el peso de otros componentes problemáticos como el vidrio de los TRC y plástico con o sin retardantes a la llama. Los aparatos desmontados se separan en general en 4 grandes grupos de productos: metales, plásticos, TRC y tarjetas de circuitos impresos. La utilización posterior de los materiales recuperados se explica con detalle en la sección 2.5, de forma general se puede decir que los componentes peligrosos se envían a gestores autorizados, los metales son recuperados en los correspondientes procesos metalúrgicos, los plásticos pueden ser aprovechados energéticamente o bien reciclados mecánicamente, el vidrio de cono y pantalla puede reciclarse en la fabricación de nuevos TRC u otros productos (reciclado de lazo abierto).

2.4.2 Separación de la banda anti-implosión

El conjunto de pantalla y cono tiene una banda metálica a lo largo de su perímetro (banda anti-implosión) que, dependiendo de fabricantes, modelos, tamaños de TRC, tiene una forma determinada. Algunas bandas están totalmente pegadas al cristal, en otros hay una unión entre banda y vidrio en la parte inferior y está separado en la superior, de forma que se facilita la entrada de una herramienta cuya función será cortar esta parte metálica.

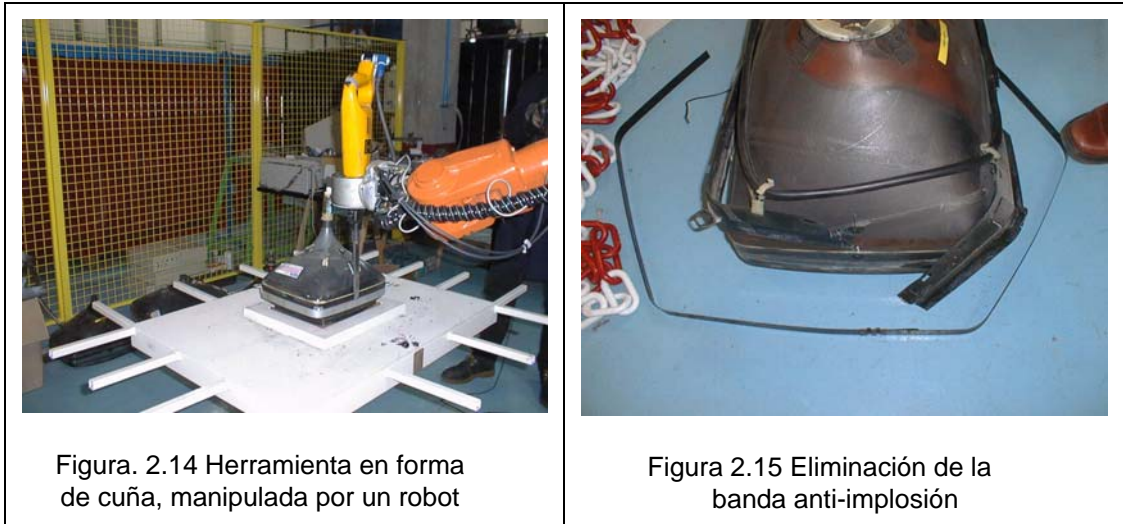
Se han estudiado diversos métodos manuales para separar la banda del vidrio. El primero consiste en un corte transversal de la banda utilizando una sierra tipo rotaflex, pudiendo comprobar que se produce una mella en el vidrio. Otro método consiste en realizar dos pequeños cortes en la banda dejando una zona pequeña entre los cortes y utilizando un alicate como si se tratara de un abrelatas, se va enrollando la chapa en el alicate y se va rompiendo en sentido transversal. Una vez que está totalmente rota la unión se procede mediante un cincel a efectuar el efecto palanca y se suelta completamente.

Entre los métodos con una cierta automatización figuran:

- Cuña que separa en un punto la parte metálica del vidrio, posteriormente baja una muela abrasiva que corta transversalmente el fleje metálico, sube la rueda y la cuña realiza el efecto palanca a lo largo del perímetro del TRC en varios puntos, separando la banda del vidrio. Una vez suelta se retira con un imán.
- Cuña que separa en un punto la parte metálica del vidrio, posteriormente baja una pequeña cizalla que corta transversalmente el fleje metálico, sube la cizalla y la cuña realiza el efecto palanca a lo largo del perímetro del TRC en varios puntos. Una vez suelta se retirará mediante un imán.
- Tijera neumática con brazos de diferente longitud. El brazo largo se introduce entre el vidrio y la banda, el segundo brazo la corta, al acabar el corte transversal completo se eleva la tijera y se introduce en otros puntos con un efecto palanca para separar la parte metálica del vidrio, una vez completamente suelta la banda se retira con un imán.

En algunos casos, al cortar transversalmente la banda metálica ésta salta y puede quedar a una distancia del TRC, con lo que puede no ser viable la

automatización de la recogida de bandas, tal como se muestra en la Figura. 2.14 y Figura 2.15.



2.4.3 Métodos industriales de separación de vidrios de TRC

Actualmente se llevan a cabo en la industria de reciclado diversos procesos de tratamiento de desensamblado de TRC y separación de los vidrios de cono y pantalla. En los apartados siguientes se citan algunos ejemplos.

2.4.3.1 Sistema Ecomatic (Alemania)

Desarrollado por la empresa Ecomatic GmbH especializada en sistemas móviles de reciclado [Ecomatic, 2005]. Se tritura el TRC completo. El material triturado pasa por un tambor rotatorio donde se realiza una limpieza mecánica en seco de los vidrios, eliminándose los recubrimientos por aspiración. Posteriormente los fragmentos limpios y triturados van pasando por diferentes etapas en las que se separaran los diferentes materiales (separación magnética y sensores infrarrojos) mediante una serie de sopladores de aire comprimido dispuestos a lo largo de la cinta

transportadora que expulsan los fragmentos de vidrio previamente identificados.

2.4.3.2 Método Sony (Japón)

El proceso comienza con una identificación del monitor, desmontaje de la carcasa y extracción manual del TRC. Posteriormente se rompe el vacío, se separa el cuello del cono, se retira la banda de reborde metálica por dilatación al calentarla con una corriente eléctrica. La cinta adhesiva, etiquetas y fijaciones de la unidad deflectora (situadas en la superficie externa) se eliminan mediante un cepillado. La separación del cono de la pantalla se lleva a cabo mediante la realización de cuatro entallas en las cuatro esquinas con un disco de diamante y posterior choque térmico localizado con un hilo calefactor. Una vez separados el cono y la pantalla se retiran de forma manual las partes metálicas internas y se procede a la limpieza de los vidrios. El vidrio de pantalla se limpia con un sistema de cepillado y aspiración para su posterior triturado. El vidrio de cono se tritura y después se limpia en un tambor rotativo por acción mecánica. Los recubrimientos del cono desprendidos se extraen por corriente de aire. Finalmente se realiza la separación magnética de los tetones de la pantalla.

2.4.3.3 Método Vicor (Alemania)

Es un proceso desarrollado por la empresa Vicor Video Computer Recycling GmbH [Vicor, 2005]. Se extrae el TRC de la carcasa manualmente. Se retira el cañón de electrones. Con una sierra radial se corta la banda metálica que cubre la unión entre el cono y la pantalla. A lo largo de la unión se hace una incisión con un elemento cortante para vidrio y sobre esta incisión se aplica una banda metálica o hilo al rojo vivo que provoca la rotura y la separación de las dos piezas de vidrio. El siguiente paso consiste en retirar las partes internas (recubrimiento metálico del cono, rejilla...) y las sustancias fluorescentes (tóxicas) que en forma de polvo recubren la cara

interior de la pantalla mediante un sistema de aspiración. El vidrio se tritura por separado en un triturador, los tetones de la pantalla se separan magnéticamente y por último el vidrio de cono se somete a un proceso de limpieza químico y se seca con aire caliente.

El método del hilo de resistencia caliente ha sido puesto en duda por el Consejo Industrial para el Reciclado de Aparatos Electrónicos [ICER, 2004], en especial los problemas de posicionar correctamente el hilo en la zona de interés, o que el vidrio no siempre rompe por donde se espera (sobre todo para TRC grandes que tienen un vidrio más grueso).

Así mismo, se han encontrado patentes y descripciones de procesos de separación cono-pantalla consistentes en el tratamiento químico del TRC (baño de ácido nítrico para deshacer la frita, seguido de choque térmico/vibración sónica), diversas variantes del método térmico de fusión de la frita y numerosos métodos mecánicos basados en la rotura o corte (sistemas multidisco, corte húmedo, corte por chorro de agua a alta presión con o sin abrasivos, etc.), con mayor o menor grado de automatización.

2.4.4 Métodos experimentales de separación de vidrios de TRC

Además de los métodos industriales más o menos implantados en plantas de reciclado, en varios programas de investigación se han experimentado diversas soluciones nuevas con el objetivo de optimizar la separación o abaratar los costes. En la siguiente sección se realiza una revisión de los más significativos.

2.4.4.1 Separación de cono y pantalla mediante microondas

El Centro Tecnológico Gaiker ha realizado una serie de ensayos de rotura de pantallas y conos de TRC en horno de microondas, encaminados a determinar si es factible utilizar la radiación de microondas para obtener una fracción de vidrio de pantalla libre de vidrio de cono, e incluso una fracción de vidrio de cono con calidad adecuada (< 2% de vidrio de pantalla) para su reciclado.

El procesamiento de materiales por microondas presenta varias ventajas, como son: la enorme velocidad de calentamiento que se puede alcanzar y el hecho de que la energía del campo se disipa en el material que la absorbe dando lugar a un sistema muy eficiente de calentamiento y, debido a que se calienta el material directamente y no toda la cavidad del horno, es de gran flexibilidad industrial al tratarse de un sistema de muy baja inercia térmica. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada debido a que no se consigue una buena uniformidad de temperaturas a frecuencias económicas producidas por magnetrones (como la habitual de 2,45 GHz) (Figura 2.16).

Los materiales interactúan con las microondas de tres modos: los materiales conductores no se calientan pero reflejan la energía microondas; otros materiales son transparentes a las microondas y no se calientan, por lo que pueden actuar como aislantes; finalmente, existe una serie de materiales que absorben la energía, calentándose. No sólo las propiedades térmicas de los materiales son determinantes para su comportamiento en el interior de un campo de microondas, sino que se ha comprobado que formas metálicas puntiagudas o de bordes afilados pueden actuar como antenas concentrando las microondas en un punto, creando fuertes gradientes de campo y provocando la aparición de arcos y chispas.



Figura 2.16 Separación de vidrio de pantalla en microondas. Izda.: Empleando mella y malla metálica. Dcha.: Pantalla fracturada en trozos al desprenderse los cantos

2.4.4.2 Separación mediante corte

Existen diversos métodos de separación de los dos tipos de vidrio mediante corte:

- **Sierra circular de diamante o disco abrasivo:** se realiza un corte en la zona de unión entre los dos tipos de vidrio (Figura 2.17). Se fija la pantalla a la mesa mediante una ventosa y se procede a cortar la pantalla del cono mediante una rotaflex.

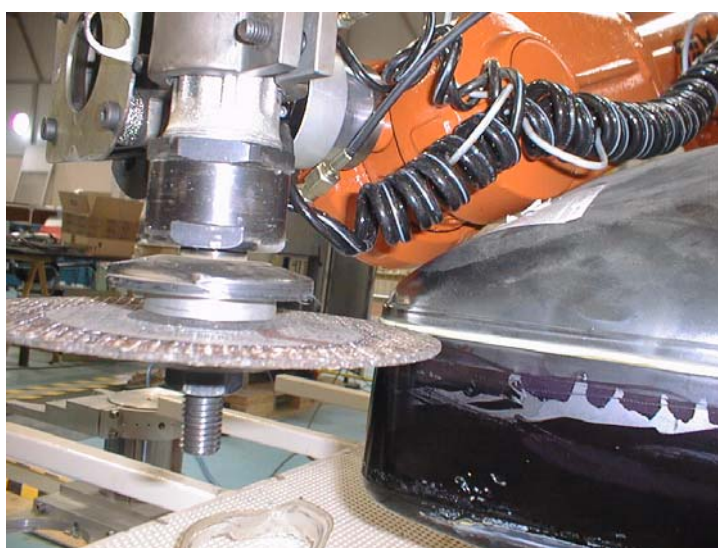


Figura 2.17 Corte robotizado mediante disco abrasivo

Se consigue cortar el vidrio comprobando que es fácil de cortar, pero hay que tener en cuenta la necesidad de refrigerar la herramienta y de instalar un sistema de absorción del polvo de corte generado.

- **Corte por chorro de agua:** Permite cortar vidrio sin ninguna dificultad [Geskin et al., 2002]., con las siguientes ventajas:
 - Se corta con un pequeño rango de holgura.
 - Las fuerzas de corte son bajas.
 - No hay vibraciones en el brazo del robot.
 - Por tratarse de un procedimiento no térmico, no se produce ninguna zona alterada por el calor.

Pero también presenta algunos inconvenientes, como los siguientes:

- Necesidad de una inversión muy alta.
- Contaminación por ruido, se necesita una cabina insonorizada y presurizada.
- El abrasivo utilizado en el corte por chorro es una sustancia contaminante, que posteriormente hay que reciclar.

2.4.4.3 Separación mediante métodos térmicos

A continuación se describen los métodos térmicos que han sido probados para la separación de los vidrios:

- **Corte por láser:** es un proceso térmico en el que el material es parcialmente fundido y parcialmente evaporado. El haz láser es focalizado por debajo o sobre la superficie del material a cortar por medio de una lente. Existen ya sistemas comerciales basados en láser de CO₂ [Proventia, 2008]. Las desventajas son el precio del sistema y posibles problemas de corte para vidrio grueso.

- **Por aire caliente:** consiste en calentar la frita (pegamento de unión) entre los dos tipos de vidrio de forma homogénea para evitar tensiones y rotura incontrolada del TRC. Se consigue separar la pantalla y el cono en el punto de la unión de ambos, quedando aproximadamente la mitad del pegamento cerámico en la pantalla y la otra mitad en el cono. El inconveniente de este procedimiento es el alto tiempo de ciclo.
- **Por autoinducción:** una bobina inductiva es un bobinado que crea un campo magnético e induce una corriente en el secundario. En este caso el secundario es la banda metálica anti-implosión que rodea al TRC, y se fabrica una bobina a medida para cada tamaño de TRC. Se coloca encima de la banda, conectando la bobina a un transformador. La bobina pone al rojo la banda metálica de manera que, al estar esta banda pegada al vidrio mediante un pegamento líquido, pasa el calor a la zona de la unión del cono y la pantalla (que están unidos mediante un pegamento cerámico). Este método supone unas instalaciones de elevado coste y consumo.
- **Por choque térmico con resistencias eléctricas:** el objetivo es separar la pantalla del cono mediante un calentamiento, seguido de un enfriamiento que provoque la rotura del TRC en la zona donde previamente se ha realizado una muesca. Se han probado además varios métodos de preparación previa: con muesca en las esquinas, con muesca en todo el perímetro del TRC en el vidrio de pantalla, y sin ningún tipo de guiado pretendiendo obtener una separación por la frita.

El sistema de calentamiento consta de un sensor de temperatura, un sistema de resistencias recubierto de amianto al cual se le da la forma del TRC, ladrillos refractarios y una cubierta para aislar la zona de calentamiento del resto. Las pruebas realizadas se muestran gráficamente en la Figura 2.18 donde se explican las fases del proceso: colocación de la banda calefactora en la zona de la frita

después de realizar el mellado, aplicación de calor de forma controlada a través del sensor, y enfriamiento progresivo. En la Figura 2.19 se muestran imágenes de los diversos resultados obtenidos en las pruebas. La conclusión es que no es posible conseguir una rotura controlada que permita obtener por separado los dos tipos de vidrio.

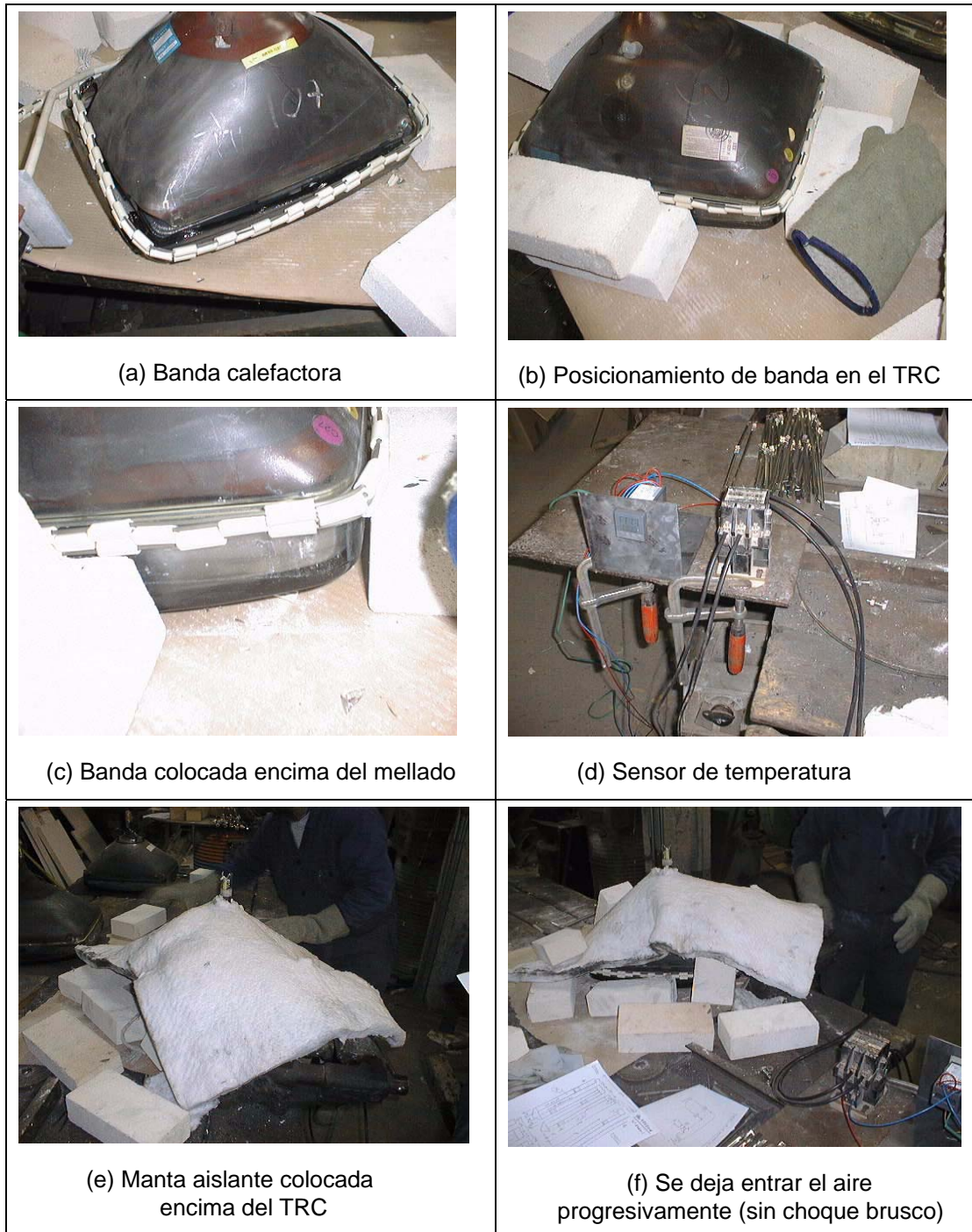


Figura 2.18 Detalles de las fases de rotura de TRC por choque térmico



Figura 2.19 Diferentes resultados de la rotura de TRC por choque térmico

2.4.5 Reciclado de tarjetas de circuitos impresos

Las tarjetas de circuitos impresos consisten en un sustrato no conductivo (normalmente una resina termoestable reforzada con fibra de vidrio) sobre el que se monta la estructura conductiva o circuito, que suele ser de cobre y algunas veces de níquel, plata, estaño, oro. Otros metales presentes son hierro y aluminio. Pueden encontrarse en menores cantidades metales del grupo del platino que son especialmente valiosos. Algunas tarjetas que se utilizaban en equipos de ofimática antiguos contenían una cantidad interesante de metales de base y otros metales preciosos, lo que ha hecho

especialmente interesante su recuperación una vez que han alcanzado el final de su vida útil. Sin embargo, en los equipos de ofimática más modernos se ha detectado una disminución del contenido de metales en las tarjetas, asimilándose cada vez más a los contenidos que aparecen en las tarjetas de los televisores.

De acuerdo con la literatura consultada [Renteria, 2006], una composición media de las actuales tarjetas de circuitos impresos puede ser 70% no metales (fibra de vidrio, termoestables), 16% de cobre, 4% soldaduras, 3% hierro, 2% níquel, 0,05% plata, 0,003% oro, 0,0001% paladio y diversos porcentajes de otros elementos (bismuto, antimonio, tántalo, etc.). Por tanto, las tarjetas de circuitos impresos contienen una gran variedad de metales de base y preciosos en diversas concentraciones, lo cual hace que sea especialmente interesante su recuperación, una vez que alcanzan el final de su vida útil.

Los procesos de reciclado de tarjetas de circuitos impresos están principalmente encaminados a recuperar los metales y, sobre todo, los metales preciosos que contienen para obtener finalmente concentrados metálicos que pueden ser empleados como materia prima en metalurgias secundarias. Las rutas para el reciclado de los materiales contenidos en las tarjetas de circuitos impresos post-consumo incluyen los procesos mecánicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, electroquímicos o combinaciones de los mismos, aunque las dos vías más habituales son el tratamiento mecánico y la metalurgia del cobre. La elección de una alternativa u otra está relacionada con el contenido metálico (principalmente de metales preciosos) y con el tipo de laminado.

Aunque no es una regla exacta, las tarjetas de bajo contenido metálico (precioso) presentan laminados de molienda relativamente fácil. Las tarjetas de alto contenido metálico suelen emplear laminados de mayor calidad y resistencia a las técnicas de molienda convencionales. Según esto, las

tarjetas de bajo contenido en metales preciosos se destinan a tratamiento mecánico para obtener fracciones concentradas que posteriormente se destinan a las diferentes metalurgias: hierro, aluminio, cobre. En realidad, el tratamiento mecánico es un tratamiento previo a la metalurgia del cobre que permite obtener concentrados metálicos a partir de tarjetas de bajo contenido en metales y recuperar ciertos metales que de, otro modo, no pueden ser aprovechados. Las tarjetas de medio y alto contenido en metales preciosos se destinan directamente a las fundiciones de cobre.

Los componentes electrónicos que forman parte de las tarjetas de circuitos impresos son muy variados, tales como capacitadores, bobinas, baterías, pantallas de cristal líquido (LCDs), resistores, potenciómetros, transistores, circuitos integrados, diodos, interruptores, cables, conectores, disipadores, etc.

Se han propuesto varios prototipos de sistemas automatizados de reciclado de componentes electrónicos en tarjetas de circuitos impresos [Stobbe, 2002]. Las fases propuestas para la recuperación son:

- Desarrollo de un sistema de desoldado automático mediante aparatos comerciales de desoldado junto con sistemas de reconocimiento por visión artificial de los puntos donde actuar. Habitualmente funcionan junto con datos provenientes de sistemas de diseño (CAD), con las características geométricas de los componentes de la tarjeta de circuito impreso.
- Optimización del proceso de desoldado (temperatura, tiempo de aplicación) para garantizar la calidad de los componentes y evitar su rotura. El método más utilizado es por aire o gas caliente aplicado de forma precisa a los pines soldados al sustrato de resina de la tarjeta.
- Control de calidad de las piezas recuperadas, analizando parámetros geométricos y de funcionalidad.

2.4.6 Reciclado de componentes plásticos

De acuerdo con datos disponibles de los principales fabricantes de televisores [Thomson, 2005], la cantidad promedio de plástico en un televisor corresponde al 18-15%, siendo los mismos porcentajes válidos para monitores de ordenador. Los plásticos mayoritarios en las carcasas de televisores y monitores son el HIPS (poliestireno de alto impacto) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), junto con la mezcla ABS+PC (policarbonato), con diversos aditivos como estabilizantes y retardantes de llama. En muchos casos estos plásticos pueden cumplir las especificaciones técnicas y legales marcadas por mercados secundarios y directivas europeas y ser reprocesadas para emplearse en nuevos productos.

En monitores de ordenador el ABS es el polímero más frecuente y puede ser reciclado para aplicaciones de alto valor añadido. Las carcasas de monitor, sin embargo, están a veces pintadas, lo que dificulta su reciclado. Para aumentar la resistencia al fuego de algunos plásticos del sector eléctrico y electrónico se añaden retardantes a la llama. La presencia de retardantes a la llama halogenados puede causar problemas de salud durante algunos procesos de reciclado, ya que se liberan humos tóxicos si la extrusión se lleva a cabo a altas temperaturas. Algunos tipos de retardantes a la llama han sido prohibidos por las directivas de la Unión Europea. Según se trate de televisores o monitores, la distribución de plásticos en las carcasas se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Plásticos más frecuentemente empleados en fabricación de carcasas

Equipo	ABS y PC+ABS	HIPS y otros
Televisor	10,4%	84,0%
Monitor	53,2%	43,2%

Las carcasas plásticas se pueden someter a etapas de identificación de plásticos y aditivos mediante técnicas de espectroscopia de infrarrojos (MIR) y fluorescencia de rayos X (XRF). De esta forma se pueden clasificar las carcasas en varios grupos, atendiendo a la presencia de aditivos tolerados o prohibidos (metales pesados, retardantes a la llama bromados) y a la naturaleza de la matriz polimérica.

Un apartado clave en el reprocesado de plásticos y mezclas post-consumo recuperados lo constituyen las etapas de acondicionamiento, consistentes en:

- Inspección y eliminación manual de componentes metálicos, gomas, etiquetas.
- Triturado.
- Lavado.
- Homogeneización mediante extrusión y granceado.

Los valores medios obtenidos tras la caracterización de los materiales recuperados muestran en general unos resultados que se encuentran dentro del intervalo de valores característicos de los materiales vírgenes.

2.5 Aplicaciones de los materiales reciclados y requisitos de las empresas que los utilizan

El reciclado de componentes y materiales requiere el desarrollo de nuevas tecnologías y estructuras organizativas para facilitar su reutilización, teniendo en cuenta aspectos como:

- Económicos: Facilitando la reutilización de los componentes reciclados en nuevos productos se pueden reducir los costes y desarrollar nuevos negocios.
- Medioambientales: La reutilización reduce el consumo de recursos necesarios para fabricar productos nuevos y también reduce el desecho generado.
- Sociales: Todavía es necesario realizar manualmente gran parte de las operaciones de reciclado, por lo que el sector del reciclaje tiene gran importancia en el empleo.

Las aplicaciones de los componentes y materiales recuperados en el proceso de reciclado son tan diversas como la naturaleza de lo obtenido. En un principio, los aparatos que se desmontaban estaban contruidos con tecnologías clásicas y contenían cantidades importantes de cobre, hierro, aluminio, zinc y metales preciosos. Estos contenidos pagaban el desmontaje, el transporte, el tratamiento y aún se obtenía un margen de beneficio.

La situación ha cambiado sustancialmente y los aparatos electrónicos o informáticos que hoy se dan por obsoletos contienen menos metales y más materiales plásticos y/o vidrio técnico. La Tabla 2.13 muestra la variación, a lo largo de los años, de la distribución de materiales recuperados en televisores reciclados por Sony Corporation en Japón [Sony, 2002; Sony, 2003; Sony, 2007]. La composición media, en peso, de un monitor es:

- 50% vidrio.
- 20% metales férreos.
- 15% plásticos.
- 15% otros materiales, incluidos metales no férreos.

Tabla 2.13 Materiales recuperados en televisores tratados por Sony en Japón

Material	2001 Tm y % respecto total procesado	2003 Tm y % respecto total procesado	2006 Tm y % respecto total procesado
Hierro	704 / 8%	833 / 7%	2.264 / 10,7%
Cobre	471 / 5,3%	469 / 4%	829 / 4%
Compuestos no féreos	--	73 / 0,6%	58 / 2,7%
Vidrio de TRC	5.355 / 60%	7.306 / 61%	8.093 / 38,5%
Otros materiales	575 / 6,4%	1.034 / 8,6%	4.106 / 19,5%
Peso total de materiales recuperados	7.106	9.724	15.360
Peso total de televisores procesados	8.851	12.008	21.009

En un principio, los mercados secundarios identificados para los materiales recuperados en el tratamiento de televisores y monitores fueron:

- Vidrio de cono sin recubrimientos: nuevos TRC.
- Vidrio de pantalla sin recubrimientos: nuevos TRC.
- Vidrio mixto, TRC completos: fundente en metalurgia.
- Plásticos mayoritarios en carcasas, sin aditivos prohibidos: reciclado mecánico.
- Rechazos plásticos (carcasas minoritarias, con aditivos prohibidos...): recuperación energética en cementera.
- Madera de carcasas: reciclado.
- Metales (Fe, Cu, Al...): metalurgia.

Un desarrollo que permita una reducción de costes de tratamiento facilitaría los planes de revalorización/reciclado que se deducen de la directiva RAEE. Tanto las empresas recicladoras como las que utilizan el material obtenido en el reciclado como materia prima están sujetas a las normativas europeas. En los próximos 15-20 años se prevé que unos 2 billones de aparatos de televisión van a ser reciclados en el mundo, por lo que realmente hay una necesidad de que el tratamiento de recuperación sea eco-eficiente. La Comisión Europea ha propuesto en la directiva sobre "Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, RAEE" unas determinadas cuotas para recuperación (reciclado y reutilización). En el caso de los aparatos de televisión y monitores de ordenador estas cifras son:

- Recuperación (reutilización, reciclado y tratamiento térmico): un mínimo del 75-80% del peso total.
- Reutilización y reciclado: un mínimo del 70-75%.

Estos objetivos sólo son alcanzables utilizando técnicas de desensamblado semiautomático, ya que actualmente estos aparatos se desmontan manualmente en 6-8 minutos para un televisor (4-6 minutos para un monitor de ordenador), siempre teniendo en cuenta que se trata de un desensamblado básico. Si la industria de reciclado debe cumplir los objetivos marcados por la Comisión Europea el proceso de desensamblado debe ser racionalizado manteniendo los criterios medioambientales, de eficiencia y de reducción de costes. Teniendo en cuenta esta situación actual y las futuras normativas a aplicar las empresas recicladoras tienen como objetivo el desarrollo de sistemas semiautomáticos de desensamblado de televisores y monitores, que sean económicamente viables, con el fin de reducir la cantidad de residuos que acaban en vertederos y de reutilizar los materiales obtenidos.

En las siguientes secciones se explican las aplicaciones actuales para los materiales obtenidos del reciclaje de televisores: vidrio, componentes electrónicos y plásticos.

2.5.1 Vidrio

El vidrio se forma con diferentes tipos de sales, principalmente dióxido de silicio en forma de arena. Para fabricar el vidrio común se añaden carbonato sódico y piedra caliza (carbonato de calcio). Los vidrios modernos incorporan otros ingredientes para mejorar el color y algunas de sus propiedades como, por ejemplo, la resistencia al calor.

En los últimos diez años se han recuperado dos millones de toneladas de vidrio de todo tipo. Aunque el material de base es abundante su fabricación partiendo de materia prima habría exigido un elevado coste energético. Además, genera una importante contaminación atmosférica que no siempre se trata convenientemente. Cada tonelada de vidrio reciclado ahorra 1.200 kg de materia prima y 130 kg de petróleo. Globalmente, el balance es pobre: 80.000 toneladas recicladas respecto a 920.000 toneladas tiradas. Todo este material debe fabricarse de nuevo, para lo cual es preciso invertir 30 veces más energía y 100% más de materia prima. El reciclado del vidrio ahorra un 20% de la contaminación atmosférica y un 50% de la contaminación de las aguas.

Reciclar significa volver al ciclo; así, para que el reciclado de un material sea verdaderamente ecológico y garantice la protección del entorno, debe cumplir los siguientes requisitos:

- Que el material obtenido pueda ser utilizado de nuevo íntegramente.
- Que el nuevo material mantenga al 100% sus cualidades.

- Que el material resultante se utilice preferentemente para fabricar el mismo producto del que proviene.

El reciclado de vidrio proveniente de TRC de monitores y televisores requiere un tratamiento específico, diferente al vidrio procedente de otras fuentes. Esto se debe a que el TRC está formado por dos tipos de vidrios, el de la pantalla y el del cono, cuya diferencia principal es el contenido de plomo. El vidrio de pantalla es un vidrio no templado, transparente y de coloración ahumada con un contenido en plomo inferior a 4%, mientras que el vidrio de cono es un vidrio no templado, transparente e incoloro (una vez eliminados los recubrimientos superficiales) cuyo contenido en óxido de plomo oscila entre un 15% y 22%.

La limitación que existe de reutilización conjunta de estos dos tipos de vidrios hace necesario aplicar procesos específicos y complejos para separar el vidrio de cono y pantalla unidos por un adhesivo cerámico. Además, ambos vidrios tienen recubrimientos, aunque de diferente naturaleza, que deben ser eliminados correctamente. En el caso de la capa fluorescente de la pantalla, la directiva sobre RAEE obliga a eliminarla, y en el caso del recubrimiento del vidrio de cono, debe ser eliminado para que pueda ser utilizado en posteriores aplicaciones.

La composición del vidrio de TRC dicta las aplicaciones potenciales de dicho vidrio. El contenido de plomo del vidrio de TRC es el factor determinante que generalmente marca su potencial e idoneidad para una cierta aplicación. La composición y contenido en plomo del vidrio de TRC varía dependiendo del componente y del fabricante. En general, además, el vidrio de TRC presenta un contenido en óxidos de bario y estroncio inadecuado para muchas aplicaciones y un color oscuro indeseado en otras. A esto se suma el hecho de que su composición exacta se desconoce y no es constante en la corriente de TRC recuperados.

El reciclado del vidrio de TRC comprende procesos destinados a la reutilización del vidrio propiamente dicho o del plomo que contiene. Generalmente, empresas procesadoras son las encargadas de recuperar el vidrio de TRC de monitores, televisores o TRC completos y adecuarlos a las diferentes aplicaciones de destino. Los procesos manuales y mecánicos comprenden diversas etapas como retirada de metales, carcasas plásticas y otros componentes distintos del vidrio, fragmentación de vidrio, limpieza de recubrimientos y, dependiendo de la aplicación final, separación de tipos de vidrio en función de su composición. A continuación se describen las diferentes aplicaciones de destino para reciclado de vidrio de TRC identificadas [Dillon, 1998].

2.5.1.1 Reciclado de vidrio en ciclo cerrado

El empleo de vidrio de TRC en la fabricación de nuevos TRC (también denominado *Closed loop Glass-to-glass recycling* o Ciclo cerrado de reciclado de vidrio a vidrio) sirve para reemplazar directamente el sílice y el óxido de plomo (materias primas primarias) (Figura 2.20). Tanto el vidrio de TRC de origen post-consumo como industrial es aceptado para esta aplicación: vidrio con y sin plomo procedente de pantallas y conos de televisores a color.

Los TRC monocromos (televisores en blanco y negro) no son deseables para esta aplicación. Se requiere la clasificación del vidrio: TRC monocromos/color, separación de vidrio de pantalla/cono, de vidrio de pantalla con/sin plomo, etc. También se requiere una limpieza previa de los dos tipos de vidrio (cono y pantalla).

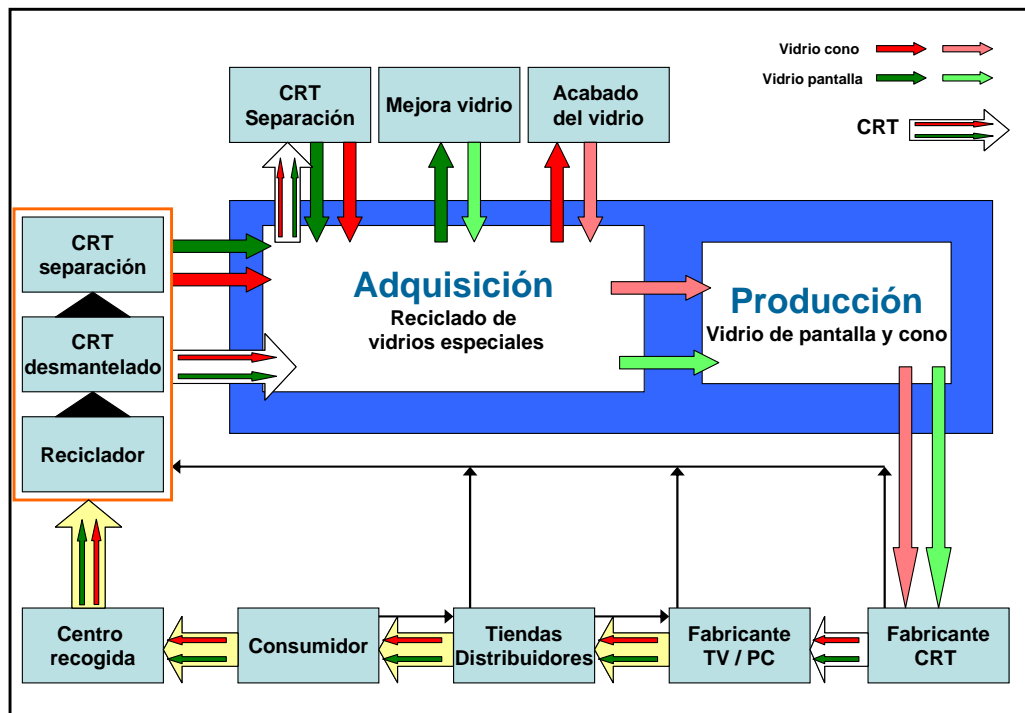


Figura 2.20 Reciclado en ciclo cerrado de TRC

Este tipo de reciclado lo vienen realizando los grandes productores de vidrio de TRC y empresas recicladoras especializadas: Schott Glass y STVG, Matsushita, Samsung-Corning, Corning Asahi Video, Nippon Electric Glass (NEG), Techneglass, Thomson Consumer Electronics, American Video Glass Company, Sony Corp., Green Cycle Corporation, Envirocycle Inc., LG, Philips Display.

Algunas de las compañías europeas han alcanzado un acuerdo (ver Tabla 2.14 y Tabla 2.1) para decidir las especificaciones de los dos tipos de vidrio, en relación a su contenido de plomo, con el fin de promocionar el reciclaje en ciclo cerrado [Schott, 2002]. Actualmente estas cifras están en un 30% para el cono y un 10% para pantalla (en peso).

Tabla 2.14 Especificaciones de Schott Glass para vidrio de pantalla para ciclo cerrado

Especificaciones para el vidrio de pantalla reciclado	
Característica	Requisito
Separación	El vidrio de cono y pantalla tienen que separarse estrictamente de un TRC sin dañar.
Vidrio aceptable	Para su reciclado, sólo se acepta vidrio de pantallas en color sin contenido en plomo. Se acepta vidrio de pantalla de monitores y televisores en color. No se acepta vidrio de pantalla de TRC en blanco y negro o monocromos.
Porcentaje de vidrio cono admisible	0%. Vidrio de cono y del cuello del cono deben ser separados completamente.
Otros vidrios admisibles	0%. La frita no se acepta y tiene que ser completamente separada.
Contaminación	Los fragmentos de vidrio de pantalla deben estar libres de recubrimientos fluorescentes, de pegamentos, de fragmentos de vidrio de cono, frita o cuello de cono, cañón de electrones, deflectores y de recubrimientos de óxido de hierro u otros recubrimientos metálicos generados, por ejemplo, durante el proceso de triturado o en el almacenaje en contenedores metálicos susceptibles de oxidarse.
Tamaño fragmentos	No se especifica un límite de tamaño para los fragmentos. Normalmente pantallas completas, rotas únicamente por caídas durante el almacenaje. Se acepta hasta un 1% del peso total del lote en partículas finas (tamaño inferior a 2 mm). No se acepta vidrio en polvo.

El uso del vidrio en ciclo cerrado está tendiendo a decrecer (debido a la aparición de la tecnología LCD y plasma), y además su fabricación se desplazará a países del este de Europa y Asia.

Tabla 2.15 Especificaciones de Schott Glass para vidrio de cono para reciclado en ciclo cerrado

Especificaciones para el vidrio de cono reciclado	
Característica	Requisito
Separación	Separación estricta entre el vidrio de cono y el de pantalla
Vidrio aceptable	Sólo se acepta vidrio de cono de TRC en color (monitores y televisores) para fabricar nuevos conos.
Porcentaje de vidrio pantalla admisible	Se acepta el vidrio de cono si está contaminado con vidrio de pantalla como consecuencia del propio proceso de separación (en una proporción menor al 2%).
Otros vidrios admisibles	La frita y el vidrio del cuello del cono se aceptan como componente secundario.
Contaminación	El vidrio no debe estar contaminado con recubrimientos fluorescentes o residuos no originarios del TRC.
Tamaño fragmentos	No hay límite superior para los fragmentos de vidrio. Se acepta hasta un 1% del peso total del lote en partículas finas (< 2 mm).

2.5.1.2 Reciclado de vidrio en ciclo abierto

El vidrio de TRC puede emplearse también en la fabricación de otros objetos de vidrio (también denominado *Open loop Glass-to-glass recycling* o Ciclo abierto de reciclado de vidrio a vidrio). Pero este tipo de reciclado no es fácil debido a las restricciones para introducir compuestos peligrosos (plomo, arsénico, cadmio) en nuevos productos. La industria del envase de vidrio admite sin demasiados problemas sólo el vidrio de pantalla con garantías de haber sido correctamente seleccionado. En la industria cerámica hay menos restricciones, y ambos tipos de vidrio se utilizan siempre que presenten una cierta homogeneidad y limpieza.

A continuación se mencionan algunos ejemplos de reutilización del vidrio en ciclo abierto:

- Hojas de vidrio plano para aplicaciones industriales en rascacielos y hospitales en las que se aprovecha la protección frente a la radiación que proporciona la presencia de plomo. Al menos un fabricante japonés emplea vidrio de TRC para este uso.
- Objetos de vidrio decorativo (jarrones, copas, garrafas, adornos navideños, pisapapeles, recuerdos, premios, trofeos...). IBM ha encargado a cristalerías estadounidenses y suecas la fabricación de este tipo de objetos. Así, por ejemplo, Vitrex o Corning trabajan en esta área. Un fabricante de Murano (Italia) produce mesas de vidrio de color utilizando un 97% de vidrio de pantalla.
- Varios productos de iluminación emplean pequeñas cantidades de vidrio plomado, como por ejemplo la base de bombillas incandescentes (alrededor de 1 g de vidrio con plomo) y las lámparas de descarga de alta intensidad.
- Fabricación de botellas rellenables para pesticidas para uso de agricultores locales en China (fabricación a cargo de una filial de la empresa estadounidense Fortune Plastics and Metal, Inc.).
- Baldosa decorativa. El sector de fabricación de baldosas de vidrio (pavés) y cerámica puede ser un mercado capaz de absorber ciertos volúmenes de vidrio procedente de TRC. Por ejemplo, la empresa Futuristic Tile LLC (EEUU) ha desarrollado una tecnología para la producción de materiales de construcción a partir de vidrio reciclado (empleando vidrio de TRC en la producción de baldosas, tanto en la capa del fondo como en la superior). En Londres, The Green Bottle Unit fabrica baldosa decorativa con capacidad para emplear tan sólo el 0,1% del vidrio de TRC (pantalla sin plomo) del Reino Unido. Otras experiencias con vidrio de pantalla sin plomo: fabricación de baldosa de revestimiento por parte de la empresa Innolasi Oy (Finlandia) [Enqvist, 2003] y fabricación de ladrillo para fines decorativos o de revestimiento por parte de la Staffordshire University del Reino Unido.

Existe dentro de la construcción una solución reciente que es el hormigón traslúcido, que tiene la solidez y resistencia del hormigón tradicional y además, gracias a las fibras de vidrio que se le han incorporado, tiene la posibilidad de permitir visualizar las 'siluetas' del exterior (Figura 2.21). Actualmente esta aplicación está patentada con el nombre de “Litracón”. Este nuevo composite puede transformar el aspecto interior de los edificios de hormigón, brindándoles la posibilidad de que se perciban más luminosos y aireados.



Figura 2.21 El hormigón traslúcido “Litracón”

2.5.1.3 Agregados de vidrio

El vidrio mezclado de TRC puede emplearse como sustituto de otros materiales en diversas aplicaciones:

- Existen experiencias de empleo de vidrio de TRC como material de relleno en construcción [Batayneh et al., 2007]. El vidrio recuperado puede utilizarse en sustitución de la grava o la arena en múltiples aplicaciones, como material de relleno para la cobertura de vertederos y tuberías o para la realización de caminos y carreteras. Este destino es promovido por algunos recicladores como Andela Products, Ltd. Mediante un método que elimina las aristas cortantes del cristal, proceso llamado “pulverizado de cristal”, se consiguen una arena y

gravillas muy adecuadas para cualquier tipo de uso habitual que se le pueda dar (Figura 2.22). Este reciclado para realizar gravilla presenta una gran ventaja y es que no hay necesidad de preocuparse del color del cristal, lo que abarata su producción. Casi cualquier uso que se le pueda dar a la gravilla normal se le puede dar a esta gravilla de vidrio.

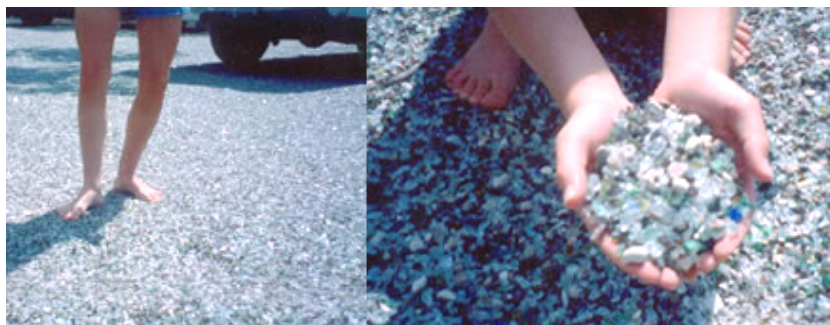


Figura 2.22 Gravilla de vidrio.

- El vidrio “espuma” es un material aislante que puede fabricarse a partir de vidrio reciclado post-consumo (experiencias en Noruega indican que es factible incorporar al menos un 20% de vidrio de pantalla de TRC en el vidrio “espuma”) [Andreola et al., 2007]. El vidrio multicelular o vidrio “espuma” es un excelente aislante térmico o acústico que se utiliza en edificación y en construcción (Figura 2.23). No existen barreras técnicas conocidas para el empleo de vidrio de TRC ni impactos medioambientales adversos respecto al uso de otros tipos de vidrio.



Figura 2.23 Gravilla de vidrio utilizada como aislante en un tejado.

- *Proactive Environmental Research and Development, Inc.* (PERDI) es un reciclador norteamericano que ha desarrollado un aditivo para inmovilizar el plomo en las operaciones de chorreo por arena y que ofrece una salida para el vidrio de TRC como medio abrasivo alternativo en los procesos de chorreo.
- El vidrio de TRC puede emplearse como agente fundente en procesos de fundición de plomo y cobre. En estos casos el vidrio de TRC es una alternativa de menor coste al empleo de sílice o arena.
- También puede emplearse vidrio de pantalla sin plomo de TRC como fundente en la fabricación de ladrillos. Investigaciones llevadas a cabo por CERAM (Centro *Ceramic Research* del Reino Unido), sobre el uso de vidrio de envase muestran un ahorro de energía del 3-5% en la calcinación si se añade como fundente un 5% de vidrio [Andreola et al., 2007]. Esta aplicación puede emplear potencialmente cantidades significativas de vidrio de pantalla de TRC (por ejemplo si todos los fabricantes de ladrillos del Reino Unido emplearan el referido 5% se requerirían alrededor de 370.000 toneladas de vidrio de TRC; una cantidad 5 veces mayor que las cantidades de residuos de vidrio de pantalla de TRC emergentes anualmente).
- Un uso muy atractivo, aunque no muy innovador (en EE.UU. se lleva usando desde los años 70), es el uso de vidrio para fabricar asfalto [Edinlile et al., 2004]. El asfalto creado con este vidrio suele tener un porcentaje de vidrio en peso menor de un 20% y el tamaño de los trozos de cristal debe ser el adecuado para que se puedan usar los métodos y máquinas habituales a la hora de trabajar con el asfalto. Este tipo de asfalto suele tener una alta adherencia y un desgaste bastante menor que el de los asfaltos corrientes. Además, usado en determinadas aplicaciones como las pistas de aeropuertos, muestra otra de sus cualidades y es que presenta una mayor visibilidad. A la hora de aplicarlo su enfriamiento es más lento y, por lo tanto, permite

que la compactación se pueda realizar con un mayor margen de tiempo.

2.5.1.4 Aplicaciones basadas en el contenido en plomo

- El New Jersey Institute of Technology (NJIT) ha trabajado en la aplicación de vidrio mezclado de TRC en productos de protección contra rayos X, demostrando la viabilidad técnica para desarrollar estos productos. Según los estudios realizados por este instituto, el vidrio de pantalla podría utilizarse en aplicaciones de baja protección contra los rayos X, el vidrio de cono en aplicaciones en las que sea necesaria una mayor protección, el vidrio mezclado en aplicaciones secundarias, mientras que el polvo podría emplearse en la fabricación de baldosas, como material de carga para polímeros y como mortero. Las aplicaciones desarrolladas para la protección de las radiaciones son: bloques de vidrio para construcción, baldosas cerámicas y barreras vinílicas.
- Otro mercado final para el plomo contenido en el vidrio de TRC es su aprovechamiento y recuperación en fundiciones, donde es empleado como fundente. Dichas fundiciones requieren preferiblemente vidrio fragmentado y relativamente libre de contaminantes plásticos, aunque pueden aceptar también TRC completos (esta ruta requeriría poco pre-procesado). En Gran Bretaña, la empresa NuLife Glass Ltd. ha desarrollado un proceso de fundición específico en presencia de catalizador que elimina el plomo del vidrio, dejando un silicato alcalino que puede ser empleado en la fabricación de nuevo vidrio. El plomo recuperado se emplea como materia prima en la industria electrónica o se destina a compraventa de materiales secundarios a través del London Metal Exchange (LME).

En la Tabla 2.16 se muestra de forma resumida las aplicaciones potenciales y su grado de madurez [Dillon, 1998; ENVIROS, 2002; Clean Washington Center, 2005; ICER, 2004].

Tabla 2.16 Aplicaciones existentes y potenciales de vidrio de TRC

Categoría	Aplicación	Tipo de vidrio	Mercado	Capacidad de mercado potencial
Reciclado en lazo cerrado <i>vidrio-a-vidrio</i>	Fabricación de vidrio de TRC	Pantalla y cono (con y sin Pb)	Existente	Significante
Reciclado en lazo abierto <i>vidrio-a-vidrio</i>	Baldosa cerámica decorativa y revestimiento	Pantalla sin Pb Vidrio mixto	Fase demostración	Moderada
	Vidrio decorativo	Pantalla s/ Pb	Existente	Baja
	Iluminación (bombillas, lámparas de descarga)	Sin información	Desconocido	Desconocida
	Botellas de vidrio para pesticidas	Variable	Existente	Desconocida
Reutilización del plomo	Protección frente a RX	Vidrio mixto	Fase I+D	Desconocida
	Vidrio plano industrial	Vidrio mixto	Existente	Pequeña
	Celdas de borosilicato para encapsulación de residuos nucleares	Vidrio mixto o con Pb	Desconocido	Desconocida
	Fundición de plomo	Vidrio mixto	Existente	Moderada
Agregado de vidrio	Fundiciones de plomo y cobre	Vidrio mixto o TRC completos (sólo fundición Cu)	Existente	Moderada
	Medio (arena) para chorreado abrasivo	Vidrio mixto	Existente	Desconocida

	Aplicación	Tipo de vidrio	Mercado	Capacidad de mercado potencial
Agregado de vidrio (cont.)	Fibra de vidrio	Sin información	Desconocido	Desconocida
	Reflectores viales	Sin información	Desconocido	Desconocida
	Lana de vidrio para aislamiento térmico y acústico	Sin información	Desconocido	Desconocida
	Vidrio “espuma”, aislante térmico o acústico	Vidrio pantalla sin Pb	Fase I+D	Baja
	Fundente para ladrillos y cerámica	Vidrio pantalla sin Pb	Fase I+D	Significante
	Sustituto de arena y grava, material de relleno	Vidrio mixto	Desconocido	Desconocida
	Cargas para pinturas de exteriores	Sin información	En fase de desarrollo	Baja
	Zeolitas	Sin información	En fase de desarrollo	Desconocida

Todas estas aplicaciones mencionadas son generalmente válidas para el vidrio de pantalla. Las aplicaciones del vidrio de cono son más limitadas. Actualmente la salida más extendida para este tipo de vidrio es la fabricación de nuevos conos para TRC. A pesar del gran número de aplicaciones descritas anteriormente el mercado de vidrio reciclado no está ampliamente establecido debido a que:

- Actualmente sólo el vidrio de pantalla tiene posibilidades de ser utilizado, pero la presencia de bario y estroncio no siempre está bien aceptado.
- La legislación actual no permite el uso de materiales con contenido de plomo.

- Los recubrimientos del TRC (polvos fluorescentes tóxicos) dificultan el reciclado.
- Hay muchas dificultades para trasladar los resultados de la investigación en reciclado de vidrio al mundo industrial porque priman los intereses económicos sobre los medioambientales.

2.5.2 Componentes electrónicos

Las razones económicas se están convirtiendo en la principal excusa para la reutilización de componentes electrónicos, debido a los cortos ciclos de innovación en la industria electrónica y a la tendencia a introducir la electrónica en casi todos los aparatos técnicos. Se pueden distinguir varios casos de reutilización [Stobbe et al., 2002]:

- **Nuevos componentes para productos nuevos:** componentes funcionalmente correctos que forman parte de rechazos de producción (por ejemplo en el caso de las tarjetas de circuitos impresos). Todavía no está muy extendida en la industria esta práctica, pero tiene un gran potencial por la reducción de costes en la producción electrónica. Ya se ha implantado algún sistema [Renteria, 2006].
- **Componentes usados para productos usados:** sí existe mayor tradición en la utilización de componentes más bien eléctricos (generadores, motores) recuperados, restaurados y renovados, sobre todo en la industria de maquinaria y automóvil. En menor escala también se recuperan componentes electrónicos aplicados a cierto tipo de ordenadores y sistemas de control. Se prevé que con el incremento del uso de la electrónica en todos los campos de la tecnología se haga necesario disponer de un stock de componentes de recambio (por ejemplo la electrónica en el automóvil).

- **Componentes usados para productos nuevos:** para algunas aplicaciones de bajo valor como juguetes o tarjetas de felicitación electrónicas la recuperación y reutilización de componentes electrónicos para nuevos productos se ha convertido parcialmente en un negocio. Sin embargo, esto puede convertirse también en un modelo para aplicaciones de alto valor. Debido al rápido cambio en las tecnologías y el acortamiento de los ciclos de uso en los productos de alto nivel tecnológico, como los teléfonos móviles, la reutilización de componentes de estos dispositivos en productos de menor nivel tecnológico es deseable desde un punto de vista económico.

Los requisitos que las empresas exigen para la utilización de componentes electrónicos reciclados en sus productos son:

- Los componentes reutilizados deben poder integrarse en los procesos de producción en marcha y en la maquinaria ya en uso, por lo que deben cumplir las mismas especificaciones geométricas que los componentes nuevos.
- Es necesario asegurar la fiabilidad de los componentes para ese segundo ciclo de vida (representada por la funcionalidad eléctrica del componente, interconexiones internas, empaquetado y soldaduras de las conexiones externas).
- Costes asequibles dependiendo de la calidad del componente.

2.5.3 Plásticos

Actualmente el reciclado de plásticos de carcasas no es una práctica común, únicamente se procesan si hay disponibles grandes volúmenes y está en vigor el principio de responsabilidad del fabricante. De todas formas se

extenderá por la obligatoriedad del cumplimiento de los objetivos de la directiva RAEE.

Para mejorar el resultado económico del tratamiento de este material diversas empresas recicladoras están investigando nuevas aplicaciones para plástico mixto (con pequeñas cantidades de metal) y que puede ser transformado en productos por intrusión, sin la necesidad de mayor clasificación o procesado. Estas aplicaciones potenciales incluyen:

- defensas marinas,
- fabricación de bloques para proteger suelos de la erosión (por ejemplo terraplenes en autopista),
- sustitutos de madera, por ejemplo andamios, planchas y bancos.

Además, se están investigando métodos de identificación y separación de los distintos polímeros (con las dificultades adicionales que plantean la presencia de pinturas y etiquetas), que pueden después ser granulados para usarlos en aplicaciones de mayor valor añadido. Algunos estudios han demostrado que plásticos de tipo ABS procedentes de diferentes fabricantes pueden ser reciclados conjuntamente sin problemas y que el ABS puede someterse hasta a cuatro ciclos de reciclado antes de empezar a degradarse. En el caso del plástico PVC la situación también está mejorando. La empresa química Solvay [Solvay, 2008] ha patentado un método, "Vinyloop", para la reutilización de este tipo de plástico. El proceso recupera el PVC de materiales compuestos utilizando la disolución y precipitación. Ha montado dos plantas a escala industrial y los resultados obtenidos en los años 2002-2003 demuestran que el sistema es viable y que el PVC puede obtenerse a un coste inferior al del material virgen.

También se encuentran en desarrollo técnicas para detectar la presencia de retardantes a la llama bromados, los cuales pueden limitar la reciclabilidad potencial de las carcasas.

El grado de reciclabilidad podría llegar al 90% en materias plásticas si se dispusiese de un buen acceso al mercado, e incluso al 98% si se aprovecha el contenido energético de mezclas complejas de polímeros.

Tradicionalmente, los mercados principales para plásticos recuperados de RAEE (carcasas principalmente) han sido la perfilería, el mobiliario de exteriores y material base de carreteras. Otras aplicaciones de bajo valor añadido ensayadas han sido: como agregado que se integra en una matriz asfáltica usada para plataformas de carreteras y aparcamientos, parche para rellenar socavones, y núcleo de suelos (tarimas) laminares sintéticos, con una durabilidad, estabilidad e impermeabilidad garantizadas por 25 años. Hay otras aplicaciones en desarrollo: carcasas de cámaras, cajones de baterías, bandejas de disco compacto, hormigón de asfalto de mezcla caliente y grana de alta calidad para piezas plásticas moldeadas. Existen más de 30 aplicaciones finales viables para termoplásticos técnicos procedentes de RAEE: piezas y productos de los sectores de telecomunicaciones, automoción, eléctrico, construcción, transporte, ordenadores y electrodomésticos, entre otros. Para favorecer el uso de los plásticos recuperados en estos nuevos mercados la investigación debe dirigirse a la medición de las propiedades y el comportamiento de los diversos plásticos.

La alternativa de la recuperación energética de plásticos no precisa una exhaustiva clasificación por tipo de polímero. Los resultados de pruebas a pequeña escala para evaluar los procesos de pirólisis y depolimerización sugieren que estas opciones también son adecuadas para tratar la fracción plástica de los RAEE [Tange y Drohmann, 2002].

2.6 Resumen y conclusiones

De las secciones anteriores hemos extraído conclusiones relativas a los métodos aplicados a la planificación y optimización del reciclado de AEE, su nivel de automatización y expectativas debido a la progresiva implementación de la directiva y regulaciones nacionales.

Constatamos una **inexistencia de líneas automatizadas** de tratamiento de RAEE, a excepción de prototipos virtuales o de laboratorio [Gil et al., 2007; Hohm et al., 2000; Bailey-Van Kuren, 2002]. Esto es debido a la propia naturaleza y diversidad del producto a tratar, en particular los televisores y monitores. En los casos más avanzados se ha implementado algún nivel de automatización básico para ciertas operaciones: transporte entre puestos por cintas motorizadas, desflejadoras, manipuladores ingrávidos. Gran parte de las actividades de clasificación, separación y tratamientos posteriores son manuales. De hecho, las empresas recicladoras con las que hemos colaborado durante el desarrollo de este trabajo nos han comunicado su necesidad de buscar soluciones con cierto nivel de automatización con el objeto de ser competitivas en el futuro.

Creemos que es complicada la aplicación de esquemas de planificación y simulación que proponen los autores mencionados en la sección 2.2.1.2 “Simulación aplicada al desmontaje y reciclado”, ya que están basados en desarrollos teóricos sobre las características originales del propio producto a reciclar [Peng y Chung, 2007; Herrmann et al., 2008; Lozano-Pérez y Wilson, 1993; Mo et al., 2002; Zwolinski et al., 2007; Li et al., 2006]. Las propuestas existentes están centradas en algoritmos que tienen como punto de partida la geometría del aparato (dimensiones, componentes internos, tipos de uniones y fijaciones). La principal dificultad para su aplicación radica en su complejidad de cálculo y en que no siempre tienen en cuenta el estado de

conservación del producto (muchas veces manipulado por cuestiones de mantenimiento) [Kim et al., 2009; Tripathi et al., 2009; Hui et al., 2008].

Otra característica de los sistemas propuestos es su **gran dependencia de sistemas de información actualizados** sobre las características del aparato, actualmente inexistentes en la práctica [Hesselbach y Westernhagen, 1999; Jun et al., 2009]. Es también reseñable el hecho de que prácticamente no existen referencias bibliográficas relacionadas con esta temática a partir de 1997.

Las tecnologías de simulación propuestas para la actividad de reciclado están claramente orientadas a simulación de producto, no a los procesos de reciclaje, compuestos por operaciones de manipulación, separación, corte, etc. Tradicionalmente hemos aplicado los sistemas de simulación de procesos a la fabricación de productos donde priman los parámetros de precisión de operaciones, dimensionamiento de máquinas y operarios para conseguir una determinada productividad y características geométricas de las piezas a producir [Rentería y Rivas, 2000; Rentería y García-Tejedor, 1996; Nomden et al., 2006; Mitsi et al., 2007].

En cambio, en las actividades de reciclaje se tienen en cuenta otros criterios, no hay fechas de entrega y el tiempo de desmontaje tiene un interés relativo. La llegada de productos a reciclar es imprevisible, por lo que es importante disponer de espacio de almacenamiento [Stuart y Christina, 2003]. Los parámetros de interés son el valor final de los componentes que se obtienen, la complejidad de la operación, el tiempo de desmontaje de los aparatos, su tamaño, etc. La propuesta más cercana a la solución planteada en esta tesis [Gerner et al., 2005] aplica técnicas de simulación y optimización de operaciones y tiene en cuenta los materiales que se obtienen del reciclado. Las principales diferencias radican en que la solución de Gerner está centrada en una alta automatización de las operaciones, basada en un gran número de parámetros de optimización y en secuencias teóricas

de desmontaje según datos CAD, optimizadas por métodos de programación multiobjetivo, por lo que está más cerca del mundo académico que del industrial a la hora de evaluar su potencial práctico.

Existe una necesidad de una mejor separación y tratamiento de los materiales para poder acceder a una reutilización de éstos que **mejore la rentabilidad de las instalaciones** de reciclaje y solucione los problemas técnicos existentes actualmente [Tang y Zhou, 2001; Kang y Schoenung, 2006]. Hemos constatado que se hace necesario contar con sistemas automatizados de identificación de materiales que permitan redireccionar los aparatos a diferentes operaciones de separación teniendo en cuenta el aprovechamiento final de los materiales y componentes obtenidos.

En resumen, la literatura consultada está muy dirigida a optimizar la secuencia de desmontaje de componentes, en su versión automática y basada en cálculos teóricos de los datos CAD.

La paulatina implementación de las directivas aumentará el flujo de RAEE hacia empresas recicladoras. La Unión Europea ha realizado un estudio [IPTS, 2006] para analizar cómo se ha ido desarrollando la directiva sobre RAEE desde su implantación en 2002, y su transposición a los países miembros (en 2005 en España). Las previsiones que incluye sobre el desarrollo del reciclado de los RAEE en la Unión Europea contemplan los siguientes aspectos:

- Se prevé un crecimiento significativo y la consolidación de los servicios de recolección y reciclado para permitir economías de escala más eficientes. Los RAEE se reciclarán en instalaciones mayores al incrementarse su volumen. Esto permitirá el desarrollo de una tecnología de reciclado mejorada, con la consiguiente disminución de costes. En los próximos cinco años se prevé una disminución general de los costes de reciclado. Sin embargo, la manipulación, el transporte

y la clasificación suponen la mayor fracción del coste y se supone que permanecerán estables porque su optimización es complicada.

- En temas organizativos se cree que aparecerán nuevas empresas a nivel nacional y europeo, con gran capacidad logística y plantas de reciclado para grandes volúmenes y que absorberán a los pequeños gestores.
- El transporte y el mismo tratamiento de residuos son áreas sensibles en la consolidación de actividades dentro de la Unión Europea. Muchos de los nuevos miembros tienen costes laborales significativamente inferiores a los de los 15 miembros que existían hasta fechas recientes. Al mismo tiempo, no generan volúmenes significativos de RAEE por lo que, para cumplir el objetivo de la directiva, pueden llegar a importar capacidad de reciclado de otros países.
- Se desarrollarán sinergias a nivel regional, tales como en la Península Ibérica, Escandinavia o sudeste europeo, donde gracias a los volúmenes de residuos y a la proximidad geográfica se pueden consolidar los mercados.
- Se prevén cambios significativos en las tecnologías de reciclado, mejorando la eficiencia económica de las plantas de tratamiento. También ayudará el hecho de una mayor concienciación social sobre la necesidad del reciclado y la mejora de los esquemas de recogida.

A nivel nacional prevemos que en los dos próximos años se producirá un aumento del flujo de televisiones de tecnología de tubo de rayos catódicos hacia el reciclado debido al “apagón analógico”, ya que será aprovechado por los consumidores para renovar el aparato hacia las versiones con pantalla plana.

3. INVESTIGACIÓN

En este capítulo se expone en primer lugar el perfil general que se requiere de un sistema de tratamiento de RAEE, enlazándolo con el propósito general de la tesis, junto con sus objetivos detallados. Se detallan las fases que sigue nuestro modelo propuesto y la forma en que realizaremos la validación de dicho modelo.

3.1 Introducción

De la situación actual del reciclado de AEE, explicada en la sección anterior, es posible extraer el perfil general de un sistema de tratamiento y reciclaje de estos residuos:

- Las empresas recicladoras deben gestionarse con criterio industrial, teniendo como objetivo el cliente (empresa usuaria de los materiales obtenidos en el reciclaje), la optimización de la calidad, el costo y el servicio.
- Debe aprovechar las ventajas que ofrecen las tecnologías para la gestión de la información y evaluación de procesos, adecuándolas al tipo de empresa recicladora que las vaya a utilizar (pequeñas y medianas empresas).
- Es necesario tratar correctamente los RAEE desde un principio (el desmontaje), y garantizar la reutilización de componentes, de tal forma que no represente un riesgo para el consumidor.

Como se ha reflejado en los capítulos anteriores la situación de la recuperación de aparatos usados ha ido cambiando gradualmente. Tradicionalmente, únicamente los fabricantes de dispositivos recogían los aparatos desechados de forma selectiva y como consecuencia, en la mayoría de los casos, de fallos técnicos o fin de vida del producto. Sin embargo, el creciente interés y preocupación pública en temas medioambientales ha promovido una demanda del consumidor hacia políticas de reciclado, principalmente a nivel europeo, con el objetivo de cerrar el ciclo de vida del material. En consecuencia, tanto los fabricantes como las empresas recicladoras se enfrentan a grandes volúmenes de aparatos obsoletos que deben ser recolectados y tratados de forma eficiente. Aunque hay oportunidades para un aprovechamiento comercial de este flujo de materiales en el proceso de reciclado todavía es necesario resolver problemas técnicos y de gestión no habituales. Las áreas problemáticas son [IPTS, 2006]:

1. Diseño para el reciclado: el diseño de productos debe permitir un desensamblado económicamente viable y una recuperación de material de alta calidad.
2. Desarrollo de mercados para la reutilización de los subproductos obtenidos.
3. Promoción de un ratio de retorno de aparatos fuera de uso a través de un sistema de recogida efectivo.
4. Adquisición de información relevante sobre el flujo de retorno hacia el reciclador.
5. Establecimiento de alianzas estratégicas y mejora del diseño de las redes logísticas.
6. Desarrollo y selección de opciones técnicas de recuperación y tratamiento de aparatos, que permita una optimización de la reutilización de los materiales y componentes obtenidos.

El principal objetivo es maximizar las oportunidades comerciales resultantes del reciclado, aunque los aspectos legislativos son el mayor catalizador de los flujos de retorno de televisores y monitores (actualmente se recolectan para reciclado entre un 30 y un 35% de los aparatos en su fin de vida, para el año 2011 el objetivo es el 75%) [European Commission, 2007].

El criterio que se debe aplicar como objetivo general de esta tesis es el de “reciclabilidad”, entendido como el porcentaje de material que puede ser considerado como materia prima (y por lo tanto no es incinerado o depositado en un vertedero). Para el caso de un televisor relativamente moderno este parámetro tiene un valor teórico medio de 90% (depende de la aceptación de los materiales reciclados por el mercado y por las leyes, muchas de ellas emergentes y/o en adaptación), y desciende a un teórico 75-85% en aparatos con una antigüedad de 10-20 años.

Actualmente ese ratio, en el caso de televisores y monitores, está más cercano al 40% por lo que las mejoras que se apliquen al proceso de desmontaje redundarán en una disminución de costes y, consecuentemente, en un aumento del ratio de reciclado. Esta tesis la enfocamos en este sentido, centrándose en los puntos 2 y 6 mencionados anteriormente: *Desarrollo y selección de opciones técnicas de recuperación y tratamiento de aparatos, que permita una optimización de la reutilización de los subproductos obtenidos.* Perseguimos la aplicación de técnicas de simulación y optimización al análisis de las diferentes operaciones de desensamblado con el fin de optimizar el proceso y maximizar los beneficios de las empresas recicladoras. Así, proponemos una adecuación de las operaciones de desmontaje a las características de los componentes tratados y al valor final del material obtenido.

3.2 Objetivos y modelo propuesto

3.2.1 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es la optimización del reciclado de aparatos electrónicos, principalmente televisores y monitores, aplicando criterios de viabilidad técnica y económica, teniendo en cuenta aspectos legales y medioambientales, y generando como resultado final del método una determinada estrategia de desensamblado y grado de recuperación de materiales que optimice el beneficio de las empresas recicladoras.

Los objetivos concretos que pretendemos conseguir son los siguientes:

1. Analizar, simular y proponer las tecnologías más adecuadas de proceso, automatizado o semi-automatizado, para la manipulación y desmontaje de RAEE, que sean viables tanto medioambiental como económicamente.
2. Optimizar las operaciones de separación de materiales y componentes para la obtención del mayor beneficio económico de las empresas.
3. Recuperar específicamente el vidrio proveniente de los tubos de rayos catódicos con una tecnología que permita su posterior reciclado y valorización para su uso en nuevas aplicaciones.
4. Permitir la recuperación y el tratamiento de componentes y materiales provenientes de las tarjetas de circuitos impresos y carcasas de plástico.

5. Confirmar la viabilidad técnica y económica del método de reciclado propuesto, con un estudio del coste del reciclado y del valor de los materiales recuperados.

Con ello, se obtendrían con respecto al estado actual de la técnica las mejoras siguientes:

1. Una representación del proceso de reciclado más sencilla y cercana a los problemas de las empresas recicladoras, mediante modelos de simulación gráfica de procesos industriales y un modelo de programación que ofrece valores optimizados de parámetros de interés.
2. Un proceso viable más adecuado para el reciclado de televisores y monitores, el cual tiene un impacto medioambiental significativo.
3. La optimización de la clasificación de los diferentes componentes de estos RAEE en fracciones peligrosas, metales, plásticos y vidrio.
4. Contribuir al cumplimiento de la legislación medioambiental sobre minimización y tratamiento de residuos y reutilización.

Para ello, hemos aplicado criterios de viabilidad que es necesario tener presentes: parámetros técnicos, económicos y legales (medioambientales). Los criterios de viabilidad técnica que se aplican son [Gaiker, 2007]:

- Procesabilidad de un desensamblado en relación a las características del aparato.
- Estado técnico del ensamblado y métodos de unión, junto con la separabilidad de materiales.
- Detección y extracción de materiales tóxicos o peligrosos.
- Posibilidad de medios para transporte, manipulación y tratamiento.

Los criterios de viabilidad económica que aplicaremos son [Florio et al., 2008]:

- Aceptación de los consumidores de productos, componentes y materiales provenientes del mercado secundario.
- Costos de recuperación.
- Precios del mercado secundario.
- Calidad de los productos del mercado secundario.
- Volúmenes limitados del mercado secundario.

Los criterios de viabilidad tanto legal como medioambiental que se aplican son los recogidos en la directiva 2002/96/EC (ver sección 2.3.2), los cuales, en su transposición española al *Real Decreto 208/2005 del 25 de febrero de 2005 sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos*, [RD_2005], cubren en resumen los siguientes aspectos:

- Prohibición de vertido y obligatoriedad del tratamiento de residuos tóxicos, detallados en el Anexo III del Real Decreto y entre los que se encuentran condensadores, pilas, tarjetas de circuitos impresos y tubos de rayos catódicos.
 - *“Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que contengan materiales o elementos peligrosos serán descontaminados. La descontaminación incluirá, como mínimo, la retirada selectiva de los fluidos, componentes, materiales, sustancias y preparados, de conformidad con lo establecido en el anexo III.”* (Art. 5-1)
- Tratamiento adecuado y priorizado de los residuos:

- *“Las operaciones de tratamiento tendrán como prioridad, por este orden, la reutilización, el reciclado, la valorización energética y la eliminación.” (Art. 5-2)*
- Objetivos de recuperación aplicados por la legislación nacional y comunitaria:
 - *“Se recogerán selectivamente cuatro kilogramos, de media, por habitante y año de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos procedentes de hogares particulares.” (Art. 9-1.a)*
 - *“De los equipos informáticos y de telecomunicaciones y de electrónica de consumo se valorizará, por categoría, el 75 por ciento del peso de cada tipo de aparato. De los componentes, materiales y sustancias se reutilizará y reciclará, por categoría, el 65 por ciento del peso de cada tipo de aparato.” (Art. 9- 1.c)*

3.2.2 Método propuesto

Con el objeto de conseguir una optimización del reciclado de los televisores y monitores proponemos un método que optimiza la planificación, diseño y puesta a punto de líneas de desensamblado y reciclado, formadas por varias estaciones [Rentería y Álvarez, 2007b; Rentería et al., 2008; Rentería et al., 2009]. Debido a que el conjunto de aparatos electrónicos es muy heterogéneo (diferentes productos, orígenes, estado de conservación, año de construcción, tamaño y forma), el modelo propuesto sirve para lograr un sistema lo suficientemente flexible tanto en el equipamiento físico (dispositivos de manipulación, transporte, herramientas, garras, sistemas de fijación, sistemas de identificación, etc.) como en la programación (control, procesado de imágenes, sistemas de ayuda al reconocimiento).

También se consigue un correcto dimensionado de la planta de tratamiento, adecuado a las características especiales de este tipo de proceso.

Nuestro modelo se basa en los desarrollos sobre dos tecnologías, simulación de procesos y optimización lineal de parámetros, con el objetivo de obtener la mejor alternativa para optimizar el proceso de desensamblado y reciclado de aparatos electrónicos (televisores y monitores principalmente). Con este modelo pretendemos maximizar el beneficio obtenido por las empresas recicladoras, mediante la recuperación de materiales y su posterior venta para reutilización. El modelo contempla las restricciones legales en vigor, consideraciones económicas y técnicas del proceso, y experiencias previas del reciclador.

Tal como se muestra en la Figura 3.1 el modelo engloba varios pasos: análisis de parámetros de entrada al modelo, definición y programación de procesos con diferentes niveles de automatización, optimización y validación por medio de análisis técnicos, económicos y medioambientales.

Además, está enfocado a ofrecer soluciones industriales (para operaciones manuales, semiautomáticas o automáticas), aplicando dispositivos y tecnologías actualmente existentes. Finalmente, el modelo aprovecha la experiencia previa de las empresas recicladoras del sector eléctrico y electrónico.

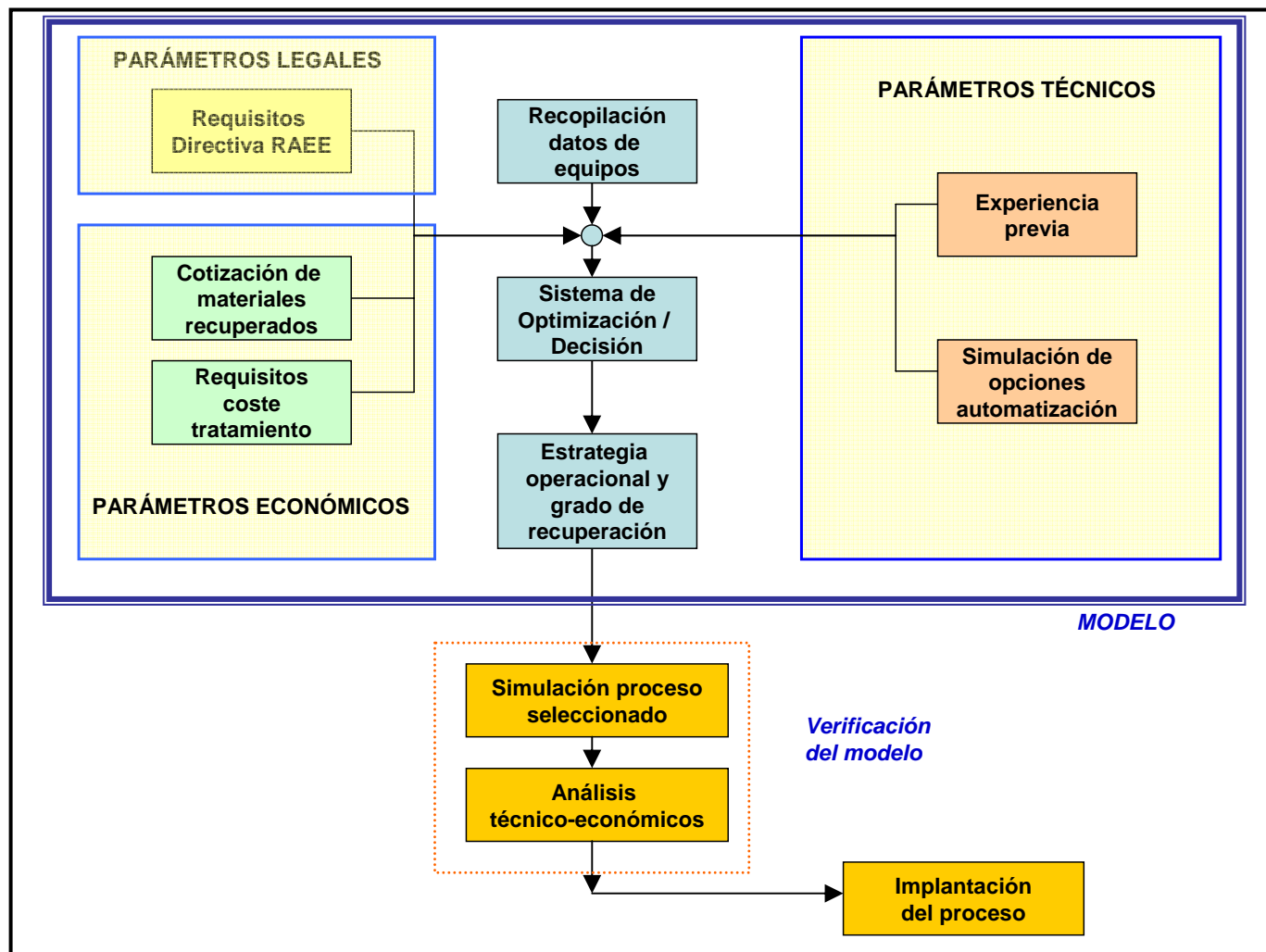


Figura 3.1 Esquema general del modelo propuesto

3.3 Análisis de los parámetros técnicos y datos de aparatos

La primera fase del método propuesto comprende el estudio preliminar de los parámetros técnicos de los aparatos a reciclar, su clasificación atendiendo a un tratamiento similar y su validación tanto técnica como económica. Esta fase se corresponde con el primer paso, la “*planificación*”, de la metodología de investigación-acción aplicada en esta tesis. El conjunto de aparatos provenientes de la recogida selectiva (logística inversa) entra en la zona de recepción, depositándose en un almacén.

A continuación, realizamos una primera operación de verificación e identificación de los aparatos con el fin de llevar un registro de los aparatos tratados (necesario a efectos de verificar de forma oficial el correcto cumplimiento de las directivas y legislación vigente). De aquí obtenemos una primera clasificación que determina el tipo de tratamiento a aplicar y los requisitos de productividad de la línea de reciclado. En esta actividad cobra importancia la experiencia adquirida en las diferentes pruebas realizadas de separación de componentes por diversos métodos (explicados en la sección 2.4).

El análisis realizado nos permite diseñar un esquema general de los componentes y materiales que se pueden obtener de un televisor o monitor de ordenador, que se muestran en la Figura 3.2.

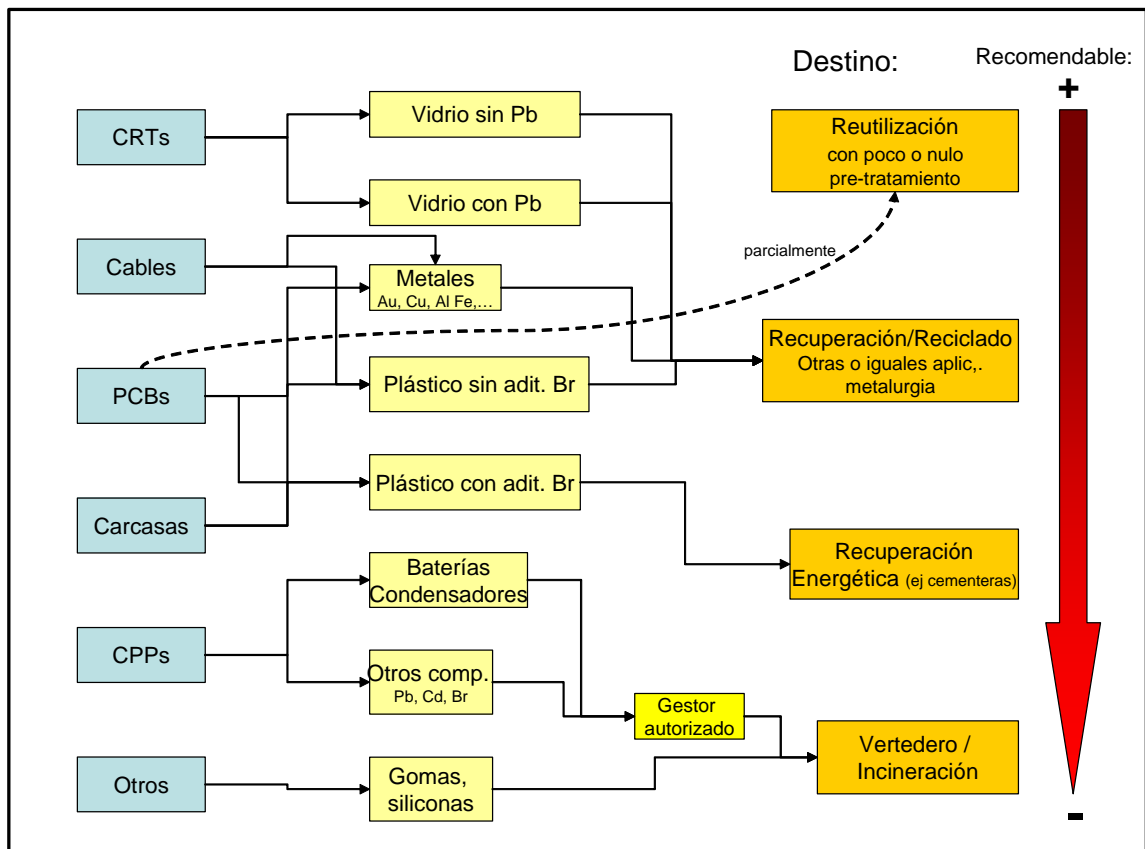


Figura 3.2 Esquema general de la separación de componentes de un televisor

La mayor proporción, en peso, del flujo de materiales proveniente de televisiones o monitores de ordenador está formada por el vidrio del 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 a la hora de definir un tratamiento posterior son los plásticos

halogenados, debido a su toxicidad. Se utilizan como retardantes a la llama y están incorporados de forma habitual en los productos electrónicos de consumo. Dependiendo del tipo de plástico su destino puede variar desde la reutilización hasta la recuperación energética.

Un cuarto grupo de materiales lo forman los componentes tóxicos o potencialmente peligrosos (CPP) si se desechan sin tratamiento adecuado. Lo forman las baterías, pilas, condensadores, etc. Necesitan que un *Gestor Autorizado* les aplique un tratamiento de neutralización previo a su almacenamiento en un vertedero controlado.

Por último queda un conjunto de materiales heterogéneos, como gomas, siliconas, incluso partes de madera si se tratan televisores algo antiguos.

En esta fase, dependiendo de la experiencia existente en la empresa recicladora, realizamos ciertas pruebas con un muestreo de los aparatos. Se realizan operaciones, manuales y semiautomáticas, consistentes en desmontar los aparatos mediante diversos métodos, registrando los tiempos necesarios, dificultad técnica, coste, tipo de material obtenido y productividad. Las pruebas que hemos realizado se reflejan en detalle en la sección “2.4 Automatización del reciclado”. Estas pruebas irán formando un registro en forma de conocimiento previo que será aplicado para las futuras remesas de aparatos a reciclar.

De esta forma partimos de los resultados experimentales obtenidos en las fases previas. Para el caso específico de televisores y monitores de ordenador el TRC es la fracción de mayor peso y con mayor dificultad de separación en los diferentes materiales que lo componen. Por ello contemplamos las siguientes fases en el reciclado de los TRC:

- Clasificación de los diferentes tipos de TRC existentes en función de sus dimensiones y origen (televisor a color o blanco y negro).

- Análisis de los vidrios de conos y pantallas. Presencia de plomo en pantallas de TRC (color).
- Comprobación de los recubrimientos interiores de pantallas y de conos para identificar su toxicidad, necesidades de limpieza e incidencia en la reciclabilidad del vidrio resultante.
- Estudio del material componente de la zona de unión entre vidrio de cono y pantalla (frita).
- Análisis de las diferentes alternativas, si las hay, de desmontaje semi o totalmente automatizado, partiendo de un estudio de la forma de desmontaje manual que se realiza tradicionalmente.

3.4 Definición y programación de las opciones de automatización

La secuencia general de desmantelamiento propuesto para un televisor o monitor se muestra en la Figura 3.3 y se corresponde con la fase “Simulación de opciones de automatización” propuesta en el modelo. En esta figura se desglosa la separación de un televisor o monitor en sus diversos componentes, así como el orden más adecuado para la extracción.

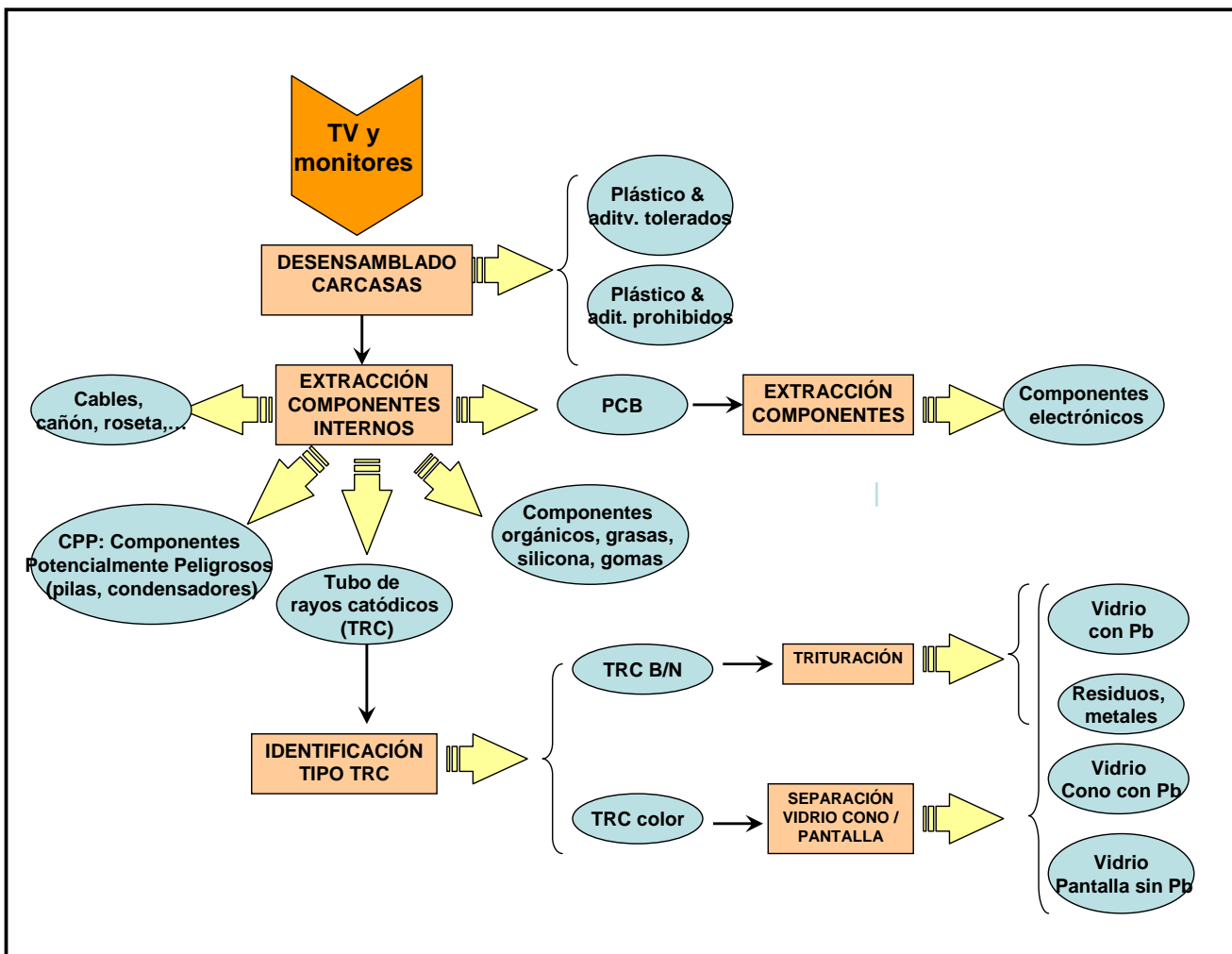


Figura 3.3 Esquema general de la secuencia de desensamblado

A continuación se explican en detalle las secuencias de desensamblado mostradas en la Figura 3.3:

- Entrada de aparatos a la línea de desensamblado utilizando métodos de transporte y posterior manipulación desde el sistema de transporte hasta la primera estación de la línea. Debido al peso de los televisores y monitores utilizamos sistemas de ayuda para minimizar el peso que debe transportar el operario (manipuladores ingrávidos, sistemas por gravedad, transpaletas, etc.). Los sistemas automáticos exigen unos diseños específicos de los sistemas de manipulación y agarre (Figura 3.4).



Figura 3.4 Manipulación robotizada del TRC con garra de diseño específico, para manipulador o robot

- Análisis del tipo de pantalla y separación, en su caso (en función del contenido en plomo), del aparato a una zona de tratamiento

diferenciado de la línea principal. Estudiamos las posibilidades de identificar de forma automática la composición de la pantalla o, en su defecto, el tipo o modelo para permitir una primera clasificación.

- Retirada de la tapa trasera y del marco frontal para acceder al interior (separación de grandes piezas de madera, plástico y metal) y corte del cable de alimentación. Para estas operaciones se definen herramientas de separación y corte de fácil manejo ya que, generalmente, son operaciones realizadas manualmente.
- Retirada de componentes considerados residuos tóxicos o potencialmente peligrosos (RTP) que requieren gestión especial. Dependiendo del destino de los componentes y de los requisitos medioambientales a cumplir se definen las operaciones de limpieza necesarias.
- Extracción del TRC y separación por grupos de los diferentes componentes internos: fuente de alimentación, electrónica y tarjetas con circuitos impresos, altavoces, pulsadores, etc. De la misma manera que se describe anteriormente, el diseño de herramientas especiales para estas operaciones (Figura 3.5, donde se muestran discos de corte y cizallas de separación) se realiza con el objetivo de optimizar su operatividad.
- Los componentes obtenidos se transportan a las diferentes líneas de post-tratamiento definidas para el proceso de reciclado.



Figura 3.5 Cambios automáticos de herramientas de robot con varios diseños específicos para separación de componentes

Se propone una tecnología adecuada que permita el tratamiento y la recuperación de componentes tales como vidrio, metales, plásticos y otros. Definimos la secuencia de separación de componentes, posibilidades de automatización y la distribución de las estaciones de desmontaje en la línea de tratamiento aplicando técnicas de simulación analítica, concretamente el sistema de simulación Robcad, desarrollado por Tecnomatix y comercializado por Siemens-UGS. La utilización del modelo virtual nos ofrece los siguientes aspectos innovadores:

- Es un medio interactivo para programar y generar el proceso de desensamblado de forma planificada, partiendo no sólo de los datos estándares (modelo 3D del producto), sino de la experiencia en métodos de desmontaje, que se integran en el modelo 3D de la instalación.
- La intervención del operario es importante ya que aporta su conocimiento previo.

- El modelo virtual nos permite proponer estaciones manuales, semi-automatizadas o totalmente automatizadas, dependiendo de diferentes circunstancias de los aparatos a tratar, condiciones económicas del mercado de materiales obtenidos, legislación, etc.
- Este modelo permite a un usuario tomar decisiones ante problemas que se puedan presentar en dicha secuencia, o sugerir propuestas de mejoras y optimización del proceso de desensamblado.
- Obtenemos un diseño de línea de desmontaje y reciclado, el cual se optimizará mediante las técnicas de programación lineal teniendo en cuenta los requisitos técnicos, económicos, legales y medioambientales.

Aunque pueda parecer que en este proceso la simulación de flujos sería la técnica más adecuada, sin embargo hemos optado por utilizar la simulación analítica ya que permite un estudio más en detalle de cada operación de desmontaje en particular. El objetivo es aprovechar las experiencias previas de separación manual de componentes, y trasladar los parámetros de interés al modelo virtual de las estaciones de tratamiento. Estos parámetros están relacionados, fundamentalmente, con aspectos geométricos del producto, trayectorias de manipulación de piezas con métodos automatizados, cálculo de tiempos de ciclo, detección de colisiones entre elementos móviles de la instalación, etc. Estos análisis se obtienen como resultado de la simulación analítica. Con este fin, tal como se explica en la sección 2.2.1, hemos realizado el modelado 3D de los elementos (robots, máquinas, puestos de trabajo) que forman la línea de reciclado, utilizando las librerías de componentes estándares (robots, sistemas de transporte, maquinaria estándar, etc.) que son suministradas con el sistema de simulación.

Posteriormente hemos realizado la programación de la secuencia de desmontaje de componentes. Este sistema de simulación requiere la programación de cada elemento del modelo que realice una función

específica en la simulación: robots, PLC, cintas de transporte, herramientas, cambios de estado de máquinas y piezas, distintos tipos de movimientos, etc. Parte de estos programas, sobre todo los asignados a robots y PLC, pueden ser cargados posteriormente a las máquinas verdaderas en la instalación real, previa calibración. En la Figura 3.6 se muestran las opciones de programación que ofrece el sistema de simulación.



Figura 3.6 Interfaz del sistema de simulación. Izda.: Opciones de programación de operaciones. Dcha.: Generación off-line de programas

Básicamente, y teniendo en cuenta la información que hemos recopilado en los pasos anteriores, el sistema propuesto recoge la secuencia de separación en los siguientes pasos generales:

1. Puesto de identificación de televisores y monitores.
2. Módulo de desensamblado, donde se obtienen:
 - Carcasas no recuperables (conteniendo aditivos prohibidos, madera, etc.).
 - Carcasas de plástico recuperable.
 - Tarjetas de circuitos impresos (PCB).
 - Metales.
 - Componentes orgánicos.
 - Residuos Tóxicos o Peligrosos (RTP).
 - TRC.
3. Los TRC pueden dividirse en aquellos conteniendo Pb o lámina de plástico en la pantalla (tipo "sandwich"), los cuales no se separan en sus dos componentes como pantalla; y el resto en los cuales se realiza la operación de separar limpiamente el cono de la pantalla. Posteriormente se limpia la parte interior del cono y pantalla.
4. Las tarjetas de circuitos impresos se tratan de forma específica para recuperar los componentes electrónicos aprovechables.

Seguidamente realizamos el estudio sobre los posibles métodos de separación de componentes, tanto manuales como automatizados. Para ello se aprovecha el conocimiento de las tecnologías existentes de separación de componentes, aplicando el modelado y simulación de las operaciones, haciendo especial hincapié en la separación de los dos tipos de vidrio del TRC. Con esta fase obtenemos una primera evaluación técnica de cada fase de separación en detalle, obteniendo tiempos de ciclo unitarios (Figura 3.7), inversiones necesarias para la línea de reciclado y coste unitario de tratamiento.



Figura 3.7 Interfaz del sistema de simulación: tiempos de ciclo.

3.4.1 Proceso de reciclado 100% manual

En esta sección se describe una distribución típica de estaciones para una línea de reciclado manual, que es el caso más habitual en la actualidad, y se describen los diferentes puestos y operaciones. La imagen general de la línea de reciclado manual se muestra en la Figura 3.8.

Está formada por una zona de entrada de aparatos a reciclar, cintas de transporte que los llevan a la estación de identificación, puestos dobles para las operaciones de desmontaje de carcasas, tarjetas de circuitos impresos, altavoces, cables y otros pequeños componentes internos. Como último paso, los TRC se transportan a dos estaciones en paralelo donde se realiza la separación de vidrios.

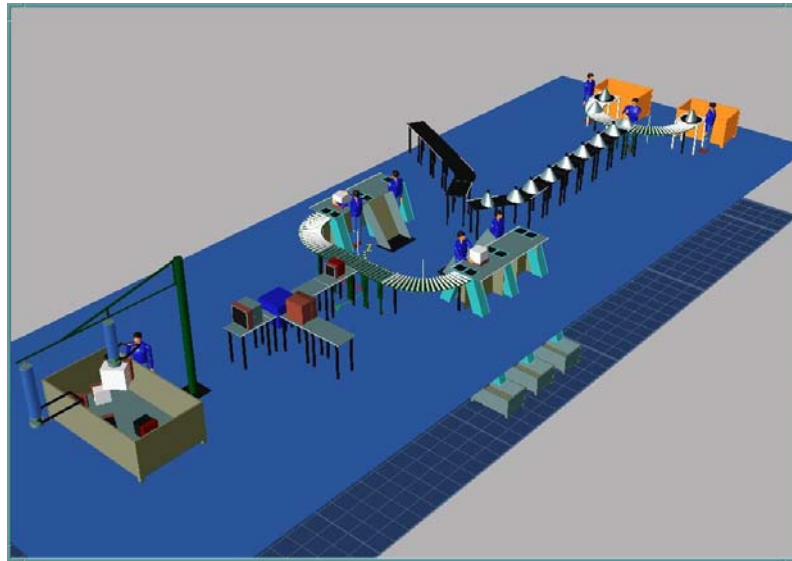


Figura 3.8 Vista general de una instalación de reciclado manual

3.4.1.1 Entrada de aparatos e identificación

Los aparatos (televisores y monitores) se almacenan en contenedores en el almacén de entrada. Las dimensiones de los contenedores utilizados en la instalación son de 1.800 mm x 3.300 mm x 1.000 mm, pudiéndose almacenar unos 30 aparatos de tamaño medio.

Estos contenedores se llevan al comienzo de la línea de desensamblado por medio de una transpaleta elevadora. Se depositan los contenedores en el área de trabajo de un manipulador ingrávito de 3 ejes (giro, elevación y traslación a lo largo del brazo horizontal), que es accionado manualmente por un operario (Figura 3.9 y Figura 3.10). Este manipulador está provisto de un accionamiento tipo ventosa para sujetar los televisores y llevarlos a una cinta transportadora que es la entrada a la primera estación de la línea. En este puesto se realiza una primera identificación de los aparatos y su separación si son aptos para la reventa en mercado de segunda mano.

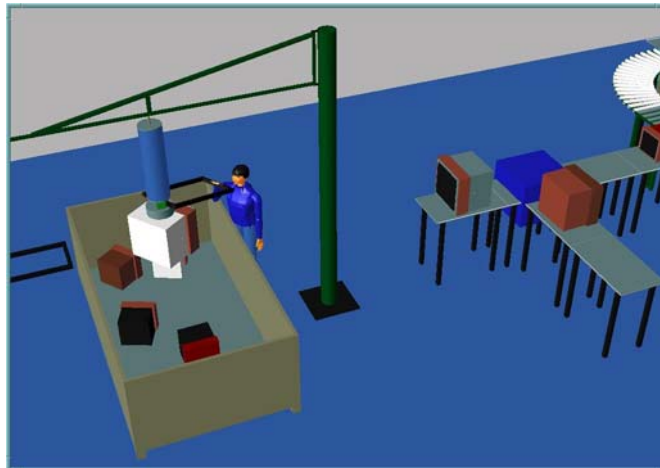


Figura 3.9 Área de entrada e identificación

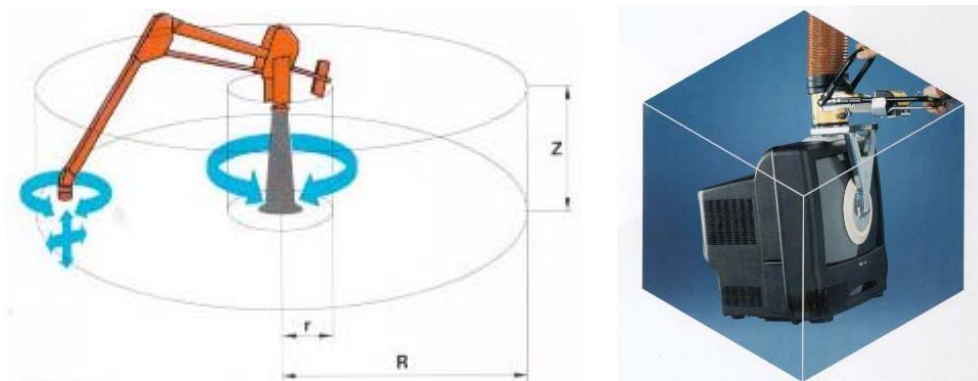


Figura 3.10 Izda: esquema de un manipulador ingrávigo. Dcha: manipulación de un televisor.

En esta zona se sitúa un operario encargado de:

- Accionar el manipulador para surtir de televisores a la entrada de la estación de identificación.
- Llevar a un contenedor los aparatos susceptibles de recuperación o venta.
- Realizar la renovación periódica de los contenedores de entrada y de los contenedores que se van llenando con los componentes obtenidos de la separación en las diversas fases.

La salida de esta primera estación de identificación (por donde se dirigirán los televisores más habitualmente) será la cinta de transporte que conduce a las estaciones propias de desensamblado. Estos puestos (se proponen cuatro puestos idénticos, en función de las necesidades de trabajo), están sobre un nivel -1 de la planta, donde se sitúan unos contenedores con el propósito de aprovechar la gravedad para recibir los resultados de las operaciones de clasificación y extracción de componentes ya separados. (Ver Figura 3.11).

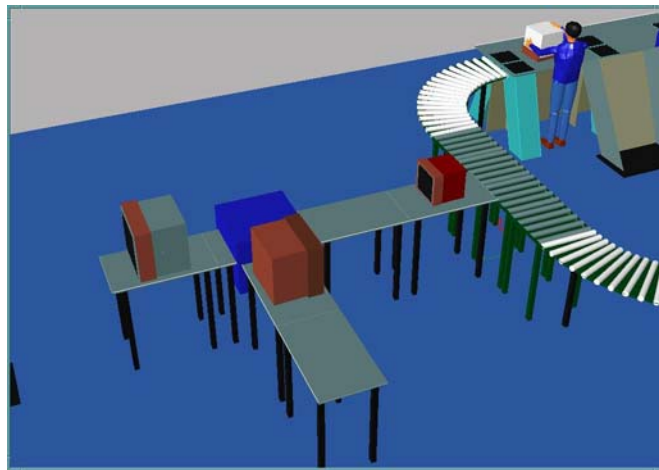


Figura 3.11 Detalle del transporte hacia desensamblado

3.4.1.2 Estaciones de desensamblado

En el nivel 0 se encuentran los cuatro puestos de desmontaje, situados dos a dos de forma simétrica. Los aparatos van llegando por la cinta de transporte hasta un punto de recogida desde el cual son arrastrados, por medio de un sistema de rodillos, hasta alguno de los cuatro puestos disponibles. En cada puesto se realiza el desmontaje de la carcasa, tarjetas de circuitos impresos, soportes y fijaciones metálicas, componentes orgánicos, residuos tóxicos o peligrosos y el tubo de rayos catódicos. Las estaciones están dotadas de herramientas manuales de separación y corte. Los diferentes componentes que se obtienen de la separación se envían a:

- a) contenedores (tamaño orientativo de 1.200 mm x 1.650 mm x 900 mm), situados en el nivel -1 y debajo de la zona de desensamblado, a donde llegan por gravedad gracias a un conjunto de rampas. El tamaño de las rampas es el adecuado al elemento que se envía por ellas. Los componentes así almacenados son: PCB, metales y cables, materiales orgánicos, RTP y también las carcasas compuestas de plásticos con aditivos prohibidos o madera. La Figura 3.12 muestra las estaciones duplicadas de extracción de estos materiales y componentes.
- b) línea de tratamiento de carcasas de plástico recuperables.
- c) línea de separación de TRC: se reenvían los TRC susceptibles de ser separados en las dos partes de cono + pantalla.

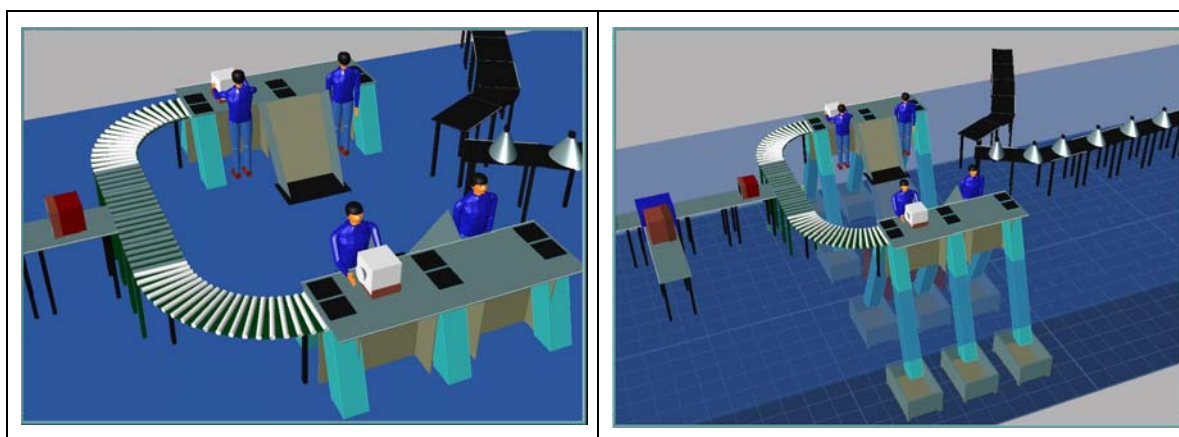


Figura 3.12 Izda: detalle de las estaciones de desensamblado de carcasas y componentes internos. Dcha: sistema de almacenamiento por gravedad a dos niveles

3.4.1.3 Separación de vidrios del TRC

La línea de conexión entre la fase de desensamblado y la separación de vidrios tiene unos 6 m de largo para que sirva como almacén de entrada a la estación de separación (Figura 3.13). En esta fase de separación de vidrios hay que tener en cuenta las especificaciones en cuanto al contenido en plomo del vidrio emitidas por el fabricante, con el objeto de clasificar los TRC.

Los TRC cuyas pantallas contengan plomo se reenvían a triturado para obtener mezcla de vidrio y metales. Las pantallas libres de plomo se separan del cono y se limpian ambas mitades.

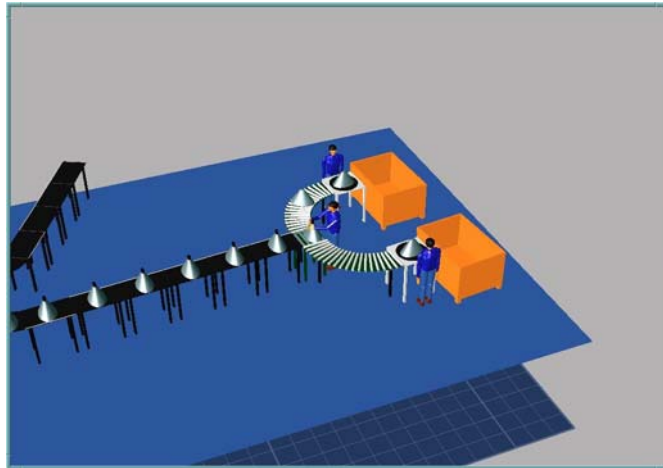


Figura 3.13 Estaciones duplicadas para la separación de vidrios del TRC

En la estación de separación hay dos puestos de trabajo iguales en los que dos operarios eliminan el cañón y el vacío del TRC y posteriormente se realiza la separación de las partes de cono y pantalla por algunos de los métodos explicados en secciones anteriores (corte mecánico, choque térmico, etc.) [Ecomatic, 2005; Vicor, 2005].

La Figura 3.14 muestra la forma de sujetar el TRC con una garra de vacío actuando sobre la pantalla y la aplicación de una cizalla, en la zona donde se localiza la banda anti-implosión, para la separación de vidrios. Después de realizar la limpieza de cono y pantalla por medio de cepillos y aspiración, éstos se almacenan en contenedores no metálicos y que cumplan los requisitos necesarios para no contaminar el vidrio.



Figura 3.14 Operación manual de separación de vidrios del TRC. Izda: sujeción del TRC por vacío. Dcha: cizalla para separación de vidrios.

3.4.1.4 Estimación del coste de tratamiento

La distribución de esta línea de desmontaje y los tratamientos explicados representan el método más habitual existente en las empresas de reciclado, y constituye la forma actual de reciclaje de televisores y monitores. El cálculo de la productividad de estas líneas totalmente manuales (tiempos de ciclo, inversiones, rentabilidad, número de operarios necesarios en la línea, etc.) lo hemos obtenido directamente de empresas recicladoras.

En la Tabla 3.1 se muestran las cantidades medias de los materiales obtenidos, separados correctamente y sin mezcla de otros compuestos. Con este método manual se lograría una recuperación de materiales (en peso) de hasta un 99%, ya que sólo la flexibilidad y adaptabilidad de un operario permite la correcta identificación, separación y clasificación de los materiales y componentes.

Tabla 3.1 Material recuperado para un aparato con un peso medio de 17 kg, con la opción manual 100%

Material	Cantidad	Unidad
Cobre	0,792	kg
Hierro	1,695	kg
Aluminio	0,048	kg
PVC	0,276	kg
Vidrio de cono	2,530	kg
Vidrio de pantalla	5,624	kg
Condensadores	0,005	kg
Madera	1,162	kg
Plástico para reciclado mecánico	1,720	kg
Plástico para cementeras	0,850	kg
Polipropileno	0,720	kg
TRC de silicona, B/N, Pb	1,553	kg
Porcentaje de recuperación (en peso)	99,0	%

En la Tabla 3.2 y en la Tabla 3.3 se muestran los parámetros de inversiones necesarias, productividad, costes de explotación y retornos anuales para una línea de reciclado de estas características. Los cálculos de los ingresos por la venta de los materiales obtenidos se han realizado con las cotizaciones medias de mercado del año 2008 (Tabla 3.12).

Tabla 3.2 Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea manual 100%

Equipos de línea de reciclado	Coste (€)
Rampa alimentación aparatos	6.000
Camino de rodillos	6.000
Manipulador ingrávito	13.200
Mesa desmontaje, útiles, campana	6.000
Cinta transportadora de carcasas	6.000
Molino plásticos reciclables	30.000
Sistema de cepillos, limpieza y aspiración	30.600
Cinta transportadora de TRC	12.000
Vuelcacestones	12.000
Cinta y tolva descarga	6.000
TOTAL	127.800

Tabla 3.3 Principales parámetros del análisis económico de la instalación manual 100%

Parámetro	Cantidad	Unidades
Número de televisores / monitores tratados	28	Aparatos / h
Capacidad de la planta de tratamiento de TRC	45.000	TRC / Año
Peso total del material separado y recuperado	16,8	kg / unidad
Porcentaje de reciclaje (en peso)	99	%
Ingreso por venta de materiales de un aparato	6,08	€/ unidad
Mano de obra requerida	6	Operario
Número de turnos	1	Turno
Coste horario de la mano de obra	19	€/ h
Inversión requerida (manipulación+desensamblado+limpieza)	127.800	€
Costes anuales de explotación	184.480	€
Retornos anuales por el material obtenido	273.556	€
Coste medio de tratamiento unitario	4,7	€/ unidad

3.4.2 Proceso de reciclado 100% automatizado

Como alternativa opuesta al actual proceso casi 100% manual de desmontaje, el modelo estudia una línea de reciclado con el mayor nivel de automatización posible, desde el punto de vista de potenciales soluciones técnicas sugeridas en la literatura consultada [Gerner et al., 2005]. El objetivo es analizar de nuevo sus parámetros técnicos y económicos para utilizarlos en la fase de optimización a la hora de aplicar el modelo a la situación real de la empresa. La línea se muestra en la Figura 3.15, donde se observa que algunos de los puestos manuales atendidos por operarios han sido sustituidos por dos robots angulares y un robot pórtico para realizar sobre todo operaciones de corte, separación y manipulación.

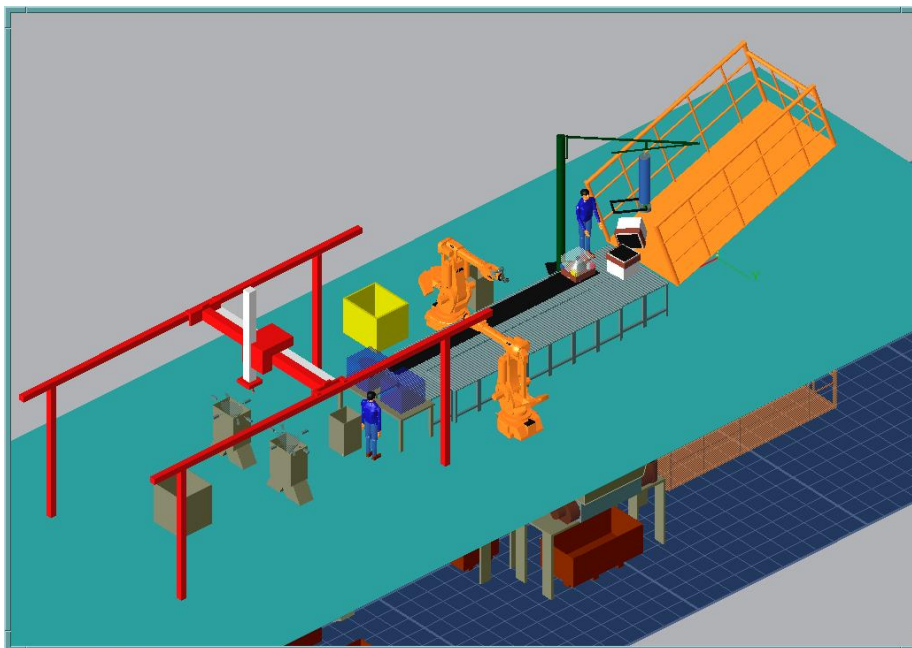


Figura 3.15 Vista general de la línea automatizada al 100%

3.4.2.1 Entrada de aparatos e identificación

La entrada de aparatos, al provenir del mismo tipo de sistema de recogida, es efectuada en una primera fase por un operario. Como alternativa se

podrían depositar en un almacén y posteriormente seguir diferentes sugerencias de transferencia reflejadas en la literatura [Stuart y Christina, 2003]. Los aparatos vienen en el mismo tipo de contenedores, de donde son extraídos con un manipulador ingrávito por el operario, el cual realiza la primera verificación. Por medio de sistemas de visión artificial o clasificación automática (vía etiquetas electrónicas) se agrupan los aparatos según el tratamiento a realizar. En la Figura 3.16 se muestra una vista lateral de la línea propuesta donde se aprecian los dos niveles que componen la instalación. Los componentes y materiales obtenidos se evacúan a contenedores situados a un nivel -1. Previamente se ha generado la mejor secuencia de separación de componentes por métodos basados en datos CAD [Srinivasan et al., 1999].

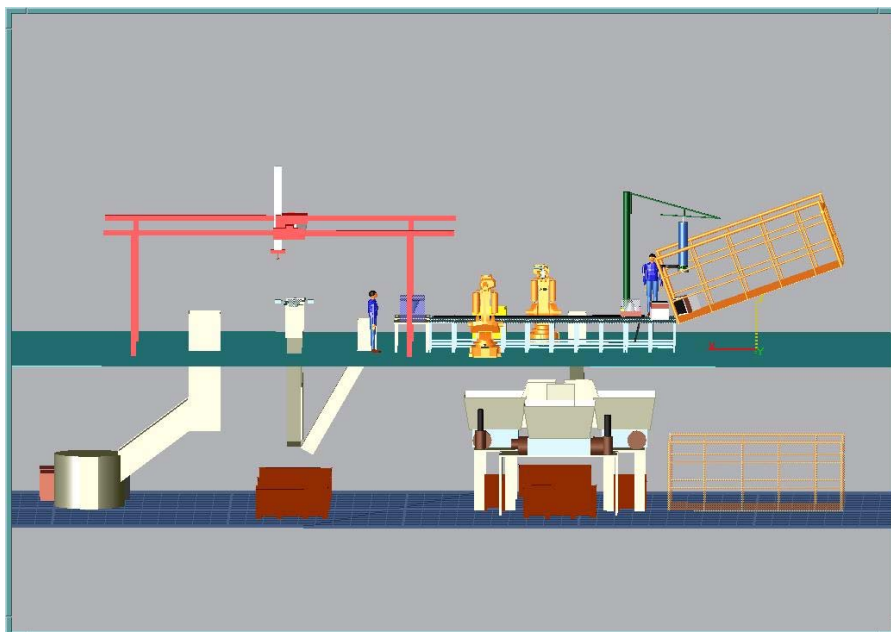


Figura 3.16 Vista lateral de la línea automatizada 100% mostrando los dos niveles

3.4.2.2 Estaciones de desensamblado

Los aparatos llegan a la primera estación de desensamblado automatizado, provista de sistemas de identificación y localización de

sistemas de fijación (tornillos, clips) [Güngör, 2006] y dos robots con herramientas adecuadas para abrir las carcasas de plástico y extraer los componentes de esta primera fase: conectores, tarjetas de circuito impreso, cables, RTP. Por medio de herramientas robotizadas como destornilladores, cizallas, sierra, etc. los dos robots (que realizan la misma operación) van cortando y extrayendo los componentes, depositándolos en los contenedores de salida adecuados [Hohm et al., 2000]. El posicionamiento y orientación de las herramientas de robots se realiza mediante visión artificial, con el análisis de imágenes 2D y 3D y datos previos del modelo CAD del aparato [Gil et al., 2007]. La Figura 3.17 muestra la disposición de los dos robots que realizan esta operación, y la Figura 3.18 las herramientas utilizadas para corte y rotura de componentes. Las carcasas se reenvían según la naturaleza del plástico que las componen (identificadas por medios automáticos, como espectrógrafos de rayos X). Se retira el cañón de electrones del TRC y el resto pasa a la siguiente estación por medio de un robot pórtico que los traslada y reorienta.

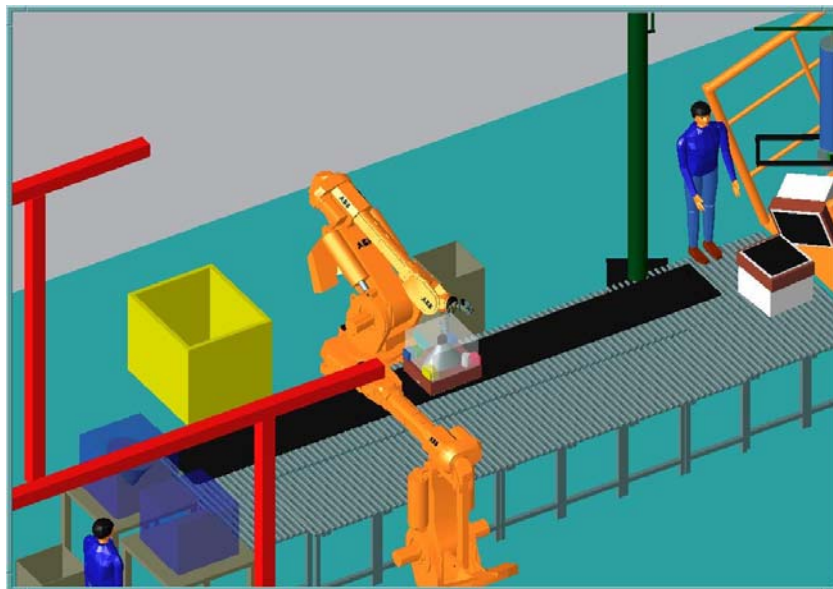


Figura 3.17 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores

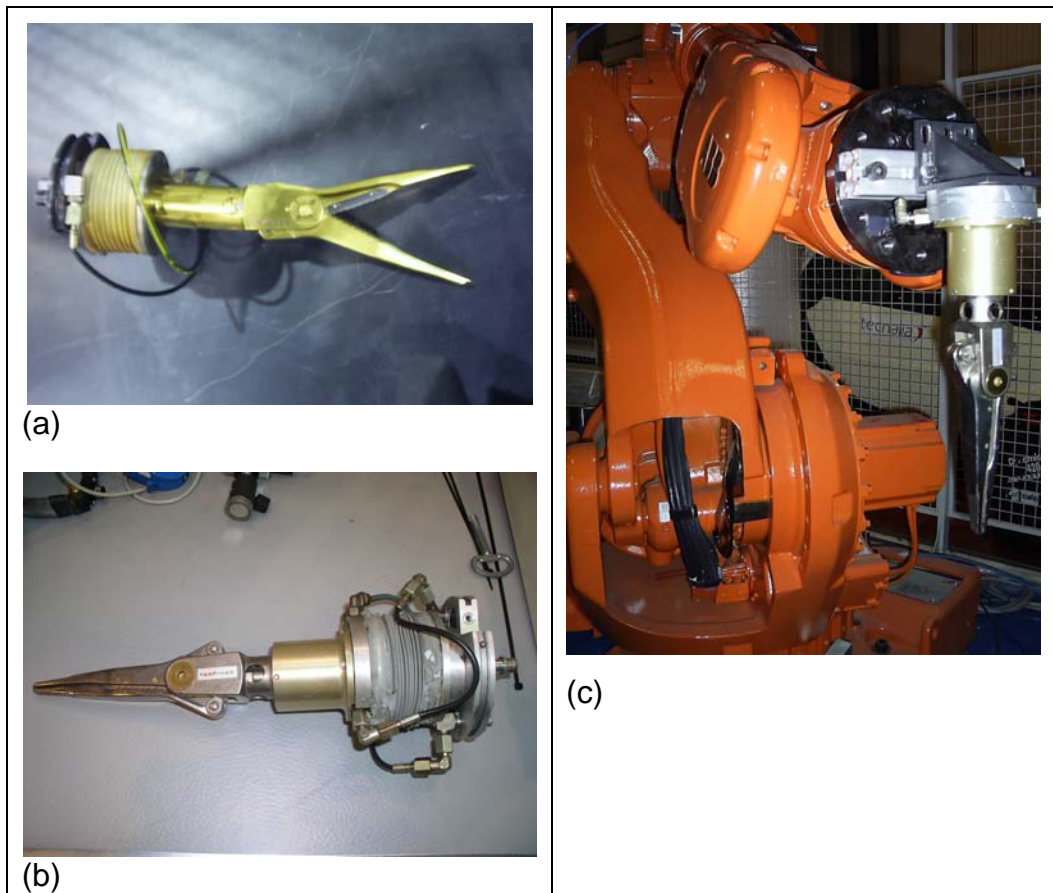


Figura 3.18 (a) y (b): Detalles de herramienta con función de tijera y cizalla. (c): La misma herramienta adosada al robot de desensamblado

3.4.2.3 Separación de vidrios del TRC

Los TRC llegan a la estación de separación de vidrios donde en una primera fase se identifica la presencia de plomo en la pantalla para decidir si se va a proceder con la separación de los vidrios de cono y pantalla. Posteriormente, un robot pòrtico lleva los TRC (sujetos por la pantalla con una garra de vacío) a una estación doble de separación de vidrio donde por métodos mecánicos (cizallas con accionamiento neumático) se separa la pantalla del cono (Figura 3.19 y Figura 3.20).

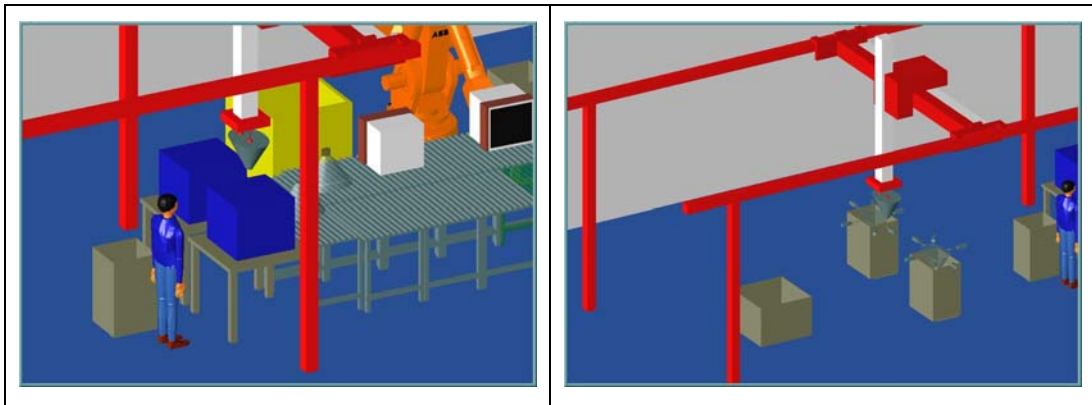


Figura 3.19 Operaciones robotizadas de manipulación del TRC y separación de vidrios

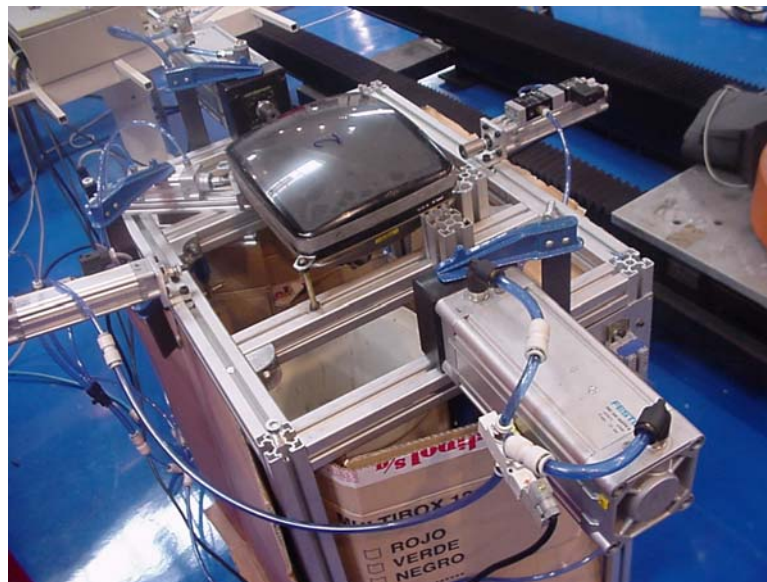


Figura 3.20 Detalle de la estación automática de separación de vidrios mediante cizallas neumáticas

El vidrio de cono cae a contenedores situados bajo la misma estación de rotura, por gravedad. La pantalla queda sujeta por la garra del robot (Figura 3.21), que la transporta hasta la zona de caída a otro contenedor para vidrio de pantalla (Figura 3.22).



Figura 3.21 Manipulación del TRC con garra de vacío en robot pórtico.

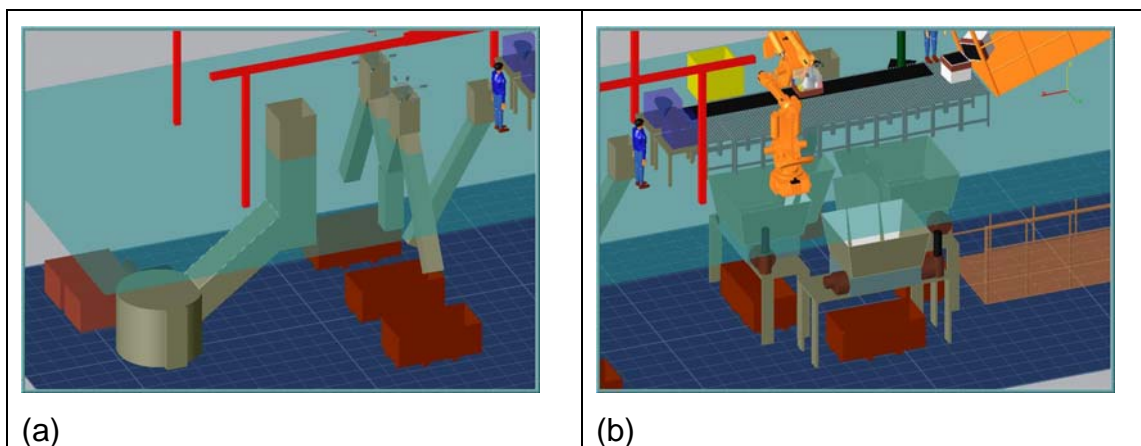


Figura 3.22 (a) Evacuación de vidrios del TRC a contenedores inferiores.
 (b): Evacuación de materiales en las estaciones de carcasas

La Figura 3.23 muestra la secuencia de operaciones que se realizan en la línea automatizada, mostrando el tiempo necesario para realizarlas. Hay que tener en cuenta que este gráfico no muestra el tiempo de ciclo por aparato procesado, ya que algunas operaciones se realizan en paralelo por varios medios de procesamiento (dos robots para el desmontaje de carcasa y elementos internos, y estaciones duplicadas para la eliminación del fleje, cañón y separación de vidrios).

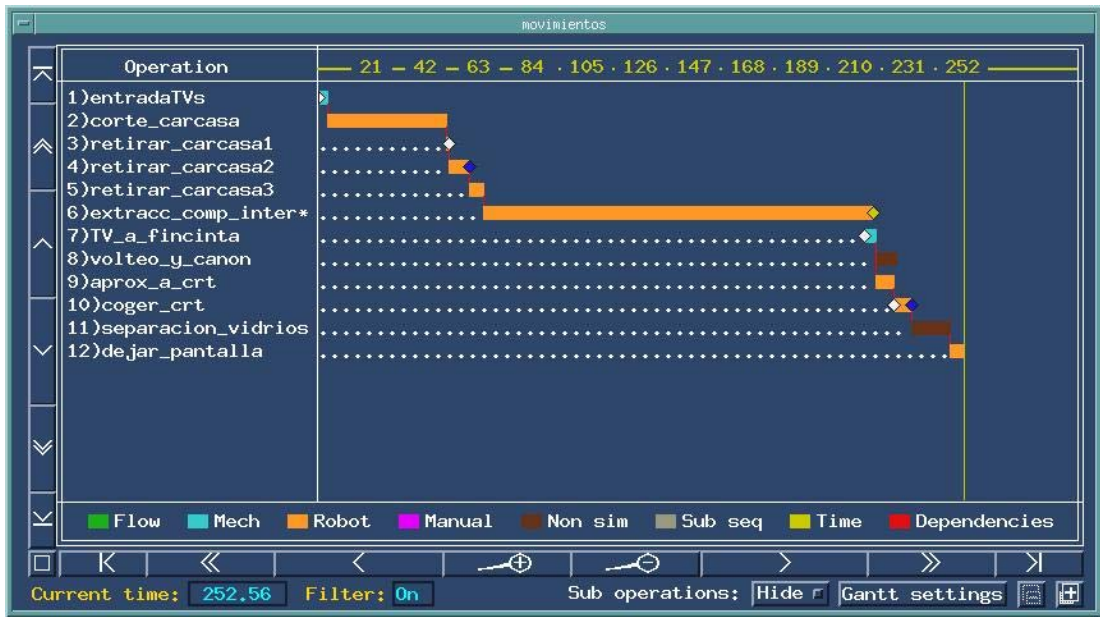


Figura 3.23 Cronograma con secuencia y duración de las operaciones automatizadas al 100%

3.4.2.4 Estimación del coste de tratamiento

La distribución de la línea de desmontaje automatizada 100% representa una opción hipotética que se justificaría en muy pocas situaciones. Esto se muestra en la estimación de los datos de la productividad, tiempos de ciclo, inversiones y rentabilidad, que hemos obtenido en la simulación y en pruebas en laboratorio [Rentería y Álvarez, 2007], realizadas para obtener los datos de cantidades obtenidas de material. La Tabla 3.4 muestra las cantidades medias de los materiales obtenidos, separados correctamente y sin mezcla de otros compuestos. Con este método automatizado se logra una recuperación media de materiales (en peso) de hasta un 61% (en general, por debajo de las exigencias de las normativas europeas). Las cantidades bajas de materiales separados se deben a la gran dificultad de identificar y de separar, de forma automática y exacta, los diferentes componentes y materiales presentes en el aparato. En consecuencia, se producen mezclas y contaminaciones que reducen su precio de venta o que incluso imposibilitan su reutilización.

Tabla 3.4 Material recuperado con la opción 100% automatizado, para un aparato con un peso medio de 17 kg.

Material	Cantidad	Unidad
Cobre	0,480	kg
Hierro	1,039	kg
Aluminio	0,029	kg
PVC	0,168	kg
Vidrio de cono	1,540	kg
Vidrio de pantalla	3,423	kg
Condensadores	0,005	kg
Madera	0,707	kg
Plástico para reciclado mecánico	1,050	kg
Plástico para cementeras	0,518	kg
Polipropileno	0,441	kg
TRC de silicona, B/N, Pb	0,945	kg
Porcentaje de recuperación (en peso)	60,8	%

En la Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se muestran los parámetros estimados de inversiones necesarias, productividad, costes de explotación y retornos anuales para una línea de reciclado de estas características. Los cálculos de los ingresos por la venta de los materiales obtenidos se han realizado con las cotizaciones medias de mercado del año 2008 (Tabla 3.12).

Tabla 3.5 Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea propuesta 100% automatizada

Equipos de línea de reciclado	Coste (€)
Rampa alimentación aparatos	12.000
Camino de rodillos	6.000
Manipulador ingrávito (pluma+equilibrador+util ventosa)	13.200
Mesa desmontaje, útiles, campana	6.000
Detector infrarrojos	50.000
Ordenador	400
Cinta transportadora de carcassas o rodillos	3.000
Molino plásticos reciclables	50.000
Molino otras carcassas	50.000
Carda limpieza superficie	600
Equipo identificación rayos X	40.000
2 Robots para carcassas y elementos internos	60.000
1 Robot pórtico para TRC	31.000
Garras	4.000
Cámara y fuente de iluminación ultravioleta	400
Licencia Software	4.000
Cinta transportadora de TRC	1.500
Armario control y conexiones	2.500
Elementos de seguridad	4.000
2 PLC	2.000
Accionamientos neumáticos	900
Estructura de perfiles de aluminio	3.000
Vibrador circular (incl. filtro salida para finos)	60.000
Vuelcacestones	12.000
Cinta y tolva descarga	6.000
TOTAL	422.500

Tabla 3.6 Parámetros del análisis económico de la instalación automatizada. (Para un aparato con un peso medio de 17 kg)

Parámetro	Cantidad	Unidades
Número de televisores / monitores tratados	36	Aparatos / h
Capacidad de la planta de tratamiento de TRC	58.000	TRC / Año
Peso total del material separado y recuperado	10,34	kg / unidad
Porcentaje de reciclaje (en peso)	61	%
Ingreso por venta de materiales	3,7	€/ unidad
Mano de obra requerida	2	Operario
Número de turnos	1	Turno
Coste horario de la mano de obra	19	€/ h
Inversión requerida (manipulación+desensamblado+limpieza)	422.500	€
Costes anuales de explotación	62.560	€
Retornos anuales por el material obtenido	214.441	€
Coste medio de tratamiento unitario	2,5	€/ unidad

Los dos ejemplos de líneas de reciclado anteriormente estudiados representan los casos extremos: la opción 100% manual ofrece datos reales de la instalación, obtenidas de empresas recicladoras, mientras que para la opción 100% automatizada es necesario realizar la simulación y pruebas en laboratorio para obtener los parámetros de interés, ya que no se han implantado en la industria. Debido a las ventajas de las técnicas interactivas del proceso de simulación (comentadas en la sección 2.2.1), podemos sustituir en los modelos gráficos de la instalación cualquier elemento de la línea de reciclado y, ejecutando de nuevo la simulación, obtener un nuevo conjunto de parámetros de productividad para la nueva situación. En la siguiente sección se muestra un caso intermedio en el que parte de las operaciones se han automatizado, mientras que el resto se mantienen con operarios. Se han realizado los mismos análisis que en los casos anteriores.

3.4.3 Proceso de reciclado semi-automatizado

La línea se muestra en la Figura 3.24, donde se observa que, partiendo de la opción 100% automatizada, algunos de los puestos robotizados son atendidos por operarios, que ejecutan la extracción de los componentes internos con mayor precisión. El robot angular se ocupa del corte y extracción de la carcasa, mientras que el robot pórtico realiza la separación de vidrios.

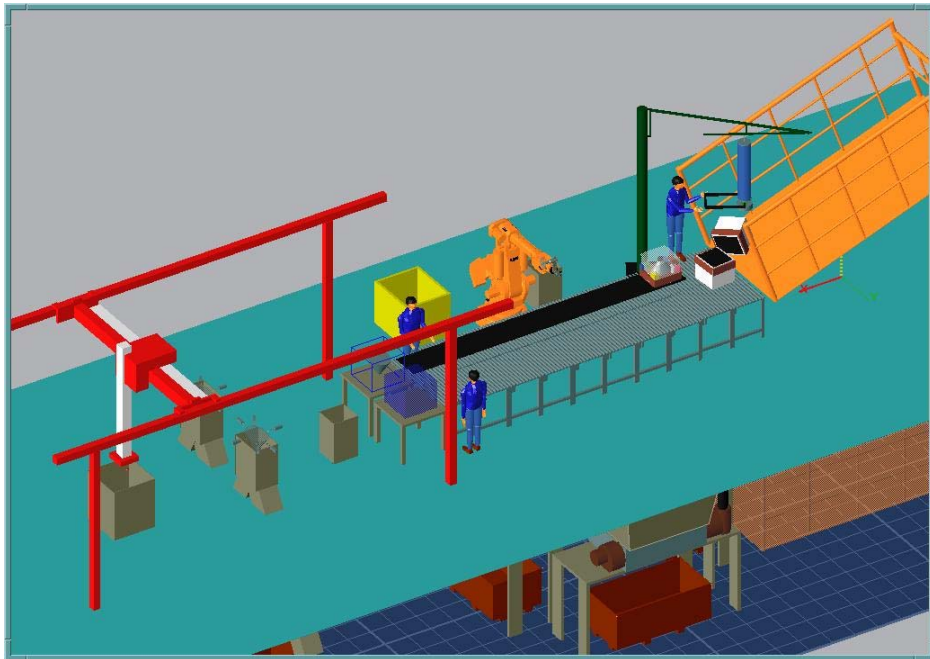


Figura 3.24 Vista general de la línea semi-automatizada

3.4.3.1 Entrada de aparatos e identificación

Se mantienen las características de la línea 100% automatizada en estas primeras fases de carga de aparatos desde el contenedor de entrada e identificación inicial por métodos automáticos (Figura 3.25)

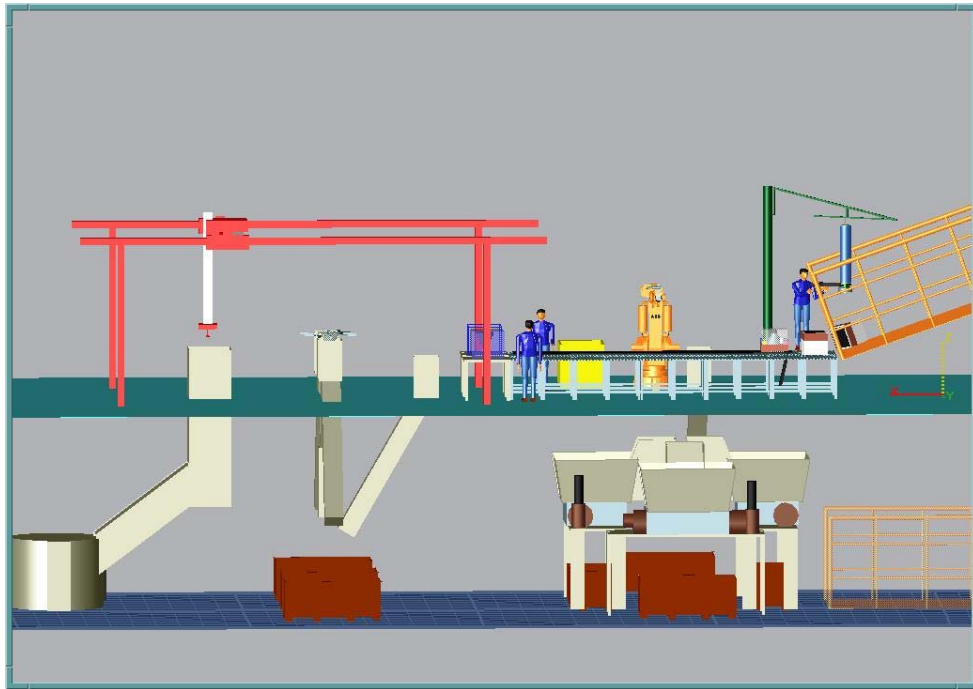


Figura 3.25 Vista lateral de la línea semi-automatizada mostrando los dos niveles

3.4.3.2 Estaciones de desensamblado

El robot realiza las primeras operaciones consistentes en el corte de la carcasa y la extracción de la misma, depositándola en el contenedor para residuos plásticos. Seguidamente el conjunto del TRC junto a los componentes internos del aparato pasa a dos puestos en paralelo, donde dos operarios realizan las operaciones de identificación, corte, separación y extracción de elementos internos. Estos componentes se depositan en las rampas adecuadas donde, por gravedad, caen en los contenedores específicos para cada tipo de componente, situados en el nivel -1 (Figura 3.26).

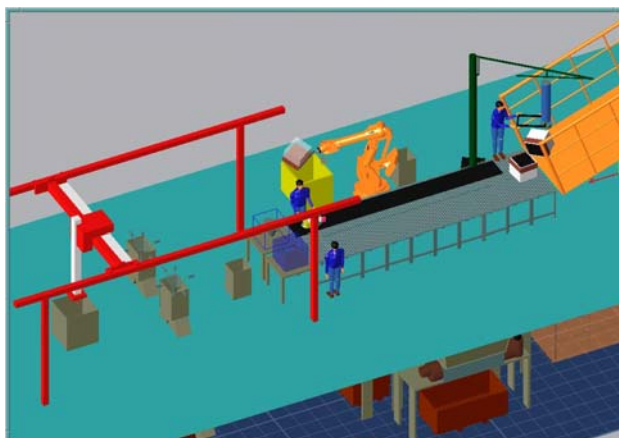


Figura 3.26 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores

3.4.3.3 Separación de vidrios del TRC

Para la separación de la banda anti-implosión y de los dos tipos de vidrios se siguen los mismos procedimientos y medios utilizados en la opción automática 100%. (Figura 3.27)

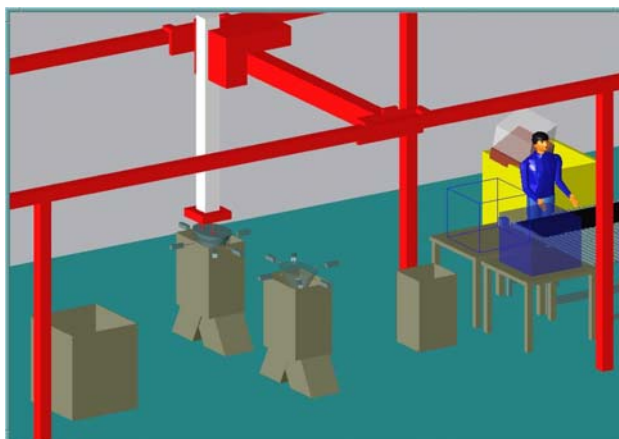


Figura 3.27 Operaciones robotizadas de corte y separación de carcasas y elementos interiores

La Figura 3.28 muestra el cronograma con la secuencia de operaciones que se realizan en la línea semi-automatizada, mostrando el tiempo necesario para realizarlas. Como en casos anteriores, el gráfico no muestra

el tiempo de ciclo por aparato procesado, ya que algunas operaciones se realizan en paralelo por varios medios de procesamiento (dos operarios para el desmontaje de elementos internos, y estaciones duplicadas para la eliminación del fleje, cañón y separación de vidrios).

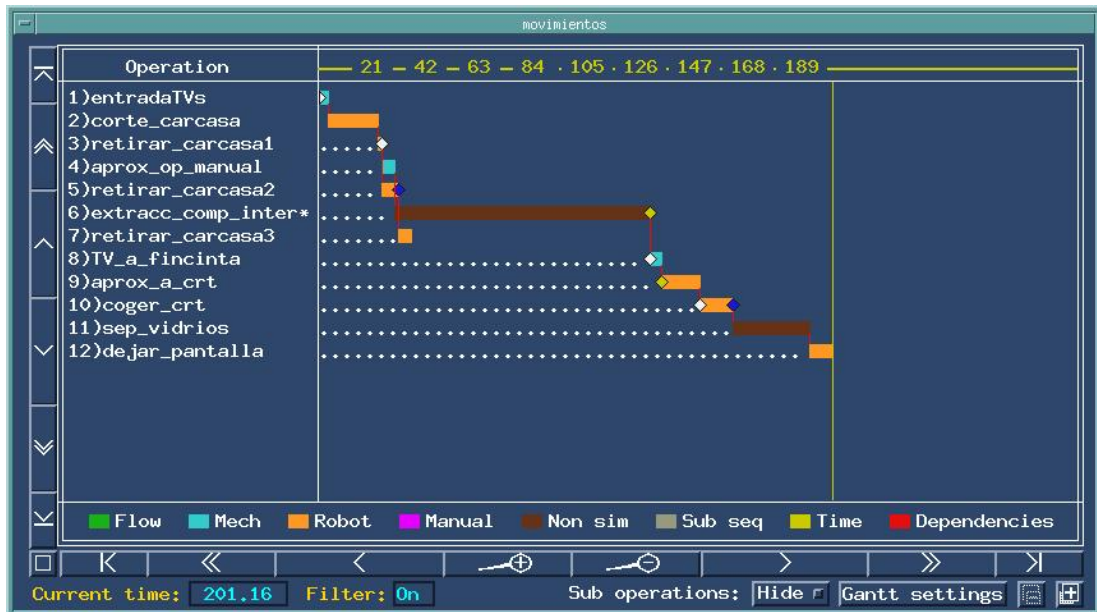


Figura 3.28 Cronograma con secuencia y duración de las operaciones

3.4.3.4 Estimación del coste de tratamiento

En la Tabla 3.7 se muestran las cantidades medias de los materiales obtenidos, separados correctamente y sin mezcla de otros compuestos. Con este método semi-automatizado se logra una recuperación media de materiales (en peso) de hasta un 78 % (en general, algo por encima de las exigencias de las normativas europeas). Al tratarse de una combinación de operaciones manuales y automáticas, las cantidades son generalmente menores que la opción 100% manual.

Tabla 3.7 Material recuperado en la opción semiautomática (Para un aparato con un peso medio de 17 kg)

Material	Cantidad	Unidad
Cobre	0,552	kg
Hierro	1,179	kg
Aluminio	0,034	kg
PVC	0,204	kg
Vidrio de cono	2,200	kg
Vidrio de pantalla	4,890	kg
Condensadores	0,005	kg
Madera	0,808	kg
Plástico para reciclado mecánico	1,200	kg
Plástico para cementeras	0,592	kg
Polipropileno (plástico)	0,504	kg
TRC de silicona, B/N, Pb	1,350	kg
Porcentaje de recuperación (en peso)	78	%

En la Tabla 3.8 y Tabla 3.9 se muestran los parámetros estimados de productividad, inversiones necesarias, costes de explotación y retornos anuales para una línea de reciclado de estas características. Los cálculos de los ingresos por la venta de los materiales obtenidos se han realizado con las cotizaciones medias de mercado del año 2008 (Tabla 3.12).

Tabla 3.8 Estimación de inversiones en aparatos necesarios para la línea semi-automatizada propuesta

Equipos de línea de reciclado	Coste (Euros)
Rampa alimentación aparatos	12.000
Camino de rodillos	6.000
Manipulador ingrávito (pluma+equilibrador+util ventosa)	13.200
Mesa desmontaje, útiles, campana	6.000
Detector infrarrojos	50.000
Ordenador	400
Cinta transportadora de carcacas	3.000
Molino plásticos reciclables	50.000
Molino otras carcacas	50.000
Carda limpieza superficie	600
Robot para carcacas	30.000
Robot pórtico para TRC	30.000
Garras	1.500
Cinta transportadora de TRC	1.500
Armario control y conexiones	2.500
Elementos de seguridad	1.000
PLC	1.000
Accionamientos neumáticos	900
Estructura de perfiles de aluminio	1.500
Vibrador circular (incl. filtro salida para finos)	60.000
Vuelcacestones	12.000
Cinta y tolva descarga	6.000
TOTAL	339.100

Tabla 3.9 Principales parámetros del análisis económico de la instalación semi-automatizada. (Para un aparato con un peso medio de 17 kg)

Parámetro	Cantidad	Unidades
Número de televisores / monitores tratados	34	Aparatos / h
Capacidad de la planta de tratamiento de TRC	54.000	TRC / Año
Peso total del material separado y recuperado	13,52	kg / unidad
Porcentaje de reciclaje (en peso)	79	%
Ingreso por venta de materiales	4,34	€/ unidad
Mano de obra requerida	3	Operario
Número de turnos	1	Turno
Coste horario de la mano de obra		€/ h
Inversión requerida (manipulación+desensamblado+limpieza)	339.100	€
Costes anuales de explotación	93.280	€
Retornos anuales por el material obtenido	234.173	€
Coste medio de tratamiento unitario	3,0	€/ unidad

Como resumen de esta sección 3.4 de análisis de procesos de reciclado, en la Tabla 3.10 mostramos de forma esquemática los tratamientos posibles que se pueden aplicar a las operaciones de reciclado de televisores y monitores, de menor a mayor nivel de automatización, junto con su correspondiente grado de separación de materiales y componentes (en porcentajes).

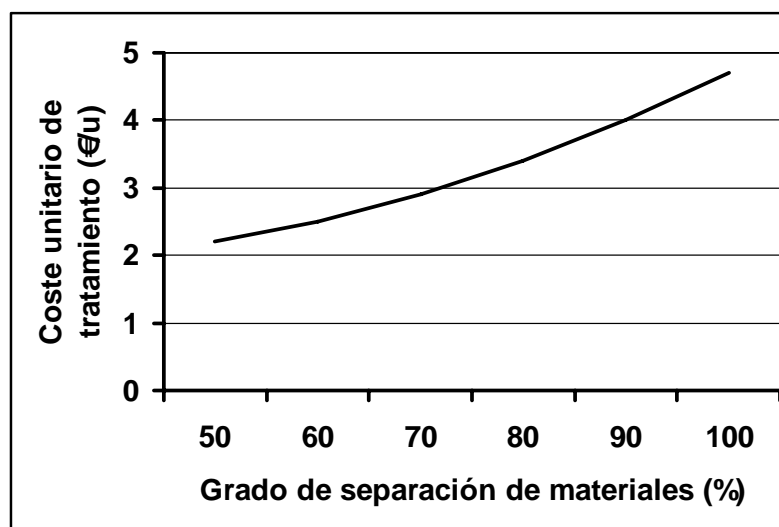


Figura 3.29 Relación entre coste de tratamiento unitario y grado de separación (pureza) de materiales

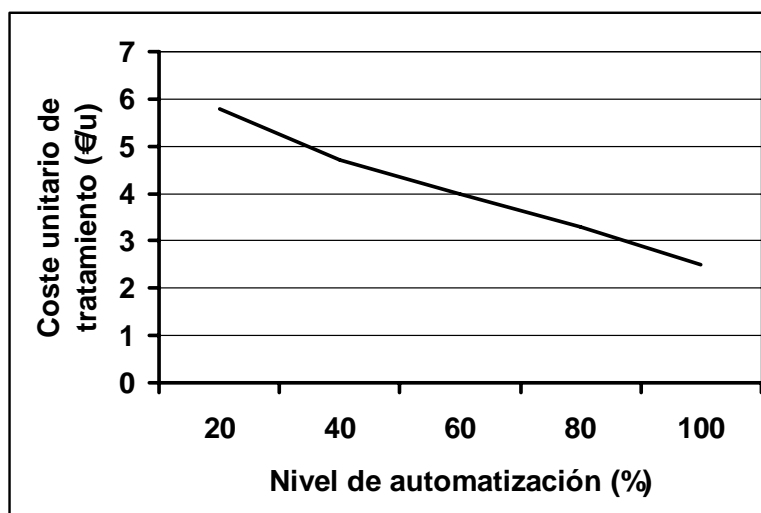


Figura 3.30 Relación entre coste de tratamiento unitario y nivel de automatización del proceso de separación

Estas gráficas, junto con la tabla anterior, se utilizan en la siguiente fase del modelo propuesto, para realizar las tareas de optimización de parámetros.

3.5 Fase de optimización

El objetivo de fase es encontrar la mejor alternativa para optimizar el proceso de desensamblado y reciclado de aparatos electrónicos. Se corresponde con la etapa de “acción” de la metodología de investigación-acción. Pretendemos maximizar el beneficio obtenido por las empresas recicladoras, mediante la recuperación de materiales y su posterior venta para reutilización. El modelo propuesto en esta tesis incorpora al proceso de optimización los “Sistemas de Ayuda a la Decisión” (*Decision Support Systems*, DSS). Un sistema de ayuda a la decisión se define como “*un programa de ordenador que ofrece información en un dominio específico de aplicación, por medio de modelos de decisión analíticos y accesos a bases de datos, para ayudar al usuario a tomar decisiones efectivas en tareas complejas y poco estructuradas*” [Klein y Methlie, 1995].

Estos sistemas utilizan métodos de optimización lineal y no-lineal para formular problemas de cierta entidad de forma precisa, resolverlos y analizar la solución. Tal como se ha explicado en la sección 2.2.3, la optimización ayuda a encontrar la solución que ofrece el mejor resultado, rendimiento o beneficio, o el menor coste, gasto o molestia. A menudo este tipo de problemas tienen que gestionar eficientemente los recursos disponibles (presupuesto, tiempo, máquinas, personal, inventario, etc.) Los problemas de optimización se clasifican en lineales y no-lineales dependiendo de si el tipo de relaciones en el problema son lineales con respecto a las variables, o no.

En las secciones anteriores hemos definido los parámetros de entrada al modelo correspondientes a los siguientes tipos de datos:

- Información técnica sobre los aparatos a reciclar. Se clasifican y agrupan de acuerdo a tratamientos de reciclado similares que se les pueda aplicar.
- Las alternativas y viabilidad técnica de las estaciones de desensamblado, desde la opción de operaciones casi completamente manuales hasta el extremo opuesto de operaciones casi completamente automatizadas. La realidad del proceso de reciclado muestra que no se dan los casos extremos puros. Las propuestas, basadas en la simulación gráfica analítica, se fundamentan en parte en la experiencia previa aportada por la empresa y, en parte, en el propio estudio de las alternativas técnicas de separación de materiales. De esta fase se obtienen tiempos de ciclo, productividad, máquinas y sistemas de identificación y separación posibles.
- Costes de tratamiento de las operaciones de reciclado obtenidos según su nivel de automatización, ya que hay una correlación entre ambos parámetros, así como con el nivel de separación de materiales que se obtiene en cada caso. Cuanto mayor nivel de automatización, menor coste de tratamiento por unidad, pero también la separación de materiales es menos detallada (hay mayor mezcla de materiales y, consecuentemente, el precio de venta es menor).

En esta fase de optimización introducimos al modelo información de naturaleza legislativa y económica, en concreto:

- Datos de ratios mínimos de reciclado que es necesario satisfacer (provenientes de la aplicación de la directiva sobre RAEE).
- Cotizaciones de mercado para los materiales recuperados. En la Tabla 3.12 se muestran los precios de venta de materiales obtenidos en el reciclado de televisores (cotización de octubre de 2008).

Tabla 3.12 Cotizaciones de materiales recuperados de un monitor

Material	Precio (€/ Tm)
Aluminio	1.690,0
Cobre	4.846,6
Hierro	320,0
Plásticos	264,0
Vidrio de cono	115,0
Vidrio de pantalla	60,5
Mixtos	0

Estos parámetros ya identificados son los datos de entrada al sistema de ayuda a la decisión. La fase de optimización por medio de este sistema consta de: función objetivo, variables, restricciones y resultados. La aplicación de estos términos al modelo propuesto se explica en las secciones siguientes.

3.5.1 Función Objetivo

La función objetivo expresa lo que se pretende optimizar en el problema. En el ámbito económico esta fórmula es generalmente una función de beneficios que se pretende maximizar o, por el contrario, una función de costes que se quiere minimizar. En los modelos se programa una única función objetivo. En el caso del proceso de reciclado la función objetivo computa los beneficios de la empresa recicladora en función de los ingresos (de la venta de los materiales obtenidos) y los costes de tratamiento del proceso, siguiendo planteamientos similares [Costi et al., 2004]. La codificación de la función se muestra en la siguiente ecuación:

$$B = \sum_{i=1}^5 (M_i \times PV_i) - ((\sum_{j=1}^n AE_j + GE) / P) \quad [3.1]$$

Siendo:

B: Beneficio unitario obtenido por el desmontaje de un televisor o monitor.

M_i: Cantidad del material *i* (*i* = 1, 2, 3, 4, 5) obtenido en el proceso de separación de un televisor o monitor. Se tienen en cuenta los 5 materiales con mayor presencia, en peso, en el aparato.

PV_i: Precio de venta (cotización) del material *i*.

AE_j: Coste de amortización anual del equipo de tratamiento *j* de la línea de desensamblado. *j* = 1, 2, ... n.

GE: Gasto anual de explotación de la línea de desensamblado.

P: Productividad anual de la línea.

El coste de tratamiento unitario (CT), incluido en la fórmula anterior, es:

$$CT = (\sum_{j=1}^n AE_j + GE) / P \quad [3.2]$$

Este coste de tratamiento unitario es el obtenido en las diferentes alternativas de líneas de reciclado estudiadas en la sección 3.4, según se recoge en las tablas y gráficas de ese apartado.

3.5.2 Variables

También se conocen como *variables de decisión* porque son las cantidades que están bajo control en el modelo de optimización. El objetivo del proceso de optimización es encontrar los valores de las variables del

modelo que generan el óptimo valor de la función objetivo, siempre sujeto a las restricciones que se apliquen a dichas variables. En el modelo propuesto para el proceso de reciclado las variables que utilizamos en el cómputo son:

- Cantidades obtenidas de cada material.
- Nivel de automatización del proceso de separación (desde manual a automatizado, pasando por niveles intermedios de semi-automatización).

Esta segunda variable está estrechamente relacionada con el coste de tratamiento (tal como se ha explicado en la sección 3.4): cuanto mayor es el nivel de operaciones automatizadas, el coste de tratamiento por aparato disminuye, pero también disminuyen las cantidades obtenidas de material correctamente separado.

3.5.3 Restricciones

Existen restricciones en los valores que las variables de un modelo pueden tomar, ya que al menos un recurso estará limitado. En el caso del proceso de reciclado las restricciones que aplicamos son:

- Pesos mínimos a obtener de cada material, cumpliendo las normas de la directiva WEEE.
- Datos técnicos referidos a la composición en materiales de los aparatos a reciclar.

La expresión matemática para estas restricciones es la siguiente:

$$PM \geq \sum_{i=1}^5 MX_i \geq \sum_{i=1}^5 M_i \geq \sum_{i=1}^5 MD_i$$

Siendo:

PM: Peso total medio de un televisor o monitor.

MX_i: Cantidad máxima obtenible del material *i* (*i* =1, 2, 3, 4, 5), en un televisor o monitor suponiendo una separación teórica del 100%.

M_i: Peso del material *i* obtenido en el proceso de separación.

MD_i: Peso mínimo del material *i* a obtener para cumplir la directiva WEEE.

Con todos los elementos mencionados hemos propuesto un modelo de optimización para el proceso de reciclado con el objetivo de maximizar el beneficio a obtener por la empresa recicladora. El modelo de cómputo se ha implementado sobre la plataforma de optimización LINGO versión 11.0, desarrollado por Lindo Systems, con el propósito de obtener valores optimizados para:

- La mejor opción técnica para separar y reciclar televisores y monitores. Esta opción recomendada por el programa de optimización se deriva directamente del coste de tratamiento sugerido para dichos aparatos.
- Pesos recomendados de cada material a obtener, como resultado del proceso de separación.

3.5.4 Resultados

Los datos de salida de la fase de optimización del modelo ofrecen la pauta de configuración de la línea de reciclado, en el sentido de dotar de un mayor o menor nivel de automatización a cada operación de manipulación y separación de componentes y materiales. Los resultados de la optimización nos ofrecen información sobre:

- Coste de tratamiento óptimo. Aplicando las correspondencias mostradas en la Figura 3.30 se puede obtener el grado de automatización sugerido partiendo del valor del coste de tratamiento obtenido del proceso de optimización. Se trata así de configurar una línea de reciclado aplicando un determinado nivel de automatización, tomando como referencia las líneas de reciclado (desde “manual” a “automatizado”) planteadas en la sección “3.4 Definición y programación de las opciones de automatización”.
- Pesos óptimos de cada material a recuperar. Cuanto más cerca esté la cantidad a recuperar del máximo recuperable, más detallado deberá ser el proceso de separación. La fase de optimización, a través de estos resultados, nos ofrece una sugerencia del método más adecuado de tratamiento de cada material y, en consecuencia, de la fase de reciclado en la cual ese material se obtiene en mayor cantidad. Para ello, sirven de referencia los datos obtenidos en los análisis previos, que se resumen en la Tabla 3.10.

3.6 Validación técnica, económica y medioambiental

Una vez propuesta la estrategia de operaciones más adecuada para la planta y realizada la simulación de las estaciones previstas, llevamos a cabo las pruebas de funcionamiento y una evaluación técnica, económica y medioambiental de la solución adoptada como resultado de la aplicación del modelo propuesto. Estas tareas del método propuesto se encuadran dentro de las fases de “*observación*” y “*reflexión*” de la metodología de investigación-acción. En este paso también se aplican técnicas cuantitativas ya que se van a recopilar datos del proceso. Para ello hemos utilizado diferentes tipos de televisores y monitores con el fin de evaluar las etapas de identificación de aparatos, desensamblado, separación de materiales de televisores y monitores y análisis de posible reutilización de materiales (estas

pruebas se reflejan en el capítulo “4. Implantaciones prácticas” y “5. Análisis de resultados”). Los estudios propuestos para realizar una evaluación de los resultados se citan a continuación:

- 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.
- Reutilización del material obtenido en otras aplicaciones.

4. EXPERIMENTACIÓN E IMPLANTACIONES PRÁCTICAS EN DOS EMPRESAS RECICLADORAS

En este apartado aplicamos las fases indicadas en el modelo propuesto a un caso práctico de reciclado de televisores y monitores de ordenador, con un acercamiento especial al proceso de:

- **Obtención de vidrio:** los resultados obtenidos han sido aplicados en la línea de reciclado de televisores y monitores de una empresa de reciclado de residuos electrónicos, que hasta la fecha utilizaba un proceso manual.
- **Reutilización de componentes de tarjetas de circuitos impresos:** los resultados se han implementado en una empresa fabricante de tarjetas, no orientada en principio al reciclado, pero que ha visto una nueva oportunidad de negocio al aprovechar el sistema propuesto para desensamblar y posteriormente re-fabricar sus propios productos rechazados en su control de calidad, e incluso aceptar tarjetas provenientes de fin de uso.

4.1 Análisis de parámetros

Esta primera fase del modelo propuesto en esta tesis la hemos realizado sobre los aparatos recibidos en la empresa de reciclado, en su vertiente técnica y económica. Aplicamos el primer paso de la metodología de investigación-acción, la “*planificación*” (identificamos los parámetros de

interés). Para ello hemos confeccionado unas fichas (un ejemplo enfocado a los parámetros del TRC se ve en la Figura 4.1), con las características técnicas de televisores y monitores. Estas fichas sirven además para cumplir con la obligación legal de llevar un registro estadístico de los aparatos tratados.









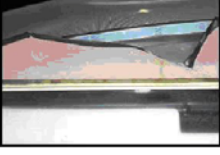

TRC,s FICHA 1/2		TRC,s FICHA 9/9	
MARCA	PHILIPS	MARCA	HITACHI
MODELO	A66EAK22X13	MODELO	M29JNA00X4
PESO EQUIPO (gr)	33.220	PESO EQUIPO (gr)	10.905
PESO TRC (gr)	23.190	PESO TRC (gr)	4.655
VIDRIO CONO (gr)	5.412	VIDRIO CONO (gr)	1.148
VIDRIO PANTALLA (gr)	16.049	VIDRIO PANTALLA (gr)	3.014
FOTO EQUIPO	FOTO TRC/1	FOTO EQUIPO	FOTO TRC/1
			
FOTO TRC/2	FOTO CONO Y PANTALLA	FOTO TRC/2	FOTO CONO Y PANTALLA
			
OPACIDAD		OPACIDAD	
			

Figura 4.1 Fichas técnicas de televisores marca Philips (izda.) e Hitachi (dcha.)

Es habitual que en un primer paso se desmonten manualmente, con mayor precisión, los diferentes modelos que se van recepcionando para hacer una primera inspección de su contenido. Así, constatamos que el peso medio de los monitores de ordenador recibidos en la planta de reciclado es de 12 kg y puede variar entre 10 y 15 kg; en el caso de los televisores el peso medio es de 27 kg, oscilando entre 25 y 35 kg. Según los casos se pueden dar diferentes porcentajes de contenido de vidrio de cono y pantalla, plásticos, tarjetas de circuitos impresos, metales, etc. y esos datos son importantes de cara a evaluar su valor económico final.

A medida que la empresa va adquiriendo experiencia en el tratamiento de estos aparatos los parámetros técnicos de cada modelo de aparato están ya registrados, por lo que sólo queda anotar el dato estadístico de número de aparatos recibidos y proceder a su clasificación. Así mismo, se dispone de los resultados de proceso (tiempo de ciclo, productividad, materiales obtenidos en el desmontaje) que se han obtenido en las diferentes modalidades (de mayor a menor grado de automatización) de líneas de reciclado planteadas en la fase de “Definición y programación de las opciones de automatización” (sección 3.4) del modelo propuesto.

Los datos obtenidos de este análisis de los aparatos que entran en la empresa recicladora forman parte del conjunto de parámetros utilizados en el programa de optimización de la línea de reciclado, tal como se explica en la siguiente sección. Se corresponde con la etapa de “acción” de la metodología de investigación-acción, donde se propone una solución al problema.

4.2 Programación del modelo

La información de partida utilizada en el método propuesto se basa principalmente en las fuentes siguientes: datos técnicos de los aparatos a reciclar (como se ha explicado en la sección anterior), datos técnicos provenientes de los estudios de simulación y experiencia previa del reciclador (tiempos de ciclo, costes de tratamientos) y precios de mercado de los materiales recuperados.

Los valores que hemos utilizado para el caso práctico que se trata aquí se muestran en la Tabla 4.1, donde aparecen los cinco materiales más significativos presentes en un televisor o monitor.

Tabla 4.1 Valores de los parámetros de entrada al sistema de optimización (aparato con un peso medio de 17 kg)

Parámetros de entrada al sistema de optimización	Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre
Pesos máximos de materiales que se pueden obtener teóricamente con un ratio de desensamblado del 100% (kg / unidad)	9.5	3.1	1.6	0.04	0.8
Pesos mínimos de materiales que deberían ser obtenidos de acuerdo con la directiva RAEE (kg / unidad)	7.1	2.3	1.2	0.03	0.6
Precios de mercado de los materiales (€/ kg) (cotización de octubre 2008)	0.12	0.26	0.32	1.69	4.84

Hemos utilizado los valores indicados en las dos primeras filas como *restricciones* del modelo propuesto, reflejado en la ecuación 3.1.

Los valores de la tercera fila los aplicamos en la *función objetivo* del modelo de optimización, según la ecuación 3.2. El coste de tratamiento unitario (CT), incluido en la fórmula anterior, se calcula en la ecuación 3.3.

Los datos correspondientes a “*Peso de material obtenido*” y “*Coste de tratamiento*” son las *variables de decisión* del modelo de optimización, y constituyen el resultado del proceso de cómputo para hallar la solución optimizada. Hemos introducido este conjunto de datos en el modelo de optimización propuesto, el cual ha sido programado en el sistema Lingo de optimización utilizando técnicas de programación lineal. En la Figura 4.2 se muestra el resumen de resultados y detalles del proceso de optimización llevado a cabo por el programa.

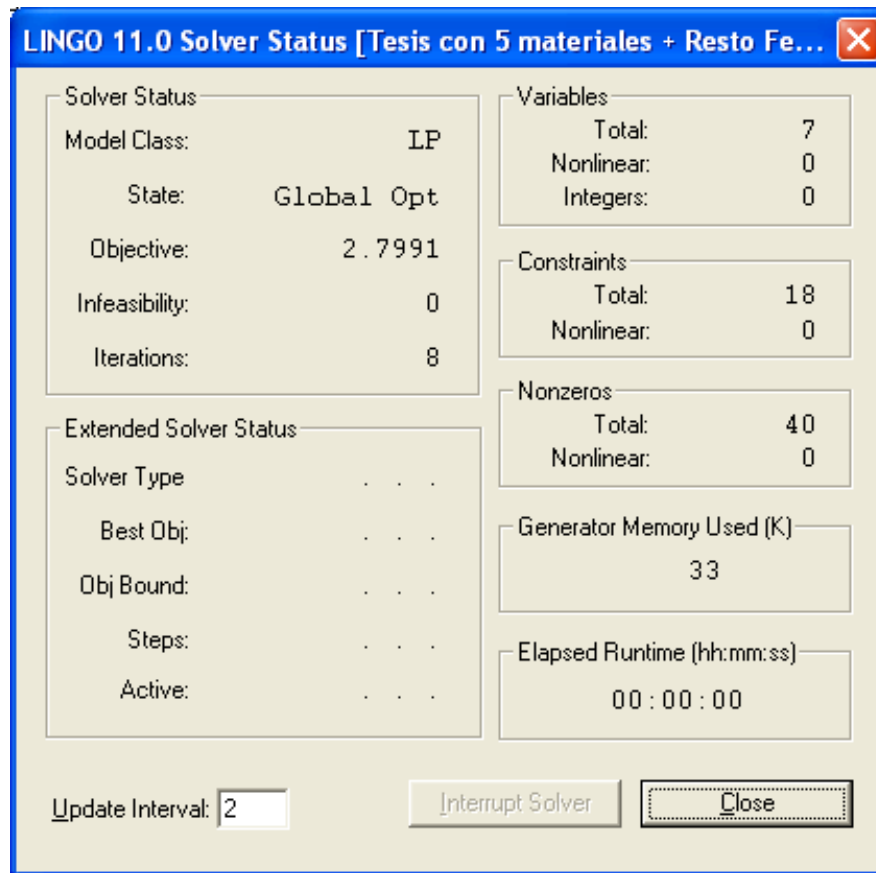


Figura 4.2 Pantalla inicial de resultados del programa de optimización

El cómputo del modelo ha necesitado realizar ocho iteraciones para obtener el valor óptimo de la función objetivo, definido como un “óptimo global” porque se trata de una solución viable con un valor objetivo que es igual o mejor que cualquier otra solución viable del modelo.

La Figura 4.3 muestra la lista completa de los valores que ofrece como resultado el programa de optimización. De entre ellos, nos interesan los correspondientes a los parámetros:

- *Objective value*, correspondiente al *beneficio óptimo* que se puede obtener por unidad procesada.
- *COSTE_TRAT (TVSET)*, que se corresponde al mejor coste de tratamiento unitario calculado por cada aparato.

- *OBTAINED (VIDRIO, PLÁSTICO, HIERRO, ALUMINIO, COBRE, OTROS)*, que se traducen por las cantidades objetivo a obtener de cada material para lograr el mayor beneficio.

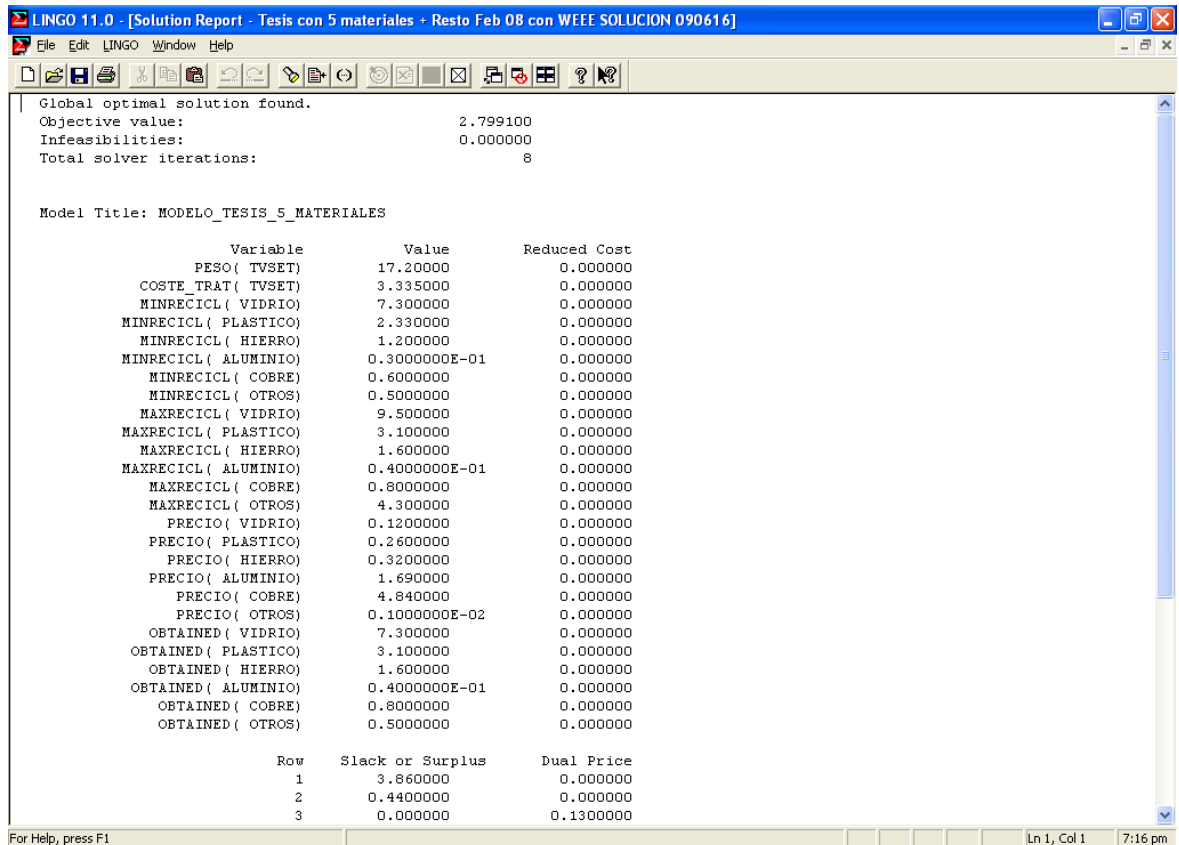


Figura 4.3 Pantalla con resultados detallados del programa de optimización

La Tabla 4.2 muestra el mejor valor hallado por el modelo al optimizar el beneficio obtenido y, en consecuencia, el coste de tratamiento recomendado, el cual está directamente relacionado (según lo explicado en la sección 3.5) con la tipología de tratamiento a aplicar (diferentes niveles de automatización del proceso de separación).

Tabla 4.2 Solución óptima del modelo de reciclado

Valor objetivo (beneficio obtenido por unidad desensamblada):	2,80 €/ unidad
Coste de tratamiento recomendado:	3,33 €/ unidad

Para conseguir estos valores óptimos el modelo de optimización también ofrece los valores recomendados de las cantidades de materiales que se deberían obtener del proceso de reciclado:

Tabla 4.3 Valores óptimos para los pesos de materiales a obtener

Soluciones propuestas	Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre
Peso de material objetivo (kg / unidad)	7,3	3,1	1,6	0,04	0,8
Peso de material objetivo (% respecto a máximo obtenible)	76%	100%	100%	100%	100%

Los resultados mostrados en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3 los interpretamos de la manera siguiente:

- El coste de tratamiento recomendado es de 3,33 €/ unidad. Aplicando el gráfico de la Figura 3.30, se concluye que la mejor opción técnica para un beneficio máximo es la utilización de una línea de reciclado semi-automatizada en la que varias operaciones se pueden automatizar completamente, pero habrá algunas tareas que tendrán que ser realizadas por operarios. Se toman como referencia las diferentes opciones de tratamiento manual, semi-automático o completamente automatizado, que han sido explicadas en la sección 3.4. Para decidir qué operaciones deben realizarse manualmente y cuáles automáticamente nos guiamos por los resultados de la Tabla 4.3, según se explica en el siguiente párrafo.

- El modelo ofrece una sugerencia sobre las cantidades de materiales que se deberían reciclar para obtener el máximo ingreso por su venta y el mínimo coste de su tratamiento, resultando en este caso el beneficio de 2,8 € / unidad. Los pesos de plástico, hierro, cobre y aluminio deberían ser los máximos posibles a obtener del aparato, mientras que el peso de vidrio está más cercano al umbral mínimo establecido por la directiva WEEE.

Utilizando la información de la Tabla 3.10 determinamos en qué operaciones es necesario optar por el proceso manual, es decir, donde se consigue mayor separación de material limpio (aquellas donde se obtenga principalmente plástico, hierro, cobre y aluminio) o por la automatización (para la obtención de vidrio), que implica una menor cantidad de material sin contaminar.

Estos resultados serían obviamente diferentes si se utilizan otros valores para los parámetros de entrada de la Tabla 4.1. Como ejemplo, y para probar el correcto funcionamiento del modelo de optimización, hemos realizado diversos casos de prueba.

Los resultados de la fase de optimización del primer caso se muestran en la Tabla 4.4, utilizando un juego de valores de diferentes cotizaciones ficticias de los materiales, y sin tener en cuenta la aplicación de la directiva. Los datos relativos a cantidades de material son las medias respecto a un aparato de un peso medio de 17 kg.

Tabla 4.4 Valores resultado de la optimización aplicando cotizaciones ficticias de materiales y sin aplicar restricciones de la directiva RAEE

Precios aplicados		Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre	Otros	Beneficio (€/ u)	Coste tratamiento (€/ u)	% Separación
Precios A	Precio €/ kg	0,10	0,23	2	0,8	1	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	0	1,56	1,6	0,004	0,8	0	3,39	1	23
	% respecto al máximo recuperable	0	24	100	100	100				
Precios B	Precio €/ kg	0,3	0,8	2	0,8	2,5	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	9,5	3,1	1,6	0,004	0,8	0	6,8	3,76	92
	% respecto al máximo recuperable	100	100	100	100	100				
Precios C	Precio €/ kg	0,10	0,55	1,3	2	7	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	0	3,1	1,6	0,04	0,8	0	8,08	1,38	48
	% respecto al máximo recuperable	0	100	100	100	100				
Máx. recuperable (kg / u)		9,5	3,1	1,6	0,04	0,8				

En la Tabla 4.4 hemos utilizado un juego de ensayo para comprobar el comportamiento de la función objetivo en el proceso de optimización, forzando de forma artificial los precios de venta de los materiales obtenidos. En este caso la optimización no aplica las restricciones propuestas en el modelo relacionadas con el porcentaje mínimo de recuperación establecido por la directiva para este tipo de aparatos (75%). Al ir aplicando diferentes cotizaciones de materiales obtenemos resultados en línea con lo previsto en las fases previas de simulación y datos reales obtenidos en la industria o en laboratorio: a medida que la cotización sube (sobre todo en los materiales con más presencia en el aparato), el modelo sugiere una configuración de línea de desmontaje orientada a obtener las máximas cantidades posibles de materiales separados (operaciones mayormente manuales). Se incrementa el beneficio obtenido, pero también el coste del proceso, ya que para lograr un 92% de separación el coste es casi 4 veces superior al caso en que las cotizaciones son bajas. En el caso B se recupera lo máximo posible de cada material y, sin embargo, el beneficio no es el máximo de los tres casos.

Una segunda validación ha consistido en utilizar precios reales de cotización de materiales, con las variaciones sufridas durante el año 2008. Tampoco en este caso hemos tenido en cuenta en el modelo de optimización la aplicación de la directiva. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5. Los materiales han sufrido ligeras variaciones en su cotización, por ejemplo, el plástico y el aluminio han aumentado su precio y el cobre se ha depreciado. Como consecuencia de ello, el modelo propuesto sugiere no separar el vidrio, obtener lo máximo posible del hierro mientras se mantiene un cierto precio, separar el máximo de aluminio y cobre, y el máximo de plástico cuando el precio de venta supere los 0,26 €/ kg. Las soluciones que hemos obtenido abogan por un modelo de línea automatizado, en el cual el coste de tratamiento unitario es bajo y, como consecuencia, el porcentaje de separación también (máximo del 37%). Los datos relativos a cantidades de material son las medias respecto a un aparato de un peso medio de 17 kg.

Tabla 4.5 Valores resultado de la optimización, aplicando precios reales de cotizaciones de materiales pero sin aplicar directiva

Fecha utilizada para el cálculo		Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre	Otros	Beneficio (€/ u)	Coste tratamiento (€/ u)	% Separación
Diciembre 2007	Precio €/ kg	0,13	0,23	0,29	1,64	5,01	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	0	1,56	1,6	0,04	0,8	0	3,89	1	23
	% respecto al máximo recuperable	0	24	100	100	100				
Junio 2008	Precio €/ kg	0,12	0,26	0,4	1,69	4,84	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	0	3,1	1,6	0,04	0,8	0	4	1,38	37
	% respecto al máximo recuperable	0	100	100	100	100				
Octubre 2008	Precio €/ kg	0,10	0,26	0,17	1,69	4,84	0,001			
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	0	3,1	0,06	0,04	0,8	0	3,75	1	23
	% respecto al máximo recuperable	0	100	0	100	100				
Máx. recuperable (kg / u)		9,5	3,1	1,6	0,04	0,8				

Tabla 4.6 Valores resultado de la optimización, aplicando precios reales de sucesivas cotizaciones de materiales y aplicando la directiva

Fecha utilizada para el cálculo		Vidrio	Plástico	Hierro	Aluminio	Cobre	Otros	Beneficio (€/ u)	Coste tratamiento (€/ u)	% Separación	
Diciembre 2007	Precio €/ kg	0,13	0,23	0,29	1,64	5,01	0,001				
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	7,3	2,66	1,6	0,04	0,8	0,5	2,87	3,22	75	
	% respecto al máximo recuperable	77	85	100	100	100					
Junio 2008	Precio €/ kg	0,12	0,26	0,4	1,69	4,84	0,001				
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	7,3	3,1	1,6	0,04	0,8	0,5	2,92	3,33	80	
	% respecto al máximo recuperable	77	100	100	100	100					
Octubre 2008	Precio €/ kg	0,10	0,26	0,17	1,69	4,84	0,001				
	Resultado de la Optimización (kg a recuperar)	7,3	3,1	1,2	0,04	0,8	0,5	2,44	3,23	75	
	% respecto al máximo recuperable	77	100	75	100	100					
Reciclaje Mín. (directiva RAEE) / Máx. recuperable (kg / u)		7,3 — 9,5	2,3 — 3,1	1,2 — 1,6	0,03 — 0,04	0,6 — 0,8					

Si en el proceso de optimización introducimos el factor de influencia del mínimo porcentaje de reciclado obligado por la directiva RAEE (como una restricción en el modelo de cálculo), los resultados (Tabla 4.6) muestran que, al ser obligatorio obtener el mínimo del 75% de reciclado, el modelo ya sugiere tratamientos semi-automatizados (indicándolo por medio del “Coste de Tratamiento”, parámetro que se obtiene como solución). Obviamente el porcentaje de material reciclado es siempre superior al 75%, pero se observa que el modelo propuesto sugiere aumentar este coeficiente hasta el 80% a partir del mes de junio al incrementarse los precios de venta, sobre todo del plástico y hierro (a pesar de que en octubre el beneficio cae al bajar el precio del hierro).

Retomando los valores de la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3, obtenidos en la optimización, utilizamos el coste de tratamiento recomendado, (3,33 € / u), como valor de entrada a la gráfica de la Figura 3.30, obteniendo una propuesta de automatización de la línea del 65-75%. Por lo tanto, la solución sugerida por el modelo consiste en una línea de reciclado semiautomática, enfocando las operaciones más manuales en la recuperación de plástico, aluminio (presentes sobre todo en las carcasas, tarjetas de circuito impreso), cobre (roseta del TRC) y hierro (partes estructurales, fijaciones y banda anti-implosión), ya que estos materiales son los que tienen un mayor objetivo de recuperación según el modelo. Por el contrario, el vidrio se recupera de forma más automatizada al tener unas cantidades objetivo menores. Este material se encuentra exclusivamente en el TRC, por lo que hemos diseñado una célula semi-automatizada para su tratamiento en particular.

Además, existen otras razones por las cuales hemos seleccionado el reciclaje del vidrio:

- Los tubos de rayos catódicos están considerados como componentes tóxicos debido al contenido de plomo del vidrio.

- El vidrio obtenido del reciclaje de los tubos de rayos catódicos cubre dos vertientes: se recicla para obtener los mismos o parecidos productos o, por el contrario, se utiliza en muy diferentes aplicaciones.
- La separación del vidrio (cono y pantalla) presenta dificultades técnicas, pero este requisito es imprescindible para su posterior reutilización.

Como ejemplo de operación de reciclado de los materiales con un mayor objetivo de recuperación presentamos la recuperación de algunos componentes activos que se pueden encontrar en las tarjetas de circuitos impresos. Las tarjetas provenientes de rechazos de fabricación o de su fin de vida pueden contener componentes electrónicos potencialmente reutilizables de alto valor, así como componentes tóxicos que deben ser retirados y tratados convenientemente.

En las siguientes secciones se explican las diferentes estaciones de tratamiento que configuran la línea.

4.3 Configuración de la línea de reciclado

La Figura 4.4 muestra la configuración de estaciones de la línea de tratamiento que proponemos según los parámetros obtenidos del proceso de optimización. Como se ha comentado anteriormente, esta línea de reciclado se ha implantado, con ciertas adaptaciones, al proceso de reciclado de televisores y monitores de una empresa recicladora de aparatos electrónicos. La descripción de los diferentes puestos de esta línea se realiza en los apartados 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3. La sección 4.3.4 “Desmontaje de PCB” explica esta fase del reciclado de las tarjetas, mostrando el sistema propuesto e instalado en una empresa de fabricación de tarjetas de circuitos impresos.

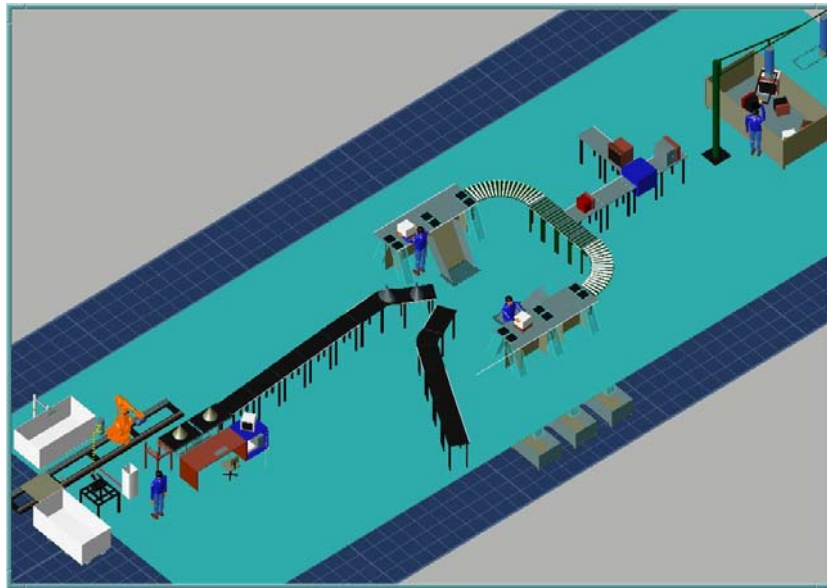


Figura 4.4 Vista general de la instalación

Los televisores (se incluyen los monitores bajo este término) se almacenan en contenedores en el almacén de entrada. El tamaño de los contenedores utilizado en el lay-out es de 1.800 x 3.300 x 1.000 mm, en el cual se pueden almacenar unos 30 aparatos de tamaño medio.

4.3.1 Entrada de aparatos e identificación

Estos contenedores se llevan al comienzo de la línea de desensamblado por medio de una transpaleta elevadora. Se depositan los contenedores en el área de trabajo de un manipulador de 3 ejes (giro, elevación y traslación a lo largo del brazo horizontal), que es accionado manualmente por un operario. Este manipulador está provisto de un accionamiento tipo ventosa para sujetar los televisores, y llevarlos a una cinta transportadora que es la entrada a la primera estación de la línea. (Ver Figura 4.5).

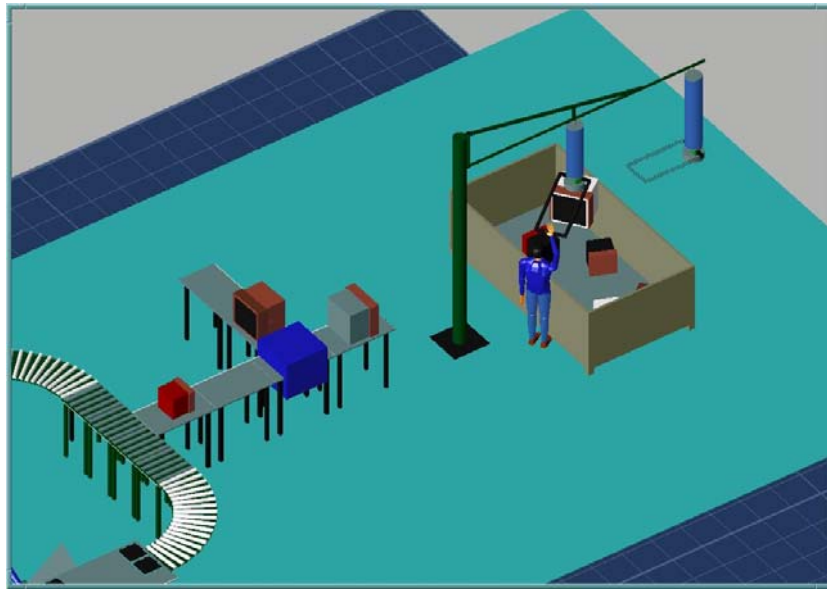


Figura 4.5 Área de entrada e identificación

En esta zona se sitúa un operario encargado de:

- accionar el manipulador para surtir de televisores a la entrada de la estación de identificación.
- llevar a un contenedor los aparatos susceptibles de recuperación o venta.
- renovación periódica de los contenedores de entrada y de los contenedores que se van llenando con los componentes obtenidos de la separación en las diversas fases.

La salida de esta primera estación (por donde se dirigirán los televisores más habitualmente) será la cinta de transporte que conduce a las estaciones propias de desensamblado. Bajo estas estaciones se encuentran los contenedores, a nivel -1 respecto a la línea de desensamblado, con el propósito de aprovechar la gravedad para las tareas posteriores de clasificación y reenvío de componentes ya separados. (Ver Figura 4.6).

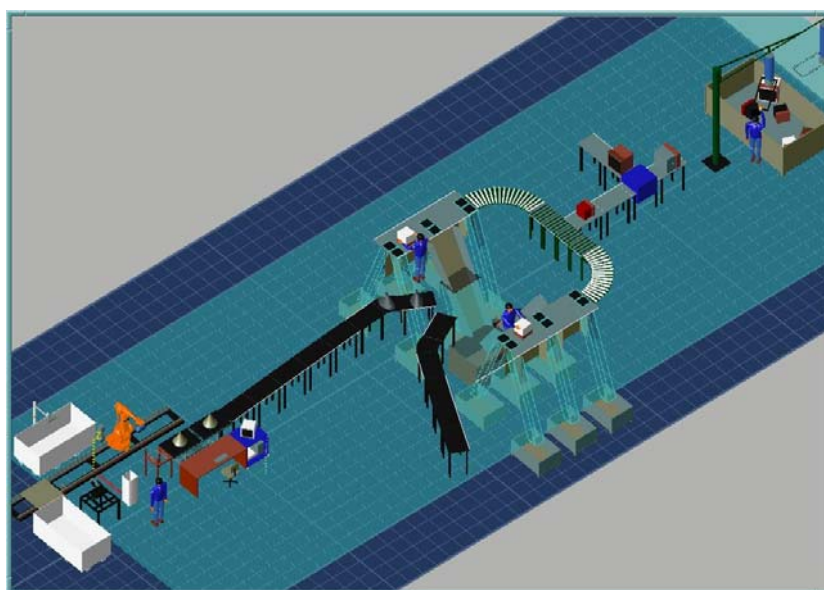


Figura 4.6 Línea de reciclado mostrando los dos niveles

4.3.2 Estaciones de desensamblado

En el nivel 0 se encuentran los dos puestos de desmontaje situados de forma simétrica. Los aparatos van llegando por la cinta de transporte hasta un punto de recogida, donde se realiza el desmontaje inicial del televisor correspondiente. Las estaciones están atendidas por dos operarios y están dotadas de herramientas manuales y semiautomáticas de separación y corte. Los diferentes componentes que se obtienen de la separación se envían a:

- a) Diferentes contenedores (tamaño orientativo de 1.200 x 1.650 x 900 mm), situados en el nivel -1 y debajo de la zona de desensamblado, a donde llegan por gravedad gracias a un conjunto de rampas. El tamaño de las rampas es el adecuado al elemento que se envía por ellas. Los componentes así almacenados son: PCB (que posteriormente pasan a una línea de tratamiento específico), metales y cables, materiales orgánicos, RTP y también las carcasas compuestas de plásticos con aditivos prohibidos o madera. (Ver Figura 4.7).



Figura 4.7 Estaciones de desensamblado manual de carcasas y elementos interiores

- b) Línea de tratamiento manual de carcasas de plástico recuperables.
- c) Línea semi-automatizada de separación de TRC: se reenvían los TRC susceptibles de ser separados en las dos partes de cono y pantalla.

4.3.3 Separación del TRC

De forma detallada en la Figura 4.8 se muestra la secuencia específica de separación de componentes del TRC: rotura de vacío del TRC, se identifica la presencia de plomo en la pantalla, dependiendo de esta condición sólo si la pantalla no contiene plomo se procede a separarla del cono para aprovechar mejor los dos tipos de vidrio, por lo que se dirige a la fase de separación de éstos. Al finalizar esta operación se obtiene vidrio de pantalla, vidrio de plomo y una mezcla de materiales (metales y vidrios).

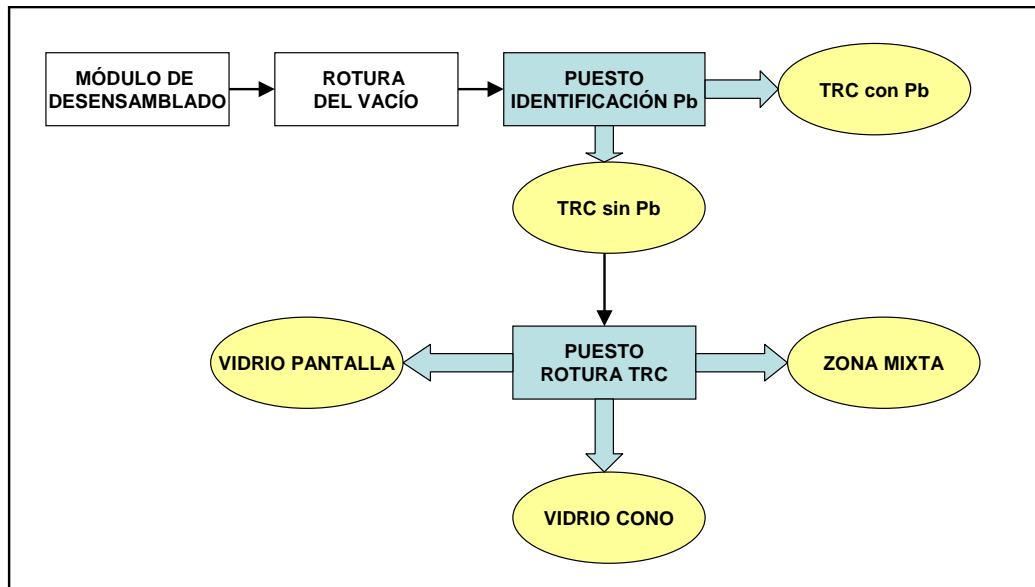


Figura 4.8 Diagrama de bloques del proceso de desensamblado de TRC

La línea de conexión entre la fase de desensamblado y la separación de vidrios tiene unos 6 m de largo para que sirva como almacén de entrada a la estación de separación (ver Figura 4.9).

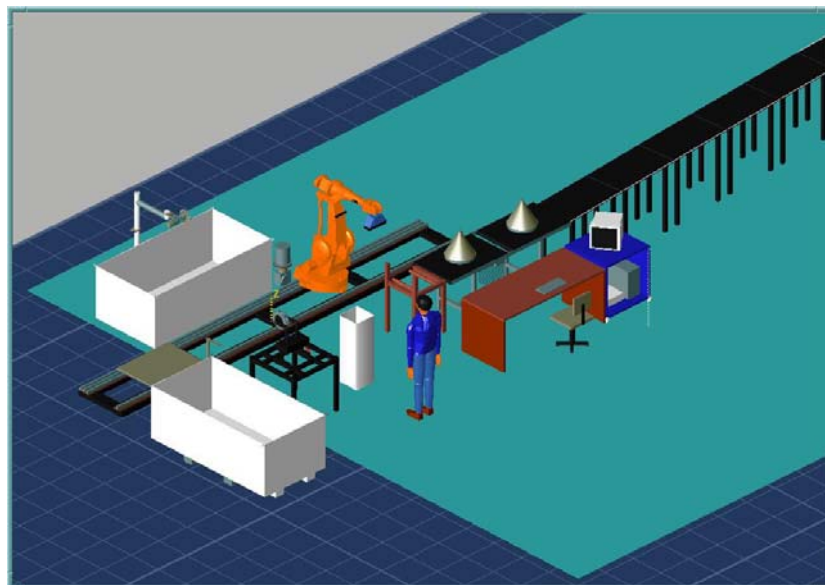


Figura 4.9 Envío de TRC a la fase de separación de vidrios

En esta fase de separación de vidrios hay que tener en cuenta las especificaciones en cuanto al contenido en plomo del vidrio emitidas por el fabricante con el objeto de clasificar los TRC.

Las operaciones de separación de los distintos tipos de vidrio presentes en el TRC se llevan a cabo en una célula semi-automatizada (Figura 4.10). Los estudios de las posibles disposiciones en planta, utilizando técnicas de simulación, dan como resultado final la distribución de estaciones mostrada en la célula. Dicha célula está formada por una cinta transportadora, estación de identificación de plomo en vidrio, robot de manipulación (situado sobre un eje lineal externo para aumentar su área de trabajo), estaciones de separación de vidrio y contenedores para clasificación de vidrio. La célula de separación de vidrios del TRC está atendida por un operario.

Hemos montado esta célula en el laboratorio de Robotiker para las tareas de pruebas de programación, puesta a punto y análisis de resultados. Posteriormente ha sido integrada en la instalación de la empresa recicladora, junto a las estaciones de separación descritas anteriormente, las cuales, al ser manuales, eran de resultados conocidos y no ha sido necesario simularlas.

Los TRC pasan a esta estación mediante una cinta transportadora provenientes de los contenedores de almacenamiento. Aproximadamente en la mitad de recorrido de la cinta transportadora hay un sistema de identificación mediante rayos-X. Este sistema clasifica los TRC según si tienen o no contenido en plomo en el vidrio de pantalla. Si ambas partes del TRC, cono y pantalla, contienen plomo, no se sigue con el proceso de separación de vidrios, el TRC va directamente a la fase de rotura de vidrio. En caso contrario es necesario separar la parte de vidrio de cono del vidrio de pantalla.

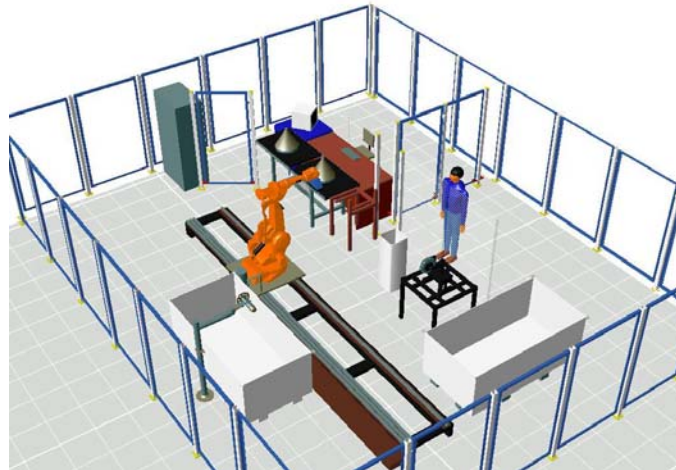


Figura 4.10 Simulación de la célula de desensamblado de TRC y obtención de vidrios

Hemos utilizado el software de simulación Robcad con el objetivo de ejecutar las operaciones virtuales en la célula, detectar posibles fallos en el diseño y optimizar la distribución de máquinas, estaciones automatizadas, operarios, etc. Una vez finalizado el análisis de la versión virtual el diseño se traslada al mundo real de la instalación de reciclado (Figura 4.11).



Figura 4.11 Vista general de la célula de desensamblado de TRC y obtención de vidrios

La secuencia de operaciones en la célula comienza introduciendo los TRC mediante una cinta transportadora, apoyados por la parte de la pantalla. La primera tarea consiste en identificar la presencia de plomo en la parte de pantalla del TRC mediante el uso de un sistema de rayos X, tal como se ha explicado anteriormente. El resultado de este análisis determina el siguiente tratamiento para el TRC, sólo en el caso de que la pantalla no contenga plomo se continuará con las siguientes fases de separación, enviando las señales adecuadas al robot y diferentes máquinas.

El robot utiliza una garra de vacío (Figura 4.12) para manipular el TRC, sujetándolo por la pantalla, y llevarlo a las diferentes estaciones. La garra dispone de varios orificios sobre una placa de espuma, este diseño de garra permite al robot coger por la parte de la pantalla diferentes tamaños y curvaturas de TRC (dentro de un rango determinado), lo que aumenta la flexibilidad de la instalación.

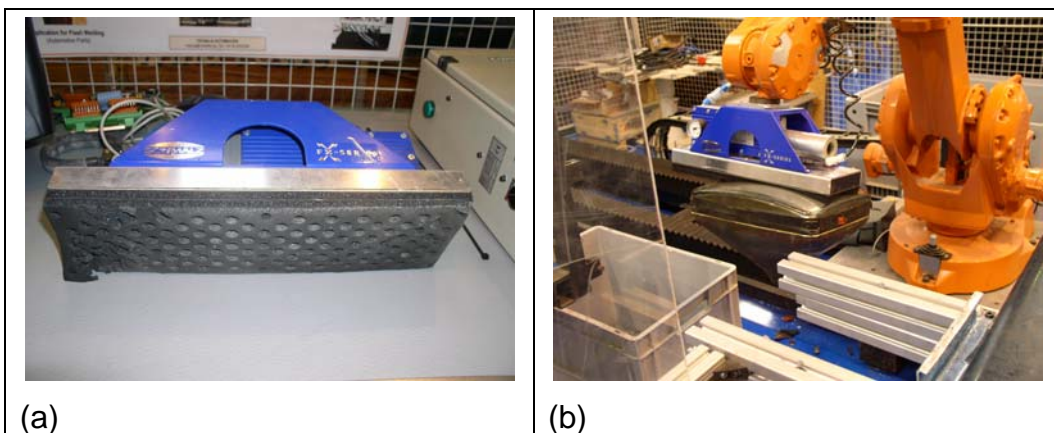


Figura 4.12 (a) Garra de vacío para manipulación de TRC. (b) Robot manipulando TRC

El robot lleva el TRC a la siguiente estación donde se produce la separación del cono y la pantalla. La Figura 4.13 muestra la posición del brazo del robot cogiendo el TRC por la pantalla, que se orienta hacia abajo ya que el TRC llega apoyado sobre ella.

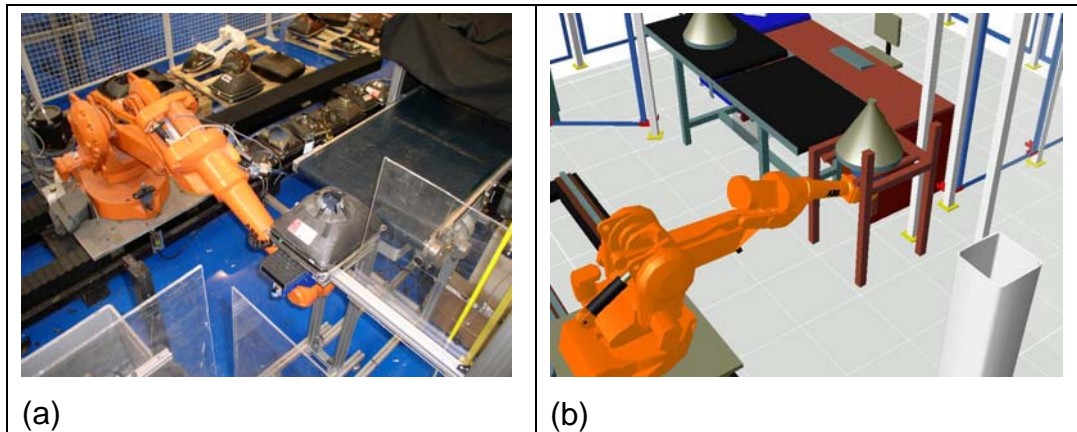


Figura 4.13 (a) Robot cogiendo el TRC por la pantalla. (b) Simulación de la misma operación

Esta separación de diferentes vidrios se hace por método mecánico. Una opción es utilizando una sierra circular estática (como se ve en la imagen de la simulación en la Figura 4.14), en la cual el robot va realizando la trayectoria de corte sobre la zona de unión de cono y pantalla del TRC.

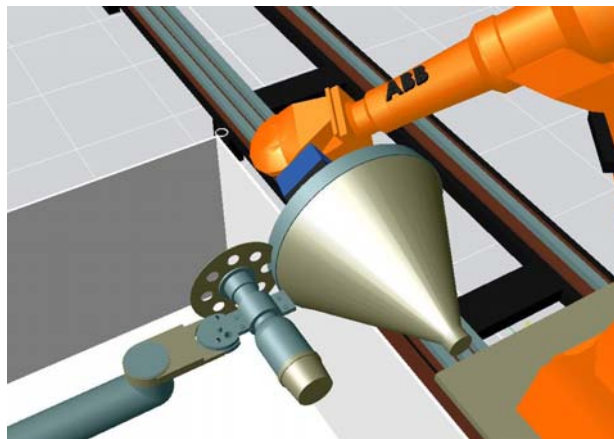


Figura 4.14 Simulación de operación de corte con sierra circular

Otro método consiste en utilizar dos cizallas neumáticas de impacto que inciden sobre dos caras paralelas del lateral del TRC, después el robot gira el TRC noventa grados y se repite la operación (Figura 4.15). En ambos casos el cono fragmentado, separado ya de la pantalla, cae por gravedad en un contenedor situado debajo de esta estación de separación.

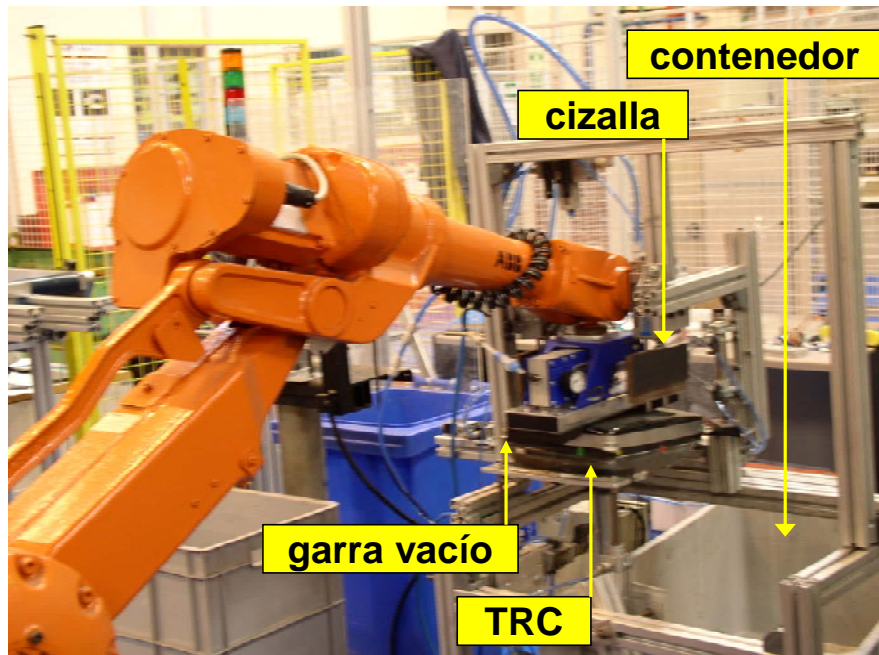


Figura 4.15 Separación mediante cizallas neumáticas

A continuación el robot se desplaza a la siguiente estación (Figura 4.16), donde se realiza una operación similar a la anterior pero esta vez se ejecuta la separación de la zona mixta (frita, metal de la banda anti-implosión y malla interna, silicona) del TRC, que cae a otro contenedor (Figura 4.17).



Figura 4.16 (izquierda) Estación de extracción de fracción mixta

Figura 4.17 (arriba) Fracción de material mixto

Queda únicamente la pantalla limpia sujeta por el robot, el cual la deposita en un tercer contenedor (Figura 4.18).



Figura 4.18 Contenedor para vidrio de pantalla limpio

Después de realizar la limpieza de los fragmentos separados de vidrio de cono y pantalla, por medio de un cepillado y aspiración, éstos se almacenan en contenedores no metálicos que cumplen los requisitos necesarios para no contaminar el vidrio.

Hemos llevado a cabo la programación completa de la célula (robots, PLC e intercomunicación entre máquinas) en el entorno de simulación con las opciones disponibles en Robcad. Después de su correcto funcionamiento en el modelo virtual hemos volcado el programa al lenguaje nativo de los diferentes sistemas de la instalación real.

4.3.4 Desmontaje de PCB

En el caso del reciclaje de tarjetas de circuitos impresos (PCB), hemos aplicado el método propuesto con el objeto de obtener los componentes electrónicos de valor. También se puede aplicar a la extracción de componentes potencialmente peligrosos presentes en PCB. En este caso, siguiendo los resultados del proceso de optimización, el diseño se ha

enfocado a una estación con bajo nivel de automatización, asistida por operarios (Figura 4.19).

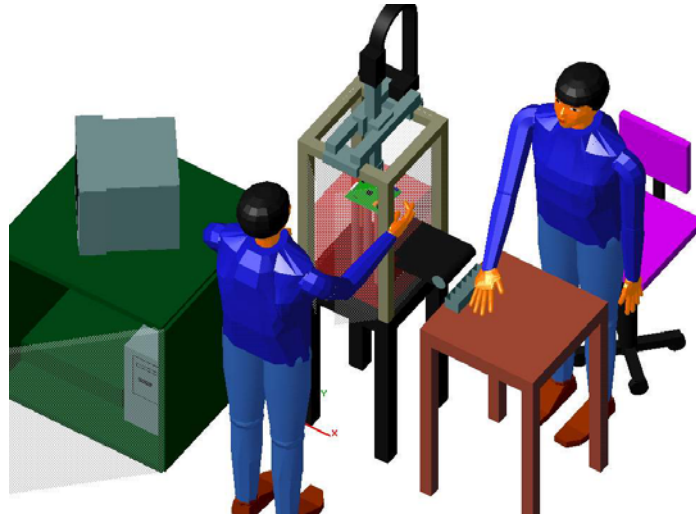


Figura 4.19 Vista general de la estación de desensamblado de PCB

Hemos seleccionado las familias de componentes que resultan de interés, dentro de un tipo de placas denominadas CPU-K265, principalmente porque el coste de los posibles componentes a reutilizar justifica la viabilidad económica de su recuperación. Dentro de esta familia de placas se han seleccionado los siguientes componentes tanto tóxicos como no tóxicos para reutilización:

1. Batería
2. Memoria FLASH
3. Micro
4. RAM bajo consumo
5. Conector plano macho 26V
6. Conector plano macho 16V
7. Set de resistencias
8. Transistor BDX (2)
9. Transistor MOSFET
10. Zumbador

En la Figura 4.20 se muestra la distribución de los componentes seleccionados sobre la placa de circuito impreso de la tarjeta CPU-K265.

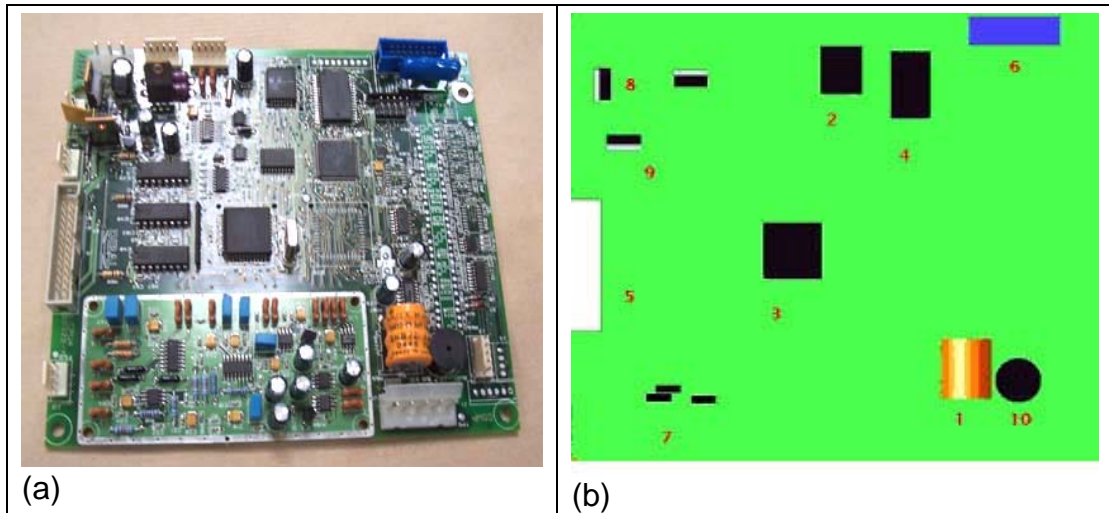


Figura 4.20 (a) Tarjeta CPU-K265. (b) Identificación de los componentes a reciclar en el modelo virtual

La técnica aplicada para el desoldado / desensamblado de componentes ha sido el chorro de aire caliente. El equipo necesario consta de una unidad generadora de aire caliente, boquilla difusora y extractores de vacío para recuperar el componente desoldado (componentes de montaje superficial). El proceso básico de desoldado de un componente de montaje superficial consiste en fijar el extractor de vacío sobre el componente, aplicar un flujo de aire caliente sobre las conexiones soldadas y retirar automáticamente el componente desoldado mediante vacío.

Estas operaciones deben ser realizadas de forma sincronizada y con tiempos específicos para lograr un correcto desoldado de los pines y conseguir una extracción limpia del componente. La Figura 4.21 muestra el procedimiento de desoldado ensayado para un componente de montaje superficial.

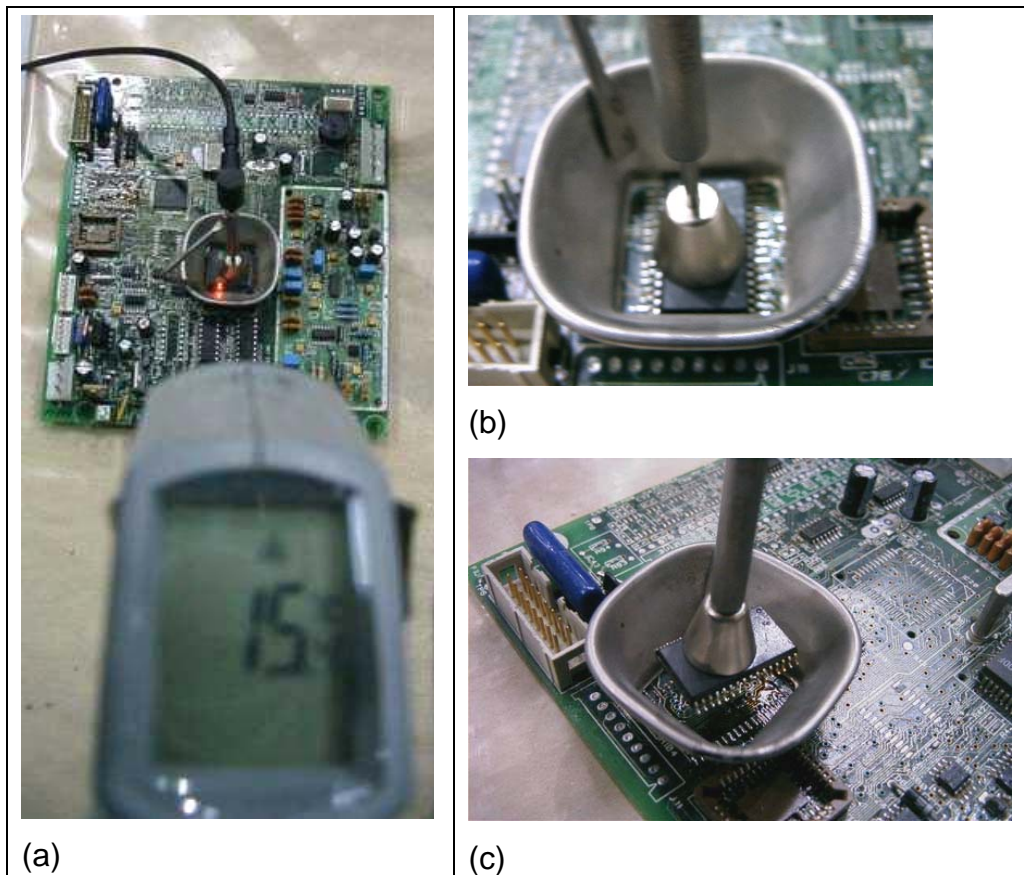


Figura 4.21 Desoldado de componentes de PCB con chorro de aire caliente.
(a) Aparato desoldador. (b) Aplicación aire caliente. (c) Extracción componente

Tanto la boquilla difusora como el extractor de vacío deben ser de las dimensiones adecuadas, adaptados al tamaño del componente. Con los resultados obtenidos en la etapa inicial de análisis previo para el desoldado y la manipulación abordamos ahora la tarea del diseño de la línea de tratamiento, simulación y desarrollo de las estaciones de desensamblado de tarjetas. En este caso hemos desarrollado primero una célula prototipo en el laboratorio, cuyo modelo para simulación, realizado con el programa Robcad, se muestra en la Figura 4.22.

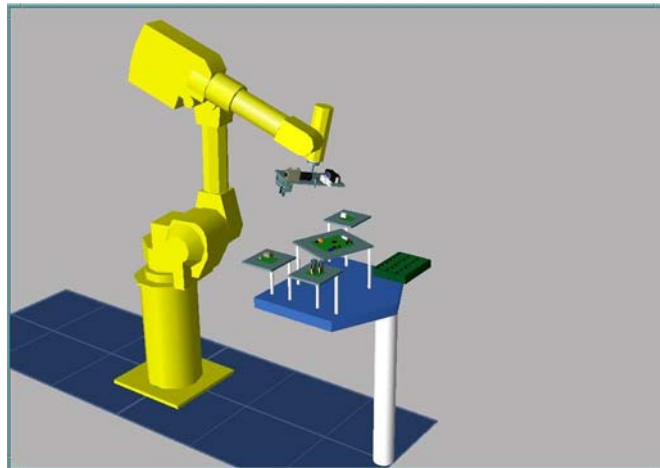


Figura 4.22 Modelo en 3D del prototipo de estación para desensamblado de PCB

Los primeros pasos han consistido en la simulación del funcionamiento de la célula robotizada de tratamiento, chequeando diferentes parámetros que han posibilitado un diseño optimizado de la misma. Hemos verificado, entre otros, alcances libres de colisiones del manipulador, tiempos de ciclo (Figura 4.23) y diseño óptimo de la herramienta de manipulación. De esta manera hemos validado previamente el diseño final de todo el sistema.

Con los datos obtenidos de la simulación hemos construido un primer prototipo de funcionamiento real, compuesto por un robot de 6 ejes encargado de manipular el sistema de desoldado y la garra de extracción de componentes. El objetivo ha sido chequear el correcto funcionamiento de la secuencia de extracción, debido a que ciertas operaciones, como el correcto desoldado, no se pueden comprobar mediante la simulación. Además, hemos implementado este prototipo en el laboratorio de Robotiker con el objetivo de realizar las pruebas reales.

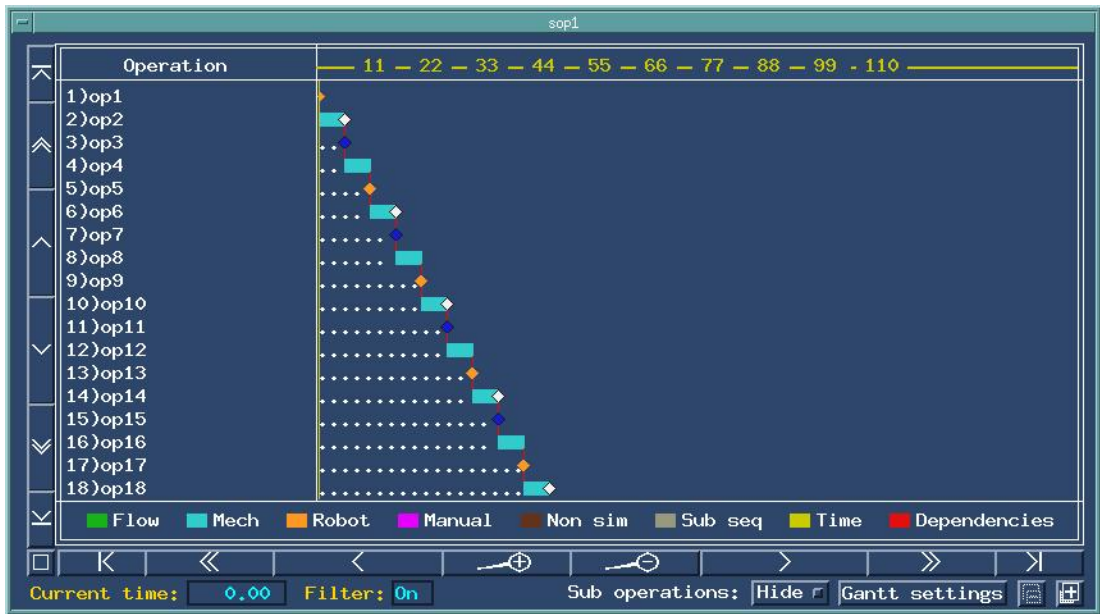


Figura 4.23 Cronograma con tiempos de ciclo de las operaciones de extracción de componentes en PCB

Esta estación de desensamblado consta, además de las tarjetas electrónicas sobre las que se opera, de cuatro subsistemas principalmente. La integración de estos cuatro subsistemas, cada uno de ellos con una funcionalidad independiente claramente definida, conforma el sistema prototipo de desensamblado de tarjetas de circuitos impresos. La Figura 4.24 muestra los cuatro subsistemas:

- Subsistema manipulador.
- Subsistema desoldador.
- Subsistema herramienta.
- Subsistema con útiles de fijación.

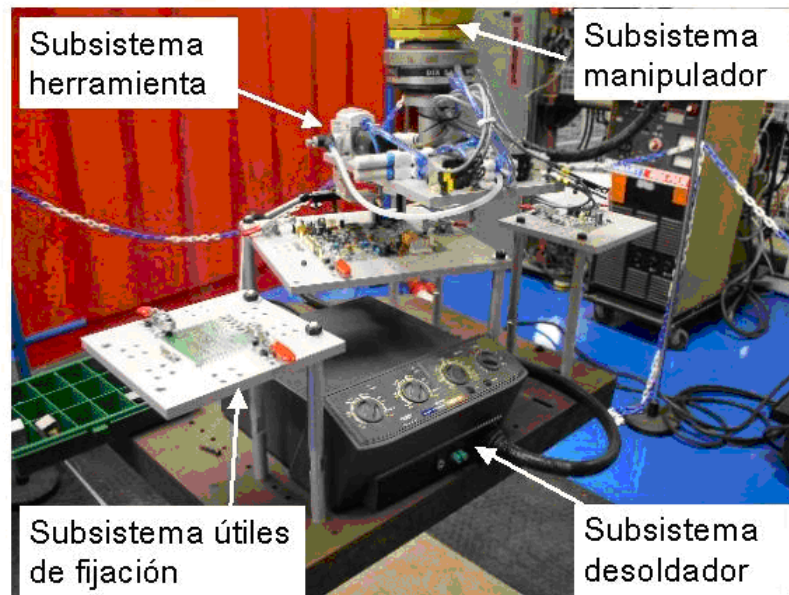


Figura 4.24 Subsistemas de la estación de PCB

A continuación se detalla el diseño de estos subsistemas:

Subsistema manipulador

El diseño del subsistema manipulador se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes características:

- Movimientos y giros en 3D necesarios para la manipulación y posicionamiento requerido.
- Presión de posición de 0.5 mm necesaria para posicionamiento preciso. La precisión en trayectoria no tiene requisitos específicos siempre y cuando su orden de magnitud no difiera del de la precisión en posición.
- La repetibilidad en posición debe ser tal que la suma del error de precisión y de repetibilidad en posición permanezca en el entorno de 0.5 mm.

- El alcance requerido para el sistema de manipulación debe permitir el acceso a todos los componentes de la mayor de las placas requeridas para las pruebas. En este caso se ha requerido un alcance de 250 x 250 mm para las placas, además de un alcance mayor para el sistema de depósito y clasificación de componentes.
- Se requiere un sistema flexible para poder generar programas para cada tipo de placa sobre la que se quiere trabajar, para posteriormente seleccionar el modelo deseado desde la unidad de control.

Para cumplir estos requisitos hemos seleccionado un sistema robotizado de seis grados de libertad y 10 kg de capacidad de carga que cumple las exigencias especificados para la manipulación (Figura 4.25). Consideramos apto este sistema para las tareas de desarrollo del prototipo por sus características de accesibilidad a las posiciones de interés y facilidad de programación. Para la fase posterior de industrialización de la instalación propuesta hemos construido un sistema de manipulación más sencillo que el indicado, pudiendo prescindir de algunas de las prestaciones que ofrece el sistema utilizado en la fase de prototipo.

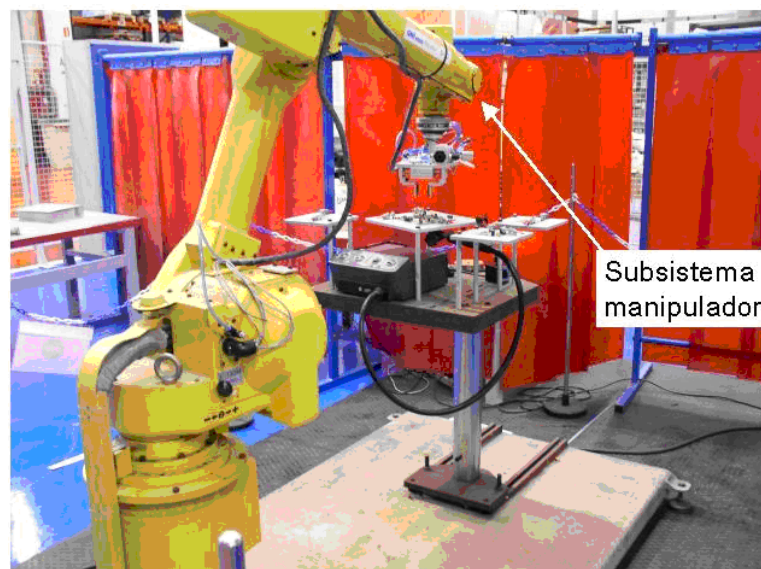


Figura 4.25 Detalle del subsistema manipulador

Subsistema desoldador

Tras la realización de las pruebas de desoldado en la instalación prototipo hemos seleccionado el sistema por aire caliente como el más idóneo para el desarrollo del demostrador (Figura 4.26). Las pruebas de desoldado realizadas con varias fuentes de calor determinan a este sistema como el que tiene mayor grado de reproducibilidad y repetibilidad, así como el más controlable. Sobre el efector final del sistema de aire caliente para desoldado se debe colocar una boquilla que distribuya convenientemente el aire caliente sobre la zona que se desea fundir.

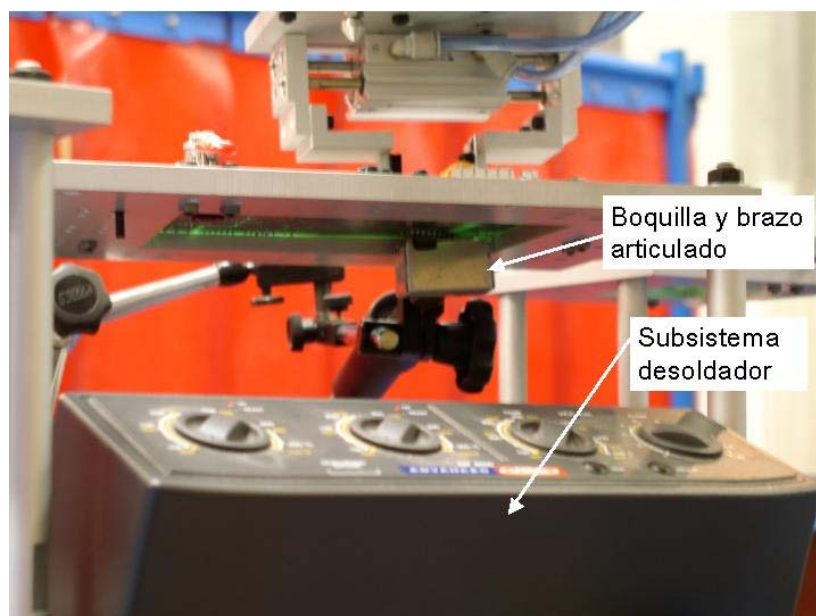


Figura 4.26 Detalle del subsistema desoldador

Subsistema herramienta

Para la manipulación y actuación sobre las tarjetas de circuitos impresos hemos diseñado y desarrollado una herramienta específica (Figura 4.27). Esta herramienta consta de tres subconjuntos fundamentales: el adaptador (que posibilita el amarre de este sistema herramienta en cualquier otro sistema manipulador), la placa base (sobre la que se colocan y distribuyen

convenientemente todos los elementos) y los periféricos (como pueden ser los actuadores, elementos de control o generadores de vacío entre otros).

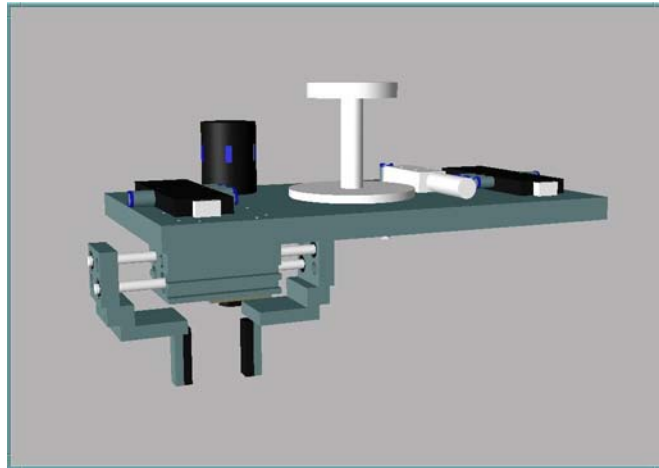


Figura 4.27 Modelo 3D de la herramienta de manipulación de componentes

Esta herramienta tiene las siguientes características:

- Adaptador intercambiable para poder utilizarla con diferentes sistemas manipuladores.
- Sistema compacto que incluye los actuadores, elementos de control, generadores de vacío y herramientas.
- Sistema modular que permite intercambiar o trabajar de manera autónoma con subconjuntos del sistema herramienta de forma independiente.
- Actuación mediante sistemas neumáticos accionados por aire presurizado.
- Generación de vacío por efecto Venturi mediante eyectores con sistema silenciador.
- Sistema de herramienta mediante pinza neumática con dedos intercambiables para control de cierre/apertura.

- Sistema de herramienta mediante ventosa para componentes superficiales.
- Sistema de herramienta mediante útil curvado para resistores.

La Figura 4.28 muestra el subsistema herramienta colocado en el brazo del robot.

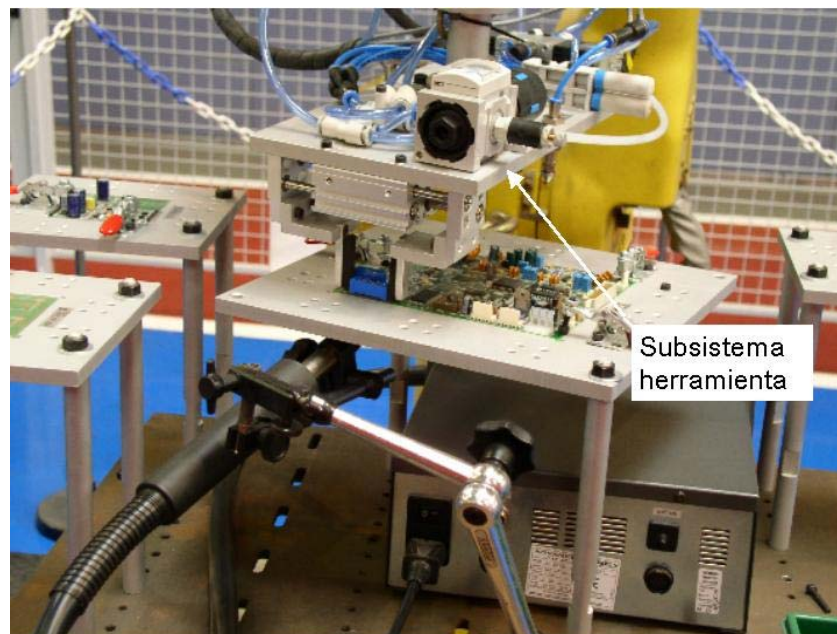


Figura 4.28 Detalle del subsistema herramienta

Subsistema con útiles de fijación

Como última fase del desarrollo del prototipo hemos diseñado y desarrollado todo el utillaje que ha permitido el correcto posicionado y fijación de las placas sobre las que realizar las pruebas (Figura 4.29). Las características de este sistema de útiles de fijación son:

- Marco perforado para la colocación de pisadores que fijen la placa al útil y permitan un cambio rápido de la misma.
- El material seleccionado para la fabricación de los útiles ha sido aluminio, que proporciona la estructura requerida y la rigidez

necesarias para soportar las placas. Así mismo disipa el calor generado por el sistema desoldador.

- Mediante un sistema de soportes intercambiables se deja espacio suficiente en la parte inferior de las placas para poder acceder a las mismas y aplicar calor para el desoldado.
- La “ventana” que dejan estos útiles permite igualmente acceder al espacio inferior de los mismos para aplicar calor sobre la placa sin dañar el útil.

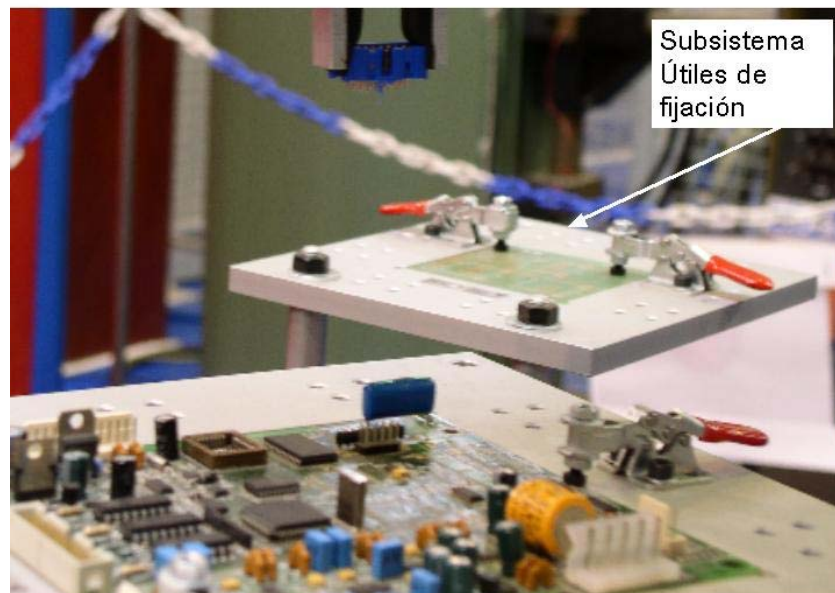


Figura 4.29 Detalle del subsistema con útiles de fijación

A partir de los resultados experimentales del prototipo, que han servido para determinar los parámetros óptimos del sistema, hemos propuesto la versión industrial de la instalación. El robot de 6 grados de libertad se ha sustituido por un brazo manipulador, de configuración cartesiana, de 4 grados de libertad, suficientes para realizar las operaciones de posicionado y manipulación. La Figura 4.30 muestra la estación de desensamblado en su fase de simulación y la implantación real se observa en la Figura 4.31.

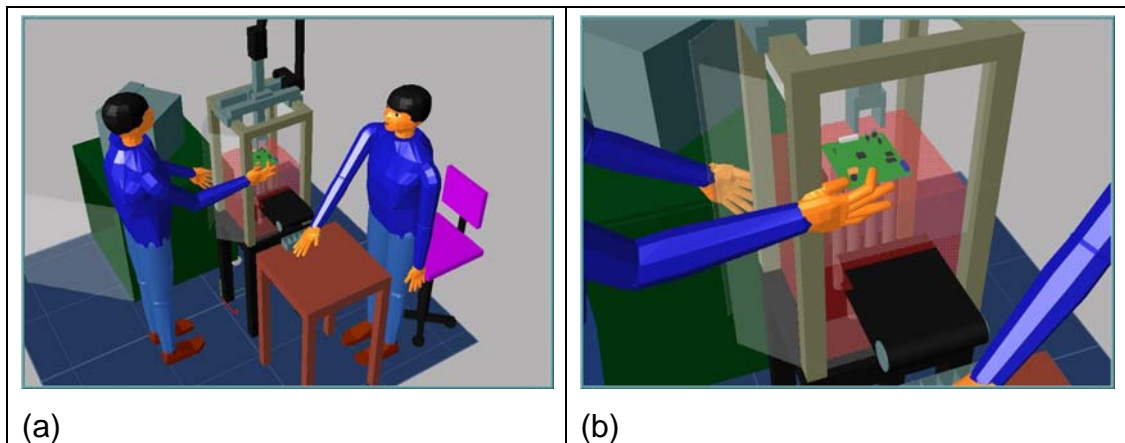


Figura 4.30 Vista general (a) y detalle (b) de la simulación de la instalación industrial

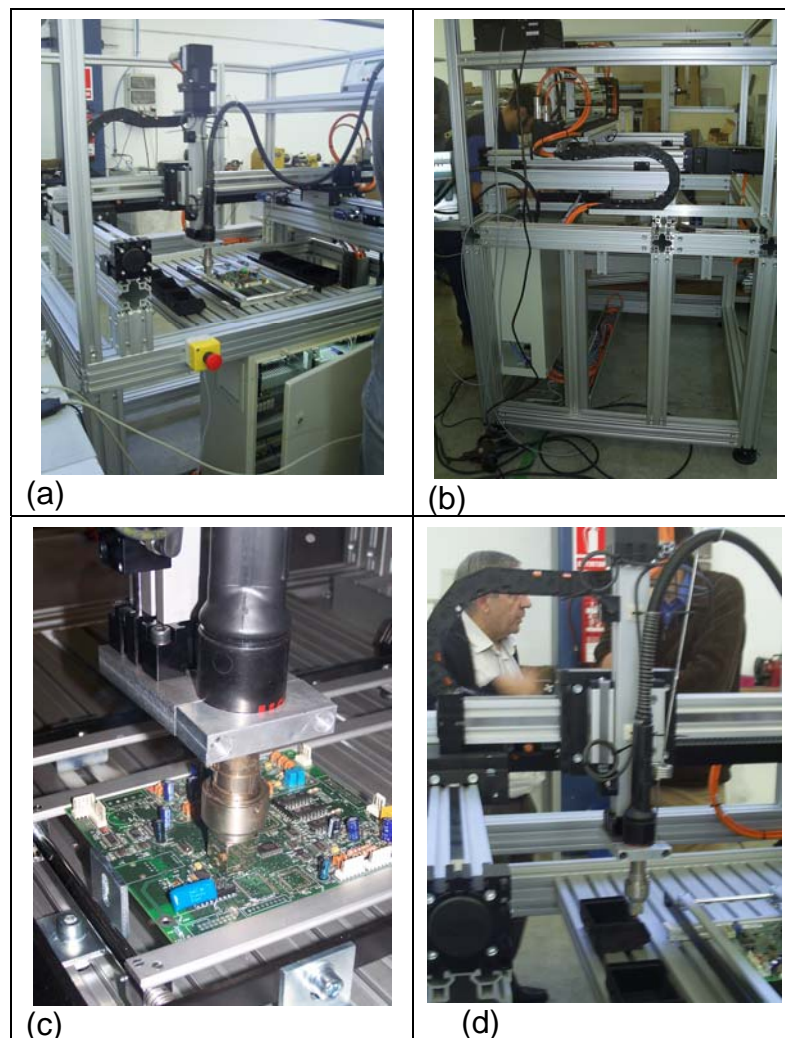


Figura 4.31 Imágenes de la instalación industrial: (a) Vista general del manipulador, (b) Vista lateral, (c) Detalle del cabezal, (d) Vista de los tres ejes de movimiento

5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección analizamos los resultados obtenidos en las implantaciones prácticas del modelo propuesto en esta tesis. Estas tareas de evaluación y análisis es el método propuesto se corresponden con las fases de “*observación*” y “*reflexión*” de la metodología de investigación-acción. También se aplican técnicas cuantitativas ya que se van a recopilar los datos del proceso. Hemos aplicado los siguientes criterios de validación del modelo propuesto:

- Evaluación técnica de la solución sugerida por el modelo, estudiando los parámetros del proceso y también algunos elementos de la instalación susceptibles de mejora. La reutilización de materiales y componentes obtenidos en el proceso de separación y reciclado se centra en el caso práctico de la recuperación del vidrio y su aprovechamiento como materia prima por una empresa manufacturera.
- Análisis económicos de la implantación, estudiando diversos índices económicos obtenidos con los resultados de productividad y costes de funcionamiento de la línea de reciclado.
- Análisis de su impacto medioambiental, revisando las consecuencias que el propio proceso de reciclado sugerido tiene para el entorno de la planta de tratamiento.

5.1 Evaluación técnica

La evaluación técnica de la solución de reciclado sugerida por el modelo cubre dos aspectos:

- Análisis de los tiempos de ciclo del proceso, materiales obtenidos en la línea de reciclado y análisis técnico de los elementos de la instalación.
- Evaluación de las posibilidades de reutilización en ciclo abierto del vidrio obtenido, es decir, en aplicaciones diferentes de la fabricación de nuevos TRC.

5.1.1 Evaluación de la línea propuesta

Hemos centrado la evaluación técnica principalmente en el proceso semi-automático para el tratamiento de los TRC. Para ello, hemos realizado las pruebas para evaluar por medio de la simulación el comportamiento de la estación de reciclado del TRC. En este proceso iterativo de simulación de la línea propuesta se han optimizado los tiempos de ciclo (Figura 5.1) a través de cuatro vías:

- Reduciendo las esperas y tiempos muertos entre el robot, operario y estaciones automáticas. Para ello, hemos optimizado y ajustado la sincronización entre los elementos de producción (manuales y automáticos), reordenando ligeramente la secuencia de operaciones en detalle en aquellas fases del desensamblado donde se ha detectado una falta de sincronización.
- Optimizando la trayectoria del robot, tanto en los puntos de paso y operación, como en relación al tipo de movimiento del brazo del robot

(lineal o punto a punto), con el objeto de disminuir el recorrido a realizar y aumentar la velocidad.

- Modificando ligeramente el diseño de la distribución en planta, acercando, cuando ha sido posible, los elementos de la línea para disminuir tiempos de transporte y variando su orientación cuando se han encontrado problemas de accesibilidad (para el caso de robot y máquinas automáticas).
- Probando métodos de separación de los dos tipos de vidrio tanto con cizalla, como con sierra circular.

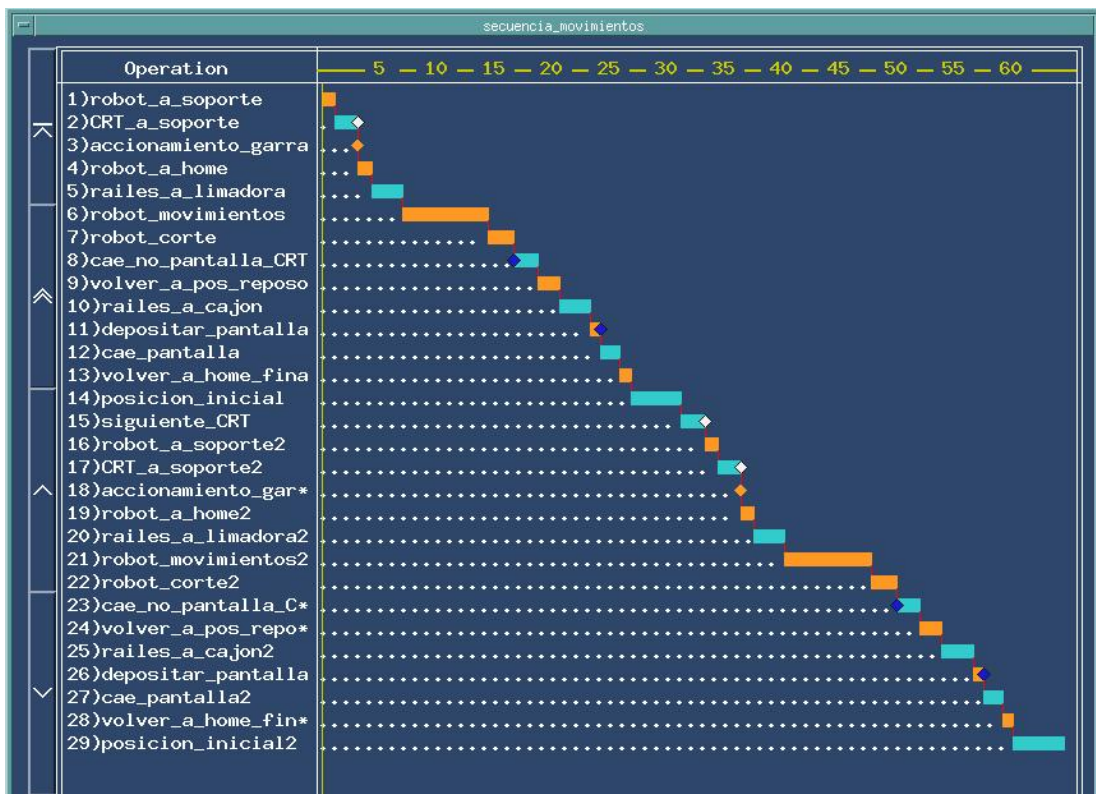


Figura 5.1 Cronograma con la secuencia y tiempos de operación correspondientes al desmontaje del TRC

Posteriormente hemos puesto en producción la célula y tras sucesivas pruebas con televisores y monitores hemos obtenido los siguientes resultados:

- Tiempo de ciclo: 1´20" por TRC.
- Pesos medios de materiales recuperados por aparato tratado:
 - Vidrio de pantalla recuperado: 5,39 kg / u.
 - Vidrio de cono recuperado: 2,5 kg / u.
 - Hierro recuperado: 1,4 kg / u.
 - Mixto metal-vidrio recuperado: 0,45 kg / u.
- Respecto al peso medio total de un aparato (televisor o monitor), el peso de los materiales recuperados representa el 81,75%.
- En cuanto al personal, un operario atiende la instalación de reciclado de TRC, que trabaja de manera semi-automática. Otros tres operarios están en las estaciones previas de desmontaje inicial. Se trabaja a un turno, estimándose una producción anual de 50.000 aparatos tratados.
- Hemos detectado un problema con la garra de sujeción por vacío por el prematuro desgaste de la espuma que recubre los orificios de aspiración, debido a roces con las piezas.

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. Los datos detallados se muestran en la sección 5.2 "Evaluación económica".

5.1.2 Evaluación técnica de la reutilización del material recuperado

Los mercados secundarios identificados para los cuales los diversos materiales recuperados en la línea de tratamiento de televisores y monitores satisfacen los requisitos solicitados son:

- Vidrio de cono sin recubrimientos: nuevos TRC.
- Vidrio de pantalla sin recubrimientos: nuevos TRC.
- Vidrio mixto, TRC completos: fundente en metalurgia.
- Plásticos mayoritarios en carcasas, sin aditivos prohibidos: reciclado mecánico.
- Rechazos plásticos (carcasas minoritarias, con aditivos prohibidos...): recuperación energética en cementera.
- Madera de carcasas: reciclado.
- Metales (Fe, Cu, Al...): metalurgia.
- Componentes electrónicos de valor en tarjetas de circuitos impresos: reutilización parcial para tarjetas de otros dispositivos.
- Residuos tóxicos (baterías, condensadores, pilas, recubrimientos de vidrios del TRC): gestor autorizado.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos correspondientes a los RAEE valorizados generados en la línea de reciclado propuesta por el modelo.

Adicionalmente hemos llevado a cabo un análisis de mercado centrado en el vidrio recuperado de los TRC, al ser éste el material obtenido en mayor cantidad actualmente en el proceso de tratamiento de los tubos de rayos catódicos.

Tabla 5.1 Resumen de RAEE valorizados generados

Residuos	Cantidad (kg / Tm tratada)	Destino
Plásticos no reciclables	97,9	Valorización energética
Compuestos orgánicos (gomas, siliconas...)	Minoritario (<1)	Valorización energética
Plásticos reciclables	85,2	Reciclado
Materiales de TRC con alto contenido en plomo y otros materiales metálicos asociados al TRC	305,4	Reciclado metalurgia
Pantallas de TRC sin plomo	287,6	Reciclado producción TRC
Pilas	<5,3	Reciclado
Metales		
Metales férricos	53,0	Fundición de hierro
Aluminio	2,4	Fundición de aluminio
Cobre y otros metales no férricos	40,1	Fundición de cobre
Compuestos plásticos y cerámicos de tarjetas	112,2	Valorización energética o reutilización parcial

Las potenciales aplicaciones de lazo abierto para el vidrio reciclado de TRC (sección 2.5.1.2) no se reflejan en las respuestas obtenidas en diversos contactos realizados con empresas españolas relacionadas directa o indirectamente con la industria del vidrio. Hemos encontrado empresas dispuestas a estudiar la posible aceptación del vidrio de TRC, empresas que tras evaluar las muestras enviadas no lo aceptan y empresas que lo rechazan de plano, sin dar opción a una evaluación del material. En líneas generales, se puede concluir que la mayoría de las empresas contactadas son muy reticentes a admitir un vidrio reciclado con las características especiales del vidrio de TRC (aunque se garanticen unas determinadas calidades), máxime si ya utilizan un vidrio reciclado de otro origen y que es bien asimilado por sus procesos productivos. También habría que destacar la gran cantidad de vidrio reciclado coloreado e incoloro disponible actualmente en el mercado y a bajo coste, factores que dificultan la introducción del vidrio de TRC.

Las empresas recuperadoras son las que poseen mayor potencial para aceptar este vidrio debido a que trabajan con grandes volúmenes (lo que posibilitaría su mezcla en bajas proporciones) y al amplio conocimiento del mercado que poseen. A continuación se resumen las principales limitaciones para conseguir mercados para el vidrio reciclado de TRC en aplicaciones diferentes a la original:

- Composición: contenido elevado en metales y plomo para el vidrio de cono. Además, la composición no es homogénea y varía de unos fabricantes de TRC a otros.
- Tonalidad oscura del vidrio de pantalla (Figura 5.2): limitación en la producción de vidrio de varios colores, como es el caso del gresite.



Figura 5.2 Vidrio de cono recuperado

- Grosor y dureza: causaría desgaste prematuro de los equipos de molienda.

Como un caso práctico de reutilización del material recuperado presentamos una aplicación del vidrio de pantalla del tubo de rayos catódicos (Figura 5.3) para una empresa del sector de la cerámica, concretamente en la fabricación de mosaicos de vidrio (gresite).



Figura 5.3 Vidrio de pantalla recuperado

La empresa fabrica su producto a partir del reciclaje de vidrio plano blanco que le abastecen hasta el momento los recuperadores de vidrio. Las dos únicas materias primas utilizadas son el vidrio reciclado (99,5%) y el colorante cerámico (0,5%), por lo que el control sobre las fuentes de abastecimiento del vidrio es muy importante. Las particularidades especiales del proceso productivo exigen una determinación muy específica del vidrio a utilizar como materia prima, no pudiéndose incorporar cualquier tipo de vidrio (botella, laminado, parabrisas, armado, con color, etc.). Actualmente la empresa no está muy segura de poder seguir siendo abastecida por sus proveedores actuales al ritmo que desarrolla su actividad, es por ello que considera muy importante dotarse de una fuente de suministro alternativa que le permita asegurar un crecimiento futuro de la actividad, o al menos no depender de un único sector de aprovisionamiento.

Los acuerdos de Kioto ponen otro fuerte impedimento a su abastecimiento de vidrio de reciclaje, ya que la misma materia prima que consume esta empresa va a ser requerida por los grandes fabricantes de vidrio plano para bajar sus emisiones de CO₂. El hecho de tener una paleta de colores ofrecida a sus clientes hace que la uniformidad de la materia prima a utilizar sea muy importante, ya que una variación en la misma produciría una variación en la tonalidad de los mosaicos producidos. Por ello, se necesita un vidrio

alternativo que tenga una tonalidad clara, similar a la presentada por el vidrio que utiliza hasta el momento.

Del mismo modo, la composición del vidrio de pantalla debe ser compatible con la composición del vidrio que utiliza actualmente, ya que, en caso de realizar una mezcla de ambos vidrios, se deberían comportar de manera similar, no dando lugar a fricciones o tensiones internas que produjesen un nivel de roturas importante. La Figura 5.4 muestra el resultado de la fase de limpieza del vidrio de pantalla (eliminación de capas de sustancias tóxicas).



Figura 5.4 Vidrio de pantalla limpio

Hemos realizado en la empresa pruebas diversas con el vidrio reciclado de pantalla proveniente de tubos de rayos catódicos (Figura 5.5). En particular se han molido dos pequeñas cantidades del vidrio suministrado, obteniendo polvo de vidrio con una granulometría de 100 micras y otra de 40 micras. Aunque los resultados son esperanzadores no son todavía concluyentes, ya que dependen del valor de la granulometría y del propio proceso de mezcla del vidrio reciclado con la materia prima original empleada por la empresa.

Los resultados de la Figura 5.5 (a) nos muestran unos mosaicos de color sucio (marcado en la imagen con rectángulos verdes), muchas impurezas en la superficie (círculos amarillos) y alto porcentaje de roturas (rectángulos rojos), como consecuencia de la presencia de burbujas de aire. Tras manipular las piezas enteras, empanelarlas y pasar unos días, hemos

observado más roturas. En la Figura 5.5 (b) los porcentajes de impurezas y roturas son menores pero elevados. La Figura 5.5 (c) tiene un color pobre, pocas impurezas y pocas roturas en producción, sin roturas a posteriori. Por último, la Figura 5.5 (d) presenta un color aceptable, pocas o nulas impurezas y ausencia de roturas en producción o a posteriori.

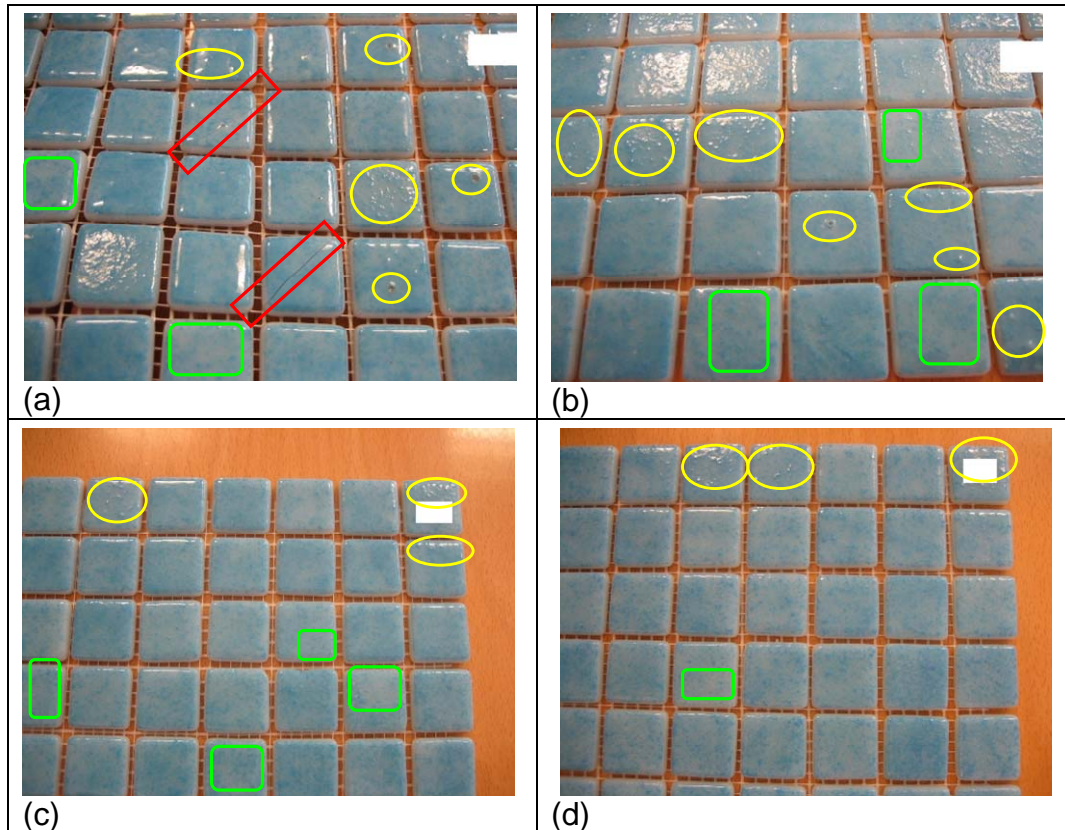


Figura 5.5 Resultados de las pruebas de reutilización del vidrio

5.2 Análisis económicos

Para la evaluación económica, hemos obtenido los datos relativos a las inversiones necesarias en equipamiento (centrados en la línea de tratamiento), ingresos previstos por la venta del material obtenido y costes de explotación. Estos datos son los resultados obtenidos según la configuración realizada de la línea de reciclado optimizada sugerida por el modelo propuesto en esta tesis. En las tablas siguientes se muestran las principales cifras de interés para la evaluación económica: en la Tabla 5.2 se indican los

pesos de cada material recuperado de forma limpia y separada en el proceso de reciclado, la Tabla 5.3 muestra las cotizaciones de dichos materiales y la Tabla 5.4 los ingresos por su venta.

Tabla 5.2 Pesos de producto recuperado (promedio por aparato)

Material	kg
Cobre	0,690
Hierro	1,474
Aluminio	0,042
PVC	0,500
Vidrio de cono	2,500
Vidrio de pantalla	5,390
Condensadores	0,005
Madera	0,200
Plástico para reciclado mecánico	1,500
Plástico para cementeras	0,840
Polipropileno (plástico)	0,470
TRC de silicona, B/N, c/Pb	0,450
Peso total producto	14,06
Porcentaje de recuperación	82%

Las cotizaciones que se muestran en la Tabla 5.3 se han obtenido de la Bolsa de metales de Londres y de los datos facilitados por la propia empresa recicladora, correspondientes a los precios en curso en octubre de 2008.

Tabla 5.3 Valor de retorno en el mercado del producto recuperado (en €/ t)

Material	€/ Tm
Cobre	4.846,6
Hierro	320,0
Aluminio	1.690,0
PVC	101,7
Vidrio de cono	122,5
Vidrio de pantalla	97,8
Condensadores	-1.540,0
Madera	-23,0
Plástico para reciclado mecánico	284,7
Plástico para cementeras	67,8
Polipropileno (plástico)	882,0
TRC de silicona, B/N, con plomo	87,6

Los valores negativos de la Tabla 5.3 indican que el reciclador debe pagar una tasa por el tratamiento posterior de esos materiales a un gestor autorizado. Tal es el caso de los condensadores y plástico PVC.

En el caso de este último material la situación está cambiando ya que la empresa química Solvay ha patentado un proceso que permite la reutilización de plásticos PVC (ver sección 2.5.3), por lo tanto este tipo de material podrá ser considerado como una fuente de ingresos por su venta.

Tabla 5.4 Ingresos por producto recuperado por aparato (en €/aparato)

Material	€/ aparato
Cobre	3,34
Hierro	0,47
Aluminio	0,07
PVC	0,05
Vidrio de cono	0,30
Vidrio de pantalla	0,52
Condensadores	-0,007
Madera	-0,005
Plástico para reciclado mecánico	0,43
Plástico para cementeras	0,05
Polipropileno (plástico)	0,41
TRC de silicona, B/N, con plomo	0,04
TOTAL ingreso	5,7

En la Tabla 5.5 se encuentran los datos económicos detallados de la productividad y costes de explotación. Estos últimos los hemos calculado específicamente para la línea propuesta, considerando el coste de la mano de obra y el consumo eléctrico de la instalación. No hemos tenido en cuenta los costes que son comunes a las líneas de reciclado estudiadas (mantenimiento de edificios, seguros, etc.). Las inversiones necesarias para esta línea se encuentran descritas en la Tabla 5.6. El resumen de esa información se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5.5 Datos de producción y explotación

Módulo	Línea propuesta
Línea de manipulación de aparatos + módulo desensamblado	31 aparatos / hora
Línea tratamiento TRC	50.000 aparatos / año
Mano de obra requerida	4 operarios / turno
Turnos de trabajo	1 turno
Coste medio de producción estimado por operario	19 €/ hora
Coste medio de consumo energético	1,3 € hora
Horas productivas anuales	1.600 horas / año

Tabla 5.6 Inversiones necesarias en la línea

Equipos de línea de reciclado	Coste (€)
Rampa alimentación aparatos	12.000
Camino de rodillos	6.000
Manipulador ingrávito (pluma+equilibrador+util ventosa)	13.200
Mesa desmontaje, útiles, campana	6.000
Ordenador	400
Cinta transportadora de carcacas	3.000
Molino plásticos reciclables	50.000
Molino otras carcacas	50.000
Carda limpieza superficie	600
Equipo identificación rayos X	20.000
Robot	30.000
Eje lineal (5 metros)	15.000
Garra de vacío	1.500

(Cont.)	
Cámara y fuente de iluminación ultravioleta	400
Equipos de línea de reciclado (cont.)	Coste (€)
Licencia Software	4.000
Cinta transportadora de TRC	1.500
Armario control y conexiones	1.000
Elementos de seguridad	1.000
PLC + Manipulador PCB	15.000
Accionamientos neumáticos	900
Estructura de perfiles de aluminio	1.500
Vibrador circular (incl. filtro salida para finos)	40.000
TOTAL	273.000

Tabla 5.7 Principales parámetros del análisis económico de la instalación para el año 1

Análisis económico	€
Total inversiones	273.000
Total costes anuales de explotación del año 1 (4 operarios * 1 turno * 1.600 h/año * 19 €/h) + (1.600 h/año * 1,3 euro/hora)	123.680
Total ingreso por producto recuperado (año 1) (50.000 aparato/año * 5,7 €/aparato)	284.886

El proceso de evaluación económica es uno de los más difíciles de realizar a la hora de tomar una decisión acerca de la implementación de sistemas automatizados. Existen métodos y técnicas de evaluación que tienen en cuenta factores cualitativos, otros son complejos y exhaustivos y requieren datos cuantitativos que pueden ser problemáticos de recopilar y formular

[Soni et al., 1992]. En el mundo del reciclado, aunque los aspectos legislativos y normativos son los que inicialmente promueven el desmantelamiento de los aparatos, el principal objetivo de las empresas recicladoras es la explotación comercial y obtención de beneficios.

5.2.1 Análisis económico inicial

Soni et al. (1992) proponen una clasificación para los métodos de evaluación económica aplicados a proyectos:

- Métodos determinísticos (simple y multi objetivo).
- Métodos probabilísticos.
- Técnicas de lógica difusa.

En esta sección aplicamos métodos incluidos en la primera categoría, concretamente el Período de Recuperación (PR) o Pay Back, la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), explicados en los párrafos siguientes. Estos métodos evalúan un único objetivo económico asociado a la inversión, en este caso, en tecnologías de reciclado. Su cálculo no es excesivamente complejo y ofrece un resultado determinístico en relación a la aceptación de la inversión en la línea de reciclado propuesta.

Periodo de Recuperación

Es el tiempo discurrido desde el comienzo del proyecto hasta que el flujo de caja neto sea mayor de cero, es decir, indica cuándo se empiezan a obtener ingresos positivos. El objetivo es tener un período de recuperación lo más corto posible, ya que entonces la instalación comienza a ser rentable. Si este dato está próximo o es superior al ciclo de vida del producto a fabricar, indica que el desarrollo no va a ser rentable.

Normalmente se mide en años, y viene dado por el valor de n que cumple:

$$\sum_{j=1}^n (R_j - C_j) = 0 \Rightarrow n = \frac{CI}{(R - C)}$$

Siendo:

R : Ingresos anuales estimados.

C : Costes anuales estimados.

CI : Coste de la inversión inicial.

j : Año actual ($j = 1, \dots, n$)

Se supone un cash-flow ($R-C$) constante durante la vida del proyecto. Este método presenta el inconveniente de que no considera el valor temporal del dinero.

Valor Actual Neto

Este cálculo incorpora al coste de inversión el tipo de interés de la financiación para la compra inicial de equipos, y los beneficios se consideran como rendimientos futuros. Puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{(R_j - C_j)}{(1+i)^j} - CI$$

Siendo:

n : Número de años que dura el proyecto.

R_j : Ingresos estimados en el año j .

C_j : Costes estimados en el año j .

CI : Coste de la inversión inicial.

i : Tipo de interés anual.

j : Año actual ($j = 1, \dots, n$)

Para que una inversión sea rentable el valor de VAN debe ser positivo.

Tasa Interna de Retorno

Es similar al VAN, pero en este caso se trata de hallar la máxima tasa de rendimiento que se obtendrá del proyecto. Se aplica la fórmula del método VAN, igualando este valor a cero y dejando la tasa de rentabilidad como incógnita, obteniendo así el valor de *i*.

La Tabla 5.8 recoge la estimación de los costes de explotación y beneficios esperados para los cinco años de duración del proyecto. Hemos considerado que los costes de explotación crecerán un 3% anual (similar al valor medio del IPC de los últimos años). Se ha estimado en un 10% el incremento previsto de los ingresos, tomando como referencia las predicciones de la Fundación ECOLEC [ECOLEC, 2009] sobre el aumento anual de las cantidades de AEE que se reciclarán.

Tabla 5.8 Estimación de costes e ingresos de la línea propuesta para años sucesivos (euros)

Vida útil del proyecto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión inicial:	273.000				
Costes explotación:					
Mano de obra	121.600	125.248	129.005	132.876	136.862
Energía	2.080	2.142	2.207	2.273	2.373
Total	123.680	127.390	131.212	135.149	139.235
Ingresos:					
Por venta de materiales	284.886	313.374	344.712	379.183	417.101
Cash-Flow	161.206	185.984	213.500	244.035	277.899

En la Tabla 5.9 se muestran los datos económicos que servirán de partida para calcular los indicadores explicados anteriormente.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos para los indicadores en estudio (PB menor que la duración del proyecto, VAN positivo y TIR mayor que la tasa límite seleccionada), consideramos que, en principio, el proyecto es viable. Sin embargo, hemos realizado un análisis más en profundidad del sistema propuesto, teniendo en cuenta las especiales características de las tecnologías y equipos empleados en la línea de reciclado.

Tabla 5.9 Datos anuales de entrada para el análisis económico para el año 1

Parámetro	Cantidad	Unidades
Productividad:		
Número de televisores / monitores tratados	31	Aparatos / h
Capacidad de la planta de tratamiento de TRC	50.000	TRC / año
Peso total del material separado y recuperado	14,06	kg / u
Porcentaje de reciclaje (en peso)	82	%
Ingreso por venta de materiales de un aparato	5,7	€/ u
Mano de obra requerida	4	Operario
Número de turnos	1	Turno
Coste horario de producción	19	€/ h
Inversión requerida (manipulación+desensamblado+limpieza)	273.000	€
Costes anuales de explotación	123.680	€
Retornos anuales por el material obtenido (1er año)	284.886	€
Coste medio de tratamiento unitario	3,57	€/ u
Resultados de los indicadores		
(seleccionando 5 años de vida del proyecto, 15% de tasa de descuento)		
Periodo de Retorno (Pay-Back, PB):	1,69	Año
Valor Actual neto (VAN):	425.986	€
Tasa Interna de Retorno (TIR):	49,76	%

5.2.2 Análisis económico complementario

En esta evaluación calculamos una variante de la TIR, llamada Tasa Interna de Retorno Modificada, que mide la rentabilidad porcentual promedio del proyecto, ofreciendo una mejor indicación de la eficiencia del proyecto, asumiendo que los excedentes de caja se reinvierten.

También prestamos atención a la flexibilidad en términos de reutilización de los elementos de automatización integrados en la línea de reciclado. Estos equipos productivos puede ser utilizados de nuevo para productos diferentes a los originalmente planificados, un caso bastante común en el mundo del reciclado de AEE, donde el tipo, condición y modelo de los dispositivos puede variar en el tiempo. Para este caso, algunos autores han sugerido una nueva técnica de cálculo, llamada *Capital Back* (Retorno de Capital) [Nilsson et al., 1992].

Retorno de Capital

Este parámetro tiene en cuenta la inversión inicial en máquinas y sistemas flexibles (robots, sistemas de manipulación, sensores, sistemas de carga/descarga, ordenadores, etc.) y la inversión en sistemas no flexibles (en general, las herramientas y sistemas de manipulación y fijación específicos de un producto). La fórmula para el cálculo del Retorno de Capital o Capital Back es:

$$CB = \frac{I_{inf}}{OCF - (I_{if} - (I_{if} * Am(n, r)))}$$

Siendo:

I_f : Inversión inicial en componentes flexibles.

I_{nf} : Inversión inicial en componentes no flexibles.

OCF : Cash flow operativo en el año t .

Am : Amortización, dependiente de n y r .

n : Duración del proyecto (años).

r : Tasa de retorno requerida al proyecto.

El objetivo del método del Capital Back es desligar la inversión en elementos flexibles de las exigentes demandas del método del Período de Recuperación (Pay Back). Se utiliza como complemento a otros indicadores, como VAN, TIR y PR. La Tabla 5.10 muestra los nuevos resultados obtenidos para estos indicadores, además de calcular el ratio Coste/Beneficio (Índice de Rentabilidad).

Tabla 5.10 Análisis económico complementario de la planta de reciclado

Inversión requerida (manipulación+desensamblado+limpieza)	Valor	Unidades
Componentes flexibles:	114.400	Euro
Componentes no flexibles:	158.600	Euro
Resultados de los indicadores (seleccionando 5 años de proyecto, 15% de tasa de descuento)		
Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM):	24,03	%
Retorno de Capital - Capital Back (CB):	0,98	Años
Índice de rentabilidad:	1,69	

Los resultados obtenidos nos permiten realizar un análisis más en profundidad, confirmando la viabilidad económica del sistema propuesto. El valor obtenido por el índice del Retorno de Capital muestra un período de recuperación más realista (0,98 años) que el ofrecido por el Período de

Retorno (1,95 años), ya que tiene en cuenta la incertidumbre de la parte no flexible de la instalación y los requisitos de rentabilidad de la parte flexible.

Los resultados económicos relacionados con la recogida y tratamiento de los aparatos electrónicos en su fin de vida están muy influenciados por los parámetros reflejados en el estudio para la revisión del cumplimiento de la directiva WEEE [European Commission, 2007], por encargo de la Comisión Europea. Las conclusiones que en él se reflejan muestran la importancia de los siguientes parámetros:

- Precios de los materiales secundarios recuperados. Los análisis realizados muestran que los precios de mercado de 2007 han incrementado los ingresos por la venta de los materiales mencionados anteriormente en un rango entre 50 y 100 euros por tonelada, comparado con 2005. Se puede ver una evolución de dichos precios en tablas incluidas en el Apéndice.
- Desarrollos y disponibilidad de nuevos mercados para aplicaciones de alto valor, y revalorización de materiales reciclados como alternativa a su correspondiente equivalente en materia prima.
- Futuros desarrollos en tecnologías de tratamiento y requisitos diferentes para las operaciones de separación (obligatoriedad de separar nuevos materiales como mercurio, etc.).
- Directivas nacionales y europeas, actuales y futuras, así como las políticas de subvención aplicadas por la Administración.

5.3 Análisis medioambiental

En la planta de reciclaje propuesta se pueden dar emisiones de polvo (partículas sólidas) por manipulación (operaciones de carga y descarga, etc.)

y transporte de materiales pulverulentos y/o granel, tales como producto acabado, residuos inertes. Debido a que todos los procesos de tratamiento que se realizan son en seco, la cantidad de agua consumida se puede considerar baja.

En las propias operaciones de limpieza, desmontaje, separación, mantenimiento, etc., se generan otro tipo de residuos (aceites, envases contaminados, absorbentes contaminados...) y se siguen las mismas pautas de almacenamiento que con el resto de residuos. Es necesario prever cubos de retención para cuando se producen derrames como el aceite o emulsiones aceitosas.

5.3.1 Control de vertidos

La medida básica de depuración es la instalación de filtros en las arquetas de desagüe de la instalación, con el fin de evitar que pequeños trozos de metales y plásticos sean arrastrados por las aguas pluviales. También es necesario disponer de una instalación de depuración de aguas residuales, que cuenten con un decantador y un desengrasador. Los fangos producidos en la limpieza del decantador se envían a un gestor autorizado.

Por los materiales almacenados los contaminantes principales de las aguas son aceites (posiblemente procedentes de pequeños derrames) y metales (Cu, Fe, Al, etc.).

5.3.2 Almacenamiento de materias primas

Las materias primas de la instalación de reciclaje (televisiones y monitores) se reciben en camiones y se descargan en áreas específicas. Contienen componentes peligrosos por lo que se depositan en jaulas o contenedores y

se almacenan a cubierto sobre suelo de cemento. Las aguas de lluvia que puedan estar en contacto con estos materiales se llevan a las depuradoras.

5.3.3 Almacenamiento de residuos producidos en el proceso de desmontaje

Una vez finalizado el desmontaje y clasificación de los aparatos individuales, obtenemos los siguientes materiales y componentes:

- *Condensadores, tarjetas de circuitos impresos, pilas y relés de mercurio, pilas de litio, y otros residuos potencialmente peligrosos, que son enviados a empresas especializadas para su tratamiento y recuperación o, alternativamente, a un depósito de seguridad.*
- *Vidrio procedente de TRC que puede ser enviado a un gestor autorizado o ser procesado para su reutilización.*
- *Plásticos que, dependiendo de su naturaleza, se envían a vertedero de no peligrosos, valorización energética o reciclado.*
- *Metales mezclados que se someten a procesos de separación y concentración para devolverlos al circuito económico como materias primas secundarias (hierro, aluminio, cobre, metales preciosos).*

Estos residuos se almacenan por separado en envases adecuados a cada tipo de residuo en un lugar a cubierto y sobre suelo de cemento.

Se vigila que en el transporte, carga y descarga de los productos a reciclar, éstos se golpeen lo mínimo posible para favorecer el reciclaje, la reutilización de componentes y evitar que se liberen compuestos perjudiciales para las personas o para el entorno como polvo, aceites, trozos rotos, etc. Por otro

lado, no existe ninguna incompatibilidad entre ellos. Habitualmente hay un período máximo de almacenamiento de 6 meses.

La propia actividad de separación y desmontaje genera los residuos detallados a continuación:

- Residuos generados en la descontaminación de los AEE:
 - Tarjetas y condensadores.
 - Componentes con mercurio.
 - Condensadores con aceite dieléctrico.
 - Polvo fluorescente de pantalla de monitor.
 - Polvo de corte.
 - Residuos de soldadura (estaño, plomo).
 - Componentes conteniendo óxido de berilio.
- Residuos procedentes de operaciones de mantenimiento en la planta de reciclado:
 - Envases de plástico contaminados.
 - Envases de metal contaminados.
 - Absorbentes contaminados.
 - Disolventes degradados.
 - Aerosoles industriales.
 - Filtros de aceite.

Para las zonas de almacenamiento y tratamiento se siguen las siguientes directrices:

- Disponer de cubetas o sistemas de recogida adecuados para los residuos líquidos o semi-fluidos.

- Ventilación suficiente de la planta.
- Aspiración, control y filtrado en los focos de emisión de polvos, partículas y compuestos orgánicos volátiles.
- Evitar incompatibilidades entre productos y mantenerlos alejados de fuentes de calor e ignición.
- Envases adecuados y con cierre, a poder ser sobre palets.
- Realizar controles periódicos en los diferentes puntos de vertido. Se miden partículas de Cd, Hg, Pb, SO₂, CO, HCl, Cr.
- Realizar controles periódicos a los residuos que van a vertedero de residuos no peligrosos (plásticos) del pH inicial y final, Cd, Hg, Pb.
- Realizar mediciones de ruido, análisis de materias primas sospechosas de estar contaminadas, mediciones en el ambiente de trabajo de concentraciones de partículas.

Como medidas generales de protección del medio ambiente con el fin de eliminar o minimizar las posibles afecciones al medio se pueden citar las siguientes:

Aguas

- Redistribución de la red de aguas separando sanitarias, pluviales potencialmente contaminadas y pluviales limpias.
- Colocación de filtros de retención de sólidos en los desagües de la planta.
- Colocación de decantadores y desengrasadores como paso previo al vertido de aguas pluviales potencialmente contaminadas.

Suelo

- Colocación de suelo de cemento en zonas de almacenamiento de materiales.
- Realización de estudio preliminar del suelo e implantación de medidas derivadas del mismo.

Impacto visual

- Mejora del impacto visual con cambio de ubicación de determinados almacenamientos y potenciación de zonas verdes.

Generales

- Implantación y certificación de un sistema de gestión medioambiental basado en la norma ISO 14001.
- Controles de pre-aceptación de los materiales de entrada.
- Análisis y trazabilidad de los materiales de salida y residuos.
- Control del consumo de energía y eficiencia energética.
- Sensibilización y formación a trabajadores en la manipulación y almacenamiento de residuos.

5.3.4 Clasificación de Impacto Medioambiental

Las definiciones de las clasificaciones de los impactos son las siguientes:

- *Impacto medioambiental compatible.* Aquél cuya recuperación es inmediata tras el cese de la actividad y no precisa prácticas protectoras o correctoras.

- *Impacto medioambiental moderado.* Aquél cuya recuperación no precisa prácticas protectoras o correctoras intensivas y en el que la consecución de las condiciones medioambientales iniciales requiere cierto tiempo.
- *Impacto medioambiental severo.* Aquél en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la puesta en marcha de medidas protectoras o correctoras y en el que, aún con esas medidas, aquella recuperación precisa un período de tiempo dilatado.
- *Impacto medioambiental crítico.* Aquél cuya magnitud es superior al umbral aceptable. Con él se produce una pérdida permanente de la calidad de las condiciones medioambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas protectoras o correctoras.

Si en la actividad planteada de desmontaje y reciclado en la instalación propuesta se siguen las pautas expuestas en esta sección, y dada la naturaleza de los residuos generados, podemos deducir que los impactos medioambientales se sitúan entre “compatibles” y “moderados”.

Finalmente, no hay que olvidarse que se están recuperando materias primas evitando de esta manera la explotación innecesaria de recursos no renovables, encajando de lleno en la estrategia de **Desarrollo Sostenible**, además del indudable beneficio medioambiental que aporta la adecuada gestión de este tipo de residuos.

6. APORTACIONES, CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS

6.1 Aportaciones y conclusiones

La necesidad de una mejor separación y tratamiento de los materiales y componentes de aparatos electrónicos, con el objeto de cumplir las directivas europeas y de acceder a una mejor reutilización, ha sido una constante por parte de las empresas recicladoras. El método propuesto en esta tesis aplica criterios de optimización técnica y económica, teniendo en cuenta el cumplimiento de aspectos legales y medioambientales. Aplicando técnicas de simulación gráfica y optimización lineal de los parámetros de interés para la empresa se ha obtenido como resultado final una estrategia optimizada de operaciones de desensamblado, alcanzándose el objetivo de lograr una recuperación de materiales que optimiza el beneficio económico y permite su reutilización en nuevas aplicaciones.

Nuestras principales aportaciones en esta tesis son:

1. Proceso optimizado de desensamblado de RAEE. El análisis, la simulación y la programación del modelo virtual del proceso de desensamblado se ha realizado sobre un desmontaje real, basando sus parámetros en los procesos de reciclado (separación, corte, manipulación, limpieza) experimentados previamente por el reciclador. Representa una innovación respecto a los métodos existentes en la actualidad, los cuales aplican una programación automática basada en el análisis de la desmontabilidad teórica de un producto según sus datos CAD, sin una fiabilidad real.

2. Mayor beneficio económico para las empresas recicladoras. La optimización por medio de programación lineal de parámetros del proceso propone una determinada configuración de la línea de reciclado de aparatos electrónicos que maximiza el beneficio de la empresa según el valor del material recuperado. A diferencia de otras soluciones existentes, que se orientan exclusivamente a obtener los máximos ratios de separación, nosotros nos centramos en optimizar el beneficio económico final obtenido de los materiales correctamente separados, dependiendo de su cotización en el mercado.
3. Recuperación de vidrio. Se ha confirmado la viabilidad técnica de la reutilización del vidrio proveniente del TRC en aplicaciones innovadoras y de mayor valor añadido, como la fabricación de gresite, a diferencia de soluciones anteriores basadas en su utilización en nuevos monitores o aplicaciones de menor valor económico (cementerías, rellenos).
4. Recuperación de componentes electrónicos. Se ha propuesto un proceso optimizado de recuperación de componentes electrónicos de alto valor, presentes en las tarjetas de circuitos impresos. Hasta la fecha las tarjetas destinadas al reciclado eran trituradas y posteriormente se obtenían materiales básicos por métodos mecánicos o químicos. Nuestra solución permite obtener componentes plenamente funcionales.
5. Confirmación de la viabilidad técnica y económica. La solución propuesta de procesos de desensamblado se ha implantado en dos empresas del sector, realizando una experimentación y obtención de resultados (técnicos y económicos) que validan nuestro método. Esta validación contrasta con las evaluaciones comúnmente utilizadas con otros métodos que se limitan, preferentemente, a simular el proceso de desensamblado propuesto o a implantarlo a escala laboratorio, de alcance limitado.

6. Solución adaptada al perfil y capacidades tecnológicas de la empresa. La solución propuesta por el método se adapta a la situación real de la empresa recicladora (aspectos técnicos), el entorno legal y las cotizaciones en el mercado de los materiales obtenidos en el reciclado. El método propuesto ofrece un rango de soluciones técnicas que engloba diferentes niveles de automatización del proceso de desensamblado, permitiendo a las empresas recicladoras la adaptación a sus necesidades concretas. Esto representa un cambio respecto a propuestas anteriores que se centraban exclusivamente en el producto a reciclar (componentes, materiales, estado) y sugerían la mayor automatización posible del proceso de separación de componentes, lo cual no siempre es económicamente viable.

7. Reducción de la complejidad del modelo de optimización lineal. La programación del modelo de optimización se ha orientado desde un principio al objetivo de simplicidad, reduciendo los parámetros de cálculo y restricciones a los estrictamente necesarios y de interés real para la empresa recicladora, permitiendo su aplicación directa y práctica en estas PYMES. Otras soluciones proponen una optimización teniendo en cuenta gran número de parámetros, técnicos y económicos, que frecuentemente son difíciles de obtener por parte de las empresas pequeñas y medianas debido a la falta de información o porque su cálculo depende de factores externos.

8. Separación optimizada de materiales potencialmente valorizables. Hemos conseguido una garantía de una mejor separación de materiales potencialmente reciclables y con un mayor valor en el mercado. El método propuesto permite alcanzar un alto grado de reciclado de los materiales implicando unas emisiones al aire desestimables y una producción de residuos muy baja, siendo la gestión de los mismos adecuada para garantizar el menor impacto medioambiental. De hecho,

aproximadamente el 94% de los materiales se destinan a procesos de valorización, siendo el 85% de reciclado.

9. Nuevos mercados para los componentes y materiales obtenidos. Hemos propuesto nuevas aplicaciones a los materiales obtenidos con las garantías que se requieren en los nuevos mercados, ya que las operaciones de desensamblado han sido planificadas y desarrolladas de acuerdo a esas necesidades.

10. Implantación real en empresas. Hemos puesto en funcionamiento en dos empresas del sector sendas implantaciones prácticas del método propuesto. El método presentado en esta tesis supone una innovación para la primera empresa participante, recicladora de televisores, puesto que le permite incluir un nuevo proceso de tratamiento de uno de los componentes peligrosos presentes en estos aparatos, los tubos de rayos catódicos. Anteriormente, la empresa separaba el TRC de televisores y monitores y lo enviaba a un gestor autorizado donde se utilizaba como sustituto de arenas para formación de escorias en los hornos de fundición. Con el nuevo proceso, conseguimos una reutilización más ecológica del vidrio de la pantalla y del cono de los televisores y monitores, obteniendo fracciones con unas especificaciones y calidades que permiten su reutilización en aplicaciones con alto valor añadido. Por otro lado, la utilización de este vidrio en la fabricación de gresite supone la sustitución directa de una materia prima en un proceso de fabricación y un gran ahorro energético. Debido a los incrementos de precio de la energía y el gran consumo necesario para la fabricación de vidrio, la chatarra de vidrio se convierte cada vez más en una materia prima con gran valor. Con respecto a la recuperación de componentes de tarjetas electrónicas, el nuevo sistema ofrece a la segunda empresa involucrada en las pruebas una oportunidad de nuevo negocio. Hasta la fecha, la actividad se centraba exclusivamente en la fabricación de tarjetas. Con el nuevo sistema

propuesto se ha planteado extender su actividad a la reutilización de estos componentes, provenientes de aparatos desechados en su fin de vida.

Las soluciones generadas con el método propuesto resultan innovadoras y aseguran un grado adecuado de “reciclabilidad”. El que en la práctica se alcance un valor de reciclabilidad del 75 al 85% depende de dos factores:

1. Que se considere aceptable desde un punto de vista medioambiental el nivel de reutilización del material. Por ejemplo, se acepta el uso de vidrio reciclado para fabricar nuevos tubos de televisor (se siguen fabricando televisores basados en tecnología TRC en Singapur y Malasia, y todavía se venden en países en desarrollo [Meller, 2009]). Pero si ese vidrio es de baja calidad y se utiliza como materia prima para productos cerámicos los beneficios medioambientales son menores, aunque ambas aplicaciones se están aceptando hoy en día, si bien la última con algunas reticencias todavía.
2. El costo de reciclado, que incluye los costos de logística (recogida de aparatos), el desensamblado o tratamiento mecánico y el posterior reaprovechamiento de lo obtenido.

En ambos casos, la aplicación del método propuesto de simulación y optimización representa un avance respecto a la forma tradicional de reciclar los aparatos electro-electrónicos. En el primero, nuestro método permite planificar y confirmar las operaciones de desmontaje que garantizan de la mejor forma posible una reutilización correcta del material obtenido de cara a unos usos específicos futuros. Respecto al segundo factor, también permite realizar una valoración preliminar del coste de las operaciones de desensamblado y realizar una optimización en consecuencia.

Es necesario indicar que, actualmente, el proceso de desensamblado o desmontaje resulta más caro frente al tratamiento mecánico (rotura de todo el aparato por trituración), ya que en el primer caso se intenta obtener subcomponentes del aparato original que pueden ser reutilizados con poca preparación posterior. En el caso del tratamiento mecánico se obtienen materiales mezclados de una forma más barata, pero con la consiguiente contaminación de unos materiales en otros, lo que dificulta notablemente su separación y reciclabilidad, y hace que sea necesario un proceso posterior de separación.

6.2 Contraste de resultados en foros científicos

Los resultados obtenidos han sido contrastados en las siguientes publicaciones:

- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E. A review of automation alternatives for recycling plants of electronic appliances. En: QIU, R. (ed.). Proceedings of FAIM – 17th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (18-20 junio 2007, Malvern, EEUU). Filadelfia: Philadelphia State University, 2007. pp. 996-1003.
- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J. Proposal of a semi-automated demanufacturing plant for electronic waste. En: COTTERELL, M. (ed.). Proceedings of 24th International Manufacturing Conference (29 julio – 1 agosto 2007, Waterford, Irlanda). Waterford: Waterford Institute of Technology, 2007. pp. 373-379.

Estos artículos presentan una revisión de los procesos de reciclado existentes para los AEE. Incluyen estadísticas de recogida de desechos, directivas en desarrollo, nuevos requisitos que se exigen a las empresas recicladoras y aprovechamiento de los materiales

obtenidos. Se expone una primera solución automatizada para la separación de vidrios del TRC.

- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E. Nueva metodología para la optimización del diseño de líneas de reciclado de aparatos electrónicos. En: CARRASCO, J. (ed.). Proceedings of 1st International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management / XI Congreso Ingeniería de Organización (5-7 septiembre 2007, Madrid, España). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007. pp. 409-418.

En esta publicación se presenta el método propuesto en esta tesis, junto con un esquema del tratamiento de los RAEE según la prioridad recomendada: reutilización, reciclado y recuperación (sin recuperación energética), recuperación energética, incineración, depósito en vertedero.

- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., LÓPEZ, J.M. A simulation based methodology to define the reuse process of printed circuit board's components. En: DE VIN, L.J. (ed.). Proceedings of FAIM – 18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (30 junio – 2 julio 2008, Skövde, Suecia). Skövde: University of Skövde, 2008. pp. 397-403.
- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., LÓPEZ, J.M. A systematic approach to define the reuse process of printed circuit board's components. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2 (2): 103-110, junio 2009.
- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J., DEL POZO, D. Nuevo método para el diseño optimizado de plantas (semi)automatizadas de tratamiento de RAEE: caso de TV y monitores. *DYNA*. Artículo aceptado.

- RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J., DEL POZO, D. Methodology to optimize the recovery of secondary materials in the recycling of electronic equipment. *International Journal of Advanced manufacturing Technology*. Artículo en revisión.

Estos artículos recogen el planteamiento del método propuesto, su aplicación y los resultados obtenidos en las instalaciones para el reciclado de vidrio de TRC y de componentes electrónicos provenientes de tarjetas de circuitos impresos.

Por otro lado, la implantación práctica del proceso de reciclado del vidrio de televisores ha sido objeto de una visita y revisión de los resultados por parte de representantes de empresas europeas relacionadas con la temática tratada en esta tesis (Philips, Sony, Stena, Reuse, Mirec y Universidad Técnica de Viena).

6.3 Líneas futuras de investigación

Las tecnologías descritas y propuestas en esta tesis están en continuo desarrollo en varias vertientes: software de optimización, simulación y cálculo, equipos con prestaciones gráficas y procesadores matemáticos, sensores y herramientas avanzadas de identificación y separación de componentes, robots específicos para desensamblado, etc. Por lo tanto, las líneas posibles de investigación son amplias, desde las relacionadas más directamente con la temática de este trabajo (simulación, optimización, automatización), hasta el desarrollo de nuevos conceptos de logística inversa, materiales específicos para fabricar uniones de subcomponentes y avances en la implantación de técnicas de eco-diseño. A continuación, hacemos referencia a las líneas más estrechamente relacionadas con nuestro trabajo y de candente actualidad:

- Ampliación de los modelos de simulación con las estrategias de recuperación de aparatos, con secuencias de desmontaje flexibles, esquemas de clasificación, efectos de las economías de escala y distinciones geográficas.
- Desarrollo de sistemas de gestión del conocimiento adquirido con las experiencias previas de reciclado, aplicando técnicas de aprendizaje automático y razonamiento.
- Desarrollo de nuevos sensores y sistemas de identificación en línea de los materiales constitutivos de los RAEE con el fin de aumentar el grado de automatización en las fases de clasificación.
- Nueva generación de robots y herramientas automáticas de desensamblado, más flexibles, capaces de manipular aparatos diversos, componentes deformables, aplicando diferentes grados de fuerzas y con capacidad de desenvolverse en entornos no estructurados y cambiantes.
- Desarrollos de sistemas de información integrados en el mismo aparato electrónico que almacenen la información relativa a su origen, características e historial de uso, recomendaciones de reciclado, etc., con el fin de que el reciclador pueda utilizar esos datos a la hora de programar las secuencias de separación. Un ejemplo es el uso de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification, RFID*) [Lee y Chan, 2009] o con la tecnología NFC (*Near Field Communication*). Será necesaria una fase previa de estandarización de esa información a nivel internacional, dado el flujo comercial de aparatos a ese nivel. De esta forma, cuando llegan los dispositivos a la planta de reciclaje, se leería de forma remota la información contenida en las etiquetas del aparato, volcándola al sistema de gestión, simulación y planificación de operaciones de la planta.

- Predicción de los flujos de retorno y mercados secundarios con el fin de adaptar los medios de reciclaje al volumen y frecuencia de entrada de aparatos y a la comercialización más ventajosa posible de los materiales recuperados.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [Alves et al., 2009] ALVES, M., LIMA, B., EVSUKOFF, A., VIEIRA, I. Developing a fuzzy decision support system to determine the location of a landfill site. *Waste Management & Research*, 27 (7): 641-651, octubre 2009.
- [Andreola et al., 2007] ANDREOLA, F., BARBIERI, L., CORRADI, A., LANCELOTI, I. CRT glass state of art. A case study: Recycling in ceramic glazes. *Journal of the European Ceramic Society*, 27 (2-3): 1623-1629, 2007.
- [Antunes y Peeters, 2000] ANTUNES, A., PEETERS, D. A dynamic optimization model for school network planning. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34 (2): 101-120, junio 2000.
- [Aoe, 2007] AOE, T. Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. *Journal of Cleaner Production*, 15 (15):1406-1414, octubre 2007.
- [Arsham, 1996] ARSHAM, H. Herramientas para el Análisis de Decisión: Análisis de Decisiones Arriesgadas. Actualizada: 1999. [Fecha de consulta: 2 julio 2009]. Disponible en:
<http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishP.htm#rFromDaKno>

- [Arsham, 2003] ARSHAM, H. From Linear to Nonlinear Optimization: The Missing Chapter. *International Journal of Mathematical Education in Science & Technology*, 34 (3): 417-430, 2003.
- [Bailey-Van Kuren, 2002] BAILEY-VAN KUREN, M. Automated demanufacturing studies in detecting and destroying, threaded connections for processing electronic waste. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (6-9 mayo 2002, San Francisco, EEUU). pp. 295-298.
- [Barba-Gutiérrez et al., 2008] BARBA-GUTIÉRREZ, Y., ADENSO-DÍAZ, B., HOPP, M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resources Conservation and Recycling*, 52 (3): 481-495, enero 2008.
- [Batayneh et al., 2007] BATAYNEH, M., IQBAL, M., ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27 (12): 1870-1876, 2007.
- [Bellini, 2004] BELLINI, F. Investigación de operaciones. Actualizada: 2004. [Fecha de consulta: 2 julio 2008]. Disponible en: (<http://www.investigacion-operaciones.com/>)
- [Benedito y Corominas, 2008] BENEDITO, E., COROMINAS, A. Cálculo de la capacidad de fabricación y refabricación óptima para sistemas con logística inversa y demanda determinista constante. En: DEL OLMO, R. (ed.). Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering and

Industrial Management / XII Congreso Ingeniería de Organización (3-5 septiembre 2008, Burgos, España). Burgos: Universidad de Burgos, 2008. pp. 1335-1342.

- [Bogue, 2007] BOGUE, R. Design for disassembly. *Assembly Automation*, 27 (4):285-289. 2007.
- [Bose et al., 2005] BOSE, I., ERYARSOY, E., HE, L. Multi- period design of survivable wireless access networks under capacity constraints. *Decision Support Systems*, 38 (4): 529-538, 2005.
- [Boyce et al., 2002] BOYCE, J., LICHTENVORT, K., JOHANSSON, G. Monitor disassembly and CRT recycling as an example for green cost management system. En: Proceedings of Going Green -CARE Innovation, (25-28 noviembre 2002, Viena, Austria).
- [Choi et al., 2006] CHOI, B.C., SHIN, H.S., LEE, S.Y., HUR, T. Life cycle assessment of a personal computer and its effective recycling rate. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (2):122-128, marzo 2006.
- [Chu et al., 2009] CHU, C.H., LUH, Y.P., LI, T.C., CHEN, H. Economical green product design based on simplified computer-aided product structure variation. *Computers in Industry*, 60 (7): 485-500, septiembre 2009.

- [Clean Washington Center, 2005] CLEAN WASHINGTON CENTER (CWC). Small-scale Recycled Glass to Fines processing System. CWC Guidance. [Fecha de consulta: 5 julio 2005]. Disponible en: <http://www.cwc.org>.
- [Costi et al., 2004] COSTI, P., MINCIARDI, R., ROBBA, M., ROVATTI, M., SACILE, R. An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. *Waste Management*, 24 (3): 277-295, 2004.
- [Cui y Forssberg, 2007] CUI, J., FORSSBERG, E. Characterization of shredded television scrap and implications for materials recovery. *Waste Management*, 27 (3): 415-424, 2007.
- [Cui y Forssberg, 2003] CUI, J., FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 99 (3): 243-263, mayo 2003.
- [Dillon, 1998] DILLON, P. Potencial markets for CRTs and plastics from electronics demanufacturing: An initial scoping report. Chelsea Center for Recycling and Economic Development, 1998.
- [ECOLEC, 2009] ECOLEC . [Fecha de consulta: 5 julio 2009]. Disponible en: <http://www.garciagalvis.com/noticia.asp?id=68>
- [Dini et al., 2001] DINI, G., FAILLI, F., SANTOCHI, M. A disassemblu planning software system for the optimization of recycling process. *Production Planning & Control*, 12 (1): 2-12, enero 2001.

- [Ecomatic, 2005] ECOMATIC GmbH. [Fecha de consulta: 2005]. Disponible en: <http://www.ecomatic.de/>
- [Edinclile et al., 2004] EDINCLILE, A., BAYKAL, G., DENGILI, K. Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways. *Resources, Conservation and Recycling*, 42 (3): 223-237, octubre 2004.
- [Enqvist, 2003] ENQVIST, V.-M. Building tile gives waste glass new application. *Glass machinery plants and accessories*, (16): 112-115, 2003.
- [ENVIROSRIS, 2000] ENVIROSRIS. Les déchets de technologie de l'information et de télécommunications au Canada. Ed. Environnement Canada. Le Bureau national de la prévention de la pollution, 2000. pp. 99-100.
- [ENVIROS, 2002] ENVIROS. Recycled glass market study & standards review – 2003 update. Ed. The Waste & Resources Action programme (*WRAP*), 2002.
- [Ersoy, 2009] ERSOY, H. Spatial and multi-criteria decision analysis-based methodology for landfill site selection in growing urban regions. *Waste Management & Research*, 27 (5): 489-500, agosto 2009.

- [European Commission, 2003a] EUROPEAN COMMISSION. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Bruselas: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [European Commission, 2003b] EUROPEAN COMMISSION. 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. Bruselas: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [European Commission, 2007] EUROPEAN COMMISSION. Review of Directive 2002/96 on waste on Electric and Electronic Equipment. Final Report. Bruselas: Comisión Europea, 2008. [Fecha de consulta: 2 noviembre 2009]. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_report_unu.pdf
- [FEEI, 1996] FACHVERBAND DER ELEKTRO-UND ELEKTRONIKINDUSTRIE (FEEI). Comparison of Systems for Collection / Recycling / Disposal of End-of-life Electrical and Electronic Equipment (EEEE). Ed. Asociación Austríaca de de Industrias Eléctricas y Electrónicas, 1996.

- [Feszty et al., 2003] FESZTY, K., MURCHINSON, C., BAIRD, J., JAMNEJAD, G. Assessment of the quantities of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in Scotland. *Waste Management & Research*, 21 (3): 207-217, junio 2003.
- [FIAR, 1997] FIAR, VLEHAN. National Pilot Project for Collecting, Recycling and Repairing Domestic Appliances and Electrical and Electronic Equipment in the District of Eindhoven – APPARETOUR. Ed. Asociación de fabricantes, importadores, proveedores y agentes del sector eléctrico y electrónico en Holanda, 1997.
- [Fleischmann y Kuik, 2003] FLEISCHMANN, M., KUIK, R. On optimal inventory control with independent stochastic item returns. *European Journal on Operacional Research*, 151 (1): 25-37, noviembre 2003.
- [Fleischmann et al., 2001] FLEISCHMANN, M., BEULLENS, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J., VAN WASSENHOVE, L. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10 (2): 156-173, 2001.
- [Florio et al., 2008] FLORIO, M., FINZI, U., GENCO, M., LEVARLET, F., MAFFII, S., TRACOGNA, A., VIGNETTI, S. Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Evaluation Unit, DG Regional Policy, European Commission, 2008. pp. 42-49.

- [Gaiker, 2007] GAIKER. Reciclado de materiales: perspectivas, tecnologías y oportunidades. Programa SUSTATU de la Diputación Foral de Bizkaia, 2007. pp. 92-93.
- [Gehin et al., 2008] GEHIN, A., ZWOLINSKI, P., BRISSAUD, D. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16 (5): 566-576, marzo 2008.
- [Gent, 2009] GENT, M.R. Recycling of plastic waste by density separation: prospects for optimization. *Waste Management & Research*, 27 (2): 175-187, 2009.
- [Gerner et al., 2005] GERNER, S., KOBEISSI, A., DAVID, B., BINDER, Z., DESCOTES-GENON, B. Integrated approach for disassembly processes generation and recycling evaluation of an end-of-life product. *International Journal of Production Research*, 43 (1): 195-222, enero 2005.
- [Geskin et al., 2002] GESKIN, E.S., GOLDENBERG, B., CAUDILL, R. Development of advanced CRT disassembly technology. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (6-9 mayo 2002, San Francisco, EEUU). pp. 249-253.
- [Gil et al., 2007] GIL, P., POMARES, J., PUENTE, S., DIAZ, C., CANDELAS, F., TORRES, F. Flexible multi-sensorial system for automatic disassembly using cooperative robots. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20 (8): 757-772. Diciembre 2007.

- [Gobierno Vasco, 1996] GOBIERNO VASCO. Recogida y tratamiento de equipos eléctricos y electrónicos en su fin de vida. Flujo doméstico + Flujo ofimático: Una experiencia mixta. Vitoria: Ed. Gobierno Vasco. Viceconsejería de Medio Ambiente, 1996.
- [Gobierno Vasco, 2003] GOBIERNO VASCO. Inventario de residuos peligrosos de la CAPV. Vitoria: Ed. Gobierno Vasco. Viceconsejería de Medio Ambiente, 2003.
- [Grochowski y Tang, 2007] GROCHOWSKI, D., TANG, Y. Parameter estimation for optimal disassembly planning. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (7-10 octubre 2007, Montreal, Canadá). pp. 2490-2495.
- [Grochowski y Tang, 2009] GROCHOWSKI, D.E., TANG, Y. A machine learning approach for optimal disassembly planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22 (4): 374-383, abril 2009.
- [Gschwendtner, 1999] GSCHWENDTNER, G. Tesis doctoral. Vienna University of technology, 1999.
- [Guide, 2000] GUIDE, V. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18 (4): 467-483, 2000.

- [Güngor, 2006] GÜNGOR, A. Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process. *Computers & Industrial Engineering*, 50 (1-2): 35-54. 2006.
- [Van den Hertem, 2007] VAN DEN HERTEN, K. The review of Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). En: GEERTS, F. (ed.). *Proceedings of 6th International Electronics Recycling Congress (17-19 enero 2007, Hamburgo, Alemania)*. Birrwil: ICM, 2007.
- [Herrmann et al., 2008] HERMANN, C. FRAD, A., LUGER, T. Integrating the end-of-life evaluation and planning in the product management process. *International Journal of Progress in Industrial Ecology*, 5 (1-12): 44.64, 2008.
- [Hesselbach y Westernhagen, 1999] HESSELBACH, J., WESTERNHAGEN, K. Disassembly Simulation for an Effective Recycling of Electrical Scrap. En: *Proceedings of EcoDesign '99: First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (1-3 febrero 1999, Tokio, Japón)*. Tokio: Institute of Electrical & Electronics Engineers, 1999. pp. 582-585.

- [Hesselbach et al., 2001] HESSELBACH, E., OHLENDORF, M., HERRMANN, C. Configuration of recycling networks for enhanced WEEE recycling. En: Proceedings of EcoDesign '99: First International Symposium On Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (11-15 diciembre 2001, Tokio, Japón). Tokio: Institute of Electrical & Electronics Engineers, 2001. pp. 516-519.
- [Hieronymi, 2007] HIERONYMI, K. Hewlett-Packard Company's Global Take Back Perspective. En: GEERTS, F. (ed.). Proceedings of 6th International Electronics Recycling Congress (17-19 enero 2007, Hamburgo, Alemania). Birrwil: ICM, 2007.
- [Hinojosa et al., 2000] HINOJOSA, Y., PUERTO, J., FERNÁNDEZ, F.R. A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 123 (2): 271-291, junio 2000.
- [Hischier, 2005] HISCHIER, R., WÄGER, P., GAUGLHOFER, 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*, 25 (5): 525-539, julio 2005.

- [Hohm et al., 2000] HOHM, K., MULLER-HOFSTEDE, H., TOLLE, H. Robot assisted disassembly of electronic devices. En: Proceedings of IROS IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (30 octubre-5 noviembre 2000, Takamatsu, Japón). pp. 1273-1278.
- [Hui et al., 2008] HUI, W., DONG, X., GUANGHONG, D. A genetic algorithm for product disassembly sequence planning. *Neurocomputing*, 71 (13-15): 2720-2726. Agosto 2008.
- [Huijbregts, 2007] HUIJBREGTS, C. Who is involved in illegal export? Enforcement experiences. En: GEERTS, F. (ed.). Proceedings of 6th International Electronics Recycling Congress (17-19 enero 2007, Hamburgo, Alemania). Birrwil: ICM, 2007.
- [IHOBE, 2004] IHOBE (Agencia de Gestión Medioambiental del Gobierno vasco). Monografía de aparatos eléctricos y electrónicos. Vitoria: Ed. Gobierno vasco. Viceconsejería de Medio Ambiente, 2004.
- [ICER, 2004] Industry Council for Electronic Equipment Recycling (ICER). Materials recovery from waste cathode ray tubes (CRT's). Ed. The Waste & Resources Action Programme (WRAP), 2004.

- [Ilgin y Gupta, 2010] ILGIN, M.A., GUPTA, S.M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): a review of the state of the art. *Journal of Environment Management*, 91 (3): 563-591, enero-febrero 2010.
- [IPTS, 2006] IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). Implementation of the Waste Electric and Electronic Equipment Directive in the EU. Ed. European Commission – Directorate-General Joint Research Centre, 2006.
- [IPTS, 2000] IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). Towards a European solution for the management of waste from electric and electronic equipment. Ed. European Commission – Directorate-General Joint Research Centre, 2000.
- [Irasarri, 1994] IRASARRI, L. Residuos informáticos y electrónicos urbanos. *Residuos*, 37-41, 1994.
- [Irasarri, 1994b] IRASARRI, L. La minimización y reciclado de los equipos eléctricos y electrónicos en su fin de vida. *Residuos*, 31: 72-78, 1994.
- [Jun et al., 2009] JUN, H.B., SHIN, J.H., KIM, S., KIRITSIS, D., XIROUCHAKIS, P. A framework for RFID applications in product lifecycle management. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22 (7): 595-615. Julio 2009.

- [Kang y Schoenung, 2006] KANG, H.-Y., SCHOENUNG, J.M. Economic Analysis of Electronic Waste Recycling: Modeling the Cost and Revenue of a Materials Recovery Facility in California. *Environmental Science & Technology*, 40 (5): 1672-1680, enero 2006.
- [Kawaguchi, 2007] KAWAGUCHI, Y. Recycling technology for LCD-TV and closed-loop material recycling of waste Plastics. En: GEERTS, F. (ed.). Proceedings of 6th International Electronics Recycling Congress (17-19 enero 2007, Hamburgo, Alemania). Birrwil: ICM, 2007.
- [Kim et al., 2006] KIM, H.J., CIUPEK, M., BUCHHOLZ, A., SELIGER, G. Adaptive disassembly sequence control by using product and system information. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22 (3): 267-278, julio 2006.
- [Kim et al., 2007] KIM, H.J., LEE, D.H., XIROUCHAKIS, P. Disassembly scheduling: literature review and future research directions. *International Journal of Production research*, 45 (18-19): 4465-4484, septiembre 2007.
- [Kim et al., 2009] KIM, H.J., LEE, D.H., XIROUCHAKIS, O. KWON, O.K. A branch and bound algorithm for disassembly scheduling with assembly product structure. *Journal of the Operational Research Society*, 60 (3): 419-430. Marzo 2009.

- [Klein y Methlie, 1995] KLEIN, M.R., METHLIE, L.B. Knowledge-based decision support systems. Chichester, UK: Ed. Wiley & Sons Ltd, 1995.
- [Knoth et al., 2001] KNOTH, R., HOFFMANN, M., KOPACEK, B., KOPACEK, P. Intelligent disassembly of electronic equipment. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (7-9 mayo 2001, Denver, EEUU).
- [Knoth et al., 2002] KNOTH, R., BRANDSTÖTTER, M., URCH, P., KOPACEK, B., KOPACEK, P. Examples for intelligent disassembly systems. En: Proceedings of Going Green - CARE Innovation (23-28 noviembre 2002, Viena, Austria).
- [Kock y Lau, 2001] KOCK, N., LAU, F. Information systems action research: serving two demanding masters. *Information technology & People*, 10 (1), 2001.
- [Kralj y Markic, 2008] KRAJL, D., MARKIC, M. Sustainable development strategy and product responsibility. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4 (1): 12-23, enero 2008.
- [Krikke et al., 1999] KRIKKE, H.R., VAN HARTEN, A., SCHUUR, P.C. Business case Roteb: recovery strategies for monitors. *Computers & Industrial Engineering*, 36 (4): 739-757, septiembre 1999.

- [Kumar y Putnam, 2008] KUMAR, S., PUTNAM, V. Cradle to cradle: reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of production Economics*, 115 (2): 305-315, octubre 2008.
- [Lambert, 2002] LAMBERT, A. Determining optimum disassembly sequence in electronic equipment. *Computers & Industrial Engineering*, 43 (3): 553-575, septiembre 2002.
- [Lambert, 2007] LAMBERT, A. Optimizing disassembly peocesses subjected to sequence-dependent cost. *Computers & Operations Research*, 34 (2):536-551, febrero 2007.
- [Lamela, 2005] LAMELA, A. La sostenibilidad: un reto global ineludible. *Informes de la Construcción*, 57 (499-500), 2005.
- [Langella, 2007] LANGELLA, I. Heuristics for demand-driven disassembly planning. *Computers & Operations Research*, 34 (2): 552-577, febrero 2007.
- [Lee y Chan, 2009] LEE, C.K.M., CHAN, T.M. Development of RFID-based reverse logistics system. *Expert systems with applications*, 36 (5): 9299-9307, julio 2009.
- [Lee et al., 2001] LEE, D.H., KANG, J.G., XIROUCHAKIS, P. Disassembly planning and scheduling: review and further research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 215 85): 695-709, 2001.

- [Lettinga, 2008] LETTINGA, G. Towards feasible and sustainable environmental protection for all. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 11 (1): 116-124. Enero 2008.
- [Li et al., 2006] LI, J.R., KHOO, L.P., TOR, S.B. Generation of possible multiple components disassembly sequence for maintenance using a disassembly constraint graph. *International Journal of Production Economics*, 102 (1): 51-65, julio 2006.
- [Liu et al., 2002] LIU, Z.F., LIU, X.P, WANG, S.W., LIU, G.F. Recycling strategy and a recyclability assessment model based on an Artificial Neural Network. *Journal Material Processing Technology*, 129 (1-3): 500-506, octubre 2002.
- [Lohse et al., 1998] LOHSE, J., WINTELER, S., WULF-SCHNABEL, J. Collection Targets for Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Final Report. Ed. Directorate General (DG XI) Environment, Nuclear Safety and Civil Protection of the Commission of the European Communities, 1998.
- [Lozano-Pérez y Wilson, 1993] LOZANO-PÉREZ, T., WILSON, R.H. Assembly sequencing for arbitrary motions. En: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (2-6 mayo 1993, Atlanta, EEUU). Washington: Computer Society Press, 1993. pp. 527-532.

- [McTaggart, 1991] McTAGGART, R. Action research: A short modern history. Geelong, Australia: Ed. Deakin University Press, 1991.
- [Martin, 2006] MARTIN, I. Europe en route to a 'recycling society'. *Recycling International*, 38-43, marzo 2006.
- [Meller, 2009] MELLER, P. EU charges Philips and others with forming CRT screen cartel. IDG news Service. 2009. [Fecha de consulta: mayo 2010]. Disponible en:
http://www.pcworld.com/article/183227/eu_charges_philips_others_with_forming_crt_screen_cartel.html
- [Mitsi et al., 2007] MITSU, S. BOUZAKIS, K.D., MANSOUR, G., SAGRIS, D., MALIARIS, G. Off-line programming of an industrial robot for manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26 (3): 262-267, agosto 2007.
- [Mo et al., 2002] MO, J., ZHANG, Q., GADH, R. Virtual Disassembly. *International Journal of CAD/CAM*, 2 (1): 29-37, 2002.
- [Mo et al., 1999] MO, J., CAI, J., ZHANG, Z., LU, Z. DFA-oriented assembly relation modelling. *International Journal Computer Integrated Manufacturing*, 12 (3): 238-250, mayo 1999.
- [Mujber et al., 2005] MUJBER, T.S., SZECSEI, T., HASHMI, M.S.J. Addressing Factory Design and planning Using Simulation and Virtual Reality Technologies. En: ÁLVAREZ, E. (ed.).

- Proceedings of FAIM – 15th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (10-20 julio 2005, Bilbao, España). Bilbao: Universidad de Deusto, 2005. pp. 849-857.
- [Nagel, 1998] NAGEL, C. Take IT back-European approaches for setting up reverse logistic systems. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (4-6 mayo 1998, Oak Brook, EEUU). pp. 25-29.
- [Nilsson et al., 1992] NILSSON, C.-H., NORDAHL, H., PERSSON, I. Analysis and evaluation of flexible capital investment. En: PARSAEI, H.R, MITAL, A. (ed.), Economics of advanced manufacturing systems. London, UK: Chapman & Hall, 1992. pp. 239-253.
- [Nomden et al., 2006] NORDEN, G., SLOMP, J., SURESH, N.C. Virtual manufacturing cells: a taxonomy of past research and identification of future trends. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17 (29): 71-92, abril 2005.
- [Ortega-Mier et al., 2007] ORTEGA-MIER, M., DELGADO, J., GARCÍA-SÁNCHEZ, A. Uso de algoritmos genéticos para resolver el modelo determinista y estocástico para el diseño de una red de recogida de residuos. En: CARRASCO, J. (ed.). Proceedings of 1st International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (5-7 septiembre 2007, Madrid, España). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007. pp. 1443-1451.

- [Padak y Padak, 2005] PADAK, N., PADAK, G. Research to practice: Guidelines for planning action research projects. [Fecha de consulta: mayo 2008]. Disponible en: <http://literacy.kent.edu/Oasis/Pubs/0200-08.htm>
- [Peng y Chung, 2007] PENG, Q., Chung, C. Analysis of part accesibility in product disassembly. *Computer Aided Design & Applications*, 4 (5): 695-704, 2007.
- [Pandey y Thurston, 2009] PANDEY, V., THURSTON, D. Effective age of remanufactured products: an entropy approach. *Journal of Mechanical Design*, 131(3), marzo 2009.
- [Peng y Chung, 2007] PENG, Q., CHUNG, C. Analysis of part accessibility in product disassembly. *Computer-Aided Design & Applications*, 4 (5): 695-704. 2007.
- [Pomares et al., 2004] POMARES, J., PUENTE, S.T., TORRES, F., CANDELAS, F.A., GIL, P. Virtual disassembly of products based on geometric models. *Computers in Industry*, 55 (1): 1-14, septiembre 2004.
- [Prahinski y Kocabasoglu, 2006] PRAHINSKI, C., KOCABASOGLU, C. Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34 (6): 519-532, diciembre 2006.
- [Proventia, 2008] PROVENTIA AUTOMATION. [Fecha de consulta: mayo 2008]. Disponible en: [\[http://www.headinvest.fi/sivu/fi/yritys/uutiset/?tila=yksi&uid=3&tyyppi=0\]](http://www.headinvest.fi/sivu/fi/yritys/uutiset/?tila=yksi&uid=3&tyyppi=0)

- [Queiruga et al., 2008] QUEIRUGA, D., WALTHER, G., GONZÁLEZ-BENITO, J., SPENGLER, T. Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management*, 28 (1): 181-190, 2008.
- [Rahimifard, 2008] RAHIMIFARD, S. Barriers, Drivers and Challenges for Sustainable Product Recovery and Recycling. En: DE VIN, L.J. (ed.). Proceedings of FAIM – 18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (30 junio – 2 julio 2008, Skövde, Suecia). Skövde: University of Skövde, 2008. pp. 2-10.
- [Rao y Padmanabhan, 2008] RAO, R.V., PADMANABHAN, K.K. Selection of best product end-of-life scenario using digraph and matrix methods. *Journal of Engineering Design*, septiembre 2008.
- [RD_2005] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto 208/2005 del 25 de febrero de 2005 sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos. Madrid, 2005. pp. 7112.
- [Rentería y García-Tejedor, 1996] RENTERÍA, A., GARCÍA-TEJEDOR, J. Fabricación virtual: técnicas avanzadas para el diseño de instalaciones robotizadas. *Automática e Instrumentación*, 1996.
- [Rentería y Rivas, 2000] RENTERÍA, A., RIVAS, M. Robótica industrial: fundamentos y aplicaciones. Madrid: Ed. McGraw-Hill, 2000.

- [Rentería, 2006] RENTERÍA, A. Proyecto REUSE: Reciclado de componentes electrónicos en tarjetas de circuitos impresos. Programas Intek del Gobierno Vasco y Profit del Ministerio de Ciencia y Tecnología. 2006.
- [Rentería y Álvarez, 2007] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E. A review of automation alternatives for recycling plants of electronic appliances. En: QIU, R. (ed.). Proceedings of FAIM – 17th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (18-20 junio 2007, Malvern, EEUU). Filadelfia: Philadelphia State University, 2007. pp. 996-1003.
- [Rentería y Álvarez, 2007b] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E. Nueva metodología para la optimización del diseño de líneas de reciclado de aparatos electrónicos. En: CARRASCO, J. (ed.). Proceedings of 1st International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management / XI Congreso Ingeniería de Organización (5-7 septiembre 2007, Madrid, España). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2007. pp. 409-418.
- [Rentería et al., 2007] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J. Proposal of a semi-automated demanufacturing plant for electronic waste. En: COTTERELL, M. (ed.). Proceedings of 24th International Manufacturing Conference (29 julio – 1 agosto 2007, Waterford, Irlanda). Waterford: Waterford Institute of Technology, 2007. pp. 373-379.

- [Rentería et al., 2008] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., LÓPEZ, J.M. A simulation based methodology to define the reuse process of printed circuit board's components. En: DE VIN, L.J. (ed.). Proceedings of FAIM – 18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (30 junio – 2 julio 2008, Skövde, Suecia). Skövde: University of Skövde, 2008. pp. 397-403.
- [Rentería et al., 2009] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., LÓPEZ, J.M. A systematic approach to define the reuse process of printed circuit board's components. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2 (2): 103-110, junio 2009.
- [Rentería et al., 2010] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J., DEL POZO, D. Nuevo método para el diseño optimizado de plantas (semi)automatizadas de tratamiento de RAEE: caso de TV y monitores. *DYNA*. Artículo en fase de subsanación.
- [Rentería et al., 2010b] RENTERÍA, A., ÁLVAREZ, E., PÉREZ, J., DEL POZO, D. Methodology to optimize the recovery of secondary materials in the recycling of electronic equipment. *Waste Management & Research*. Artículo en fase de revisión.
- [Rubio, 2003] RUBIO, S. El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones. Tesis doctoral. Universidad de Salamanca, 2003.
- [Saldanha y Captivo, 1998] SALDANHA, F., CAPTIVO, M.E. A heuristic approach for the discrete dynamic location problem. *Location Science*, 6 (1-4): 211-223, diciembre 1998.

- [Sankar et al., 1999] SANKAR, J., UMA, J., WANG, Y., TIRUMALI, H., Lyons, K. Hart, P. VADE: Virtual assembly design environment. *IEEE Computers graphics and applications*, 19 (6): 44-50, noviembre-diciembre 1999.
- [Schott, 2002] SCHOTT GLASS GmbH. Requirements for Recycling Cullets from End-Of-Life (EOL) CRTs for SCHOTT GLASS. SCHOTT GLAS, SBU Display-Solutions, Spezialglas-Recycling. Mainz (Alemania). 2002.
- [Seyfang, 2007] SEYFANG, G. Grassroots innovations for sustainable environment: towards a new research and policy agenda. *Environmental Politics*, 16 (4):584-603. 2007.
- [Siddique y Rosen, 1997] SIDDIQUE, Z., ROSEN, D. A virtual prototyping approach to product disassembly reasoning. *Computer Aided Design*, 29 (12): 847-860, 1997.
- [Solvay, 2008] SOLVAY, S.A. [Fecha de consulta: mayo 2008]. Disponible en: <http://www.vinyloop.com>.
- [Soni et al., 1992] SONI, R.G., PARSAEI, H.R., LILES, D.H. Economic and Financial Justification Methods for Advanced Automated Manufacturing: An Overview. En: PARSAEI, H.R, MITAL, A. (ed.), Economics of advanced manufacturing systems. London, UK: Chapman & Hall, 1992. pp. 3-19.
- [Sony, 2002] SONY CORPORATION. Social & Environmental Report 2002. 2002. p.35.

- [Sony, 2003] SONY CORPORATION. Corporate Social Responsibility Report 2003. 2003. pp. 58.
- [Sony, 2007] SONY CORPORATION. Corporate Social Responsibility Report 2007. 2007. p. 63.
- [Srinivasan et al., 1999] SRINIVASAN, H., FIGUEROA, R., GADH, R. Selective disassembly or virtual prototyping as applied to de-manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15: 231-245, 1999.
- [Stone, 2006] STONE, H. RoHS- the elusive level playing field. *Recycling International*, 4: 32, 2006.
- [Streicher-Porte et al., 2005] STREICHER-PORTE, M., WIDMER, R., JAIN, A., BADER, H-P., SCHEIDEGGER, R., KYTZIA, S. Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modeling e-waste processing in the informal sector in Delhi. *Environmental Impact Assessment Review*, 25 (5): 472-491, julio 2005.
- [Stuart y Christina, 2003] STUART, J.A., CHRISTINA, V. New metrics and scheduling rules for disassembly and bulk recycling. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 26 (2): 133-140, 2003.
- [Stobbe et al., 2002] STOBBE, I. GRIESE, H. PÖTTER, H. REICHL, H. STOBBE, L. Quality assured disassembly of electronic components for reuse. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the

Environment (6-9 mayo 2002, San Francisco, EEUU). pp. 299-305.

[Sundin y Bras, 2004] SUNDIN, E., BRAS, B. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 13 (9): 913-925. 2004.

[Tang y Zhou, 2001] TANG, Y., ZHOU, M. An integrated approach to disassembly planning and demanufacturing operation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17 (6): 773- 784, diciembre 2001.

[Tang y Zhou, 2004] TANG, Y., ZHOU, M. Fuzzy Petri-Net based disassembly planning considering human factors. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, 36 (4): 718-726, 2004.

[Tange y Drohmann, 2002] TANGE, L., DROHMANN, D. Bromine recovery from plastics containing brominated flame retardants. EBFRIP, the European Brominated Flame Retardant Industry Panel, 2002.

[Teunter, 2006] TEUNTER, R.H. Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34 (6): 533-537, diciembre 2006.

[Thomson, 2005] THOMSON, D. Views on an emerging issue of concern - the collection and recycling of electronic products, by Electronic Manufacturer's Coalition for Responsible Recycling. [Fecha de consulta: noviembre 2008].]

Disponible en:

<http://www.electronicrecycling.org/NCER/UserDocuments/Thompson.doc>.

[Tripathi et al.,
2009]

TRIPATHI, M., AGRAWAL, S. PANDEY, M.K., SHANKAR, R. TIWAN, M.K. Real world disassembly modeling and sequencing problem: optimization by algorithm of self-guided ants (ASGA). Robotics and Computers-Integrated Manufacturing, 25 (3): 483-496. Junio 2009.

[Turowski et al.,
2005]

TUROWSKI, M., TANG, Y., MORGAN, M. Analysis of an Adaptive Fuzzy system for disassembly process planning. En: IEEE (ed.) Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (16-19 mayo 2005, New Orleans, EEUU). pp. 249-254.

[Vicor, 2005]

VICOR VIDEO COMPUTER RECYCLING GmbH. [Fecha de consulta: septiembre 2005]. Disponible en: <http://www.vicor-berlin.de>

[De Vin et al.,
2005]

DE VIN, L.J., NG, A.H.C., OSCARSSON, J., ANDLER, S.F. Information Fusion for Simulation Based Decision Support in Manufacturing. En: ÁLVAREZ, E. (ed.). Proceedings of FAIM – 15th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (10-20 julio 2005, Bilbao, España). Bilbao: Universidad de Deusto, 2005. pp. 136-144.

- [Vollrath, 2006] VOLLRATH, K. Buried under a mountain of red tape. *Recycling International*, 3: 22-29, marzo 2006.
- [Vollrath, 2006b] VOLLRATH, K. Bureaucracy undermines established recycling paths. *Recycling International*, 3: 30-31, marzo 2006.
- [Widmer et al., 2005], WIDMER, R., OSWALD-KRAPF, H., SINHA-KHETRIWAL, D., SCHNELLMANN, M., BÖNI, H. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25 (5): 436-458, julio 2005.
- [Williams, 2007] WILLIAMS, J.A.S. A review of research towards computer integrated demanufacturing for materials recovery. *International Journal of computer Integrated Manufacturing*, 20 (8):773-780. 2007.
- [Zhan y Forssberg, 1999] ZHANG, S., FORSSBERG, E. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. *Powder technology*, 105 (1-3): 295-301, 1999.
- [Zonneveld, 2006] ZONNEVELD, N. Where are WEEE?. *Recycling International*, 1: 28-29, 2006.
- [Zonneveld, 2007] ZONNEVELD, N. A treatise on the (illegal) export of WEEE. En: GEERTS, F. (ed.). Proceedings of 6th International Electronics Recycling Congress (17-19 enero 2007, Hamburgo, Alemania). Birrwil: ICM, 2007. pp. 17-19.

[Zuidwijk y Krikke, 2008] ZUIDWIJ, R., KRIKKE, H. Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes?. *European Journal of Operational Research*, 191 (3): 1206-1222, diciembre 2008.

[Zwolinski et al., 2007] ZWOLINSKI, P., TICHKIEWITCH, S., SGHAIER, A. The use of Virtual Reality techniques during the design process: from the Functional Definition of the product to the Design of its Structure. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 56 (1): 135-138, 2007.

8. TERMINOLOGÍA

AEE:	Aparato eléctrico /electrónico. Según directiva: “ <i>Aparatos que necesitan para funcionar corriente eléctrica o campos electromagnéticos, destinados a ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1.000 V en corriente alterna y 1.500 V en corriente continua, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir dichas corrientes y campos</i> ”.
BFR:	Retardantes de llama bromados (<i>Bromated Flame Retardant</i>).
CAD, CAM, CAE, CAPE:	Acrónimos que hacen referencia a diferentes sistemas computerizados de asistencia al diseño (CAD), mecanizado (CAM), ingeniería (CAE) e ingeniería de producto (CAPE).
CER:	Catálogo Europeo de Residuos.
CRC, HFC:	Componentes clorados.
CFC:	Clorofluorocarbonos.
OCDE/ OECD:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>).
CRT / TRC:	Tubo de Rayos Catódicos (<i>Cathodic Ray Tube</i>).
CRS:	Centros de Recogida Selectiva.
DFD:	Diseño para Desensamblado (<i>Design For Disassembly</i>).
DFA:	Diseño para Ensamblado (<i>Design For Assembly</i>).

DSS:	Sistemas de ayuda a la decisión (<i>Decission Support Systems</i>).
Ecodiseño:	Conjunto de propuestas para diseñar un producto teniendo en cuenta su impacto medioambiental durante su ciclo de vida completo.
IGES, VDA-FS, SET:	Formatos de intercambio de datos geométricos entre programas de diseño y simulación gráfica.
IHOBE:	Agencia de Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
Impacto Medioambiental:	Influencia (positiva o negativa) de un producto o actividad sobre su entorno natural.
ISO 14000:	Norma internacional de normalización que hace referencia a la temática medioambiental.
ISO 9000:	Norma internacional de normalización que hace referencia a la temática de procesos.
Lay-out:	Distribución en planta de elementos de producción.
LCD:	Pantalla de Cristal Líquido (<i>Liquid Cristal Display</i>).
London Metal Exchange:	Bolsa de Metales de Londres.
MIR:	Radiación infrarroja media (<i>Mid Infrared Radiation</i>).
PCB:	Tarjeta de circuito impreso (<i>Printed Circuit Board</i>).
Programación lineal:	Procedimiento o algoritmo matemático para resolver un problema formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando una función objetivo también lineal.
Programación	Procedimiento que intenta optimizar una función

dinámica:	objetivo, en problemas no lineales, discretizables y secuenciales.
Programación offline:	Método de programación de máquinas (robot) utilizando entornos virtuales, descargando posteriormente el programa definitivo en el dispositivo real.
RAEE / WEEE:	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (<i>Waste from Electronic and Electrical Equipment</i>). Según directiva: “Aparatos eléctricos y electrónicos cuyos materiales, componentes, consumibles y subconjuntos proceden tanto de usos domésticos como de usos profesionales, a partir del momento en que pasan a ser residuos.”
ROHS:	Restricción del uso de sustancias peligrosas (<i>Restriction of the use of Hazardous Substances</i>).
RSU:	Residuos Sólidos Urbanos.
Redes Bayesianas Híbridas:	Modelo gráfico probabilístico representado por un conjunto de variables y sus dependencias probabilísticas.
Redes de Petri:	Lenguaje de modelado matemático para la descripción de sistemas discretos distribuidos.
RTP:	Residuos Tóxicos o Peligrosos.
TRC:	Tubo de Rayos Catódicos.
Valorización energética:	Obtención de energía, generalmente por combustión.
XRF:	Fluorescencia de Rayos X.

9. APÉNDICE

9.1 Evolución de la cotización de diversos materiales y su consumo



Figura 9.1 Evolución del precio del plomo (€/t)



Figura 9.2 Evolución del precio del hierro (€/t)

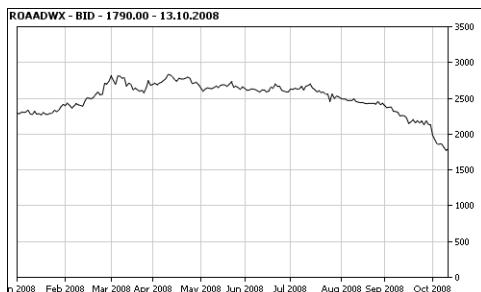


Figura 9.3 Evolución del precio del aluminio (€/t)



Figura 9.4 Evolución del precio del zinc (€/t)



Figura 9.5 Evolución del precio del cobre (€/t)

Fuente: London Metal Exchange (consultada en octubre 2008).

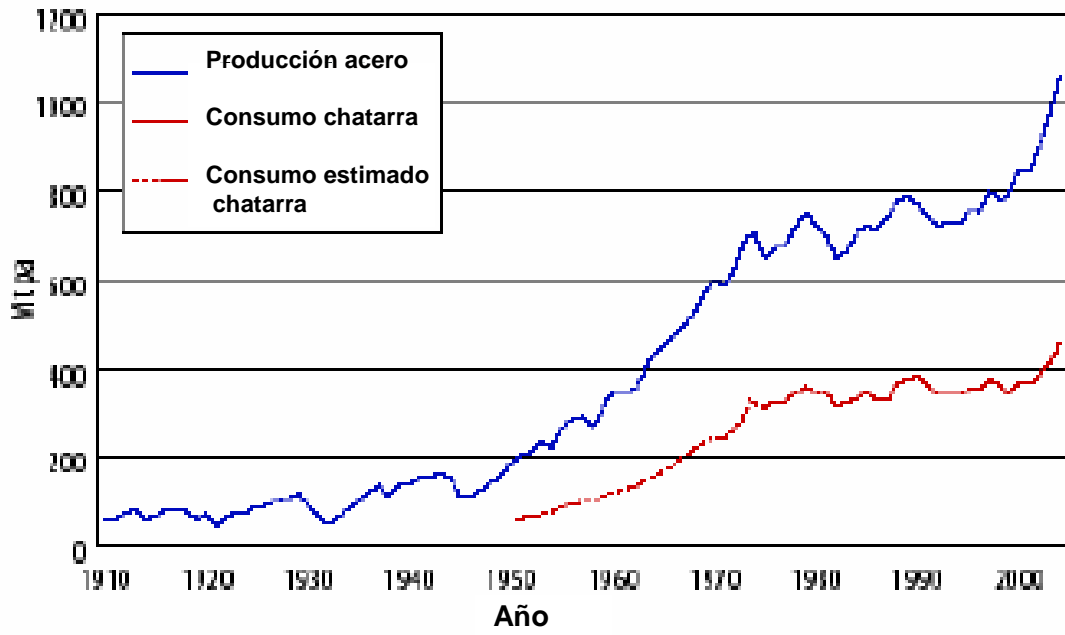


Figura 9.6 Evolución del consumo de acero. Fuente: Comisión Europea, 2007

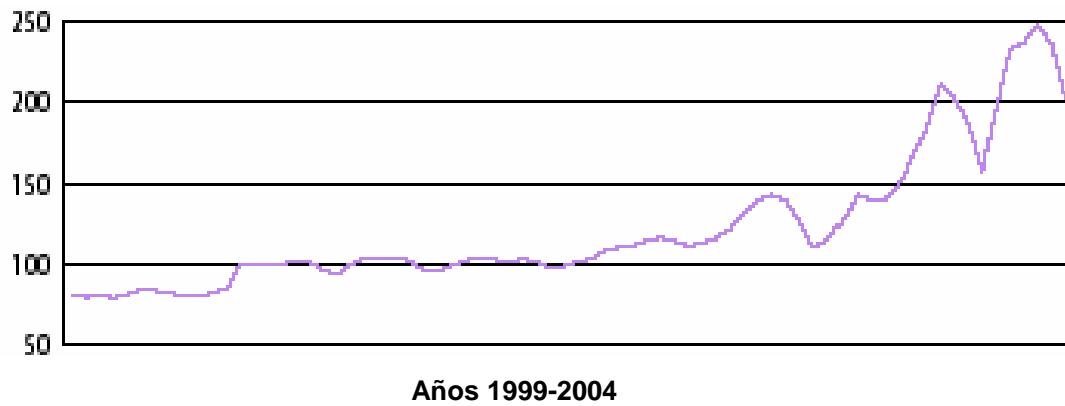


Figura 9.7 Precios del mercado europeo para acero reciclado (€/t). Fuente: Eurofer, 2007