

Trabajo de Fin de Máster

Máster en Ingeniería Química

Análisis del impacto económico y ambiental del reciclaje de
residuos eléctricos y electrónicos

MEMORIA

Autor: Ana Varela Penedo
Director: César Alberto Valderrama Ángel
Convocatoria: Octubre 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Con el presente trabajo se pretende analizar la viabilidad de las plantas de tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Para llegar a este objetivo se comienza estudiando esta corriente de residuos, es decir, que elementos la forman y su evolución en el tiempo. Una vez se ha especificado esta corriente se hace un repaso a la legislación correspondiente, la cual marca el tratamiento que se le ha de realizar a cada fracción del residuo. Posteriormente se revisan los principales estudios realizados hasta la fecha en materia de viabilidad de este tipo de plantas y se estudia su método de financiación.

Centrándose ya en la planta objeto de este estudio, se describen las operaciones llevadas a cabo en ella y se realizan los análisis económicos y ambientales correspondientes. También se estudia la rentabilidad de una planta de este tipo mediante el VAN y el TIR. Tras esto, se compara la obtención de materiales nuevos a partir de elementos reciclados con su obtención a partir de materias primas y las emisiones que se producirían si estos residuos se incineraran en un vertedero al aire libre.

Por último, se detalla la importancia de tratar estos residuos y no desviarlos a otros países en los cuales no se cumple la legislación en cuanto a su tratamiento.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
SUMARIO DE TABLAS	5
SUMARIO DE ILUSTRACIONES	6
1. GLOSARIO	7
2. PREFACIO	8
2.1. Origen del proyecto	8
2.2. Motivación	8
3. INTRODUCCIÓN	10
3.1. Objetivos del proyecto	10
3.2. Conocimientos previos	10
4. GESTIÓN DE RAEE	13
4.1. Legislación	13
4.2. Tratamiento	14
4.3. Estudios sobre la viabilidad de las plantas de tratamiento.....	15
4.4. Financiación	17
4.5. Economía circular	18
5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE ESTUDIO	20
6. PLANTA DE RAEE	27
6.1. Análisis económico	27
Línea blanca con residuos peligrosos	29
Línea marrón con residuos peligrosos	30
6.2. Cálculo de la inversión de la planta de RAEE	34
Inversión inicial	34
Amortizaciones	36
Ingresos	38
Gastos	41
Cash flow	43
6.3. Análisis del impacto ambiental.....	47
7. DEPOSICIÓN EN VERTEDERO Y EXTRACCIÓN DE NUEVOS	

MATERIALES	52
7.1. Impacto de los vertederos	52
7.2. Impacto de la extracción de materiales vírgenes.....	54
7.2.1. Metales ferrosos.....	54
7.2.2. Metales no ferrosos.....	55
7.2.3. Plásticos	56
7.2.4. Vidrio.....	56
7.2.5. Cálculo del ahorro de emisiones de CO _{2e}	57
8. IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE RAEE	59
CONCLUSIONES	61
PASOS FUTUROS	63
BIBLIOGRAFÍA	64
Recursos web	65
ANEXO I	67
Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable	67

Sumario de tablas

Tabla 1. Generación de RAEE en España, 2012.	12
Tabla 2. Composición media en masa de determinados RAEE en Europa. Fuente: Waste from electrical and electronic equipment, European Environment Agency	14
Tabla 3. Porcentaje másico de los productos obtenidos de los aparatos de línea blanca con residuos peligrosos.	23
Tabla 4. Porcentaje másico de los productos obtenidos de los aparatos de línea marrón con residuos peligrosos.	26
Tabla 5. Datos de producción supuestos para la línea blanca con residuos peligrosos.	29
Tabla 6. Beneficio de la línea blanca con residuos peligrosos.	30
Tabla 7. Datos de producción supuestos para la línea marrón con residuos peligrosos.	31
Tabla 8. Beneficio de la marrón con residuos peligrosos.	32
Tabla 9. Detalle de la inversión inicial necesaria para una planta de tratamiento de RAEE.	35
Tabla 10. Cálculo de las amortizaciones asociadas a cada tipo de inmovilizado en los diez años de estudio. (Vi: valor inicial, VR: valor residual).	37
Tabla 11. Ingresos anuales asociados a los diferentes productos y al canon de los SIGs.	39
Tabla 12. Gastos anuales existentes en la planta.	42
Tabla 13. Cálculo de los cash flow anuales.	44
Tabla 14. Distancia máxima de recogida de residuo.	48
Tabla 15. ODP y GWP de diferentes gases refrigerantes.	49
Tabla 16. Ahorro de las emisiones de CO _{2e} comparación tratamiento-incineración al aire libre.	53
Tabla 17. Emisiones de CO _{2e} asociadas a la emisión de R11	53
Tabla 18. Ahorro en las emisiones de CO ₂ comparación reciclaje-extracción.	58

Sumario de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de flujo del tratamiento de línea blanca con residuos peligrosos (Azul: proceso, rojo: materiales peligrosos, verde: reciclaje)	21
Ilustración 2. Diagrama de flujo del tratamiento de línea marrón con residuos peligrosos (Azul: proceso, rojo: materiales peligrosos, verde: reciclaje)	25
Ilustración 3. Mapa de Galicia con las plantas de RAEE, los puntos de almacenamiento y los de recogida (en rojo la planta de estudio).	27
Ilustración 4. Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable de la línea blanca con residuos peligrosos.	30
Ilustración 5. Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable de la línea marrón con residuos peligrosos.	31
Ilustración 6. Evolución del VAN en función de la tasa de descuento.	46
Ilustración 7. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (metales ferrosos).	54
Ilustración 8. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (aluminio).	55
Ilustración 9. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (vidrio).	57
Ilustración 10. Flujo de RAEEs desde los países desarrollados a países en vías de desarrollo. Fuente: http://ewasteguide.info/europe-breaking	60

1. Glosario

AEE: aparatos eléctricos y electrónicos

BATRRT: best available treatment recovery and recycling techniques

CFC: clorofluorocarbonos

CRT: *cathode ray tube* (tubo de rayos catódicos)

EPA: Environmental Protection Agency

GWP: potencial de efecto invernadero.

HCFC: hidroclorofluorocarbonos

LME: London Metal Exchange

MAGRAMA: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

MINETUR: Ministerio de Industria, Energía y Turismo

ODP: potencial de destrucción de la capa de ozono.

PUR: poliuretano

RAEE: residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

RAP: responsabilidad ampliada del productor

RD: Real Decreto

RSU: residuos sólidos urbanos

SIG: sistema integrado de gestión

TIR: tasa interna de rentabilidad.

VAN: valor actual neto.

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La elaboración de este trabajo se enmarca en el contexto del Trabajo Fin de Máster de Ingeniería Química de la Universidad Politécnica de Cataluña. Más concretamente, el interés por este tema surge a partir de la realización de las prácticas en una planta de tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

2.2. Motivación

En el siglo XXI, en una sociedad en la que predomina el consumismo, uno de los grandes retos a solucionar es la generación y tratamiento de los residuos sólidos. Esta producción de residuos viene asociada a la mejora del bienestar humano y se ha dado a lo largo de toda la historia de la humanidad. Pero hasta finales del siglo XVIII, con el comienzo de la revolución industrial, estos residuos eran absorbidos por el entorno al ser mayoritariamente materia orgánica. Sin embargo a partir de esta fecha, con el aumento del comercio, de la población mundial y del descubrimiento de nuevos materiales, empieza a surgir la problemática de su tratamiento. Esto se agudiza cuando la materia orgánica ya no es la fracción mayoritaria de esta corriente, sino que comienzan a utilizarse en masa los envases plásticos o metálicos.

Actualmente, la generación de residuos sigue aumentando como consecuencia de la expansión demográfica y el desarrollo económico, por lo que es necesario buscar nuevas vías de tratamiento. En España se generaron alrededor de 137 millones de toneladas de residuos en 2010 de los cuales el 61% se destinaron a la valorización, en la que se incluye el reciclaje y la incineración, y el 37% acabaron en vertederos. Si se comparan estos datos con los de la UE-28 son positivos ya que la media es de un 49% para valorización y 45% para vertedero (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014). Dentro de los residuos sólidos, los mayoritarios son aquellos que se denominan residuos sólidos urbanos (RSU), procedentes de las actividades domésticas y todos aquellos del sector servicios o de la industria que se pueden asimilar a los RSU.

Es importante destacar que almacenando estos residuos en un vertedero se pierden gran cantidad de recursos, que si se recuperasen se evitaría su extracción de manera virgen. Además, si estos vertederos no se construyen de forma controlada pueden generar múltiples impactos en el medio ambiente, como contaminación de las aguas o emisión de gases de efecto invernadero, y en la salud de las personas por fugas de componentes tóxicos o debido a la proliferación de roedores portadores de enfermedades.

Por ello, la mejor forma de combatir estos problemas asociados a los residuos es reducir

su generación. Con todo, no es posible la situación de residuos cero por lo que actualmente se pueden seguir tres vías alternativas.

Por un lado se encuentra el compostaje, que presenta la ventaja de que se obtiene un producto natural aunque solo se puede realizar a partir de la materia orgánica presente en los RSU. Otra opción es la valorización energética mediante incineración, cuya mayor ventaja es el aprovechamiento de energía y su principal inconveniente es que produce gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, y tóxicos, como las dioxinas, que deben tratarse posteriormente. La tercera opción es el reciclaje que, aun siendo la mejor alternativa actualmente, también presenta un coste ambiental en cuestiones relativas al consumo de combustible, ya sea para trasladar el residuo o para su tratamiento; y económico, puesto que el proceso no siempre es rentable.

Es por ello que desde los gobiernos se necesita una inversión en concienciación para reducir la producción de residuos y en financiación para las plantas de reciclaje.

Debido a la variedad de materiales que forman los RSU es necesario hablar de cada una de las fracciones por separado. Dentro de los RSU se encuentra la corriente de residuos con mayor crecimiento en Europa, se estima que aumenta cada año de un 3 a un 5% (Hischier et al., 2005). Este tipo de residuo procede de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) y hasta hace pocos años su gestión no estaba regularizada.

Suponen un gran peligro para la salud y el medio ambiente puesto que habitualmente contienen elementos peligrosos que, si no se tratan de forma adecuada, pueden liberarse a la atmósfera, al agua o al suelo provocando grandes daños a su alrededor.

Actualmente, este tipo de residuos se tratan en plantas específicas, pero aun así una parte muy importante escapa de los cauces legales y se envía a países en vías de desarrollo en los cuales las restricciones legales son más laxas o inexistentes ya que es más económico. En estos países, como China o India, se incineran al aire libre provocando grandes problemas ambientales y de salud debido a la emisión de compuestos tóxicos.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El principal objetivo de este proyecto es aportar los datos necesarios para la justificación de la existencia de las plantas de tratamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos desde dos puntos de vista, el económico y el ambiental.

Para ello se definen unos objetivos secundarios:

- Aspecto económico: detallar la composición de los RAEE para calcular el coste de su tratamiento y los ingresos asociados a la venta de las fracciones valorizables. En relación con estas fracciones, se estudia el coste económico de la extracción de estos materiales. También se estudia la viabilidad de la planta mediante el cálculo de la rentabilidad, con el uso de los indicadores económicos Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).
- Aspecto ambiental: estudiar los efectos ambientales de la explotación de la planta y definir la cantidad de compuestos peligrosos y tóxicos presentes en los RAEE que no se emiten gracias a la existencia de estas plantas. Por otro lado, también se analiza el impacto ambiental de utilizar materiales reciclados como metales o plásticos, en comparación con la extracción de material virgen.
- Analizar las posibilidades en materia de economía circular que se pueden asociar a esta corriente de residuos, tales como la reparación y posterior reutilización, y el aprovechamiento de materiales valiosos para reintroducirlos en el mercado y que pasen a formar parte de nuevos aparatos.

3.2. Conocimientos previos

Se denominan aparatos eléctricos y electrónicos a “aquellos aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, que están destinados a utilizarse con una tensión nominal no superior a 1.000 voltios en corriente alterna y 1.500 voltios en corriente continua” (Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos).

Este grupo de residuos se caracteriza por dos motivos principales, uno es su alta complejidad ya que suelen estar formados por múltiples partes y componentes de diversa naturaleza; y el otro es que se trata de una de las corrientes de residuos con mayor crecimiento. Esto se debe a la reducción de los ciclos de vida de los diferentes aparatos y a que cada vez se hacen más accesibles a toda la población.

En la Unión Europea se pusieron a la venta más de 9,5 millones de toneladas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Huisman et al., 2008) agrupados en su mayoría de la siguiente forma:

- Más de 44 millones de grandes aparatos domésticos como neveras, microondas, aires acondicionados...
- 48 millones de ordenadores portátiles o de sobremesa.
- 32 millones de televisiones.
- 776 millones de bombillas.

Estos residuos se englobaban en la categoría de residuos voluminosos, pero se trata de un término poco preciso ya que está compuesto por numerosos tipos de aparatos que hace de su gestión un tema muy complicado. Actualmente se les denomina RAEEs, y cuentan con legislación específica (Directiva Europea) debido a los motivos anteriormente citados. En ella se da la siguiente clasificación:

1. Grandes electrodomésticos.
 - 1.1. Frigoríficos, congeladores y otros equipos refrigerados.
 - 1.2. Aire acondicionado.
 - 1.3. Radiadores y emisores térmicos con aceite.
 - 1.4. Otros grandes electrodomésticos: Lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas, hornos eléctricos...
2. Pequeños electrodomésticos.
3. Equipos de informática y telecomunicaciones.
4. Aparatos electrónicos de consumo y paneles fotovoltaicos.
 - 4.1. Monitores, pantallas y televisores: Televisores de rayos de tubo catódico (CRT), pantallas LED, pantallas planas, monitores de ordenadores personales.
 - 4.2. Paneles fotovoltaicos de silicio.
 - 4.3. Paneles fotovoltaicos de telurio de cadmio.
5. Aparatos de alumbrado (con excepción de las luminarias domésticas).
 - 5.1. Lámparas de descarga de gas.
 - 5.2. Lámparas con diodos emisores de luz (LED).
 - 5.3. Luminarias profesionales.
 - 5.4. Otros aparatos de alumbrado.

6. Herramientas eléctricas y electrónicas (con excepción de las herramientas industriales fijas de gran envergadura).
7. Juguetes o equipos deportivos y de ocio.
8. Productos sanitarios (con excepción de todos los productos implantados e infectados).
9. Instrumentos de vigilancia y control.
10. Máquinas expendedoras.
 - 10.1. Máquinas expendedoras con gases refrigerantes.
 - 10.2. Resto de máquinas expendedoras.

En la Tabla 1 (adaptada de Eurostat) se muestra la cantidad de residuos recogidos de este tipo en España en el año 2012. Como se puede ver, las cuatro primeras categorías engloban el 90% de los RAEE.

Tabla 1. Generación de RAEE en España, 2012.

Total (t)	Grandes electrodomésticos (t)	Pequeños electrodomésticos (t)	Equipos de informática y telecomunicaciones (t)	Aparatos de consumo (t)	Otros (t)
157.994	90.594	7.050	20.679	23.876	15.794

Como se puede observar este grupo también es muy heterogéneo y engloba residuos de orígenes muy diferentes, por lo que no todos se tratan de la misma forma. De hecho, en el RD 110/2015, que surge a partir de la Directiva Europea 2012/19/UE, se establecen las diferentes líneas de tratamiento y qué residuo debe ir por cada línea. En él se especifican protocolos para el tratamiento de residuos que contengan CFC, NH₃ o HC (Categorías 1 y 10.1) y para pantallas CRT y pantallas planas (Categoría 4.1) entre otros.

4. Gestión de RAEE

En los siguientes apartados se realiza un repaso de los aspectos legales más relevantes para la correcta gestión y tratamiento de RAEE. Así mismo también se comentan algunos de los estudios relacionados con la viabilidad económica y ambiental de las plantas de reciclaje, y se finaliza explicando la financiación del tratamiento.

4.1. Legislación

La gestión de RAEE ha ido cobrando mucha importancia a lo largo de los años, pero aun así hace poco tiempo que existe una legislación específica. En los años 90 determinados países de Europa, como Austria, Italia o Suiza, comenzaron a incorporar determinadas normativas. Pero otros países, como España, no implantaron ninguna legislación hasta que nació la Directiva 2002/96/CE de 2003 del Parlamento Europeo y el Consejo. En ella, la primera específica de RAEE, se tratan temas fundamentales como diseñar aparatos más eficientes y con un proceso de reciclado más sencillo.

Pero todavía seguían existiendo dos aspectos muy preocupantes de este tipo de residuos, uno es el corto ciclo de vida de estos aparatos y otro es que existe una importante salida de residuo fuera de la Unión Europea a lugares donde se desconoce cómo se gestionan. Esto último es de gran relevancia puesto que habitualmente se desvían a países en los que la legislación no es tan estricta, lo que provoca que no se traten de forma adecuada y se incrementa el riesgo en la salud y medio ambiente de esa zona.

De esta forma, con el objetivo de subsanar las deficiencias detectadas, en el año 2012 se sustituye por la Directiva 2012/19/UE, que propone mejoras en la gestión de RAEE y en la que se engloba otra legislación relacionada con los residuos.

El fin último de esta ley es llegar a un consumo sostenible, utilizar los recursos actuales sin comprometer el futuro de las próximas generaciones. Para ello se hace especial hincapié en que los productores deben realizar un diseño que facilite la reparación y actualización de sus productos. Con esto se permitiría alargar su vida útil y evitar la producción de aparatos nuevos, evitando el consumo de materias primas. Por ello se utiliza el principio de Responsabilidad Ampliada del Productor (RAP): *quien contamina paga*. Así se pretende incentivar la conciencia del productor.

La adaptación de estas leyes al ámbito nacional se realizó en primer lugar con el Real Decreto 208/2005 en el que se incorporó la Directiva 2002/96/CE y determinados aspectos de la Directiva 2002/95/CE en materia de sustancias peligrosas usadas en la construcción de AEE. El RD permite intervenir al gobierno en la gestión de RAEE para que se realice adecuadamente y tiene como máxima la reducción y la reutilización,

quedando el reciclaje como tercera opción.

Actualmente está en vigor el Real Decreto 110/2015, que traslada la Directiva 2012/19/UE al estado español, derogando el anterior RD e intentando solucionar sus puntos débiles y aclarando las posibles interpretaciones que se pudieran realizar.

De los objetivos destacan el establecimiento detallado de las obligaciones de los usuarios, fabricantes, gestores y todos aquellos que traten con el residuo; garantizar la trazabilidad del residuo y su adecuada gestión; promover la reutilización, y hacer que la gestión de RAEE sea eficiente bajo la responsabilidad ampliada del productor.

4.2. Tratamiento

La importancia del tratamiento de esta corriente de residuos radica en que están compuestos de materias primas muy valiosas. Los AEE están compuestos por metales, plásticos, vidrios y otros materiales como madera. Se tratan de objetos muy diversos y, debido a su naturaleza diferente, cada uno tiene una proporción de componentes particular. Muchos de ellos tienen una extracción o elaboración muy costosa, tanto económica como ambiental, y por ello es de vital importancia recuperar el máximo posible de estos compuestos.

Al mismo tiempo estos aparatos también contienen sustancias peligrosas necesarias para su funcionamiento que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y para la salud humana si no se tratan de forma adecuada, por lo que su recogida, almacenamiento, transporte y tratamiento se tienen que realizar en determinadas condiciones para evitar que se mezclen con otros flujos de residuos.

Tabla 2. Composición media en masa de determinados RAEE en Europa. Fuente: Waste from electrical and electronic equipment, European Environment Agency

Aparatos	Hierro (%)	Metales no ferrosos (%)	Vidrio (%)	Plástico (%)	Componentes electrónicos (%)	Otros (%)	Total (%)
Frigoríficos y congeladores	64,4	6	1,4	13		15,2	100
Ordenadores	35,3	8,4	15	23,3	17,3	0,7	100
TV	5,3	5,4	62	22,9	0,9	3,5	100
Fotocopiadoras	58	8	7	9	2	16	100
Pequeños aparatos	38	21			41		100

En la Tabla 2 se muestra la composición (porcentaje en masa) de diferentes aparatos y en ella se observa que hay grandes diferencias entre ellos, hecho que dificulta su

tratamiento. A continuación se detalla que incluye cada una de las categorías nombradas en la tabla:

- Hierro, usado en las carcasas.
- Metales no féreos, como el cobre de los cables o el aluminio.
- Vidrio, usado en las pantallas.
- Plásticos, como el de las carcasas o el recubrimiento de los cables.
- Componentes electrónicos de los circuitos impresos.
- Otros, como madera, goma o cerámica.

Aunque existen diversas formas de realizar el tratamiento de RAEE, unas más respetuosas que otras con el medioambiente u otras en las que se obtiene una mayor recuperación, tanto en la Directiva Europea como en el Real Decreto se establece una lista en la que se encuentran los componentes que, como mínimo, hay que separar. Entre ellos se encuentran los compuestos con mercurio, las tarjetas de circuitos impresos, los tóner, los tubos de rayos catódicos (CRT), clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC)...

Por otro lado, también existe una guía de mejores técnicas disponibles para el tratamiento de recuperación y reciclaje (BATRRRT, sus siglas en inglés) de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. En ella se establecen los mejores métodos para retirar los elementos peligrosos de los RAEE, de acuerdo a la legislación.

La legislación actual marca los pasos a seguir en las plantas de tratamiento de RAEE en cuanto a descontaminación del residuo, tanto a nivel europeo como estatal. Esto se debe a la gran importancia que están cobrando estos residuos hoy en día, ya sea por el elevado valor de sus componentes o por su peligrosidad para el medioambiente.

4.3. Estudios sobre la viabilidad de las plantas de tratamiento

Desde la puesta en marcha de este tipo de plantas han surgido numerosos debates y estudios sobre su viabilidad, mayoritariamente en temas de logística. Esto se debe a que son residuos voluminosos que se encuentran dispersos por toda la geografía y que para su traslado no es posible compactarlos, sino que deben mantener su estado original con

el fin de evitar cualquier tipo de fuga de material peligroso. Habitualmente estos estudios se basan en el análisis del ciclo de vida en los que se comparan varios escenarios, como por ejemplo la recolección y tratamiento de los RAEE o la disposición de los mismos en vertederos. Barba-Gutiérrez et al., (2007) estudiaron como se veían afectadas la salud humana, la calidad del ecosistema y los recursos en función de la distancia recorrida por los camiones que transportan los RAEE.

Otro tipo de estudio que se ha realizado ha sido el análisis del impacto ambiental y del económico que supone la utilización de materiales reciclados como cobre o hierro en comparación con los mismos materiales vírgenes. La Agencia para la Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA) ha identificado ciertos beneficios a la hora de utilizar hierro y acero reciclado, como es un ahorro de la energía, menor uso de agua o una reducción de la contaminación de aguas. Por otro lado también se ha calculado el ahorro energético que supone utilizar aluminio reciclado (95%), cobre (85%) o plásticos (>80%) (Cui y Forssberg, 2003).

En el artículo de Biganzoli et al., (2015) se realiza un análisis del impacto ambiental que tienen las plantas de tratamiento primario en Italia, comparando el efecto que tiene tratar los RAEE o no en diferentes categorías, como destrucción de la capa de ozono. Los resultados obtenidos son todos positivos con respecto al tratamiento, salvo en el caso de los efectos tóxicos y cancerígenos y en la ecotoxicidad del agua, que se relacionan con la producción de acero reciclado.

También se han realizado estudios en Suiza que comparan la gestión adecuada con la incineración completa (Hischier et al., 2005), en el cual se demuestra que el reciclaje presenta numerosas ventajas frente a la incineración.

En cuanto al análisis del impacto económico muchos de los estudios que se han realizado se basan en un balance a nivel de viabilidad de una planta de tratamiento de RAEEs. También hay otros que lo realizan entre lo que cuesta la extracción o fabricación de material virgen y lo que cuesta la compra, por parte de los productores de aparatos eléctricos y electrónicos, de material reciclado. Este precio de venta del material reciclado habitualmente viene marcado según la dificultad de separación de un componente o según la dificultad del proceso de reciclaje.

En el caso del trabajo de Huisman et al. (2008), se valora el impacto económico para diferentes categorías de residuos en el que se tiene en cuenta el transporte y la recogida, el desmantelamiento, el reciclaje y la incineración o la disposición en vertederos. Los resultados obtenidos están muy influenciados por el desarrollo tecnológico existente en

cada planta, por la accesibilidad al mercado de cada país y por los precios de los materiales resultantes.

Los autores Cucchiella et al. (2015), estiman que en 2014 los beneficios del reciclaje de los RAEE fueron más de dos billones de euros y se espera que aumenten en el año 2020 a más de 3,5 billones de euros.

Por lo que, tanto desde el punto de vista medioambiental como desde el económico, se trata de un tema de gran interés para los gobiernos, las empresas y los investigadores. Además, al ser una corriente formada por residuos tan diferentes todavía queda mucho campo de mejora e investigación para optimizar el proceso de tratamiento.

Teniendo en cuenta los dos motivos anteriores, el presente estudio tiene como objeto realizar un análisis del impacto ambiental y económico de una planta de tratamiento de RAEE en la cual se tratan televisores de tubo de rayos catódicos y frigoríficos.

4.4. Financiación

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, la rentabilidad de las plantas de tratamiento de RAEE depende mucho del desarrollo tecnológico y del acceso al mercado de cada país. Es por ello que, según marca la Directiva Europea, los fabricantes de los equipos eléctricos tienen la obligación de asumir la financiación de la gestión de los residuos que proceden de sus aparatos.

Esto se realiza, habitualmente, teniendo en cuenta su cuota de mercado, es decir, la cantidad de aparatos que coloca en el mercado cada productor. Debido a la complejidad asociada a que cada productor tenga su propia planta de reciclaje en la que se traten los residuos de sus productos y que también se ocupen de la recogida, nacen los llamados Sistemas Integrados de Gestión (SIG). Estos SIG suelen ser asociaciones sin ánimo de lucro que se responsabilizan del establecimiento y gestión de sistemas de recogida, transporte, depósito o almacenamiento, valorización, tratamiento, eliminación y control de los residuos.

En este caso, la planta estudio de este trabajo es una planta de tratamiento primario a la cual los SIG envían el residuo que han recogido y almacenado para que se descontamine y recicle. Estos SIG abonan una cuota en función del tipo de residuo para financiar el tratamiento en nombre de los productores.

Estas plantas de tratamiento primario habitualmente desmantelan los residuos,

separándolos en diversas fracciones, triturando las que se puedan y posteriormente vendiéndolas a los recicladores finales.

En resumen, los productores se ayudan de los SIG para la gestión de los residuos de sus productos y éstos los envían a las plantas de tratamiento, en donde se obtienen fracciones valorizables y no valorizables que mandan a un gestor final, ya sea para darle un nuevo uso si es valorizable o enviarlo a vertedero si no lo es.

4.5. Economía circular

Muy estrechamente ligado al concepto de consumo sostenible, explicado en el apartado de legislación, se encuentra el de economía circular. Según la Unión Europea es *un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y que tiene por objetivo que el valor de los productos, materiales y recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo así la generación de nuevos residuos.*

Con esta iniciativa se pretende abandonar el modelo de economía lineal “extraer-fabricar-utilizar-eliminar” que predominaba anteriormente, cuando se creía que los recursos o la energía eran ilimitados. Desde la década de los 70 y más actualmente, se sabe que esto no es verdad y que determinados recursos, como los combustibles fósiles, se encuentran en proceso de agotamiento. Por tanto, lo que se intenta con esta metodología es que lo que es considerado un residuo para alguien se convierta en una materia prima para otro. (Ken Webster, 2012)

Para que esto se lleve a cabo es muy importante la actuación de todos los estratos de la sociedad. Por un lado se encuentran los fabricantes de los productos con la obligación de realizar diseños que faciliten el reciclado y su reparación. También intervienen los organismos públicos habilitando las vías para un desarrollo sostenible, y la sociedad en general ya que ésta última ha de replantearse si su consumo y sus necesidades van a la par.

Por tanto, cambiando a este modelo económico se conseguiría reducir el uso de los recursos a la vez que disminuirían los residuos, lo que habitualmente conlleva un ahorro energético. Pero al mismo tiempo se necesitan puestos de trabajo para realizar los procesos de reparación para reutilización o de reciclado, por lo que aparte de beneficios ambientales también sería generador de riqueza.

El caso específico de los RAEE es clave en la economía circular por varios factores. Por una parte, se trata de aparatos formados por múltiples materias primas, muchas de ellas difíciles de extraer, costosas y/o poco abundantes. También tienen la característica de

que tan solo se aprovecha una pequeña parte de su ciclo de vida ya que normalmente la gente los deshecha aunque funcionen, debido al lanzamiento de un producto mejorado o en el caso de que haya que repararlos.

Por tanto, tanto con el reciclaje como con la reparación se generaría *empleo verde*, el cual se define como aquel que contribuye a preservar o restablecer la calidad ambiental (MAGRAMA, 2013). Además, con el reciclaje se recuperarían materias primas muy valiosas y con la reparación se conseguiría que determinados sectores de la sociedad con menor poder adquisitivo tuviese acceso a la tecnología.

5. Descripción de la instalación de estudio

A continuación se describe y se muestra con las ilustraciones los procedimientos habituales que siguen los residuos en la gran mayoría de las plantas de tratamiento primario. Las flechas azules indican el sentido del proceso, en rojo se muestra el material peligroso y en verde el material extraído y destinado a reciclaje (hierro), valorización energética (PUR) o eliminación (goma).

En un primer lugar se realiza la recepción de residuos que llegan en camiones y se descargan para trasladar cada residuo a su línea correspondiente o a un almacén temporal.

Una vez los residuos se encuentran en la planta y separados por línea de tratamiento se llevan a cabo las siguientes operaciones.

En el caso de frigoríficos, congeladores y aires acondicionados (Ilustración 1) se considera línea blanca con residuos peligrosos, debido a que el aislante y el gas refrigerante que tienen se considera peligroso al contener gas CFC (muy tóxico) o gas ciclopentano (explosivo). Lo primero que se les realiza a estos residuos es un triaje y desmontaje manual con el objetivo de retirar los elementos que no se pueden triturar, como compresores o motores, o que no se desean triturar porque se retiran fácilmente, como las los ventiladores, gomas herméticas, puertas de madera o cables de alimentación. Normalmente este grupo de elementos se envía a gestores autorizados si es posible su valorización o, si debido al mal estado no es posible, se eliminan en vertederos autorizados.

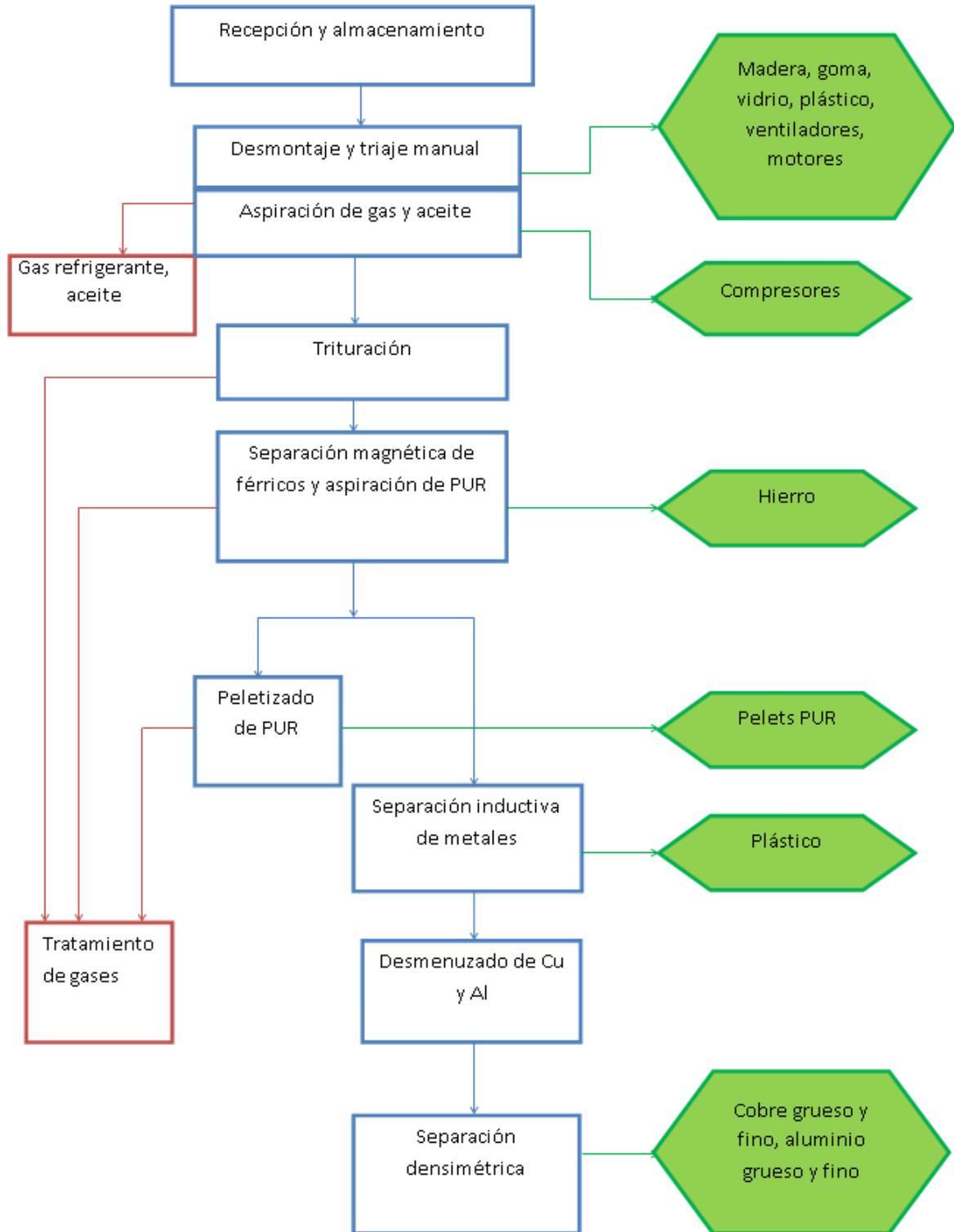


Ilustración 1. Diagrama de flujo del tratamiento de línea blanca con residuos peligrosos (Azul: proceso, rojo: materiales peligrosos, verde: reciclaje)

Antes de retirar los compresores es necesario retirar el aceite que tienen y el gas del circuito refrigerante (CFC o ciclopentano) con un equipo de succión destinado en exclusiva a esta operación. Tanto los gases como el aceite se envían a un gestor autorizado para su posterior tratamiento.

En este punto, el residuo que está formado principalmente por la carcasa del electrodoméstico, se traslada a la máquina trituradora y para ello se utiliza una cinta transportadora que eleve el residuo hasta la entrada de la máquina. Ésta suele contar con dos módulos, uno primario en el que se desmenuza la carcasa del electrodoméstico y un granulador con el que se obtiene un tamaño final de grano entre 20 y 25 mm. En esta máquina se tritura metal, plástico, espuma de poliuretano (PUR), cobre y aluminio.

La cámara que forma la trituradora es hermética para evitar que se produzca cualquier tipo de emisión y, aunque se haya extraído parte del gas refrigerante, la espuma que forma el aislante contiene gran cantidad de gas en su interior que se retira posteriormente por lo que la trituración se realiza en una atmósfera inertizada con nitrógeno para evitar cualquier explosión del ciclopentano. Si todos los frigoríficos fuesen de CFC no sería necesario utilizar nitrógeno puesto que no es explosivo, pero hoy en día la gran mayoría de estos electrodomésticos utilizan este compuesto como gas refrigerante por lo que se hace necesario su uso.

Una vez han sido triturados se procede a la separación de componentes. El primer equipo es un separador PUR-férricos, que consta de una aspiración neumática para captar el PUR, ya que es un material muy ligero, enviándolo a un silo para convertirlo en pellets. Este separador también tiene un canal vibrante por el que se extiende el material triturado y una cinta magnética que separa los componentes férricos que se transportan con una cinta hasta un contenedor y se envían a un gestor autorizado.

Es importante destacar que durante todos los procesos en los que se encuentra presente el PUR es necesario un sistema de extracción de gases contaminantes para su posterior tratamiento, que ha de ser diferente del gas extraído en la primera fase puesto que este también contiene una alta proporción de nitrógeno. Este gas se obtiene mayoritariamente durante el proceso de peletizado, ya que al comprimir el PUR también se produce el proceso de desgasificación.

Los materiales restantes, principalmente plásticos y metales no férricos (cobre y aluminio), se llevan a un separador inductivo mediante corrientes de Foucault para separar ambas fracciones. Los plásticos se conducen a almacenamiento, para su posterior envío a un gestor autorizado. Mientras que los metales se envían a un molino

en el que se obtiene un tamaño de grano de alrededor de 8 mm y posteriormente se separan por diferencia de densidad.

En la Tabla 3 se muestran las proporciones másicas correspondientes a cada uno de los subproductos obtenidos en la línea:

Tabla 3. Porcentaje másico de los productos obtenidos de los aparatos de línea blanca con residuos peligrosos.

MATERIAL	RECUPERADO
Pellet PUR	13,80%
Férrico	45,00%
Cobre	0,60%
Aluminio	4,80%
Plástico	12,00%
Cable	0,30%
Compresores	17,20%
Gas	0,60%
Aceite	0,50%
Otros	5,20%
Total	100,00%

En la Tabla 3 se muestran tanto productos valorizables (férrico, cobre o aluminio) como elementos cuyo tratamiento supone un coste, por ejemplo el gas refrigerante. Por otro lado, en *otros* se engloba la posible basura que puedan contener los frigoríficos y otros elementos no valorizables que se destinan a vertedero.

Otro de los residuos más abundantes son las televisiones de tubos de rayos catódicos que se engloban en la línea marrón con residuos peligrosos. En la Ilustración 2 se muestra un esquema de los procesos a los que se someten este tipo de residuos. Del mismo modo que en la anterior, en azul se muestra el proceso, en rojo los elementos peligrosos y en verde material extraído y destinado a reciclaje, valorización o eliminación.

El primer paso es un triaje y desmontaje manual en el cual se desmonta la carcasa exterior y se extraen los elementos fácilmente recuperables como altavoces, cables, enchufes, conos de cobre o placas electrónicas. La carcasa exterior es de plástico y se

separa por colores y tipo de plástico con el objetivo de obtener fracciones de mayor valor tras su trituración. Después de realizar esta operación, como en la línea anterior, hay un separador magnético para eliminar la fracción férrica y una separación inductiva para separar el aluminio del plástico.

Una vez se han retirado los elementos anteriores, el residuo está formado por el tubo de rayos catódicos y el cañón de electrones. El tubo se encuentra a vacío por lo que es necesario realizar la separación en una unidad especial para evitar que se produzca una implosión. En ella se corta el cañón de electrones y se corta y desenrolla manualmente la cinta metálica que rodea el tubo de rayos catódicos, se perfora el tubo en el centro y se limpia para eliminar restos de pegamento o papel. El tubo se envía a la siguiente unidad y el cañón de electrones se almacena para enviar a un gestor autorizado.

El tubo está formado por dos tipos de vidrio, limpio y plomado, siendo este último un residuo peligroso, por lo que hay que separarlos. Esta separación se realiza mediante un choque térmico. En esta etapa también se retiran los elementos metálicos que pudiera haber en el interior y se aspira la sustancia luminiscente que posteriormente se envía a un gestor autorizado. (Autorización Ambiental Integrada, Planta de tratamiento de RAEE y de residuos voluminosos de Cerceda, 2014)

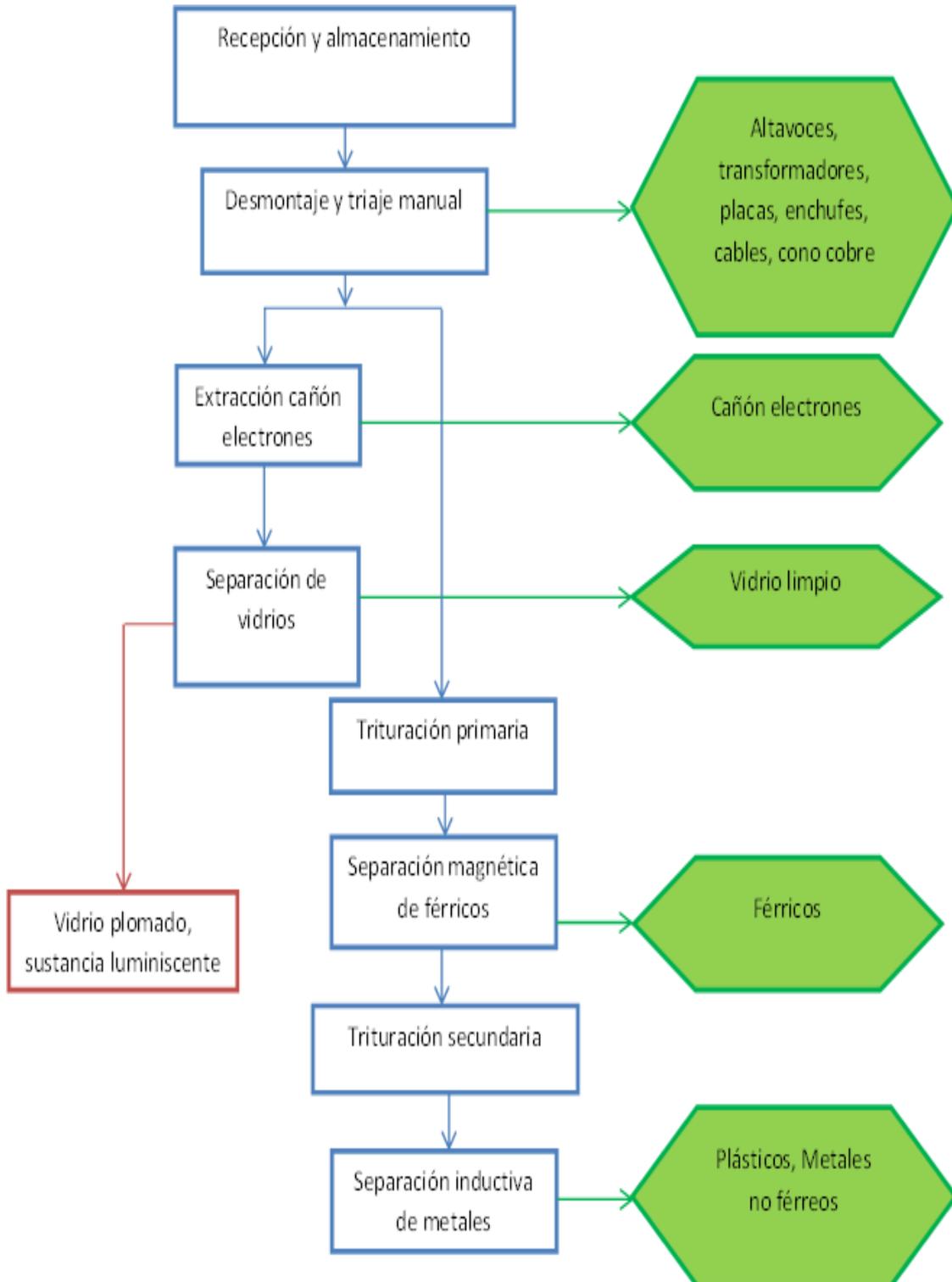


Ilustración 2. Diagrama de flujo del tratamiento de línea marrón con residuos peligrosos (Azul: proceso, rojo: materiales peligrosos, verde: reciclaje)

De la misma forma que para la línea blanca, en la Tabla 4 se muestran los porcentajes máxicos de recuperación para la línea marrón con residuos peligrosos:

Tabla 4. Porcentaje másico de los productos obtenidos de los aparatos de línea marrón con residuos peligrosos.

MATERIAL	RECUPERADO
Cristal	40,88%
Cristal plomado	23,53%
Cono	3,08%
Placa	5,13%
Condensador	1,15%
Férrico	13,90%
Plástico	5,05%
Otros	7,30%
Total	100,00%

En este caso, el tratamiento del cristal limpio, el plomado y los condensadores suponen un coste, mientras que el resto de productos se venden.

Estas dos líneas son las que mayor cantidad de residuos reciben, pero no son las únicas por lo que en este tipo de plantas también se tratan lavadoras, o pequeños aparatos electrónicos como microondas o impresoras. De estos residuos se obtienen materiales diferentes a los anteriores, como baterías o los tóner de las impresoras, entre otros.

Muchos de los materiales obtenidos son peligrosos, escasos o difíciles de obtener de la naturaleza, por ello es necesaria su correcta gestión, optimizando el proceso de reciclaje.

6. Planta de RAEE

El objetivo de este apartado es realizar los balances económicos de la línea de tratamiento de aparatos de línea blanca con residuos peligrosos y de aparatos de línea marrón con residuos peligrosos. Para ello se tendrán en cuenta los costes asociados a la logística del traslado de los residuos desde los puntos limpios a la planta y los costes e ingresos asociados al proceso de reciclaje. Así mismo se realiza una valoración de la inversión necesaria para la puesta en marcha de la planta y se estudia el impacto ambiental de la misma.

6.1. Análisis económico

El balance económico al reciclaje de RAEE se divide en los costes de logística y en los asociados a la operación de la planta.

Respecto a los costes de logística se han tomado los resultados del artículo *Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain* (Mar-Ortiz J, et al., 2010). Aunque en este artículo se optimiza la red de recolección de residuos en Galicia, se parte del caso real, el cuál se utiliza en este estudio. De este artículo se extrae la Ilustración 3, en la que se muestran las plantas de reciclaje existentes, los puntos en los que se pueden depositar los residuos y los almacenes desde los cuales se envían a las plantas.



Ilustración 3. Mapa de Galicia con las plantas de RAEE, los puntos de almacenamiento y los de recogida (en rojo la planta de estudio).

La planta de estudio es la que se encuentra rodeada de un círculo rojo.

Atendiendo a los resultados obtenidos en el artículo, el coste anual asociado a la logística para esta planta es de 1.029.548 €. Para obtener este coste se ha tenido en cuenta el proporcionado en el artículo (año 2010) y se ha actualizado a 2016, también se ha tenido en cuenta la proporción de residuo que tiene como destino final una u otra planta (el 80% del residuo de Galicia acaba en la planta de estudio). Es importante destacar que la gran mayoría del residuo (en torno al 75%) se gestiona por transportistas externos, es decir, son los SIG los encargados de llevar el residuo a la planta, por lo que este coste no se imputaría a la operativa de la planta. No ocurre así con el 25% restante, ya que es la propia empresa la que se encarga de su recogida. Por tanto, el coste correspondiente a esta logística es de 257.387 €.

Una vez se obtiene el coste de la logística se realizan los balances económicos correspondientes a la línea de tratamiento de aparatos de línea blanca con residuos peligrosos y de aparatos de línea marrón con residuos peligrosos.

Para realizar este balance se utiliza la Ecuación 1:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Beneficio} (\text{€}/\text{año}) \\
 & = \left\{ \textit{Venta valorizable} (\text{€}/\text{ud}) + \textit{Canon} (\text{€}/\text{ud}) \right. \\
 & \quad - \left[\textit{Coste fracciones no valorizables} (\text{€}/\text{ud}) \right. \\
 & \quad \left. \left. + \textit{Costes producción} (\text{€}/\text{ud}) \right] \right\} \cdot \textit{ud tratadas}/\text{año} \quad (1) \\
 & - \textit{Coste personal} (\text{€} / \text{año})
 \end{aligned}$$

Como se observa, en la Ecuación 1 tan solo se tienen en cuenta los gastos e ingresos de explotación, sin considerar el coste de la instalación ya que la planta estudiada lleva más de diez años en funcionamiento por lo que se entiende que todos los equipos están amortizados.

La venta de valorizable se corresponde con el ingreso que se obtiene a partir de la venta de las fracciones que se separan durante el proceso de tratamiento, en este grupo se englobarían por ejemplo el plástico o el hierro.

El canon es la tasa que pagan los productores, o en su caso los SIG, con el objetivo de financiar el tratamiento. Esta tasa varía en función del tipo de residuo que sea y también del propio SIG.

El coste de personal es aquel asociado a los sueldos de los trabajadores, la seguridad

social y la formación que sea necesaria.

El coste de las fracciones no valorizables se corresponde con los residuos que se generan durante el tratamiento, pueden ser basura que venga con el residuo o ciertos elementos, como el vidrio plomado de las CRT o los gases refrigerantes de los frigoríficos, que necesitan un tratamiento posterior y del cual no se obtiene ningún beneficio económico.

Por último, los costes de producción son los asociados a la electricidad, el mantenimiento, el combustible de la maquinaria...

Línea blanca con residuos peligrosos

En esta línea se tratan mayoritariamente frigoríficos y congeladores, y ambos residuos contienen gases y aceites refrigerantes muy contaminantes para el medioambiente, por lo que es necesaria su extracción. Pero además de esta fracción no valorizable, también tienen una gran cantidad de elementos que se pueden vender y así obtener un beneficio.

Para realizar este balance se han supuesto los datos de la Tabla 5 de producción anual:

Tabla 5. Datos de producción supuestos para la línea blanca con residuos peligrosos.

Unidades tratadas/año	40.000
Peso medio (kg/ud)	55
Peso total tratado (t)	2.200

En la Ilustración 4 se muestran las proporciones másicas de los principales elementos que forman parte de esta corriente.

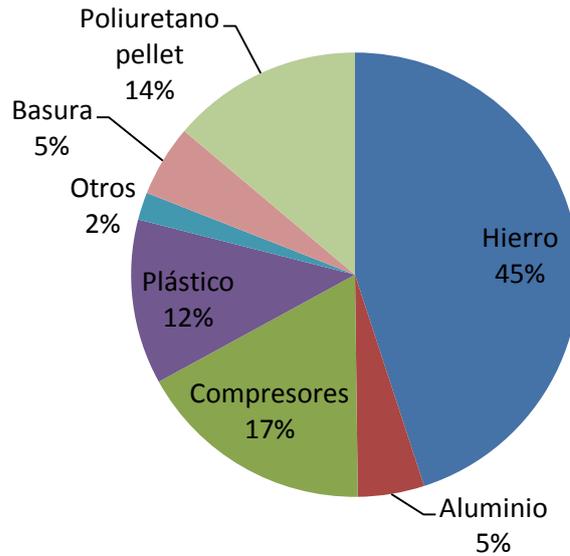


Ilustración 4. Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable de la línea blanca con residuos peligrosos.

Teniendo en cuenta las unidades tratadas, y los costes y los ingresos asociados se obtienen los términos de la ecuación de beneficio (Tabla 6):

Tabla 6. Beneficio de la línea blanca con residuos peligrosos.

Venta valorizable (€/ud)	20,72
Canon (€/ud)	10,60
Coste personal (€/año)	96.000
Coste no valorizable (€/ud)	1,65
Costes producción (€/ud)	7,35
Unidades tratadas (ud/año)	40.000
Beneficio (€/año)	796.800

Del balance realizado se obtiene un beneficio económico de más de medio millón de euros, aunque este resultado puede variar de forma muy significativa ya que el precio de la mayor parte del valorizable, y los metales en concreto, depende de la bolsa de metales. Aun así, manteniendo estos precios también es necesario tratar una cantidad mínima de residuo, 8.000 unidades, para obtener beneficio económico.

Línea marrón con residuos peligrosos

En esta línea se tratan las televisiones con tubo de rayos catódicos, obteniendo ciertos residuos peligrosos, como el vidrio plomado de la pantalla o las sustancias fosforescentes

que pueden ser bario, cadmio o fósforo, las cuales hay que gestionar correctamente. Además de estos residuos peligrosos, también hay componentes valorizables como metales, plásticos o diferentes componentes electrónicos de los que se obtiene un beneficio.

Los datos supuestos para realizar el balance se muestran en la Tabla 7 y las proporciones másicas de los principales elementos en la Ilustración 5.

Tabla 7. Datos de producción supuestos para la línea marrón con residuos peligrosos.

Unidades tratadas/año	35.000
Peso medio (kg/ud)	20
Peso total tratado (t)	700

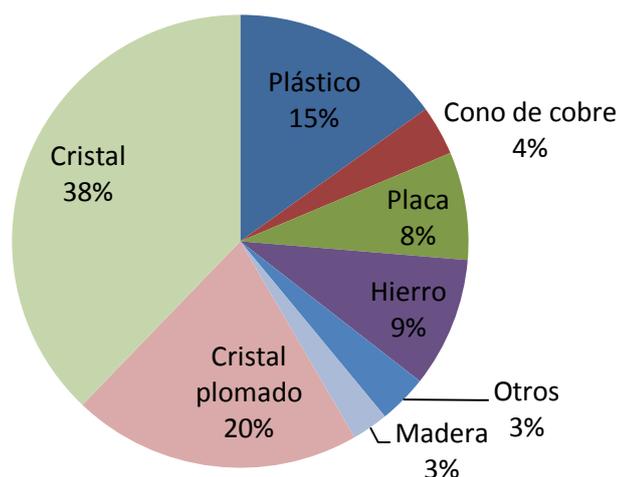


Ilustración 5. Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable de la línea marrón con residuos peligrosos.

A parte del beneficio que se obtiene por el valorizable también se encuentra el beneficio por canon y los costes de producción y personal (5 operarios), que se resumen en la tabla siguiente:

Teniendo en cuenta las unidades tratadas, y los costes y los ingresos asociados se obtienen los términos de la ecuación de beneficio (Tabla 8):

Tabla 8. Beneficio de la marrón con residuos peligrosos.

Venta valorizable (€/ud)	3,52
Canon (€/ud)	3,00
Coste personal (€/año)	120.000
Coste no valorizable (€/ud)	0,54
Costes producción (€/ud)	1,35
Beneficio (€/año)	42.050

Se observa que esta línea también aporta beneficios, pero en mucha menor medida que la de frigoríficos. En este caso, es necesario tratar un mínimo de 30.000 unidades para que la línea obtenga beneficios. Esto se debe a que el valorizable obtenido en esta línea es de menor valor que el de la línea anterior, sobre todo por la cantidad de metales (hierro, cobre y aluminio) que tienen un mayor peso en los frigoríficos. Otro de los factores que hace que el beneficio baje es que la mitad del peso de los televisores es vidrio (limpio y plomado), el cual no aporta ningún beneficio económico, teniendo que pagar por su gestión posterior.

Resultado global

Teniendo en cuenta el beneficio obtenido para las dos líneas anteriores y los costes asociados a la logística se calcula el beneficio asociado con la Ecuación 2:

$$\begin{aligned} \text{Beneficio } (\text{€}/\text{año}) & \\ &= \text{Beneficio línea blanca } (\text{€}/\text{año}) \\ &+ \text{Beneficio línea marrón } (\text{€}/\text{año}) - \text{Costes logística } (\text{€}/\text{año}) \quad (2) \\ &= 796.800 + 42.050 - 257.387,03 = 581.463 \text{ (€}/\text{año)} \end{aligned}$$

Por tanto, la planta es viable desde el punto de vista económico siempre y cuando se trate un número mínimo de unidades en ambas líneas. Así mismo, en el artículo de Mar-Ortiz J, et al. (2010), proponen una red logística optimizada y en caso de que se usara este valor el beneficio obtenido sería el siguiente:

$$\text{Beneficio } (\text{€}/\text{año}) = 796.800 + 42.050 - 204.117,26 = 634.733 \text{ (€}/\text{año)} \quad (2)$$

Comparando ambos datos, se hace evidente que es necesario un diseño optimizado de la red de recogida del residuo.

Aun así es importante destacar que el precio de los metales obtenidos es fluctuante ya que éste se guía por una bolsa propia, la *London Metal Exchange* (LME). Esto afecta de forma directa al resultado de la planta, y como son materiales que están estrechamente relacionados con la construcción y el automovilismo se espera que en los años siguientes este resultado mejore a la par que crecen estos dos sectores.

6.2. Cálculo de la inversión de la planta de RAEE

En este capítulo se propone un ejemplo de estudio de la rentabilidad que se esperaría tener si se llevase a cabo la construcción de una planta de tratamiento de RAEE en la cual se traten los residuos especificados en este proyecto, línea blanca con residuos peligrosos y línea marrón con residuos peligrosos. Cabe mencionar que normalmente en plantas de este tipo se suele tratar también otro tipo de residuos, como pequeños aparatos electrónicos o lavadoras, que en este caso no se contemplan.

Es por ello que los resultados obtenidos no son tan buenos como cabría esperar ya que habitualmente la misma maquinaria, por ejemplo la trituradora, puede formar parte de varias líneas a la vez.

Inversión inicial

La inversión inicial necesaria para esta planta consta de los gastos correspondientes al diseño y a las autorizaciones, al coste del terreno y de la construcción de la nave, la compra de la maquinaria y elementos auxiliares necesarios como las carretillas elevadoras y los elementos informáticos necesarios. En la Tabla 9 se muestra el desglose de los diferentes elementos que constituyen la inversión inicial, la cual asciende a 2.931.950 €.

Tabla 9. Detalle de la inversión inicial necesaria para una planta de tratamiento de RAEE.

Gastos de ingeniería y asesoría	13.000 €
Gastos de licencia	4.000 €
SUBTOTAL	17.000 €
Coste del terreno	400.000 €
SUBTOTAL	400.000 €
Edificio	1.500.000 €
Instalación tratamiento de gases	80.750 €
Instalación sistema contraincendios	75.000 €
Electricidad	84.900 €
Depósitos y tuberías	80.000 €
Maquinaria	600.000 €
Elementos auxiliares (carretillas)	27.000 €
Elementos informáticos	20.000 €
Montaje	26.800 €
Puesta en marcha	20.500 €
SUBTOTAL	2.514.950 €
TOTAL	2.931.950 €

Amortizaciones

Uno de los pasos para calcular la rentabilidad de la planta es calcular las amortizaciones del material inmovilizado. Esta amortización varía en función de la naturaleza de los activos:

- La vida media de la maquinaria se amortiza en un 10% anual ya que su vida media es de 10 años.
- La vida media del edificio se estima en 25 años por lo que se amortiza un 4% anual.
- Los elementos auxiliares como las carretillas se estima que se utilizan durante 6 años por lo que se amortiza un 17% anual.
- En el caso de los equipos informáticos, la vida útil es muy inferior al resto de inmovilizado, se amortizan durante 3 años, a un 33% anual.

La amortización se realiza de forma lineal durante toda la vida del aparato en cuestión. En la Tabla 10 se muestran las amortizaciones para la vida del proyecto, 10 años, siendo Vi el valor inicial y VR el valor residual correspondiente a cada año:

Tabla 10. Cálculo de las amortizaciones asociadas a cada tipo de inmovilizado en los diez años de estudio. (Vi: valor inicial, VR: valor residual).

AMORTIZACIONES	Vi	Año 1	VR	Año 2	VR	Año 3	VR	Año 4	VR	Año 5	VR
Edificio (25 años)	1.500.000	60.000	1.440.000	60.000	1.380.000	60.000	1.320.000	60.000	1.260.000	60.000	1.200.000
Maquinaria (10 años)	600.000	60.000	540.000	60.000	480.000	60.000	420.000	60.000	360.000	60.000	300.000
Elementos auxiliares (6 años)	27.000	4.590	22.410	4.590	17.820	4.590	13.230	4.590	8.640	4.590	4.050
Elementos informáticos (3 años)	20.000	6.600	13.400	6.600	6.800	6.600	200	200	0		

AMORTIZACIONES	Año 6	VR	Año 7	VR	Año 8	VR	Año 9	VR	Año 10	VR
Edificio (25 años)	60.000	1.140.000	60.000	1.080.000	60.000	1.020.000	60.000	960.000	60.000	900.000
Maquinaria (10 años)	60.000	240.000	60.000	180.000	60.000	120.000	60.000	60.000	60.000	0
Elementos auxiliares (6 años)	4.050	0								

Ingresos

Los ingresos registrados en esta planta se corresponden con dos partidas diferenciadas, por un lado se encuentra la venta de las fracciones valorizables obtenidas del tratamiento de reciclaje y desmantelamiento y por otro, a la tasa que pagan los SIGs de reciclaje. Esta tasa es diferente para cada aparato eléctrico, en función de la dificultad de su reciclaje y de los elementos valorizables que contenga cada uno.

Con el objetivo de simplificar los cálculos se estima que cada año se vende la misma cantidad de material valorizable porque se trata la misma cantidad de residuos. Así mismo, los precios se actualizan cada año según el índice de precios industriales (IPRI). En este caso se ha tomado el valor medio de los últimos diez años, un 1,93%.

En la Tabla 11 se muestran los ingresos correspondientes a diez años de operación.

Tabla 11. Ingresos anuales asociados a los diferentes productos y al canon de los SIGs.

Producto	RECUPERADO	Precio	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Aceite	11	100	1.100 €	1.100 €	1.100 €	1.100 €	1.100 €
Aluminio	105,6	1720	181.632 €	181.632 €	181.632 €	181.632 €	181.632 €
Cable	9,96	1500	14.940 €	14.940 €	14.940 €	14.940 €	14.940 €
Cable anillo	5,74	2000	11.480 €	11.480 €	11.480 €	11.480 €	11.480 €
Cobre	13,2	2500	33.000 €	33.000 €	33.000 €	33.000 €	33.000 €
Compresores	378,4	600	227.040 €	227.040 €	227.040 €	227.040 €	227.040 €
Cono de cobre	24,71	1040	25.698 €	25.698 €	25.698 €	25.698 €	25.698 €
Hierro	1054,87	300	316.461 €	316.461 €	316.461 €	316.461 €	316.461 €
Placa	53,9	500	26.950 €	26.950 €	26.950 €	26.950 €	26.950 €
Plástico	369,63	300	110.889 €	110.889 €	110.889 €	110.889 €	110.889 €
Otros	10,71	279	2.988 €	2.988 €	2.988 €	2.988 €	2.988 €
Ingresos por canon			529.000 €	529.000 €	529.000 €	529.000 €	529.000 €
	TOTAL		1.481.178 €	1.481.178 €	1.481.178 €	1.481.178 €	1.481.178 €
	TOTAL ANUAL		1.481.178 €	1.509.765 €	1.538.904 €	1.568.605 €	1.598.879 €

Producto	RECUPERADO	Precio	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Aceite	11	100	1.100 €	1.100 €	1.100 €	1.100 €	1.100 €
Aluminio	105,6	1720	181.632 €	181.632 €	181.632 €	181.632 €	181.632 €
Cable	9,96	1500	14.940 €	14.940 €	14.940 €	14.940 €	14.940 €
Cable anillo	5,74	2000	11.480 €	11.480 €	11.480 €	11.480 €	11.480 €
Cobre	13,2	2500	33.000 €	33.000 €	33.000 €	33.000 €	33.000 €
Compresores	378,4	600	227.040 €	227.040 €	227.040 €	227.040 €	227.040 €
Cono de cobre	24,71	1040	25.698 €	25.698 €	25.698 €	25.698 €	25.698 €
Hierro	1054,87	300	316.461 €	316.461 €	316.461 €	316.461 €	316.461 €
Placa	53,9	500	26.950 €	26.950 €	26.950 €	26.950 €	26.950 €
Plástico	369,63	300	110.889 €	110.889 €	110.889 €	110.889 €	110.889 €
Otros	10,71	279	2.988 €	2.988 €	2.988 €	2.988 €	2.988 €
Ingresos por canon			529.000 €	529.000 €	529.000 €	529.000 €	529.000 €
		TOTAL	1.481.178 €				
		TOTAL ANUAL	1.629.737 €	1.661.191 €	1.693.252 €	1.725.932 €	1.759.242 €

Gastos

Hay diferentes tipos de gastos que se deben contabilizar:

- Gasto correspondiente a la retirada de los subproductos y residuos que se generan en la planta. Dentro de este grupo se engloban los gases refrigerantes, el vidrio plomado o la propia basura que va directamente al vertedero.
- Asociado a la producción, tanto directos como la electricidad o el nitrógeno necesario en la línea blanca con residuos peligrosos y los indirectos de agua o teléfono.
- El gasto de personal necesario en las diferentes líneas, los administrativos y el jefe de planta. Es decir, en esta partida se engloba todo el personal necesario para el correcto funcionamiento de la planta.

Los gastos anuales se muestran en la Tabla 12:

Tabla 12. Gastos anuales existentes en la planta.

	Producción	Precio	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Basura	114,40 t/año	-40 €/t	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €
Poliuretano pellet	303,60 t/año	-30 €/t	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €
Gas	13,20 t/año	-5000 €/t	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €
Madera	18,06 t/año	-40 €/t	- 722 €	- 722 €	- 722 €	- 722 €	- 722 €
Cristal plomado	143,50 t/año	-57 €/t	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €
Cristal	264,95 t/año	-37 €/t	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €
		SUBTOTAL	- 98.571 €				
Costes de producción (electricidad, agua...)			- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €
Costes de personal			- 216.000 €	- 216.000 €	- 216.000 €	- 216.000 €	- 216.000 €
		TOTAL ANUAL	-557.250 €	-568.005 €	-578.967 €	-590.141 €	-601.531 €
	Producción	Precio	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Basura	114,40 t/año	-40 €/t	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €	- 4.758 €
Poliuretano pellet	303,60 t/año	-30 €/t	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €	- 9.108 €
Gas	13,20 t/año	-5000 €/t	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €	- 66.000 €
Madera	18,06 t/año	-40 €/t	- 722 €	- 722 €	- 722 €	- 722 €	- 722 €
Cristal plomado	143,50 t/año	-57 €/t	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €	- 8.179 €
Cristal	264,95 t/año	-37 €/t	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €	- 9.803 €
		SUBTOTAL	- 98.571 €				
Costes de producción (electricidad, agua...)			- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €	- 341.250 €
Costes de personal			-216.050 €	-216.050 €	-216.050 €	-216.050 €	-216.050 €
		TOTAL ANUAL	-613.141 €	-624.974 €	-637.036 €	-649.331 €	-661.863 €

Cash flow

Para calcular la rentabilidad del proyecto es necesario calcular su cash flow. Para ello se ha estimado que se financia en una entidad bancaria el 40% de la inversión inicial, en un periodo de ocho años. Esta deuda se estudia a un interés anual del 6%.

Una vez calculado el cash flow en función de los cobros y pagos estimados, se calcula su acumulado actualizándolos con una tasa de interés del 8%. Este dato sirve para calcular el VAN, mediante la Ecuación 3:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (3)$$

Donde CF_t es cada uno de los cash flow en cada periodo, i es la tasa de rentabilidad exigida, t es cada uno de los periodos y I_0 es la inversión inicial.

Con los datos de la Tabla 13 se obtiene un VAN de 98.778,82 €. Este dato es positivo y por tanto se espera que esta inversión devuelva beneficios en los diez años estimados.

También a partir del cash flow acumulado se puede obtener el momento en el cuál se recupera la inversión, que sería aquel en el que se pasa de tener un valor negativo a uno positivo. En este caso se corresponde con el año 4.

Tabla 13. Cálculo de los cash flow anuales.

		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Total cobros en ejercicio		1.481.178 €	1.509.765 €	1.538.904 €	1.568.605 €	1.598.879 €
Total pagos en ejercicio		-655.821 €	-668.478 €	-681.380 €	-694.531 €	-707.935 €
Amortizaciones		-131.190 €	-131.190 €	-131.190 €	-124.790 €	-124.590 €
Margen operativo bruto		694.167 €	710.097 €	726.334 €	749.284 €	766.354 €
Impuestos sobre beneficios		138.833 €	142.019 €	145.267 €	149.857 €	153.271 €
Resultado después de impuestos		555.334 €	568.077 €	581.067 €	599.427 €	613.083 €
Inversión en inmovilizado	1.172.780 €					
Años	8					
Principal a amortizar anualmente (fijo anual)		146.598 €	146.598 €	146.598 €	146.598 €	146.598 €
Importe de la deuda al final de cada año	1.172.780 €	1.026.183 €	879.585 €	732.988 €	586.390 €	439.793 €
Tipo de interés		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Interés anual		70.367 €	61.571 €	52.775 €	43.979 €	35.183 €
Deuda anual		216.964 €	208.168 €	199.373 €	190.577 €	181.781 €
Cash flow	- 1.172.780 €	338.370 €	359.909 €	381.694 €	408.850 €	431.302 €
Cash flow acumulado		-834.410 €	-474.501 €	-92.807 €	316.043 €	747.345 €

		AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Total cobros en ejercicio		1.629.737 €	1.661.191 €	1.693.252 €	1.725.932 €	1.759.242 €
Total pagos en ejercicio		-721.598 €	-735.525 €	-749.721 €	-764.190 €	-778.939 €
Amortizaciones		-124.050 €	-120.000 €	-120.000 €	-120.000 €	-120.000 €
Margen operativo bruto		784.089 €	805.666 €	823.531 €	841.741 €	860.303 €
Impuestos sobre beneficios		156.818 €	161.133 €	164.706 €	168.348 €	172.061 €
Resultado después de impuestos		627.271 €	644.533 €	658.825 €	673.393 €	688.242 €
Inversión en inmovilizado	1.172.780 €					
Años	8					
Principal a amortizar anualmente (fijo anual)		146.598 €	146.598 €	146.598 €		
Importe de la deuda al final de cada año	1.172.780 €	293.195 €	146.598 €	- €		
Tipo de interés		0 €	0 €	0 €		
Interés anual		26.388 €	17.592 €	8.796 €		
Deuda anual		172.985 €	164.189 €	155.393 €		
Cash flow	- 1.172.780 €	454.286 €	480.343 €	503.432 €	673.393 €	688.242 €
Cash flow acumulado		1.201.631 €	1.681.975 €	2.185.406 €	2.858.799 €	3.547.042 €

Por último se calcula la TIR que se trata de la tasa de interés que hace cero el VAN y se trata de un criterio complementario al VAN para saber si una inversión será rentable o no. En el caso de esta planta la TIR obtenida es de 8,7%, superior al 8% exigido por unas décimas (Ilustración 6). Esto implicaría que el proyecto es rentable aunque como se puede observar, la diferencia es muy pequeña.

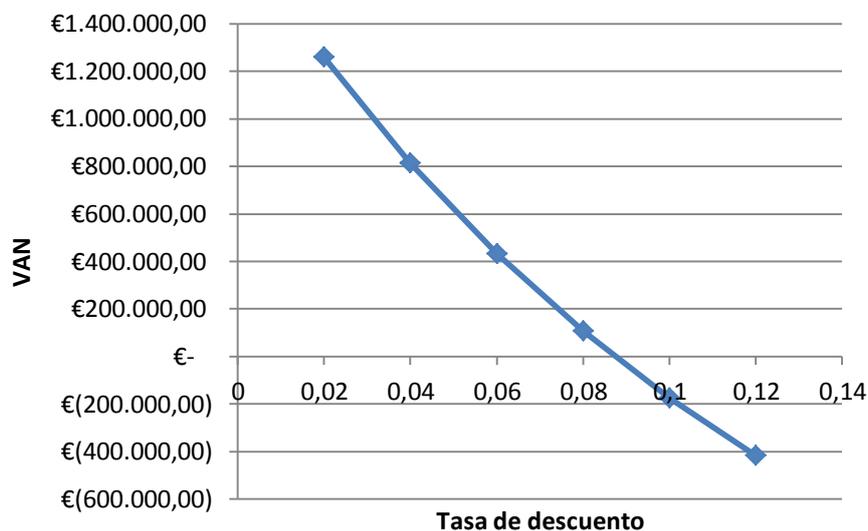


Ilustración 6. Evolución del VAN en función de la tasa de descuento.

Por este motivo no se podría afirmar con seguridad que es un proyecto rentable, ya que los ingresos dependen mucho de la fluctuación del precio de los metales y de las nuevas tecnologías asociadas al reciclaje de plásticos, por ejemplo. Aun así, cabe recordar que se trata de un proceso medioambientalmente positivo, a los cuales no siempre se les exige una buena rentabilidad ya que se considera que el principal objetivo es realizar una labor favorable con el medioambiente.

6.3. Análisis del impacto ambiental

En este apartado se analiza el impacto ambiental que causa una planta de desmantelamiento de RAEE.

Para estudiar el impacto ambiental de una planta de estas características es necesario entender que se trata de residuos que, por norma general, contienen elementos peligrosos. Depositarlos en un vertedero no es una buena opción ya que el espacio disponible es un gran problema en los vertederos gallegos, y además otro gran problema en Galicia es la aparición de vertederos incontrolados en las zonas rurales, con los riesgos que conllevan (reacciones químicas incontroladas, incendios que emitan productos contaminantes o lixiviaciones de productos tóxicos). Por otro lado, si se incineran se pueden producir efectos negativos como la emisión de metales pesados y sustancias halogenadas, o la concentración de metales en las cenizas.

Con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de esta planta se evalúan las posibles alteraciones de los elementos que integran el medio y que son susceptibles de verse afectados por el funcionamiento de la planta. Para ello es importante aclarar que la planta se encuentra en el entorno de un polígono industrial del municipio gallego de Cerceda, por tanto se trata de un terreno antropizado y adecuado a las necesidades de una planta de tratamiento. Además, en esta localidad se encuentra el Complejo Medioambiental de SOGAMA (Sociedade Galega do Medioambiente) en el cual se tratan los RSU de Galicia, por lo que se evita el rechazo social que provocan este tipo de actividades.

A continuación se valoran, de forma general, los efectos ambientales que se pueden producir en el medioambiente:

- **Clima:** la destrucción de la vegetación existente en la zona no tiene la extensión ni la magnitud suficiente para modificar la humedad o el régimen hídrico del entorno.
- **Calidad del aire:** debido al incremento del tráfico rodado se producirá un aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, pero al estar la planta en un entorno industrial la calidad del aire ya no es la óptima por lo que este aspecto no se ve afectado de forma crítica. Por otro lado, no hay emisiones contaminantes del tratamiento gracias a las medidas de seguridad que tiene la planta. Tampoco se producen olores debido a la naturaleza de los residuos.
- **Aguas:** al ser un entorno industrializado, el pavimento existente es el adecuado para evitar las filtraciones ya que se encuentra próximo a un río. En cualquier caso no se utiliza agua de proceso por lo que el único vertido que se produce es el de aguas pluviales, que antes de llegar al río pasan por un separador de grasas para evitar su contaminación por cualquier compuesto que pudiera arrastrar.

- Suelo: su calidad se ve afectada principalmente en el periodo de construcción de la planta ya que desaparecen las características anteriores. Así mismo también se altera durante la explotación debido al tráfico rodado.
- Vegetación y fauna: se ven completamente afectados ya que se modifica por completo su hábitat natural, pero al ser un polígono industrial donde se encuentran presentes otras plantas es poco significativo.
- Ruido: igual que el punto anterior, al estar en un entorno industrial la contaminación acústica es poco apreciable.

En base a estos indicadores, se observa que la planta si se sitúa en un polígono industrial no se provoca un impacto ambiental grave.

En el estudio de Barba-Gutiérrez et al., (2007) se demuestra que el proceso de reciclado será ambientalmente positivo si la distancia recorrida en la recogida del residuo es inferior a un cierto valor, dependiente del tipo de residuo. Esto se realiza comparando diferentes categorías de impactos ambientales asociados al tratamiento y a la disposición en vertedero del residuo. Los impactos estudiados son: emisión de partículas, radiación, acidificación/eutrofización y combustibles fósiles. En la Tabla 14 se muestran los resultados que han obtenido para los frigoríficos y las televisiones:

Tabla 14. Distancia máxima de recogida de residuo.

	Partículas	Radiación	Acidificación/ Eutrofización	Combustibles fósiles
Frigoríficos	262 km	436 km	475 km	471,5 km
Televisiones	363,5 km	461 km	305 km	338,5 km

En esta tabla se muestra la distancia a partir de la cual el proceso de reciclado no compensa ambientalmente con respecto a la disposición en vertedero. Es importante destacar que con el artículo lo que se pretende es remarcar la importancia de un buen diseño de las rutas para la recolección del residuo. En general, para que no se produzca ningún impacto ambiental habría que diseñar las rutas con una distancia máxima inferior a 262 km.

En los siguientes puntos se desarrollan los efectos ambientales de los principales componentes peligrosos así y como las posibilidades de recuperación en base al concepto de economía circular:

- **Gas:** se trata del fluido refrigerante de estos aparatos y del gas inyectado en la espuma, y habitualmente constituye el 0,6% de su masa. Aunque pueda parecer

poca cantidad, en torno a 300 g, es muy importante que se recoja de forma adecuada ya que se trata de compuestos muy peligrosos ya que pueden degradar la capa de ozono o ser tóxicos.

Para cuantificar su impacto es necesario distinguir entre dos tipos de gases refrigerantes. Por un lado se encuentran los **clorofluorocarbonose hidroclorofluorocarbonos** que, aunque está prohibido utilizarlos desde 1996 (Protocolo de Montreal), debido a su gran vida útil hay que tenerlos en cuenta. Se trata de un gas de síntesis y dentro de esta categoría hay diversos tipos como el R12, que se utiliza en el circuito de frío, o el R11 y el R141b que se utilizan en las espumas, entre otros (MAGRAMA, 2011). En la Tabla 15 se muestra el potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP), tomando como referencia potencial 1 para el R11 y el potencial de efecto invernadero (GWP), tomando como referencia potencial 1 para el dióxido de carbono.

Tabla 15. ODP y GWP de diferentes gases refrigerantes.

Sustancia (fórmula)	ODP	GWP
R11 (CFC)	1	1600
R12 (CFC)	1	4500
R141b (HCFC)	0,08	150

Por tanto, aunque se emita muy poca cantidad provocan un gran impacto ambiental debido a sus altos potenciales.

A raíz de la prohibición en el uso de los gases fluorados, éstos se sustituyeron por hidrocarburos simples (HC) con un potencial nulo de destrucción de la capa de ozono y un bajo potencial de efecto invernadero, en comparación con los anteriores. El problema de este tipo de gases es que suelen ser inflamables y altamente explosivos, siendo algunos también tóxicos. En este caso el isobutano, sustancia tóxica, extremadamente inflamable y explosiva, se utiliza en el circuito de refrigeración y el ciclopentano, el cual también es tóxico, inflamable y explosivo, en la espuma. Por lo que, aunque no dañen la capa de ozono o no contribuyan al calentamiento global es importante recogerlos y tratarlos adecuadamente para evitar contaminación del medio, debido a su alta toxicidad.

El gas refrigerante que está formado por hidrocarburos se lleva a una planta específica en la cual se limpia y se regenera para alcanzar las especificaciones de un gas nuevo, volviéndolo a introducir en el mercado. En el caso de que esté formado por CFC o HCFC, no es posible su reutilización porque está prohibido

usarlo por lo que es necesario destruirlo.

- El **aceite** presente en los compresores de los frigoríficos constituye un residuo peligroso por su propia condición de aceite, que puede provocar la contaminación de las aguas y de la tierra si hay un vertido incontrolado, y también porque lleva disuelto el gas refrigerante, por lo que dependiendo del tipo de gas podrá dañar la capa de ozono o aumentar su toxicidad. Por lo tanto es importante extraer por completo el aceite del compresor y retirarle todo el gas que pueda estar disuelto para así descontaminarlo y que pueda regenerarse. (SIGAUS)

El aceite se envía a una planta en la que se valoriza en forma de combustible, ya que su regeneración no es viable actualmente. Aun así se prolonga su vida útil más allá de para lo que fue fabricado.

- Los **pellets de PUR** se obtienen completamente descontaminados de los gases refrigerantes gracias al proceso de peletizado, por lo que se utilizan como parte del combustible de las cementeras. Con ello se reduce en gran parte el aporte de combustibles fósiles, realizando una valorización energética del producto obtenido. Por tanto, se incrementa la vida útil del poliuretano y además se evita que acabe en el vertedero.
- El **polvo fosforescente** de las CRT está formado por diferentes materiales, habitualmente metales de transición o tierras raras. Estas tierras se denominan así porque son muy difíciles de extraer y procesar, al estar mezcladas en las minas con otros compuestos. Debido a esto, es muy importante recuperar este material ya que se trata de un elemento fundamental en múltiples aparatos electrónicos. Respecto al efecto ambiental, su emisión a la atmósfera provoca la contaminación por metales de las tierras cercanas y al tener un tamaño de partícula alrededor de 2,5 μm tienen una gran capacidad para su penetración en las vías respiratorias causando problemas de salud.
- El **vidrio plomado** presente en las pantallas de las CRT es vidrio que en vez de tener óxido de calcio tiene óxido de plomo, el cual sirve para evitar que los rayos X procedentes del tubo de rayos catódicos atraviese la pantalla. Por tanto, es muy importante que se manejen con cuidado para evitar que se rompa la pantalla y que se emita plomo a la atmósfera. La emisión de plomo causa tanto problemas ambientales como de salud, se puede quedar retenido en el suelo y el agua lo que provoca bioacumulación en los diferentes organismos, con la posibilidad de que llegue al ser humano, provocando graves problemas de salud ya que daña el sistema nervioso y los riñones, entre otras afecciones.

Antes de la existencia de las pantallas planas, el vidrio plomado se reciclaba de forma eficiente, fundiéndolo para realizar nuevas pantallas. Pero hoy en día este

formato está obsoleto, por lo que ahora se utiliza este vidrio en la fabricación de elementos de la construcción como ladrillos, cementos y materiales aislantes.

Con todo esto se observa que el funcionamiento de la planta no supone un impacto ambiental negativo grave sino que, como ya se comentó en apartados anteriores, el mayor impacto lo produce el tráfico de camiones. Esto se debe a que son residuos voluminosos que no se pueden compactar, por lo que por un lado se tiene la contaminación producida por los automóviles de los ciudadanos que llevan su residuo al punto limpio, y por otro la producida por los camiones que trasladan gran cantidad de residuo desde los puntos de almacenamiento a la planta de tratamiento.

7. Deposición en vertedero y extracción de nuevos materiales

El fin último del reciclaje de RAEE es la obtención de materiales valiosos, como metales, que se puedan tratar en plantas específicas para prolongar su vida útil, evitando que se agoten los recursos naturales ya que se reduce la cantidad de materia prima que hay que extraer. Además, también se evita la contaminación asociada a la emisión de gases a la atmósfera. En este apartado se analizan estos dos aspectos relacionados con no reciclar los RAEE, el impacto que tienen los vertederos y el asociado a los materiales vírgenes.

7.1. Impacto de los vertederos

Como ya se comentó en apartados anteriores, uno de los mayores problemas en Galicia es el espacio existente en los vertederos y el nacimiento de vertidos incontrolados en las zonas rurales. En ellos se depositan sin ningún tipo de control cualquier clase de residuo, ocasionando graves impactos ambientales.

Gracias a la legislación vigente, no se contempla el caso de gestionar estos residuos en vertederos legales ya que la ley no lo permite, sino que se han de llevar a los puntos limpios para después transportarlos a plantas especializadas. Pero en el caso de los vertidos ilegales, estos residuos se amontonan sin ninguna precaución, por lo que es habitual que se rompa el circuito de refrigeración de los frigoríficos o el tubo de rayos catódicos de las CRT, emitiendo sustancias peligrosas.

Aun así, antiguamente en Europa y actualmente en países menos desarrollados de Asia y África, este tipo de residuos sí se depositan en vertedero y se incineran al aire libre, emitiendo a la atmósfera elementos contaminantes y gases de efecto invernadero.

Para estimar las emisiones de CO₂ equivalente emitidas durante este proceso de incineración al aire libre se toman los datos de las Tablas 5 y 7 y los porcentajes de los materiales contenidos en los dos tipos de RAEE estudiados (Anexo I). Por tanto, se calcula cuanto CO₂ se ahorra de emitir al tratar las mismas unidades que en el apartado anterior en comparación con el proceso de incineración. En la Tabla 16 se muestran las toneladas procesadas de los principales materiales de la línea blanca y línea marrón con residuos peligrosos, el ahorro de emisiones por no incinerarlos (Hogg, 2006) y el ahorro total anual.

Tabla 16. Ahorro de las emisiones de CO_{2e} comparación tratamiento-incineración al aire libre.

Material	Toneladas tratadas/año	Ahorro kg CO_{2e}/t material	Ahorro kg CO₂/año
Metales ferrosos	1055,8	24	25.339
Metales no ferrosos	546,22	81	44.244
Plásticos	369,63	205	75.774
Vidrio	426,05	64	27.267
TOTAL			172,62 t/año

Es importante mencionar que este cálculo tan solo es una estimación, ya que se toman valores promediados tanto de composición del residuo como del ahorro en las emisiones. Aun así se observa que el tratamiento de cada una de las fracciones recuperables es mucho más favorable desde el punto ambiental que su incineración.

Por otra parte, también se realiza una estimación de las toneladas de CO₂ equivalentes que se emitirían a la atmósfera a raíz de los gases refrigerantes presentes en los frigoríficos. Como ya se ha comentado, estos gases suponen el 0,6% en masa de estos residuos y partiendo del mismo número de unidades que en el caso anterior se obtiene la cantidad de gases refrigerantes anuales que se podrían emitir a la atmósfera. Así mismo sabiendo que un 50% de los frigoríficos que llegan a la planta son de CFC (se asume que todo es R11) y que este tiene un GWP de 1600, se obtienen los resultados de la Tabla 17:

Tabla 17. Emisiones de CO_{2e} asociadas a la emisión de R11

Toneladas tratadas	1.100
Toneladas de CFC	0,66
GWP R11 (t CO _{2e} /t R11)	1600
Total (t CO_{2e}/año)	1.056

La importancia de reciclar este tipo de residuos se encuentra en este tipo de gases, que aun suponiendo una pequeña parte de su masa su potencial contaminante es mucho mayor.

7.2. Impacto de la extracción de materiales vírgenes

En este apartado se pretende comparar en términos energéticos y de emisiones de CO₂, entre otros, el uso de materiales vírgenes y reciclados. Para ello se analizan los diferentes materiales que se obtienen del proceso de reciclado y se aportan datos de su extracción. Por último se calcula el ahorro de emisiones de CO_{2e} que supone utilizar materiales reciclados.

7.2.1. Metales ferrosos

La chatarra obtenida es un producto completamente reciclable y se puede reciclar un número ilimitado de veces sin perder sus características. Según datos del *Bureau of International Recycling*, reciclar una tonelada de acero ahorra 1,1 toneladas del mineral de hierro, 630 kg de carbón y 55 kg de caliza. También es importante el espacio que se ahorra en el uso de vertederos, que en este caso asciende a 2,3 m³ por tonelada de acero reciclado.

Si se habla en términos energéticos y de combustible, mediante el reciclaje se ahorran 642 kWh, cerca de 300 L de petróleo y 11,5 millones de kJ por tonelada de acero.

En la Ilustración 7 se resumen las principales ventajas del proceso de reciclado en comparación con la producción a partir de materias primas:

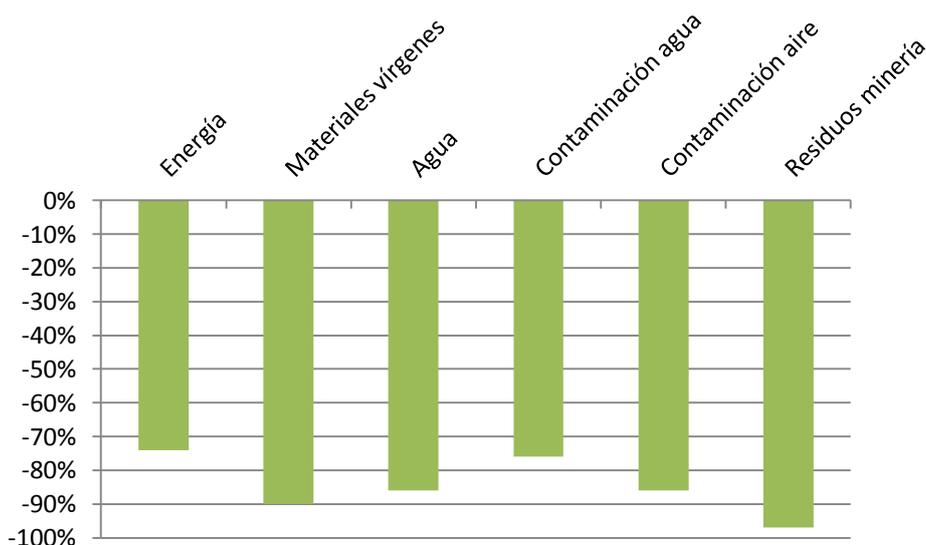


Ilustración 7. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (metales ferrosos).

7.2.2. Metales no ferrosos

Dentro de este grupo y en lo que concierne a los RAEE, los metales no ferrosos más importantes son el aluminio y el cobre. Aunque el aluminio sea el metal más abundante en la corteza terrestre, ambos tienen una disponibilidad limitada y su reciclaje es viable desde el punto de vista económico y favorable ambientalmente. Para cuantificar las ventajas del reciclaje es necesario tratar ambos metales por separado:

- **Aluminio:** tiene gran potencial de reciclaje ya que este proceso consiste en la refundición del metal consumiendo menos energía que su producción a partir de la electrólisis de la alúmina. Además, al reciclarlo no se pierden sus propiedades por lo que se puede volver a utilizar para el mismo fin del que se parte.

En términos de materia prima, por cada tonelada de aluminio reciclado se ahorran 8 toneladas de bauxita. Pero principalmente destaca la energía y combustible que se ahorra, 14.000 kWh, más de 6.000 L de petróleo, 251 millones de kJ y 7,6 m³ de espacio en vertedero. La Ilustración 8 muestra de forma gráfica el ahorro generado con el reciclaje de aluminio.

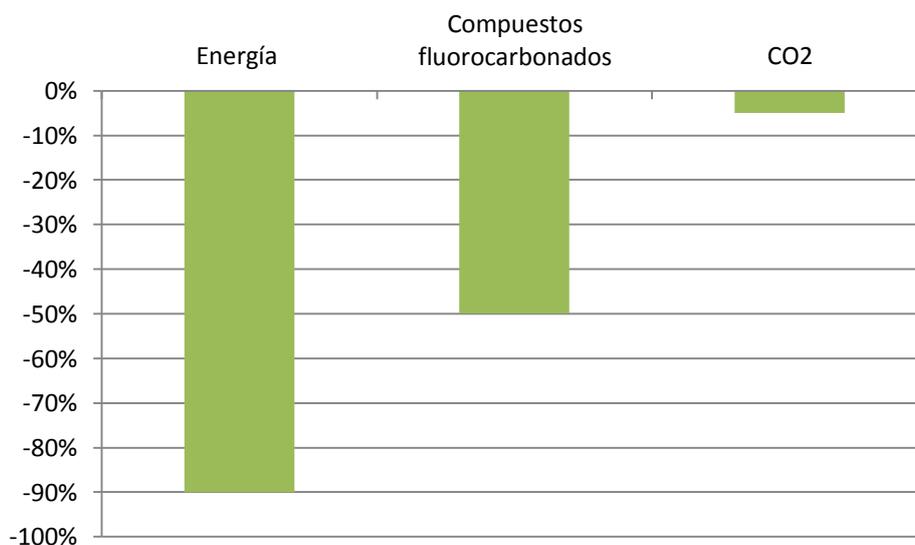


Ilustración 8. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (aluminio).

- **Cobre:** se trata del metal con mayor crecimiento de la demanda ya que aumenta de forma paralela al consumo de tecnología. Es muy importante debido gran capacidad de conducción eléctrica y térmica, y es muy importante en las aleaciones con estaño o zinc.

El cobre también se puede reciclar un número ilimitado de veces, aunque a

diferencia del aluminio no se suele utilizar para el mismo objetivo ya que puede estar contaminado con otros metales que reduzcan sus prestaciones. Esto se debe a que en la fabricación de cables se necesita cobre de alta pureza (<99%), por lo que cualquier contaminación disminuiría su capacidad de conducción y ya no sería válido para su propósito. Por tanto, aunque es necesario que una parte del cobre se produzca a partir de materia prima, el reciclaje de este material es muy importante para la producción de aleaciones y para su utilización en fines menos exigentes.

Además, reciclando el cobre se ahorra un 85% de la energía necesaria en la producción primaria. En general, con el reciclaje de cobre se ahorran anualmente alrededor de 40 millones de toneladas de dióxido de carbono.

7.2.3. Plásticos

El plástico presente en la carcasa de los RAEE es mayoritariamente ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) en el caso de las CRT, y PS (poliestireno) en el caso de los frigoríficos. Ambos son reciclables, aunque este proceso es más difícil que en el caso de los metales debido a la heterogeneidad de formas en las que se presentan y porque pueden estar mezclados con diferentes tipos de materiales.

También a diferencia de los metales, el reciclaje afecta a las propiedades del plástico y es de vital importancia en este campo la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías. Como consecuencia de este cambio de propiedades, el plástico reciclado se utiliza en aplicaciones muy diferentes de las que provenía.

Como término medio, ya que varía para cada tipo de plástico, con el reciclado se ahorran más de 5.500 kWh, 2.600 L de petróleo y 100 kJ por tonelada reciclada. Así mismo también son importantes los 22 m³ de vertedero que se ahorran por cada tonelada. Todo esto conlleva un ahorro de materia prima (petróleo mayoritariamente) del 80%.

7.2.4. Vidrio

El vidrio, igual que los metales, admite un reciclado total y se puede reciclar un número ilimitado de veces ya que no pierde sus propiedades. Es por ello que es de vital importancia reciclar este material, debido a las grandes cantidades que se generan en el tratamiento de las CRT. Como con todos los materiales anteriores el reciclado de vidrio también es importante por el hecho de que se ahorra un gran espacio en los vertederos.

Por normal general, por cada tonelada de vidrio reciclado se ahorran 1,2 toneladas de materias primas, 130 kg de combustible y 42 kWh.

En la Ilustración 9 se muestran más datos de ahorro correspondientes al reciclado de vidrio:



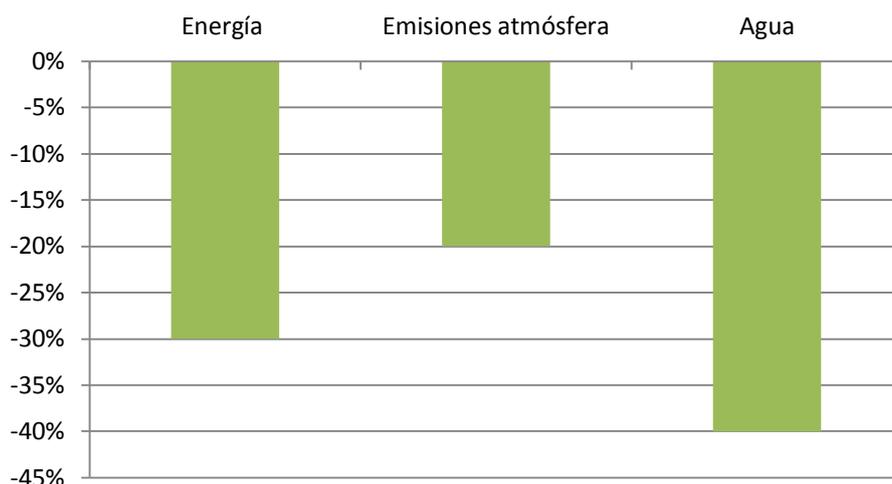


Ilustración 9. Porcentajes de ahorro del reciclado en comparación con la extracción (vidrio).

7.2.5. Cálculo del ahorro de emisiones de CO_{2e}

Tras analizar cada uno de los materiales involucrados se destaca que el reciclaje siempre conlleva un ahorro energético y esto es debido, mayoritariamente, a que se elimina el proceso de extracción que suele ser el más costoso energéticamente.

A partir de la diferencia en el consumo energético de cada material, expuesto en los apartados anteriores, se calcula el ahorro de las emisiones de CO_{2e}. Para ello se toman las mismas cantidades de material que en los apartados anteriores, es decir, la que contienen los RAEE.

En la Tabla 18 se muestran las toneladas producidas de cada material, así y como el ahorro de energía que supone su reciclado en comparación con la extracción y por último el ahorro de las emisiones. Este último dato se ha calculado teniendo en cuenta un factor de conversión de 0,526 kg CO_{2e}/kWh de electricidad. Este valor se toma del propuesto por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo para el año 2011 para la electricidad producida a partir de combustibles no renovables. Se toma este tipo de combustible puesto que es el que usan habitualmente en la generación de energía para la maquinaria necesaria en los procesos de extracción.

Tabla 18. Ahorro en las emisiones de CO₂ comparación reciclaje-extracción.

	Producción t/año	Ahorro kWh/t	Emisiones t CO ₂ /año
Metales ferrosos	1055,8	642	356,5
Aluminio	113,79	14000	837,9
Plásticos	369,63	5500	1069,3
Vidrio	426,05	42	9,4
TOTAL			2.273 t CO ₂ /año

Es importante mencionar que para el caso del cobre no se obtuvieron datos representativos, por lo que no se tendrá en cuenta en este cálculo. Aun así, el ahorro sería mayor puesto que el consumo energético del cobre reciclado es inferior al del mismo material virgen.

8. Importancia del tratamiento de RAEE

Con los apartados anteriores se ha pretendido demostrar la necesidad, desde el punto de vista ambiental, y la viabilidad, desde el punto de vista económico, de la existencia de estas plantas. Se ha visto que son beneficiosas para el medio ambiente en relación a las emisiones de CO_{2e} y también gracias al aprovechamiento de recursos que de otra forma tendrían que extraerse a partir de materias primas, las cuales en muchos casos están cerca de su agotamiento. Por otro lado, con el uso de la tecnología adecuada el procesado es rentable, lo que permite obtener beneficios económicos gracias a la venta de las diferentes y valiosas fracciones.

Esto es importante por varias razones:

- En el 2010 se compraron más de 600 mil toneladas de aparatos eléctricos en España, mientras que la cantidad recogida no llega a las 200 mil toneladas (Queiruga et al. 2012).
- En el 2007 (último dato encontrado, Queiruga 2008) la capacidad de las plantas españolas era de 97.500 toneladas anuales.

Como se puede observar, aunque la capacidad de las plantas se hubiese duplicado desde el 2007 al 2016 (195 toneladas anuales), seguiría siendo insuficiente para tratar todos los residuos generados. Sobre todo teniendo en cuenta el ritmo de crecimiento de esta corriente de residuos, de un 3 a un 5% anual.

Por tanto surge la pregunta ¿dónde terminan todos los RAEEs que no se gestionan en las plantas españolas? Estos residuos habitualmente se envían a otros países, normalmente en vías de desarrollo, ya sea porque es más económico o porque las leyes ambientales son más permisivas. A esta práctica se le denomina *dumping* (Convenio de Basilea), y se trata del tráfico ilícito transfronterizo de desechos peligrosos y otros desechos desde países desarrollados a países en vías de desarrollo.

Muchos de estos residuos se envían a países como Nigeria, Gana o India (Ilustración 10) como si fuesen equipos de segunda mano, ya que este tráfico sí que está permitido al permitir acceder a la tecnología a determinada población que no tiene el poder adquisitivo necesario para comprarse aparatos nuevos. Pero esto encubre el traslado de residuo de forma ilegal ya que la gran mayoría no se pueden reutilizar.

Esto provoca que países con menos recursos se conviertan en los vertederos de los países desarrollados, y es en estos vertederos donde se produce el reciclaje ilegal de RAEEs. Es habitual que entre los trabajadores haya menores, los cuales desmantelan los residuos para extraerles los materiales más valiosos en el mismo lugar en el que se están incinerando aquellos residuos que ya se han desmantelado por completo. Todo esto

conlleva un elevado coste ecológico y de salud para la población más pobre. Además, con estos métodos de desmontaje manual no se extraen todos los componentes que se podrían extraer si se gestionasen adecuadamente. Por tanto, el envío de RAEE a estos países provoca daños en el medio ambiente y en la salud y una pérdida económica asociada a la baja eficiencia del proceso de reciclaje.



Ilustración 10. Flujo de RAEEs desde los países desarrollados a países en vías de desarrollo. Fuente: <http://ewasteguide.info/europe-breaking>

En base a todo esto, se hace evidente que es necesario aumentar la capacidad de tratamiento de las plantas españolas ya que el desvío de residuos a países menos desarrollados implica que esto se realice al margen de los cauces legales ya que España, como miembro de la UE, ha ratificado el Convenio de Basilea.

Como se ha demostrado, este tipo de plantas generan valor a partir de residuos, tanto para la localidad en la que se sitúe la planta al generar puestos de trabajo, como para los propietarios al ser rentable y en general para el estado ya que se consigue disminuir la cantidad de materias primas que hay que comprar a otros países o reducir la explotación de los recursos propios. Esta última ventaja también conlleva un beneficio medioambiental porque normalmente los procesos de extracción son más contaminantes y/o más exigentes energéticamente que los procesos de reciclado.

Conclusiones

A lo largo de este trabajo ha quedado patente la necesidad del tratamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos ya que se han convertido en uno de los grandes problemas de los países desarrollados. Los cortos ciclos de vida y la facilidad en el acceso a las nuevas tecnologías hacen que sea la corriente de residuos con mayor crecimiento. Debido a esto hoy en día está en vigor en España el RD 110/2015 que marca las pautas de recogida, transporte, almacenaje y tratamiento de estos residuos. Por lo que es necesario tratar estos residuos en plantas específicas, diferentes a las de tratamiento de RSU.

Uno de los principales objetivos del proyecto era demostrar la viabilidad económica de este tipo de plantas. Para ello se realiza un balance económico de las dos líneas de tratamiento estudiadas y se estudia la rentabilidad de la inversión que supone una planta de estas características. Ambos estudios arrojan resultados positivos siempre y cuando se traten un mínimo de unidades anuales, 8.000 para la línea blanca con residuos peligrosos y 30.000 para la línea marrón con residuos peligrosos, y además su tratamiento esté financiado por los Sistemas Integrados de Gestión. Por otro lado, la rentabilidad de esta planta se ve muy afectada por la maquinaria utilizada, ya que de ella dependerá la cantidad y calidad de material valorizable que se obtiene. Por tanto, es muy importante invertir en el desarrollo de nueva tecnología ya que habitualmente esto implica un menor consumo y una mejora en la separación de los materiales.

Como se ha visto, si estos residuos no se gestionan correctamente no solo se pierden elementos valiosos y escasos sino que además se daña gravemente el medio ambiente por dos vías diferentes.

La primera es por el impacto que tienen en los vertederos este tipo de residuos, ya que antiguamente se incineraban al aire libre por el gran espacio que ocupaban, lo que conllevaba la emisión de miles de toneladas de dióxido de carbono y de otros compuestos muy peligrosos como los CFC que destruyen la capa de ozono. Si se incineraran todos los residuos que se han tomado como base para este proyecto se emitirían más de 1.000 toneladas de CO_{2e} al año, sin tener en cuenta ni el transporte ni el daño que se podría causar al medio ambiente por otros cauces, como la incineración de los aceites.

La segunda vía a tener en cuenta es la explotación de los recursos mineros para la obtención de nuevos materiales. Esta industria es de las más contaminantes del mundo debido a la baja concentración de los materiales en las minas, lo que repercute en un alto consumo energético y de combustibles fósiles. Otro factor importante es que para la extracción de muchos metales se utilizan fuertes ácidos que acaban contaminando

suelos y mares, ya que muchas de estas minas están en países en vías de desarrollo con legislación ambiental más laxa. Además, es habitual que los procesos de reciclado consuman menos recursos que la extracción, por ejemplo por cada tonelada de aluminio que se recicla se ahorran 14.000 kWh.

Por otro lado, se ha demostrado que este tipo de residuos juegan un papel muy importante en la propuesta de economía circular ya que están formados por elementos de valor y fácilmente reciclables que pueden volver a entrar en el mercado con las mismas características.

Por tanto, es muy importante que desde los gobiernos e instituciones se fomente e impulse la recogida y el reciclado de estos residuos para que no se cree un mercado negro que los desvíe a países sin la tecnología adecuada para tratarlos. Ya no solo porque el país que los envíe pierde recursos valiosos, sino porque con este flujo ilegal lo único que se consigue es que estos países menos desarrollados se conviertan en vertederos electrónicos en los que se desmantelan sin ningún control, provocando serios problemas ambientales globales y de salud.

Pasos futuros

Tras realizar este proyecto y comprender la gran problemática que surge a raíz de este tipo de residuos se ha visto que autores conocedores de la materia y diversas agencias ambientales proponen una serie de acciones a realizar en el futuro. Algunas de ellas son las siguientes:

- Fomentar el ecodiseño: se trata de impulsar a los productores de aparatos eléctricos a que reduzcan la cantidad de elementos peligrosos o nocivos en el diseño y que centren parte del diseño en el final de su vida útil. Esto quiere decir que sea fácilmente reciclable, por ejemplo minimizando el número de materiales a utilizar. (Gottberg, 2006)
- Logística inversa: planificar las rutas de recogida de los residuos con la ayuda de software especializado con el objetivo de minimizar la distancia recorrida y hacer más eficiente el proceso. Esto es muy importante porque normalmente los puntos limpios en donde se depositan los RAEEs están dispersos por toda la geografía, por lo que diseñar las rutas correctamente ahorra tiempo y recursos.
- Inversión en I+D: con el objetivo de utilizar maquinaria más especializada en las operaciones de separación y con menores consumos energéticos.
- Concienciación ciudadana: es uno de los puntos más importantes porque a menudo estos residuos se desechan con la basura normal por falta de conocimiento. Para ello es vital promocionar los puntos limpios y realizar campañas de recogida periódicas para incitar al reciclaje.
- Promover la reutilización y reparación de equipos en contra de la sustitución por aparatos nuevos mediante la creación de plantas dedicadas a la reparación, lo que permitiría acceder a la tecnología a ciertos sectores de la sociedad que no pueden permitirse comprar equipos nuevos y se evitarían una gran cantidad de residuos.

Bibliografía

Autorización Ambiental Integrada, Planta de tratamiento de RAEE y de residuos voluminosos de Cerceda, Cespa S.A., 2014

Barba-Gutiérrez Y., Adenso-Díaz B., Hopp M. (2008) "An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation" en *Resources, Conservation and Recycling* nº52; 481-495.

Biganzoli L., Falbo A., Forte F., Grosso M., Rigamonti L. (2015) "Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in Lombardia Region (Italy)" en *Science of the Total Environment* nº 524-525; 361-375.

Cucchiella F., D'Adamo I., Lenny Koh S.C. (2015) "Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams" en *Renewable and Sustainable Energy Reviews* nº51; 263-272.

Cui J., Forssberg E. (2003) "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review" en *Journal of Hazardous Materials* B99; 243-263.

Directiva Europea 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Directiva Europea 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto de una Planta de Tratamiento de Residuos Voluminosos en la Comunidad Autónoma de Galicia, Xunta de Galicia, 2006

Gottberg, A., Morris J., Pollard S., (2006) "Producer responsibility, waste minimization and the WEEE directive: Case studies in eco-design from the European lighting sector" en *Science of the Total Environment* vol 359, 38-56.

Guidance on the Recovery and Disposal of Controlled Substances Contained in Refrigerators and Freezers, Scottish Environment Protection Agency, 2002.

Hischier, R., Wager, P., Gaughhofer, J. (2005) "Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling system for waste electrical and electronic equipment (WEEE)" en *Environmental Impact Assessment Review* nº25; 525–539.

Hogg, D. (2006) "A Changing Climate for Energy from Waste?" en *Final Report for Friends of the Earth*; Bristol.

Huisman J., Magalini F., Kuehr R (2008) "Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)". United Nations University

Mar-Ortiz J., Adenso-Díaz B., González-Velarde JL. (2011) "Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain" en *Journal of the Operational Research Society* nº 62, 1471–1484.

Queiruga D., González J., (2008) "Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain" en *Waste Management* vol 28, 181-190.

Queiruga D., González J., Lannelongue G., (2012) "Evolution of the electronic waste management system in Spain" en *Journal of Cleaner Production* vol 24, 56-65.

Randall Thomas (Editor) (2006) *Environmental Design: an introduction for architects and engineer*, 3ª Edición, Abingdon, Capítulo 6 páginas 68-69.

Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos

Waste from electrical and electronic equipment- quantities, dangerous substances and treatment methods, European Environment Agency (2003)

Recursos web

BIR, Bureau of International Recycling, Reciclaje de metales. Disponible en www.bir.org/industry-es-es/ferrous-metals-es-es/ (Consultada en agosto 2016)

Convenio de Basilea, Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Disponible en <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf> (Consultada en octubre 2016)

Copper Alliance, Instituto Europeo del Cobre. Reciclaje del cobre. Disponible en www.copperalliance.es/el-cobre/reciclaje (Consultada en agosto 2016)

EC, Comisión Europea, Sostenibilidad y Economía circular. Disponible en https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability_en (Consultada en septiembre 2016)

EPA, Agencia para la Protección Medioambiental de los Estados Unidos. Disponible en www.epa.nsw.gov.au/resources/warrlocal/100058-benefits-of-recycling.pdf (Consultada

en julio 2016)

Eurostat, Oficina Europea de Estadística. Disponible en <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (Consultada en junio 2016)

INE, Instituto Nacional de Estadística, Sección prensa-índice de precios industriales. Disponible en http://www.ine.es/prensa/ipri_tabla.htm (Consultada en octubre de 2016)

MAGRAMA, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Nota técnica sobre el tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que contengan CFC, HCFC, HFC o HC, septiembre 2011. Disponible en [http://www.magrama.gob.es/imagenes/es/NOTA%20TECNICA%20FRIGOS_NT_T1_V1%20\(2\)_tcm7-189530.pdf](http://www.magrama.gob.es/imagenes/es/NOTA%20TECNICA%20FRIGOS_NT_T1_V1%20(2)_tcm7-189530.pdf) (Consultada septiembre 2016)

MAGRAMA, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Análisis y Prospectiva, Serie Medio Ambiente nº6 mayo 2013, pág 1. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/AyP_serie_n%C2%BA6_Empleo_Verde_tcm7-278004.pdf (Consultada en septiembre 2016)

MINETUR, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España. Disponible en http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/propuestas/Documents/2014_03_03_Factores_de_emision_CO2_y_Factores_de_paso_Efinal_Eprimaria_V.pdf (Consultada en septiembre de 2016)

SIG AUS, Sistema Integrado de Gestión de Aceites Usados, Cadena de reciclaje del aceite industrial usado. Disponible en <http://www.sigaus.es/consumidores/sab%C3%ADas-qu%C3%A9.aspx> (Consultada en septiembre 2016)

Tedx talks, Conferencia de Ken Webster sobre el concepto de Economía Circular, enero 2012. Disponible en <http://tedxtalks.ted.com/video/TEDxLoodusele-Ken-Webster-Circu> (Consultada en septiembre 2016)

ANEXO I

Porcentajes de recuperación de valorizable y no valorizable

Línea blanca con residuos peligrosos

MATERIAL	RECUPERADO	VALOR
Hierro	45,00%	220,00 € / t
Aluminio	4,80%	1720,00 € / t
Compresores	17,20%	370,00 € / t
Plástico	12,00%	220,00 € / t
Cobre	0,60%	2500,00 € / t
Cable	0,30%	1500,00 € / t
Aceite	0,50%	100,00 € / t
Basura	5,20%	-40,00 € / t
Poliuretano pellet	13,80%	-30,00 € / t
Gas	0,60%	-5000,00 € / t
Total	100,00%	

Línea marrón con residuos peligrosos.

MATERIAL	RECUPERADO	VALOR
Plástico	15,09%	250 € / t
Cono de cobre	3,53%	1040 € / t
Placa	7,70%	420 € / t
Hierro	9,27%	220 € / t
Cable anillo	0,82%	2000 € / t
Cable	0,48%	1200 € / t
Aluminio	0,18%	900 € / t
Altavoz	0,99%	80 € / t
Tomillería	0,13%	191 € / t
Cañón electrones	0,17%	40 € / t
Enchufes	0,06%	80 € / t
Basura	0,65%	-40 € / t
Madera	2,58%	-40 € / t
Cristal plomado	20,50%	-57 € / t
Cristal	37,85%	-37 € / t
Total	100,00%	