

RESUMEN

El proyecto se centrará en el estudio del balance energético y huella de CO₂ (Estudio Eco-Audit) del vidrio contenido en los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) gestionados en las plantas de recuperación energética (planta incineradora) de Cataluña. Se cuantificará el contenido del vidrio en las escorias de incineración y se valorará su utilización como árido secundario, en el campo de la construcción. Los resultados obtenidos se compararán con aquellos obtenidos a partir de áridos naturales y con los correspondientes al reciclaje del vidrio, para la obtención de envases, estableciéndose el correspondiente ahorro energético y emisiones de CO₂ para ambos procesos.

Para la obtención de resultados, se han seleccionado las etapas dominantes de cada proceso bajo los criterios del estudio Eco-Audit o Eco-auditoría [1], en cuanto a valores energéticos y de emisiones de CO₂. Una vez seleccionadas las etapas, se han elaborado los diferentes esquemas de proceso, mostrando los consumos de energía (entradas) y las emisiones emitidas (salidas), para cada uno de los métodos de fabricación.

Los resultados han sido extraídos a partir de diferentes citas bibliográficas. Éstos pretenden dar una estimación de la cantidad de energía consumida, en los diferentes procesos, así como también de la emisión de CO₂ proporcionada a la atmosfera. Los resultados concluyen y reafirman, la viabilidad de las dos vías de reciclaje del vidrio contenido en los residuos sólidos urbanos. Se observa que el reciclaje del vidrio, para envases o como material de construcción, es inmediatamente inferior en términos energéticos y de emisiones de CO₂, al proceso productivo a partir de la extracción de fuentes primarias.

SUMARIO

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Objetivos del proyecto.....	6
1.2. Alcance del proyecto.....	6
2. GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS	7
2.1. Definición.....	7
2.2. Clasificación	7
2.2.1. Según su composición.....	7
2.2.2. Según su origen.....	8
2.3. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en Cataluña.....	9
2.3.1. Definición de Residuo Sólido Urbano	9
2.3.2. Etapas del proceso	10
3. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA: INCINERACIÓN	18
3.1. Introducción.....	18
3.2. Funcionamiento.....	19
3.2.1. Ventajas e inconvenientes de la valorización	20
3.2.2. Problemática Medioambiental de la incineración.....	21
3.3. Residuos de combustión.....	22
3.3.1. Cenizas	22
3.3.2. Escorias	23
4. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	28
4.1. Introducción.....	28
4.2. Estudio Eco-Auditoría	29
5. MATERIALES	33
5.1. Introducción.....	33
5.2. Características generales	33
5.3. El vidrio contenido en los RSU.....	35
5.3.1. Recogida selectiva: Envases	35
5.3.2. Escoria de incineración de la Fracción Resto: Material granular	39
5.4. Materias primas.....	44
5.4.1. Vidrio.....	44

5.4.2. Árido natural	46
6. ESTIMACIONES	48
6.1. Análisis Eco-Auditoría del vidrio	48
6.1.1. Envases reciclados	50
6.1.2. Envases 100% fuentes primarias	51
6.2. Análisis Eco-Auditoría del árido.....	53
6.2.1. Escorias de incineración.....	53
6.2.2. Árido natural	54
7. RESULTADOS	56
7.1. Vidrio para envases	56
7.2. Árido.....	57
8. VIABILIDAD ECONÓMICA	59
9. IMPACTO AMBIENTAL	60
CONCLUSIONES	61
AGRADECIMIENTOS	62
BIBLIOGRAFIA	63
Referencias bibliográficas	63

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad son numerosos los estudios acerca de los ciclos de vida de los materiales usados comúnmente, con la finalidad de investigar y evaluar todos los impactos ambientales asociados con producto durante todas las etapas de su existencia (extracción, producción, distribución, uso y desecho).

Uno de los mayores impactos ambientales detectados es la emisión de CO₂ generada en el ciclo de vida de los productos. Teniendo en cuenta que un mismo producto tiene maneras diferentes de obtenerse, es de interés evaluar todos y cada uno de los procesos con la finalidad de concluir cuál es proceso óptimo en cuanto a términos de consumo energético e impacto ambiental.

Una forma de paliar los problemas sociales y medioambientales asociados a la producción y vertido de residuos, es desarrollar un proceso que permita reciclar los residuos a través de su transformación en materiales útiles.

Concretamente este proyecto se centrará en el estudio del vidrio doméstico obtenido mediante dos vías de gestión de los Residuos Sólidos Urbanos: La Recogida Selectiva y la Recogida No Selectiva o Fracción Resto.

El estudio se focaliza en la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos generados en la Comunidad de Cataluña, comunidad de 32 000 km² de superficie y con 7.438.696 habitantes [2]. Cataluña, generó un total de 3.731.439,92 t de residuo sólido urbano en el pasado año 2012, de los cuales se recogieron selectivamente un total, 1.457.764 t, mientras que las restantes 2.273.867 t compusieron la denominada fracción resto [3]. Del total de la recogida selectiva, un 11.6% se correspondió con el vidrio, mientras que un 11.5% de la fracción resto (con un contenido aproximado del 4% de vidrio [4]), fue a parar a las plantas de recuperación energética (plantas incineradoras) como tratamiento finalista.

Sin embargo, el vidrio obtenido mediante estos dos tipos de recogidas, finalizan en aplicaciones diferentes: Envases y material secundario en el campo de la construcción. El presente proyecto analizará el consumo energético así como también las emisiones de CO₂, generados en cada etapa dominante del proceso productivo, bajo los criterios de la Eco-Auditoría. Éstos serán posteriormente comparados con las otras alternativas de producción de éste, cuyas materias primas se obtienen a partir de fuentes primarias. De esta manera se comparará la recogida selectiva del vidrio y la obtención de envases a partir de fuentes secundarias, con la producción de un envase a partir de 100% materias primarias; y la recogida no selectiva de la fracción resto, hasta la obtención de la escoria de incineración, con la extracción y producción de árido natural.

1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo del presente proyecto es el de evaluar, en cuanto a valores energéticos y de emisión de CO₂, las dos vías de tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), las cuales serán posteriormente comparadas con el proceso productivo a partir de la extracción de fuentes primarias. De esta manera se pretende obtener una estimación de los consumos y emisiones generados, con la finalidad de estudiar la viabilidad de ambos procesos de tratamiento de los RSU, en lo referente al reciclado o reutilización del vidrio contenido en el mismo.

Concretamente se hará un mayor hincapié en el material granular obtenido a partir de las escorias de incineración de los RSU, cuya aplicación actual es como material secundario en el campo de la construcción, en subbase de carreteras o como material de relleno. La incineración de RSU implica grandes consumos de energía así como también elevadas emisiones a la atmosfera. La comparación del proceso con la producción de árido natural, genera un gran interés para poder evaluar la viabilidad del reciclado.

1.2. Alcance del proyecto

El estudio se centra en la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos generados en la Comunidad de Cataluña, abarcando desde la recogida de los residuos (a partir de su correspondiente contenedor), hasta la obtención del producto requerido. Las etapas intermedias analizadas serán aquellas que se consideren dominantes, en cuanto a valores energéticos y de emisiones, como establece la Eco-auditoría.

El proyecto se basa en datos extraídos a partir de fuentes bibliográficas, por lo que sólo pequeños cambios de unidades, son los cálculos realizados en este proyecto. Por tanto, los resultados mostrados son sólo una estimación de la carga ambiental y energía contenida en los distintos procesos de obtención de vidrio, para la fabricación de envases, y áridos, para la aplicación como material secundario en el campo de la construcción como, por ejemplo, subbase de carreteras.

2. GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS

2.1. Definición

Se define Residuo como todo aquél material que pierde utilidad tras haber cumplido su misión o servicio para realizar un determinado trabajo.

Éstos están codificados, clasificados y determinados para su correcta gestión. Cada tipo de residuo está regulado en el Decreto 34/1996, de 9 de enero, por el que se aprueba el Catálogo de Residuos de Cataluña y mediante el cual se cumplen tanto los requisitos de la Unión Europea como los requerimientos de la Ley 6/1993, del 15 de julio. Ésta última regula los residuos, y el Decreto legislativo 2/1991, del 26 de septiembre determina que la junta de residuos tiene que mantener un código de identificación de los residuos industriales producidos en Cataluña [5].

2.2. Clasificación

Los diferentes tipos de residuos se clasifican en función de su composición y/u origen [6].

2.2.1. Según su composición

- Residuo orgánico: todo desecho de origen biológico (desecho orgánico), que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo, por ejemplo: hojas, ramas, cáscaras y residuos de la fabricación de alimentos en el hogar, etc.
- Residuo inorgánico: todo desecho sin origen biológico, de índole industrial o de algún otro proceso artificial, por ejemplo: plásticos, telas sintéticas, etc.
- Mezcla de residuos: En el sentido más amplio del término, se refiere a todos los desechos de residuos mezclados que es el resultado de una combinación de materiales orgánicos e inorgánicos.
- Residuos peligrosos: se refiere a todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial (código CRETIB) y que por lo cual debe ser tratado de forma especial, por ejemplo, material médico infeccioso, residuo radiactivo, ácidos y sustancias químicas corrosivas, etc.

- Residuo inerte: aquel residuo no peligroso que no experimenta transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas, no es soluble ni combustible, ni reacciona física ni químicamente ni de ninguna otra manera, no es biodegradable, no afecta negativamente a otras materias con las cuales entra en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes del residuo y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales o subterráneas.

2.2.2. Según su origen

- Residuo domiciliario: basura procedente de los hogares y/o comunidades.
- Residuo industrial: su origen es producto de la manufactura o proceso de transformación de la materia prima.
- Residuo hospitalario: desechos que son catalogados, por lo general, como residuos peligrosos y pueden ser orgánicos e inorgánicos.
- Residuo comercial: procedentes de ferias, oficinas, tiendas, etc., y cuya composición es orgánica, tales como restos de frutas, verduras, cartones, papeles, entre otros.
- Residuo urbano: correspondiente a las poblaciones, como desechos de parques y jardines, mobiliario urbano inservible, etc.
- Basura espacial: Objetos y fragmentos artificiales de origen humano que ya no tienen ninguna utilidad y se encuentran en órbita terrestre.
- Residuo de construcción y demolición: Cualquier sustancia u objeto que se genere en una obra de construcción o demolición.

De los diferentes residuos mencionados en los apartados anteriores de este capítulo, cabe mencionar que el presente proyecto sólo se dedicará a los Residuos Municipales (Residuos Sólidos Urbanos), aquellos que engloban los residuos de origen domiciliario, comercial y urbano y que se describirán, junto a su gestión, en el capítulo que viene a continuación.

2.3. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en Cataluña

2.3.1. Definición de Residuo Sólido Urbano

Los Residuos Sólidos Urbanos (R.S.U) son aquellos residuos generados en actividades desarrolladas en núcleos urbanos o zonas de influencia como domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios. Se encuentran regulados por medio de tres medidas de carácter jurídico, que son la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos; el Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNUR) 2000 - 2006 y el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008 – 2015 [7].

Este tipo de residuos, por su importancia estratégica y presencia en el conjunto de la sociedad, disponen de un programa de gestión, de una planificación de infraestructuras y de un modelo de gestión específicos.

En Cataluña se recogieron en 2012 un total de 3.731.440 t de RSU_[3] (Tabla 2.1). Los RSU están formados por materia orgánica, papel y cartón, plásticos y vidrio, entre otros. Las etapas de su gestión serán desarrolladas en el siguiente capítulo, 2.3.2.

Tabla 2.1 - Evolución de los datos de generación de residuos en Cataluña en Cataluña entre los años 2011-2012 [3].

COMPARATIVA GENERACIÓ DE RESIDUS MUNICIPALS 2011/2012 (valors disponibles a 29 de juny 2013)				
Dades en tones	2012	2011	VARIACIÓ SOBRE 2010	
HABITANTS	7.570.908	7.539.618	0,42%	
	TOTAL	TOTAL	% TOTAL/RM	
AUTOCOMPOSTATGE	5.105,80	-		
FRACCIÓ ORGÀNICA	384.136,28	411.770,05	10,29%	-6,71%
PODA	99.178,02	104.626,19	2,66%	-5,21%
PAPER I CARTRÓ	318.020,39	408.541,52	8,52%	-22,16%
VIDRE	169.116,71	180.740,81	4,53%	-6,43%
ENVASOS LLEUGERS	135.289,31	137.012,63	3,63%	-1,26%
VOLUMINOSOS+FUSTA	163.548,78	185.444,83	4,38%	-11,81%
RAEES	19.996,83	24.897,77	0,54%	-19,68%
FERRALLA	6.224,32	8.993,52	0,17%	-30,79%
OLIS VEGETALS	1.155,47	1.076,77	0,03%	7,31%
TÈXTIL	6.653,85	10.216,64	0,18%	-34,87%
RUNES	122.491,81	135.872,23	3,28%	-9,85%
REPO	1.828,63	1.975,47	0,05%	-7,43%
ALTRES RECOLLIDES SELECTIVES	25.018,43	30.891,09	0,67%	-19,01%
TOTAL RSB	1.457.764,62	1.642.059,52	39,07%	-11,22%
% RSB/RM	39,07%	40,62%		

FRACCIÓ RESTA	A TMB DE LA RESTA	1.129.135,86	857.307,49	30,26%	31,71%
	A DIPÒSIT CONTROLAT (DC)	882.235,57	1.064.038,00	23,64%	-17,09%
	A INCINERACIÓ (INC)	262.300,87	480.707,49	7,03%	-45,43%
	Subtotal DC + INC	1.144.536,44	1.545.761,41	30,67%	-25,96%
	TOTAL FRACCIÓ RESTA	2.273.672,30	2.402.740,96	60,93%	-5,37%
% FR _{TOTAL} /RM		60,93%	59,38%		
GENERAL	TOTAL RM	3.731.436,92	4.044.800,48		-7,75%
	RATI (kg/hab*dia)	1,35	1,47		-8,17%

2.3.2. Etapas del proceso

La gestión de los RSU consta de cuatro etapas:

2.3.2.1. Depósito y recogida

La recogida de los residuos urbanos consiste en su recolección para efectuar su traslado a las plantas de tratamiento.

Básicamente existen dos tipos fundamentales de recogida [8]:

Recogida no selectiva o Fracción Resto, donde los residuos se depositan mezclados en los contenedores de color gris (Figura 2.1), sin ningún tipo de separación. Su destino final será el de las plantas de tratamiento mecánico biológico (TMB), el vertedero o las plantas de recuperación energética (incineradoras).



Figura 2.1 - Contenedor Fracción Resto [9].

En el 2012 se gestionaron en Cataluña 2.273.867 toneladas de fracción resto, de los cuales un 11.5% fueron destinados a la planta de incineración, 38.8% al vertedero y el 49.7% a tratamiento mecánico-biológico (Figura 2.2).

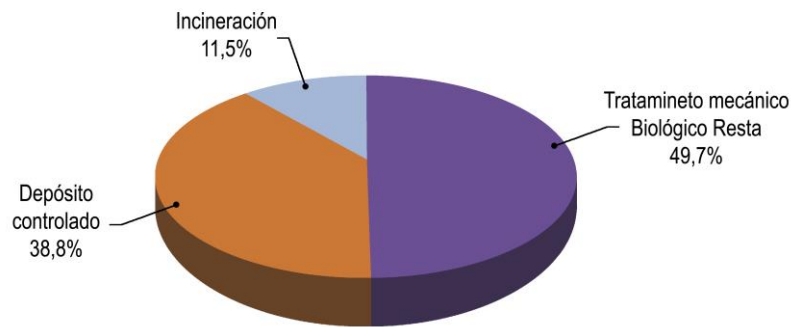


Figura 2.2 - Distribución de la fracción resto de Residuos Sólidos Urbanos en Cataluña en 2012 [3].

Recogida selectiva, la cual se realiza mediante camiones que recogen los residuos que han sido clasificados previamente en los hogares, las corrientes que se colectan de manera separada son: papel y cartón (Figura 2.3.a), vidrio (Figura 2.3.b), envases ligeros (Figura 2.3.c) y la fracción fermentable (Figura 2.3.d), siendo éstos posiblemente separados mediante el uso de contenedores específicos para cada caso.



Figura 2.3 - Distintos tipos de contenedores empleados en la recogida selectiva de los RSU [9].

El objetivo de la Recogida selectiva es el de recoger segregadamente los residuos para posibilitar su posterior reciclaje e introducción de un nuevo ciclo productivo, evitando así que se destinen a otros tratamientos finalistas (vertederos o incineradoras). Esto supone un ahorro energético y de materiales, si se compara con la fabricación del producto a partir de fuentes primarias.

Durante el 2012, según datos extraídos de la Agencia de Residuos de Cataluña, en Cataluña se recogieron selectivamente 1.457.943 toneladas de residuos, los cuales suponen un 39.05% del total de residuos generados [3]. Este porcentaje está formado por las siguientes fracciones de residuos (Figura 2.4):

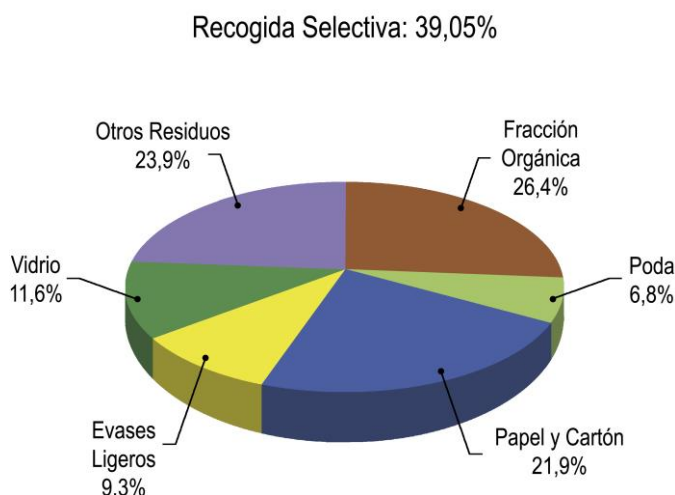


Figura 2.4 - Distribución de la recogida selectiva de Residuos Sólidos Urbanos en Cataluña en 2012 [3].

2.3.2.2. Selección

Aunque la primera clasificación de residuos ocurre (o debería ocurrir) en origen (hogares); la separación de los residuos constituye un elemento dentro del manejo integrado de residuos ya que es necesario un procesamiento o separación adicional antes de poder reutilizar estos materiales.

Las instalaciones en las que se realiza este proceso utilizan procedimientos manuales y/o medios mecánicos para separar los materiales de interés para su posterior tratamiento.

En Cataluña existen dos tipos de instalaciones para la selección de los residuos:

- Plantas de selección general, que reciben residuos mezclados que han sido recogidos mediante la recogida no selectiva.
- Plantas de selección de envases ligeros, donde llegan los residuos que han sido depositados en el contenedor de envases y posteriormente recolectados mediante recogida selectiva.

La ARC (2012) reporta la existencia de 3 plantas de selección en Cataluña.

2.3.2.3. Transporte

En esta etapa se realiza el transporte de los residuos hacia las estaciones de transferencia, plantas de clasificación, reciclado, valorización energética o vertedero.

Las estaciones de transferencia son instalaciones en las cuales se descargan y almacenan temporalmente los residuos para poder posteriormente transportarlos a otro lugar para su tratamiento. Una vez allí, se compactan, almacenan y se procede a su transporte en vehículos de mayor capacidad hacia la planta de tratamiento.

Normalmente han de estar dotados de sistemas de compactado de la basura para optimizar su transporte. De esta forma se reducen los costes de transporte y se alarga la vida de los vehículos de recogida. En ocasiones en que el centro de tratamiento está próximo a los núcleos habitados, los propios vehículos de recogida son los que realizan el transporte a planta.

En Cataluña hay 10 estaciones de transferencia de donde parten los camiones hacia las incineradoras y los vertederos.

2.3.2.4. Tratamiento

Una vez recogidos los residuos, el siguiente paso en el sistema de gestión es su tratamiento final, que recoge todas las operaciones precisas para la recuperación o la eliminación de dichos residuos. Esta fase concentra todos los procesos de transformación, ya sean mecánicos, químicos, biológicos o de recuperación energética utilizados para valorizar los residuos, así como aquellos que se emplean para el vertido final de los restos no recuperados y de los rechazos de los procesos anteriores.

A continuación se ofrece la descripción de los procesos de disposición y tratamiento más habituales, haciendo mayor hincapié en el reciclaje y la incineración, ya que son procesos a partir de los cuales se obtiene un porcentaje de vidrio.

2.3.2.4.1 Reciclaje

Se entiende por reciclaje la transformación de los residuos, dentro de un proceso de producción, para su fin inicial o para otros fines, incluido el compostaje y la biometanización, pero no la incineración con o sin recuperación energética.

El reciclaje implica una serie de procesos industriales que, partiendo de unos residuos originarios y sometiéndolos a tratamientos físicos, químicos o biológicos, dan como

resultado la obtención de una serie de materiales que se introducen nuevamente en el proceso productivo.

Una de las características de los residuos domésticos es su gran heterogeneidad, lo que hace que sean muy difíciles de tratar en conjunto. Además la calidad de los productos reciclados está directamente relacionada con la calidad de la recogida y de la clasificación, evitándose así posibles contaminaciones. Todo ello justifica claramente la necesidad de separar los diferentes materiales que componen los residuos, lo que implica la instauración de políticas de recogida selectiva de los residuos.

Una vez separados los diversos materiales, se someten a los correspondientes procesos de transformación, según la clase de materiales.

2.3.2.4.2 Vertido sin control

Consiste en la acumulación de residuos sin ningún tipo de tratamiento a cielo abierto. Aunque es la forma más antigua y más económica de deshacerse de los residuos, no es aceptable desde el punto de vista ambiental y de salud humana.

En estos vertederos proliferan animales, microorganismos y se generan productos de descomposición que contaminan el suelo, el aire e incluso aguas superficiales. Otros problemas son los malos olores, el impacto paisajístico y los posibles incendios, que liberarían humos tóxicos.

2.3.2.4.3 Vertido controlado ó relleno sanitario

Se denomina vertido controlado cuando se toman las medidas necesarias para evitar todo aquello que pueda resultar nocivo o molesto y pueda resultar en un deterioro del medio.

Es la técnica de eliminación más utilizada en Europa ya que permite una eliminación final y completa de los residuos con la posibilidad de implantación de técnicas de reciclaje complementarias en la zona de vertedero.

Consiste en el almacenamiento de residuos en terrenos amplios que se excavan y se rellenan con capas alternativas de basura y de tierra compactadas. En este tipo de tratamiento resulta fundamental la elección de un terreno adecuado desde el punto de vista hidrogeológico, con capacidad suficiente y buenas comunicaciones. Los vertederos controlados pueden ser de varios tipos, según el tratamiento a que se sometan los residuos:

- De baja densidad: En ellos los residuos se someten a una compactación ligera obteniendo una densidad media de 600 kg/m^3 . Los residuos vertidos diariamente se cubren.
- De media densidad: Los residuos son compactados hasta una densidad media de 750 kg/m^3 , realizándose la cubrición con una mayor periodicidad.
- De alta densidad: los residuos son tratados con maquinaria pesada que los tritura y compacta llegándose a obtener densidades medias de 1100 kg/m^3 . En este tipo de vertederos no se necesita cubrición.

La elección de uno u otro tipo influyen varios factores, aunque muchas veces se supedita al volumen de residuos generados: así los de alta densidad se utilizan en pequeños vertederos de menos de 130 t/día, los de media para vertederos que reciben entre 130 y 300 t/día y los de baja para más de 300 t/día.

2.3.2.4.4 Valorización energética. Procesos térmicos:

2.3.2.4.4.1 *Incineración*

El proceso de incineración, puesto que es la base del presente proyecto, se describe detalladamente en el apartado "3. Valorización energética: Incineración".

2.3.2.4.4.2 *Pirólisis.*

La pirólisis es un proceso térmico realizado en ausencia de oxígeno y a una temperatura próxima a los 400°C . En él se genera:

- Una mezcla de gases hidrocarbonados y algo de monóxido de carbono.
- Mezcla de hidrocarburos líquidos.
- Un sólido carbonoso que presenta incrustaciones de elementos inertes que no pirolizan como piedras, vidrio, metales, etc.

2.3.2.4.4.3 *Gasificación.*

Por último la gasificación consiste en la oxidación del residuo en atmósfera empobrecida para conseguir una combustión parcial. Se tiene experiencia en materiales homogéneos.

2.3.2.4.5 Procesos biológicos

2.3.2.4.5.1 *Producción de abono ó compost*

El compostaje es un proceso de descomposición biológica, por vía aerobia (en presencia de oxígeno), de la materia orgánica contenida en los residuos en condiciones controladas. Las bacterias actuantes son termófilas, desarrollándose el proceso a temperaturas comprendidas entre 50-70°C, lo que produce la eliminación de los gérmenes patógenos y la inocuidad del producto, o masófilas, en procesos a temperaturas comprendidas entre los 35-45°C. El material resultante del proceso, llamado compost, no es enteramente un abono, aunque contiene nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y oligoelementos (manganeso, cobre, hierro), sino más bien, un regenerador orgánico del terreno, razón por la que se ha denominado abono orgánico.

En España existen 24 plantas de compostaje, que producen cantidades variables de compost, según la demanda, llegando a producir más de 2,3 millones t/año.

Las plantas son rentables a partir de 300 t/día, estimándose el límite inferior de viabilidad en 150 t/día y se considera que no se deben montar plantas para producciones menores de 100 t/día. Aproximadamente el 80% de las instalaciones están ubicadas en Levante y en el Sur de España. En la Comunidad Valenciana es donde más plantas hay instaladas, seguida de Murcia, Andalucía y Cataluña.

2.3.2.4.5.1.1 Propiedades del compost

- Mejora las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados del suelo agrícola, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad, y aumenta su capacidad de retención de agua en el suelo. Se obtienen suelos más esponjosos y con mayor retención de agua.
- Mejora las propiedades químicas. Aumenta el contenido en macronutrientes N, P,K, y micronutrientes, la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) y es fuente y almacén de nutrientes para los cultivos.
- Mejora la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos ya que viven a expensas del humus y contribuyen a su mineralización.
- La población microbiana es un indicador de la fertilidad del suelo.
-

2.3.2.4.5.2 *Digestión anaerobio o biometanización.*

La biometanización, o digestión anaerobia, es un proceso microbiológico de fermentación de la materia orgánica, en condiciones de ausencia de oxígeno, transformándose por la acción bacteriana los compuestos orgánicos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Se obtienen dos productos:

- Biogás, que puede utilizarse para producir energía eléctrica.
- Digesto de materia orgánica.

Este tipo de tratamiento debe ir precedido de un tratamiento de clasificación y seguido de un proceso de compostaje para la estabilización del digesto.

3. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA: INCINERACIÓN

3.1. Introducción

La incineración consiste en la oxidación total de los residuos en exceso de aire y a temperaturas superiores a 850°C, según se recoge en la Directiva 2000/76 [10]. Ésta Se realiza en hornos apropiados con aprovechamiento de la energía producida.

Las plantas incineradoras son instalaciones donde se da lugar un proceso de combustión controlada de la fracción no reciclable de los residuos, la fracción resto, la cual es transformada en cenizas, escorias (compuestos inorgánicos semifundidos y enfriados) y gases. De esta manera se reduce de forma importante el volumen de los residuos y se aprovecha la energía que éstos contienen, para generar electricidad.

De las 2.146.624 toneladas de residuos que se recibieron en las plantas de tratamiento finalista en Cataluña en el año 2012, 606.714 toneladas fueron destinados a plantas de incineración [3].

En Cataluña existen 4 plantas dedicadas a la incineración de residuos con capacidad media de 172 t/año [11] (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 - Instalaciones de incineración de residuos en Cataluña (2012) [12].

CCAA	Provincia	Instalación	Capacidad		Entrada TOTAL (t)		Salida TOTAL		
			Nº de Hornos	Capacidad nominal (t/año)	RU mezcla	Rechazos Instalaciones	Potencia Generada (kwh/año)	Residuos Gnerados (t)	Destino Residuos Generales
C.A Cataluña	Barcelona	TERSA Inceneradora de Sant Adrià del Besòs	3	326.250	168.390	153.801	178.994	82.874	Valorización disposición final
		TRM Inceneradora de Mataró	2	164.000	174.579	0	45.509.000	27.463	Valorización disposición final
							36.579	Exceso a vertedero	
	Gerona	TRARGISA Inceneradora de RSU de Gernona, Salt i Sarrià de Ter	2	35.250	33.725	0	7.039.300	10.196	Valorización disposición final
	Tarragona	SIRUSA Inceneradora de Tarragona	2	165.120	149.462	0	53.204.000	36.874	Valorización disposición final
	TOTAL		9	690.620	526.156	153.801	105.931.294	193.986	

3.2. Funcionamiento

A continuación se describen las diferentes etapas recorridas por los residuos en una planta de integral de tratamiento de la fracción resto, que incluye una planta de tratamiento mecánico biológico para la selección de los materiales revalorizables y tratamiento de la fracción orgánica (MOR) i una planta de incineración ^[13] (Figura 3.1):

- Los residuos urbanos (fracción resto o de rechazo) llegan a la central, transportados generalmente por camiones, que vierten su contenido en el foso de basuras, o **fosa de recepción (1)**, para ser enviadas mediante una cintra transportadora a la planta de selección.
- En la **zona de selección** se separan los diferentes tipos de materiales que componen los residuos sólidos urbanos, seleccionando aquellos que pueden tener utilidad por uno u otro motivo. Los materiales que pueden ser reciclados (cristal, cartones, metal, plástico, pilas) se extraen y almacenan.

La materia orgánica (MOR) se lleva, tras pasar por un separador magnético que retira los materiales férricos aún presentes, a unas playas de fermentación en las que permanecerán uno o dos meses. En ellas, esta materia es aireada periódicamente para obtener un abono denominado “compost”. Una vez separado aquello que se considera aprovechable, el resto se envía al depósito de rechazo, donde será posteriormente combustionado en el **horno tipo parrilla (2)**.

- La combustión en el horno hace que el agua que circula por las **tuberías (3) de la caldera** se transforme en vapor a presión. El vapor resultante del calentamiento del agua sirve para mover la **turbina (4)** y generar así, electricidad.
- Las escorias resultantes de la combustión se extraen y se llevan a un **depósito (5)** para su tratamiento posterior. Los gases de combustión se limpian mediante una unidad de **depuración de gases (6)**, antes de ser vertidos a la atmósfera a través de la **chimenea (7)**.

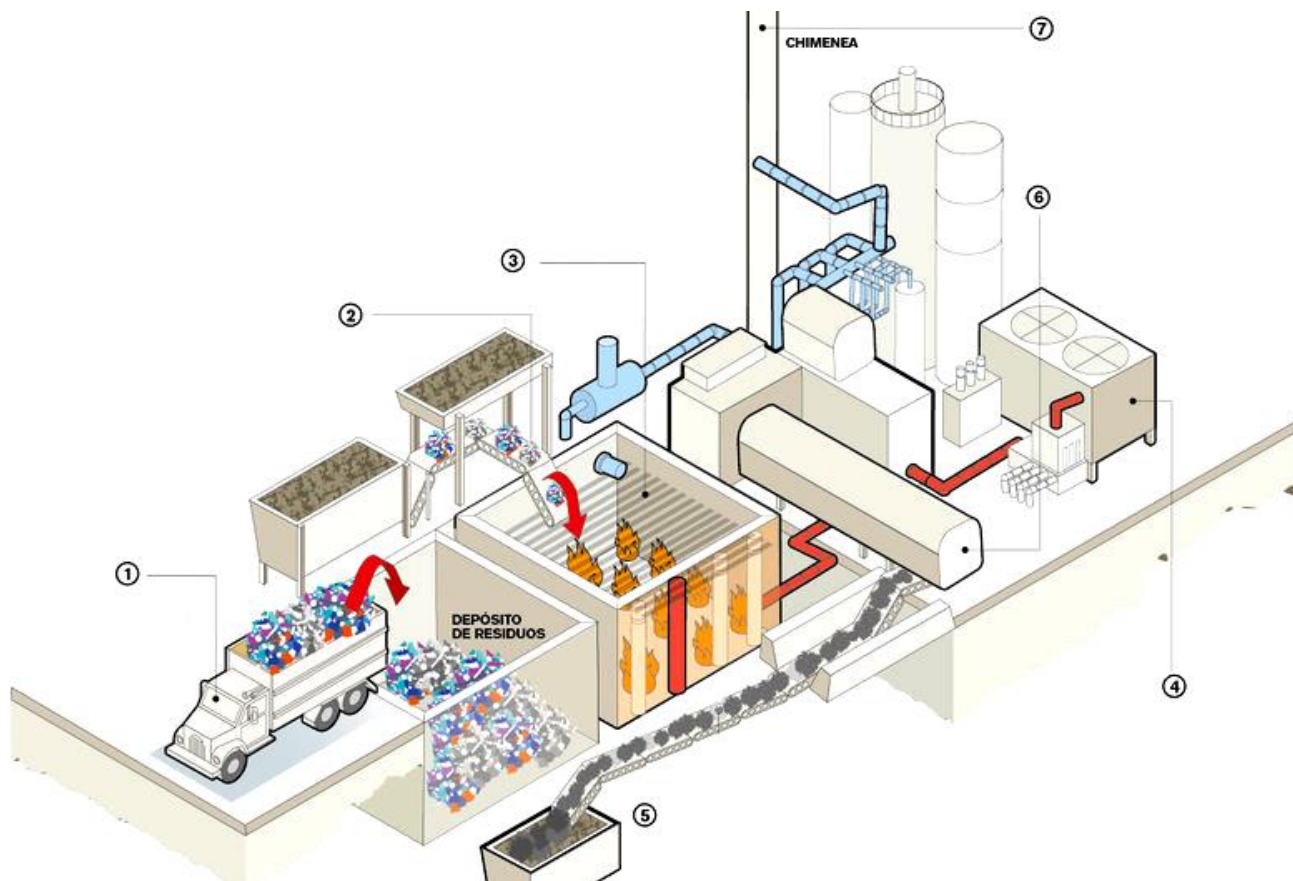


Figura 3.1 - Central incineradora de RSU [13].

3.2.1. Ventajas e inconvenientes de la valorización

La incineración, especialmente la fase de depuración de gases, es cara. Aun así ofrece las siguientes ventajas [14]:

- Permite reducir considerablemente el volumen de residuos que van a parar al vertedero (80 a 90% aprox., en el caso de los residuos municipales).
- Permite recuperar parte de la energía contenida en los residuos y/o generar electricidad o vapor útil para la industria.
- Ocupa poco espacio y permite una implantación cercana al lugar de generación de residuos.
- Permite el tratamiento de cualquier tipo de residuo municipal ordinario si su poder calorífico es adecuado.

Los inconvenientes que se presentan ^[14]:

- La combustión indiscriminada de la basura sin separación produce como efecto de la combustión determinados productos muy tóxicos. La presencia de PVC en la mezcla, aporta a los gases de combustión ácido clorhídrico que, en presencia de materia orgánica, puede originar productos tóxicos derivados de las dioxinas y de los dibenzofuranos.
- Las cenizas producto de la combustión contienen metales pesados, tales como el cadmio, en cantidades consideradas peligrosas, y deben recibir un tratamiento especial como residuos peligrosos.
- Como consecuencia de los dos puntos anteriores es necesario hacer cuantiosas inversiones tecnológicas.

3.2.2. Problemática Medioambiental de la incineración

Los principales contaminantes que se encuentran en los flujos de gases procedentes de la combustión de los residuos sólidos urbanos son ^[14]:

- Óxidos de Azufre (SO_2 y SO_3)
- Ácido Clorhídrico (HCl)
- Monóxido de carbono procedente de combustión incompleta (CO)
- Óxidos de Nitrógeno (NO_x)
- Compuestos orgánicos, entre los que se encuentran dioxinas, furanos, clorofenoles y clorobencios.
- Metales pesados, tales como plomo, cadmio o mercurio, que volatiliza a temperaturas próximas a los 330-450°C.
- Partículas sólidas de inquemados.

Los productos citados han de ser eliminados o, en su defecto, minimizados, cumpliendo en todo caso con las normativas vigentes de emisiones contaminantes. Los contaminantes tóxicos procedentes de las incineradoras pueden incorporarse a la cadena trófica afectando así a animales y humanos, posteriormente.

3.3. Residuos de combustión

Los principales tipos de residuos generados en una planta incineradora y los más importantes, desde un punto de vista cuantitativo, son las escorias, cenizas y chatarras. La Figura 3.2, con datos extraídos de la planta incineradora de Tarragona [15], muestra a grandes rasgos el balance de masas del proceso, con las proporciones relativas de cada uno de los subproductos que se obtienen en la incineración de 100 toneladas de residuos sólidos urbanos.

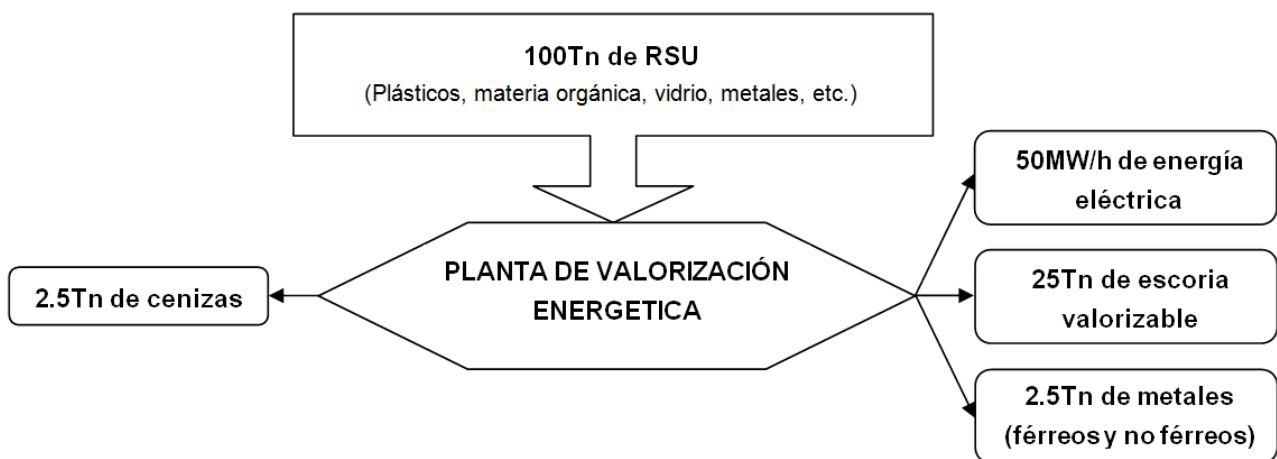


Figura 3.2 - Balance de masas de la incineración (SIRUSA, 2009) [15].

3.3.1. Cenizas

Las cenizas están catalogadas como residuos peligrosos y están formadas por las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión y por los residuos del tratamiento, seguido en la depuración de gases.

Actualmente, tras ser almacenadas en un silo-estanco, son recogidas y trasladadas en camiones cisterna a un gestor autorizado para su inertización o son inertizadas en instalaciones específicas de las plantas.

Mediante un proceso de fijación y estabilización físico-químico las transforman en un residuo admisible en un vertedero de inertizados.

Las caracterizaciones realizadas a las cenizas por centros tecnológicos homologados por las distintas administraciones aseguran que no presentan nocividad ni toxicidad.

3.3.2. Escorias

Las escorias son el subproducto más importante cuantitativamente que se obtiene en la incineración de residuos sólidos urbanos, ya que constituyen del 85 al 95% en peso del producto sólido resultante de la combustión [17]. Se trata de un material de tipo granular con partículas, en su gran mayoría inferiores a 1 cm de diámetro, formadas por los materiales no combustibles y/o inertes de los residuos urbanos que salen de la cámara de combustión, después de la incineración a temperaturas superiores a 850°C. La cantidad de cada constituyente depende de la composición de la alimentación del horno (es decir, del residuo sólido urbano incinerado), del sistema y la efectividad de la combustión y de la existencia de un subsiguiente tratamiento del material previo a su almacenaje, disposición o utilización. Al margen de estas variables, se ha podido determinar tendencias generales en las proporciones de los constituyentes, y predominan claramente el **material de fusión y el vidrio doméstico** [17][18].

Las escorias son de color grisáceo, con un elevado grado de humedad, que confiere cierta adherencia entre ellas, y morfología muy dispar (Figura 3.3). Se pueden clasificar como un sistema multicomponente de diversos materiales de naturaleza diferente, particularidad que les confiere una gran heterogeneidad. Se pueden diferenciar cinco grandes grupos de materiales de diferente naturaleza [17][18]:

- Fragmentos de cerámica, hormigón porcelana, tochos y tiza.
- Vidrio de origen doméstico.
- Metales férreos (piezas de acero y de hierro, generalmente oxidadas) y no férreos (aluminio, cobre y plomo).
- Residuos no quemados fruto de una combustión incompleta en el proceso de incineración: carbonilla, papel, algodón fibra sintética y fragmentos óseos.
- Material generado a partir de la fusión en el horno.

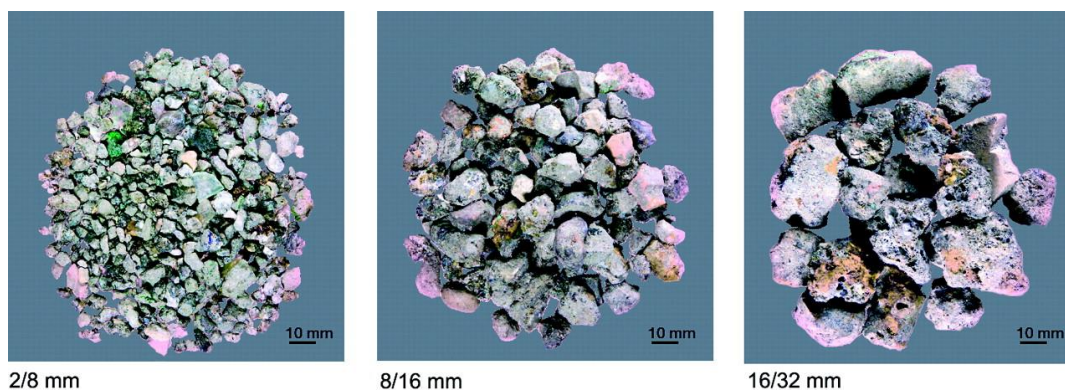


Figura 3.3 - Ejemplo de escoria de incineración [19].

Éstas son más porosas y menos resistentes que los áridos naturales, pudiéndose considerar como áridos de calidad media. Por esto último, hoy en día tienen su aplicación como material árido en obra civil y pública.

3.3.2.1. Procesamiento

El reciclado de los residuos procedentes de incineradoras de residuos sólidos urbanos requiere un procesamiento bastante elaborado para obtener un material que sea aceptable desde los puntos de vista técnico y medioambiental. El tratamiento posterior que han de tener las escorias es el siguiente [11]:

- **Enfriado** de la escoria en agua inmediatamente después de salir del incineradora. Esta práctica está muy extendida pese a que, algunos estudios, ponen de manifiesto los beneficios de no mojarlas antes del procesamiento [19]. El agua dificulta la separación de partículas, tanto desde el punto de vista físico como desde el punto de vista químico, ya que en el momento que empiezan las hidrataciones, algunos metales como el hierro o el aluminio forman hidróxidos pudiendo ya no ser reciclados.
- **Desferrización** por medios magnéticos. La separación del hierro y aceros ferríticos es una práctica habitual, mientras que la de otros metales es menos común. Los materiales recuperados se reciclan a través del mercado de la chatarra. Si no se procede a la retirada de esta fracción, el empleo de la escoria puede ocasionar problemas. Es preferible la eliminación de la fracción metálica, antes de la combustión, para recuperar un producto de mayor calidad, tanto el metálico como la fracción mineral de la escoria.

- **La trituración** es una operación que se aplica en algunas plantas y que permite reducir el tamaño de la partícula, ampliándose el campo de aplicación de la escoria para sectores industriales como el del cemento y el hormigón.
- **Cribado** con un paso máximo de grano de 20 mm (Bélgica y Holanda) y 60 mm (Francia). La distribución del tamaño de las escorias está condicionada por la materia prima utilizada, pero si se desea emplear la escoria como árido, es esencial controlar su distribución granulométrica, dada su influencia en sus características de compactación y en sus propiedades mecánicas.
- Eliminación de la fracción más fina de las escorias, ya que en ella se encuentran concentrados los metales pesados (tomando como límite por ejemplo 2 mm).
- Almacenamiento de la escoria al aire libre durante varios meses (generalmente entre 1 y 3 meses) con el fin de obtener estabilidad volumétrica mediante un proceso de maduración.

La escoria recién extraída del foso es relativamente reactiva. Algunas sales de metales están presentes como óxidos, hidróxidos y cloruros. La exposición a la atmósfera permite que en el seno de la misma tengan lugar procesos de carbonatación e hidratación. Estas reacciones reducen el potencial de lixiviación de los metales presentes en las escorias, con lo que se reduce su impacto potencial sobre el medioambiente. Así pues, la maduración tiene lugar dejando expuestos los acopios a la acción de la atmósfera. Este almacenamiento forma parte del tratamiento integral al que se someten las escorias y durante el mismo se han de analizar los lixiviados producidos y, si fuera necesario, someterles a tratamiento adecuado.

3.3.2.2. Propiedades del material procesado

Según su composición mineralógica, las escorias no son productos estables. Durante los primeros tres meses de almacenamiento se producen reacciones de hidratación, solidificación, reacciones de los sulfatos, formación de sales y reacciones del hierro, entre otras, dando lugar a la formación de escorias estables ^[21] ^[22].

- Reacciones de hidratación
- Solidificación $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- Reacciones del sulfato $\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$
- Formación de sales NaCl y KCl

- Reacción del hierro $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

3.3.2.3. Aplicaciones

La reutilización de los residuos procedentes de incineradoras ha sido fomentada no sólo por las preocupaciones medioambientales actualmente surgidas en las autoridades y en la sociedad, sino también por el problema de la insuficiencia de espacio en los vertederos, debido a las crecientes cantidades de desechos municipales que es necesario eliminar. Aunque en España el reciclaje de este tipo de residuos es muy reducido y se produce de forma puntual, en otros países europeos su utilización alcanza porcentajes mayores (principalmente de las escorias).

Para las escorias, el destino más habitual es el vertedero de residuos no peligrosos, exigiéndose una caracterización previa de la composición de la fase sólida y del lixiviado. En menor medida, la escoria se valoriza como material secundario en el campo de la construcción.

3.3.2.3.1 Carreteras

La capacidad de soporte inicial de las capas de escoria es algo inferior a las de zahorra natural o artificial, pero con el tiempo las escorias endurecen por envejecimiento, mejorando su comportamiento a largo plazo. Estas cualidades hacen que en algunos países se utilicen para capas de subbase. En Alemania, las sub-bases y las aplicaciones con ellas relacionadas absorben el 37% de la escoria revalorizada [23 a 27] [28].

3.3.2.3.2 Edificación

Una posibilidad de aplicación es la sustitución parcial o total de los áridos del hormigón por residuos de la incineración de RSU, cuyo estudio por el momento únicamente se ha llevado a cabo en laboratorio. Al sustituir parte de los áridos del hormigón por escoria (hasta un 25%) no se producen variaciones significativas en las características mecánicas ni en la durabilidad del hormigón, aunque pueden aparecer problemas derivados del elevado contenido de cloruros y sulfatos y de la presencia de metales pesados, como: pérdida rápida de trabajabilidad, aumento importante del tiempo de fraguado y formación de hidratos expansivos durante el fraguado y endurecimiento [16].

Estos problemas se pueden solucionar, según los trabajos de laboratorio realizados, sumergiendo las escorias en una disolución de hidróxido sódico durante 15 días. Con este

tratamiento se consigue reemplazar una parte del árido natural por escorias, sin que afecte a la durabilidad del hormigón.

3.3.2.3.3 Obras de tierra y terraplenes

Los terraplenes y otros trabajos de movimiento de tierras, parecen ser los usos más prometedores de la escoria en la construcción de carreteras. Por una parte, los criterios técnicos de aceptación no tienen que ser demasiados rígidos; por otra parte se pueden absorber grandes cantidades de escoria en un determinado emplazamiento, lo que facilita la puesta en práctica de medidas e inspecciones protectoras desde el punto de vista del medio ambiente.

4. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

4.1. Introducción

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o Life-cycle assessment (LCA), investiga y evalúa todos los impactos ambientales asociados con un sistema de producto durante todas las etapas de su existencia (extracción, producción, distribución, uso y desecho).

El Análisis del ciclo de vida de un producto típico tiene en cuenta la adquisición de materias primas necesarias para la elaboración del material (extracción de éste y consumo de energía), su proceso de fabricación, el uso del producto y su posterior gestión como residuo una vez no es útil su uso.

La gestión de este residuo puede desarrollar otras actividades relacionadas con su posterior reutilización como el reciclaje de este material, o el aprovechamiento de este residuo como otra forma o producto como la producción de electricidad, fabricación de adobo u otros combustibles y subproductos.

Todas las actividades o procesos implicados en la gestión de los residuos municipales (Figura 4.1) provocan impactos medioambientales, suponen un consumo de recursos, emiten sustancias al medio ambiente y generan otras modificaciones ambientales durante su periodo vital.

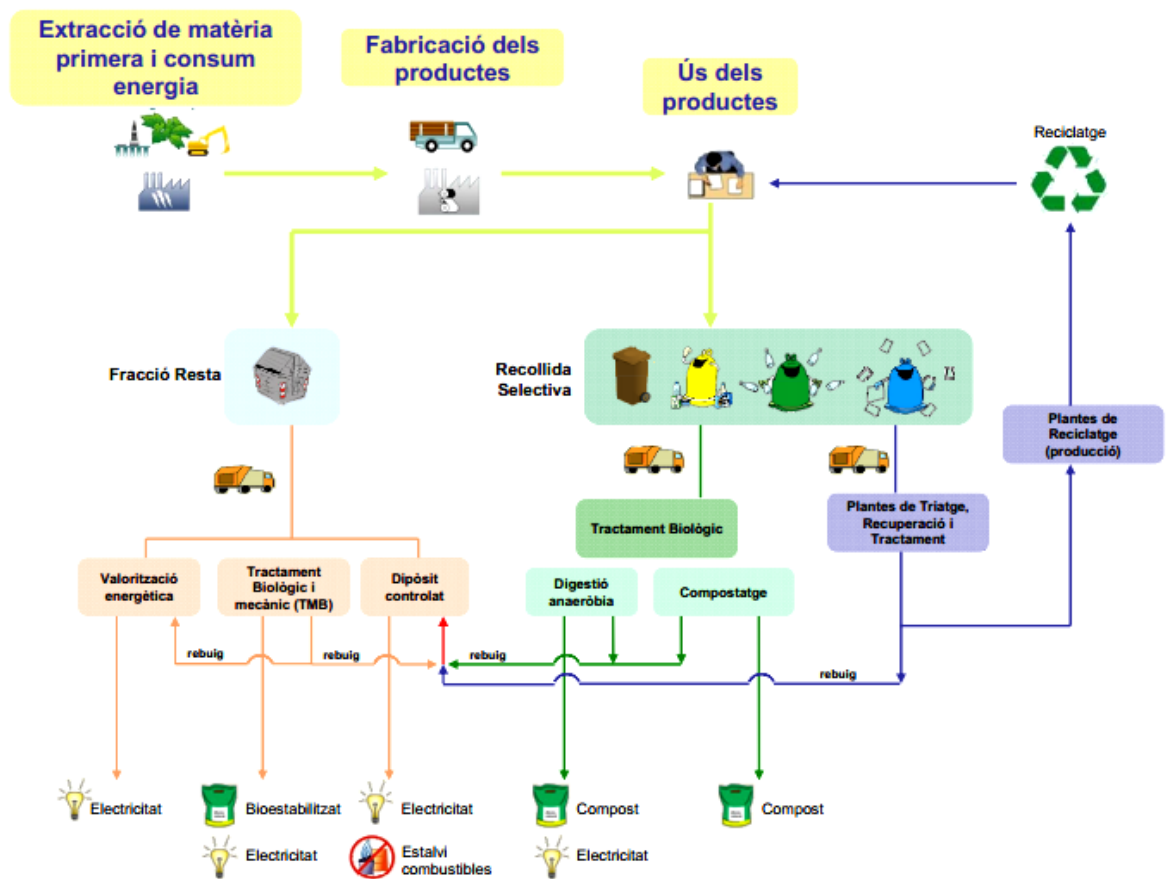


Figura 4.1 - Esquema general de la gestión de Residuos Sólidos Urbanos [29].

4.2. Estudio Eco-Auditoría

Se define el estudio Eco-Auditoría como la rápida evaluación inicial de la demanda de energía y de las emisiones de carbono en la vida de un producto. Por tanto, el principal objetivo de la herramienta Eco-Auditoría es el cálculo la energía empleada y de CO₂ emitido durante cinco fases de la vida de un producto (obtención del material, fabricación, transporte, uso y final de vida), identificando cuál es su la fase dominante. Éste es el primer paso para el diseño de productos ecológicos, ya que identifica cuáles son los parámetros que necesitan ser alterados para reducir la eco-huella del producto [1].

Para ello, es necesaria una estrategia de evaluación que esté dirigida a los intereses actuales y que combine un coste aceptable con la suficiente precisión para un mejor asesoramiento en la toma de decisiones. La estrategia debe ser lo bastante flexible para que tengan cabida futuras mejoras y, lo bastante simple para permitir la exploración de

nuevas alternativas. Para conseguir simplificar el método, es necesario omitir la mayoría de los detalles, los múltiples enfoques, y la complejidad de método que hacen que las técnicas ACV (Técnicas de análisis del ciclo de vida) estándares sean tan extensas. El enfoque desarrollado a continuación tiene tres componentes [1]:

- **Adoptar métricas simples para los índices medioambientales:** la energía embebida (embodied energy) o la huella de CO₂ como elecciones lógicas. Las dos están relacionados y son entendidas por el público en general. La energía embebida posee el mérito de ser la más fácil de controlar, puede ser medida con relativa precisión, y con apropiadas precauciones, puede ser usada como una representación del CO₂ cuando sea necesario.
- **Distinguir las fases de vida.** Este sistema consiste en dividir el total de la energía consumida por un producto durante su ciclo de vida, asignando una fracción del total a cada una de las siguientes fases: la obtención material, la fabricación de un producto, el transporte, el uso y reciclado. El reciclado del producto puede tomar formas muy diferentes, algunas conllevan una penalización energética, otras permiten el reciclaje o la recuperación de energía. Cuando se hace esta distinción, se encuentra frecuentemente que una de las fases domina el gráfico. La Figura 4.2 lo evidencia. La fila de arriba muestra un patrón de tres productos de consumo de energía: un avión civil, un coche familiar y un electrodoméstico. Para los tres la fase de uso consume más energía que la suma de todas las otras fases. La fila de bajo muestra productos que todavía requieren energía durante su vida útil, pero no tan intensamente como los de la fila de arriba. Para esos, las energías embebidas de los materiales con los que están hechos contribuyen en mayor porcentaje.

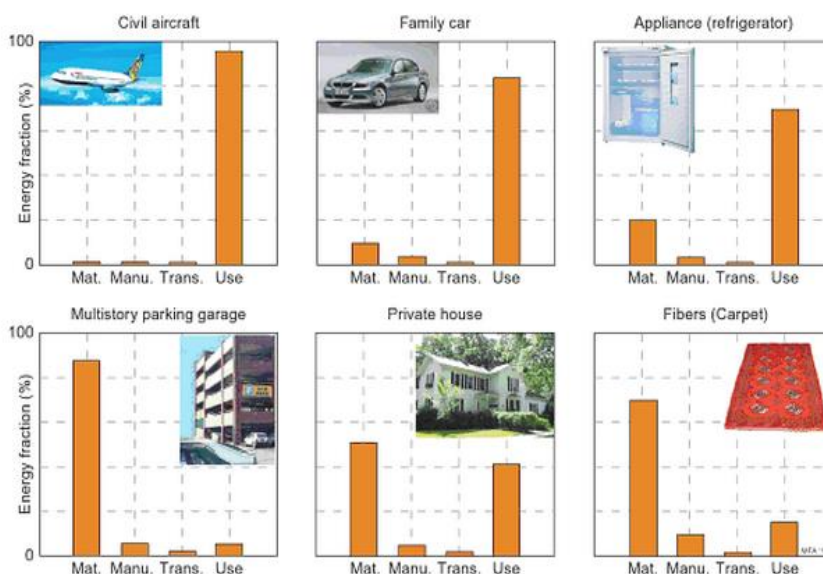


Figura 4.2 - Valores aproximados de la energía consumida en cada fase del producto [1].

Se pueden sacar dos conclusiones:

- 1- Hay una fase que domina frecuentemente, consumiendo el 60% o más de la energía, a menudo mucho más. Si se quieren conseguir grandes ahorros de energía, la fase dominante se convierte en nuestro principal objetivo, ya que una reducción fraccional dada, hace la mayor contribución.
- 2- Cuando las diferencias son tan grandes como las de la Figura 4.2, la precisión no es necesaria; cambios modestos en la introducción de datos, no producen cambios significativos en el gráfico. Es la naturaleza de la gente la que provoca querer medir las cosas con tanta precisión, cuando la precisión debe ser el último objetivo. Pero es posible avanzar sin tanta precisión; juicios precisos pueden ser sacados de datos imprecisos.

- **Basar la acción posterior en el análisis de energía o carbón.**

La Figura 4.3 sugiere cómo ha de ser implantada la estrategia. Si la producción del material es la fase dominante, el siguiente paso es elegir los materiales con baja energía embebida y minimizar las cantidades empleadas. Si la manufactura es la fase de uso de energía más importante, reducir el uso de energías en este proceso se convierte en el objetivo principal. Si el transporte supone una gran proporción del consumo de energía vital, buscar un medio de transporte más eficiente o reducir la distancia se convierte en la mayor prioridad. Cuando la fase de uso es la que domina, la estrategia es minimizar la masa (si el producto es parte de un sistema que se mueve), aumentar la eficiencia térmica (si es un sistema térmico o termo mecánico), o reducir las pérdidas eléctricas (si se trata de un sistema electromecánico). En general la elección del mejor material para minimizar una fase, no será el que minimice las otras, requiriendo métodos compensatorios para guiar la elección.

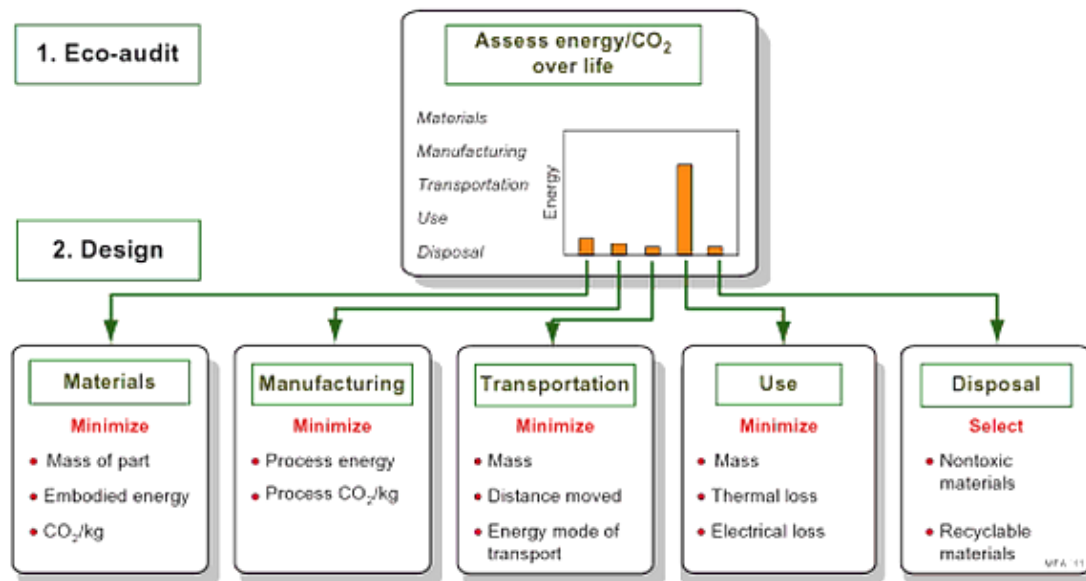


Figura 4.3 - Estrategia implementada en el estudio Eco-Audit [1].

- **La implementación requiere herramientas.** Son necesarios dos conjuntos: uno para hacer el boceto de la eco-auditoría (parte superior de la Figura 4.3), el otro para permitir el análisis y la selección de materiales, manufactura, transporte, uso, y gestión de residuos (parte inferior de la Figura 4.3).

5. MATERIALES

5.1. Introducción

De los diferentes materiales que forman parte de los Residuos Sólidos Urbanos, se ha escogido el vidrio como objeto de estudio. La importancia de este material como RSU recae en su capacidad de reciclaje ya que, a diferencia de otros materiales contenidos en los RSU, éste permite su revalorización a partir de dos vías diferenciadas de revalorización: mediante la recogida selectiva en origen o plantas de tratamiento mecánico biológico (reciclaje propiamente) y mediante la incineración de la fracción resto (reutilización como árido secundario).

Ambos residuos obtenidos tienen aplicaciones finales totalmente diferentes pero ambas suponen la disminución de extracción de los recursos naturales. Por un lado, el vidrio reciclado, mediante la recogida selectiva de éste, tiene su aplicación final como envases de vidrio. Ésta aplicación no sólo disminuye la extracción de materias primas sino también la energía y emisiones a la atmósfera generadas para su extracción.

El vidrio revalorizado mediante la reutilización de las escorias de incineración de la fracción resto tiene su aplicación final como material árido secundario, principalmente para su uso como sub-base para carreteras. Las sub-bases para carreteras son un producto de aglomerado de áridos. Éstos áridos requieren de una extracción y, como se ha comentado en el apartado anterior, de una energía e impacto ambiental.

El presente capítulo describirá el vidrio recuperado, para las aplicaciones comentadas, mediante estas dos vías de revalorización del material. Éste será posteriormente comparado con la producción de la misma aplicación a partir de las fuentes primarias correspondientes.

5.2. Características generales

El vidrio es un material obtenido por la fusión de compuestos inorgánicos a altas temperaturas, y el enfriamiento de la masa resultante hasta un estado rígido, no cristalino.

El principal componente del vidrio es la sílice (SiO_2). La sílice, sola, sería un vidrio ideal para muchas aplicaciones, pero las altas temperaturas necesarias para su fusión y las dificultades para darle forma limitan su uso a algunas aplicaciones especiales.

Para reducir la temperatura de fusión de la sílice (óxido formador), es necesario utilizar también un óxido modificador, y para ello se utiliza mayoritariamente el óxido de sodio (Na_2O). Como el conjunto $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ es soluble en agua, se añade un tercer elemento modificador, el óxido de calcio (CaO), que le confiere al vidrio la estabilidad química necesaria. Este vidrio se denomina vidrio soda-cal.

El vidrio soda-cal, también llamado «vidrio común», representa el 90% de todo el vidrio fabricado en el mundo, pues sus propiedades lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos de vidrios de soda – cal son virtualmente inertes, no contaminado la materia que contienen ni su sabor. Sin embargo, son poco resistentes al choque térmico.

El vidrio soda-cal, además de SiO_2 , Na_2O y CaO , que constituyen aproximadamente el 90% de su composición, posee otros elementos, algunos procedentes de la propia materia prima usada, como el óxido de hierro (Fe_2O_3), y otros agregados a propósito para brindarle al vidrio características deseables, como es el caso del óxido de aluminio (Al_2O_3) y otros óxidos metálicos.

El concepto de vidrio hoy en día se ha ampliado enormemente respecto al concepto tradicional que se tenía en el siglo anterior, ya que han aparecido en el mercado y en los laboratorios, nuevos productos con 100% de contenido vítreo o fase vítrea, hasta materiales que obtenidos por un proceso de fusión y enfriamiento a diversas velocidades, pueden dar lugar incluso con tratamientos de nucleación y crecimiento cristalino. En realidad, tanto el vidrio como este tipo de productos, tienen amplios usos desde domésticos a tecnológicos y se denominan con el nombre genérico de "materiales vitrocerámicos o vitrocristalinos" [29]. La Tabla 5.1 muestra los diferentes productos vítreos en el mercado y sus aplicaciones comerciales:

Tabla 5.1 - Tipos de productos vítreos en el mercado y sus aplicaciones comerciales [29].

Tipo de producto vítreo	Forma del producto vítreo	Aplicaciones o uso
Vidrios Masivos	Vidrio plano Vidrio hueco	construcción doméstico, industrial
Vidrios Porosos	En placas Fibras cortas	construcción, industria biológico, construcción
Fibras Vítreas	Fibras largas Fibras cortas	construcción composites (construcción)
Vidrios en capas o Vidriados	Según grosor y soporte (Frita: es un precursor vítreo)	azulejos y pavimentos crámicos, recubrimientos
Vitrocerámicos	Masivos: convencionales/ petrúrgicos Sinterizados	industria, construcción construcción, industria

5.3. El vidrio contenido en los RSU

A continuación se hará una breve descripción de la revalorización del vidrio contenido en las dos tipologías de materiales obtenidos a partir de la recogida de los residuos sólidos urbanos. Por un lado, se describirá el vidrio obtenido directamente por mediación de su contenedor verde (Envases) y, por otro lado, se analizará aquél vidrio contenido en la escoria de los procesos de la incineración de la fracción resto (Áridos), obtenida a partir del material contenido en el contenedor gris.

5.3.1. Recogida selectiva: Envases

El vidrio es un material que por sus características es fácilmente recuperable. Un envase de vidrio es 100 % reciclable, es decir, que a partir de un envase utilizado, puede fabricarse uno nuevo que puede tener las mismas características del primero.

El principal tipo de vidrio encontrado en los residuos sólidos domiciliarios es el vidrio de envases, o el también llamado **vidrio hueco**. Esos envases de vidrio son: botellas para bebidas alcohólicas, para agua, refrescos y jugos, vasos, jarras, potes y frascos para alimentos [31].

En los residuos sólidos domiciliarios se encuentra también el vidrio que forma parte o componente de un sin fin de otros productos domésticos, como, por ejemplo, platos, ollas, ensaladeras, aceiteras, televisores, lámparas, entre otros. Éste es comúnmente conocido

como *vidrio plano* y se realiza por un canal diferente al de los envases de vidrio, concretamente son las desecharías las encargadas de su gestión. La composición química de estos vidrios, normalmente, es muy diferente de la del vidrio común, usado en la fabricación de envases y de vidrio plano y, por consiguiente, es muy difícil, o casi imposible, separar y aprovechar el vidrio de estos artículos. En principio, todo este vidrio podría ser reaprovechado. Sin embargo, en la práctica no resulta viable económicamente.

Por lo tanto, la mayor parte del vidrio contenido en los residuos sólidos domiciliarios que se puede reaprovechar, comprende: botellas, frascos, potes y otras vasijas para productos alimenticios, cosméticos, etc. Los cuales son los obtenidos directamente del contenedor verde (Figura 5.1), financiados por la entidad ECOVIDRIO [32]. La gestión de productos que no son envases de vidrio se financian por otra vía de la administración y es por eso que éstos últimos se tienen que derivar a puntos verdes o desecharías [31].



Figura 5.1-Contenedor Fracción Vidrio [9].

En 2012 se recogieron en Cataluña 169.175t de vidrio (Figura 5.2) [3], el cual representa el 4.53% en peso de los residuos municipales generados en Cataluña según datos de la Agencia de Residuos de Cataluña.

Éste fue el primer material recogido selectivamente y presenta una densidad que puede variar en un rango de 180-480kg/m³ dependiendo de su tipología [3]. Actualmente, todo vidrio recogido se desvía a empresas encargadas de su reciclaje.

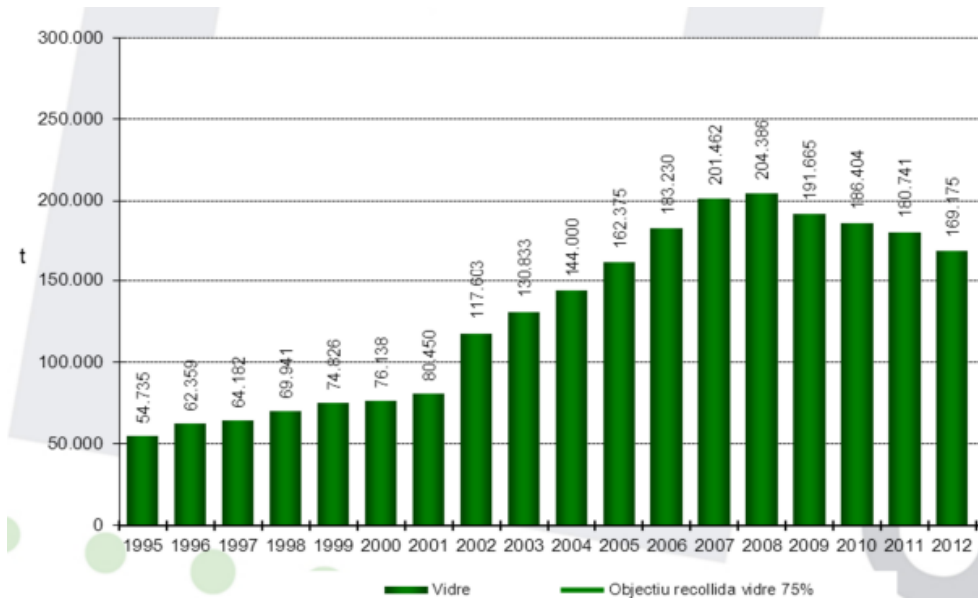


Figura 5.2 - Evolución de la Recogida Selectiva del vidrio [3].

5.3.1.1. Proceso de reciclaje

El proceso del reciclaje del vidrio consta de las etapas que muestra la Figura 5.3:

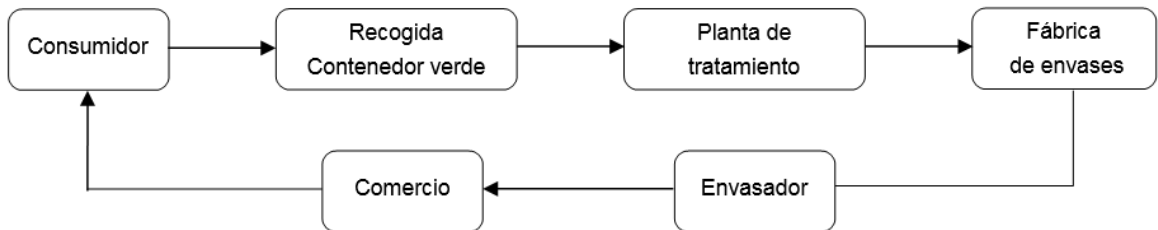


Figura 5.3 - Proceso del reciclaje del vidrio [32].

El ciclo del reciclaje del vidrio comienza a través del consumidor de éste. La responsabilidad del consumidor es clave en la cadena del reciclado de vidrio. Sin su colaboración, separando en origen y depositando los residuos de envases de vidrio en los contenedores verdes correspondientes, jamás podría completarse esta cadena.

Una vez depositados los residuos en su contenedor correspondiente, los envases de vidrio recogidos selectivamente, se transportan a la planta de tratamiento donde acaban reciclándose al 100%.

En la planta de tratamiento los residuos de envases de vidrio se limpian de todo aquello que haya podido ser introducido en el contenedor verde de vidrio y que no sea propiamente

vidrio. A continuación, el vidrio es triturado hasta convertirse en calcín (vidrio seleccionado, limpio y molido).

El calcín permite fabricar envases de vidrio exactamente iguales que los originales. El vidrio reciclado exige una menor temperatura de fusión, aprox. 1.200°C, que las materias primas originales (arena, sosa y caliza), 1.500°C, y, con ello, en el proceso de fabricación de nuevos envases contribuye directamente al **ahorro energético** en el proceso de producción. Gracias a la utilización del vidrio reciclado junto con las materias primas vírgenes, la temperatura de fusión disminuye, consiguiendo un ahorro aproximado de un 1% de energía por cada 4% de calcín reciclado que se introduce en el horno como materia prima [32].

Cabe decir que, aunque el vidrio sea 100% reciclado, el calcín debe mezclarse con materias primas ya que el calcín recogido no cubre las necesidades totales de una industria.

Además no es posible elaborar recipientes cuando se mezclan trozos de vidrio de varios colores. La mezcla sólo se puede utilizar para la obtención de envases de color. El vidrio coloreado no puede volver a ser transparente. Esto significa que con las botellas de color verde o marrón que se tiren al contenedor para reciclar, sólo se fabricarán otras botellas de color. O, al revés, que para producir botellas blancas (transparentes) se necesitaría separar el vidrio blanco de cualquier pequeño pedazo de color [33].

Se estima que la proporción habitual del vidrio recuperado y ya triturado suele ser un 50% de verde, un 30% de blanco y un 20% de marrón o ámbar.

Esta es la razón por la que en la fabricación de envases transparentes, sólo se utiliza un 10% de material reciclado, mientras que en la fabricación de envases de color, esta cifra oscila entre 50 y 70 % [31].

Pese a esto no cabe ninguna duda que hay una disminución de materias primas, en mayor o menor medida, y que además, viene acompañado de una **disminución del impacto ambiental** generado en su extracción. Reciclando 3.000 botellas de vidrio se ahorra más de una tonelada de materia prima [32].

El vidrio producido se dirige hacia las empresas que envasan o embotellan parte o la totalidad de sus productos en vidrio y son las que financian el sistema de recogida selectiva de los residuos de envases de vidrio desarrollado por Ecovidrio.

Finalmente, en los establecimientos de venta al público, el comerciante pone a disposición de los consumidores los productos envasados en vidrio. Allí, el consumidor puede

reconocer los envases de vidrio que han pagado para su posterior reciclado, identificando el punto verde en la etiqueta.

5.3.1.2. Ventajas del reciclaje de vidrio

Las ventajas del reciclaje son las siguientes [35]:

- Disminuir el uso de materias primas naturales fruto de las extracciones mineras, minimizando el impacto ambiental global del proceso.
- Ahorro energético en la fabricación debido a la disminución del punto de fusión de la mezcla de vidrio reciclado (calcín) y materias primas vírgenes.
- Disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera debido a la disminución de la demanda de energía en el proceso de extracción y en el proceso de fabricación.

5.3.2. Escoria de incineración de la Fracción Resto: Material granular

Como se ha mencionado en el apartado de introducción, se estima que un de vidrio recuperado después de su revalorización en la planta incineradora es de un 43,1% [17]. Datos de ECOPARC demuestran que, aunque hay una recogida selectiva previa de aquellos materiales reciclables, la Fracción Resto puede contener aún entre un 30-40% de materia orgánica, entre un 20-30% de papel, un 18% de plásticos y metales, y un 4% de vidrio [4]. Este porcentaje de vidrio es el que nos lleva a obtener estos valores en la escoria de incineración.

El tratamiento posterior de las escorias se realiza en unas instalaciones independientes de la planta incineradora y bajo la dirección de otra empresa. En Cataluña existen dos empresas que se dedican al acondicionamiento de las escorias (Vecsa y Pedreras Rusc, Tabla 5.2) de las cuales resulta un producto llamado ESCOGRAVA.

Tabla 5.2 - Tratamiento pos incineración y destino de las escorias [19].

INSTALACIONES ELECTROIMÁN	TRATAMIENTO POSTERIOR	DESTINO	
Tarragona	si	si (desde marzo del 2001)	VECSA
Mataró	si	si	Pedreras Rusc
Sant Adrià	si	no	vertedero Garraf
Girona	no	no	almacenaje

5.3.2.1. ESCOGRAVA

Las empresas VECSA (a partir de las escorias de Tarragona) y Pedreres de Rusc (a partir de las de Mataró) generan la llamada Escograva, como se ha comentado al principio de este apartado. Ésta, está controlada por la normativa del departamento de Medio Ambiente mediante la Orden del 15 de febrero de 1996 sobre la valorización de escorias. Según esta orden, las escorias de incineradora valorizadas son aptas para utilizar en la obra pública como material destinado a sub-bases de carreteras, nivelado de terrenos y terraplenes y restauración de áreas degradadas por actividades extractivas [20].

Lo que se pretende con este tratamiento de pos incineración es valorizar las escorias al nivel técnico más alto posible y ampliar así sus aplicaciones mediante la mejora de la calidad del producto. En esencia la Escograva es escoria la cual un procesamiento ha mejorado sus propiedades haciéndola más apta para las aplicaciones mencionadas. Las operaciones de tratamiento son las siguientes:

- Eliminación de las partículas grandes de las escorias mediante una parrilla. Estas partículas grandes extraídas son posteriormente trituradas para volverlas a incorporar al procesamiento, siendo su tamaño de 30-40mm.
- Extracción de la fracción férrica mediante la separación magnética.
- Extracción de la fracción metálica no férrea mediante un sistema de corrientes de Foucault.
- Extracción de los no quemados mediante una separación de corrientes de aire. Fracción que se devuelve al horno de incineración.
- Maduración o envejecimiento a la intemperie durante unos cuantos meses (1-3 meses). La maduración supone un envejecimiento de la escoria en pilas de almacenaje sometidas a agentes atmosféricos. Las reacciones químicas que tienen lugar benefician las características del producto.

El resultado obtenido es un árido depurado el cual cumple las especificaciones del Orden de valorización de las escorias y que puede ser utilizado en el campo la construcción y obra civil como material secundario.

Las propiedades y características de la Escograva, generadas por las plantas de tratamiento anteriormente mencionadas, se recogen en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4:

Tabla 5.3 - Características químicas y ambientales de una muestra de Escograva de Pedreres de Rusc, Enero 2001 [20].

Pérdida entre 105 °C y 500 °C Incrementados	4.50% 3.00%
<i>Parámetros sobre DIN 38414-S4</i>	
Fracción soluble	0.97%
As	< 0.01 mg/L
Cu	0.71 mg/L
Pb	< 0.20 mg/L
Cd	< 0.02 mg/L
Cr VI	0.06 mg/L
Zn	< 0.11 mg/L

Tabla 5.4 – Características físicas y geotécnicas de muestras de Escograva de Pedreres de Rusc y Vecsa [20].

PROPIEDADES	RUSC octubre 2001	RUSC valores medios	VECSA marzo 2001	VECSA valores medios
Medida máxima nominal mm	20	<40	20	20
Plasticidad	no plástico	no plástico	no plástico	no plástico
Desgaste de los Angeles %	41.5	35 a 50	32	42
Equivalentes de tierra	65	41	58	53
Humedad óptima %	10.1	-	14.8	14.4
Densidad seca máxima Mg/m ³	1.77	1.70	1.72	1.76
Índice CBR %	65	153	24	41

El hecho de que sus propiedades mecánicas y ambientales estén reguladas y, por tanto, garantizadas, facilita su incorporación al mercado. De esta manera, el nombre de obras en el que se ha utilizado este producto es significativo, y algunas de considerable envergadura, como los terraplenes de la “Pota Sud” (en el Prat de Llobregat, Barcelona) construídos a principios de 1997 y que suponen unos 20.000 m³ de Escograva y un tramos de la N-II a la altura de Mataró (Barcelona). En general, la Escograva se ha colocado en parkings y deshecherías o caminos secundarios.

5.3.2.1.1 Aplicación

Una de las aplicaciones potenciales que se considera, teniendo en cuenta que las escorias se presentan como un material granular y compactible, es la sustitución de áridos naturales en el ámbito de la obra civil. El gran volumen de escorias producidas requiere una gestión o disposición y podrían ser reciclables completamente en este sector por sus propiedades mecánicas.

La cantidad de áridos utilizados anualmente por el sector de la ingeniería civil es muy elevada, hecho que comporta pérdidas considerables de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente. La utilización de las escorias en el campo de la ingeniería civil, reemplazando materiales naturales, significaría muchos beneficios:

- Se valorizaría y se reutilizaría un subproducto que de otra manera sería dispuesto como residuo, se eliminaría la problemática del emplazamiento de esta materia y se alargaría la vida de los vertederos. Se evitaría el crecimiento de pilas de escorias e incluso podrían desaparecer estas pilas utilizando el material almacenado.
- Se contribuiría, pese que la producción de escorias aún está limitada para reemplazar a todo el consumo de material natural, a reducir la extracción de recursos naturales finitos, ya que se consumirían menos áridos naturales, reduciendo así el impacto ambiental que producen las extracciones de áridos. Una disminución de la actividad en las graveras repercute en una disminución del ruido, emisiones y consumo del territorio.

5.3.2.1.2 La construcción y las carreteras

El sector de la construcción de carreteras es uno de los mayores consumidores de áridos naturales, principalmente tierra, grava y materiales de cantera. El consumo nacional de áridos es de 435 millones de toneladas, de los cuales, aproximadamente 95 millones van destinados a la construcción de carreteras [36].

En general, las carreteras son una estructura la cual descansa sobre la explanada y está formada por diferentes capas según se muestra a continuación (Figura 5.4):

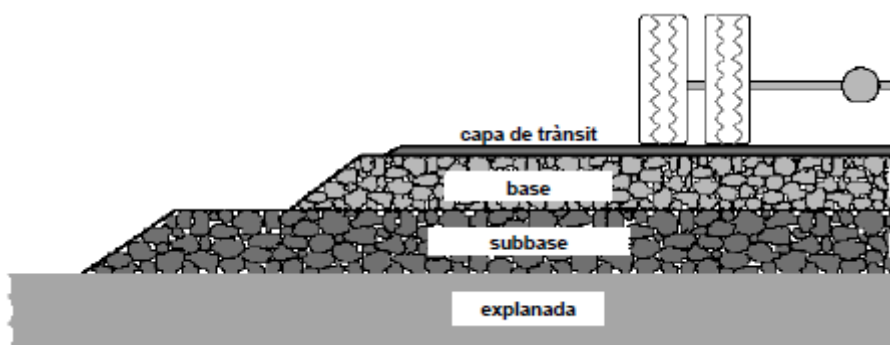


Figura 5.4 - Esquema del perfil del firme [20].

Los grosores dependen del nivel de tráfico y de la categoría de la explanada. En explanadas buenas y para tráficos pesados e intensos, el grosor mínimo es de 25 cm [20]. Tomando un ancho de 6m y densidad de compactación de 2.100 kg/m^3 . Estos datos

equivalen a 3.000 toneladas de áridos por kilómetro de carretera. En caso de la explanada sea de mala calidad, la cantidad se duplica porque hay que aumentar el grosor de las capas granulares.

Los datos sobre el consumo de recursos naturales en el ámbito de la construcción de carreteras son, lo bastante significativos, como para justificar un estudio en profundidad sobre la viabilidad del reemplazamiento de los áridos naturales que conforman las capas granulares del pavimento para áridos alternativos como las escorias.

5.3.2.2. Proceso incineración de residuos

El proceso de incineración de residuos sólidos sigue el esquema que muestra la Figura 5.5:

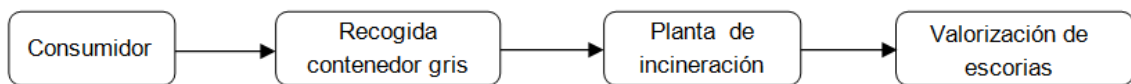


Figura 5.5 - Proceso de incineración de residuos.

El proceso empieza con el consumidor, pues es aquél que distribuye los residuos en el contenedor gris. Éste está dedicado a aquellos residuos generados los cuales no son valorizables, es decir, que no pueden ser reciclados. En la práctica no funciona así, ya que como se ha comentado en el apartado de “Escoria de Incineración”, la fracción resto la forma entre un 30-40% de materia orgánica, entre un 20-30% de papel, un 18% de plásticos y metales, y un 4% de vidrio.

Los residuos vertidos en el contenedor de la fracción resto son recogidos por camiones y trasladados a los centros de transferencia donde se hará una previa separación antes de su valorización.

Los residuos ya separados, no en su totalidad, de ahí se explica la composición de la fracción resto comentada, se dirigen hacia la planta de incineración de residuos dónde se someterán a un proceso de fusión.

Finalmente la escoria, como producto resultante de la incineración, se traslada a la planta de valorización donde se realizarán los procesos de homogeneización, anteriormente detallados.

5.4. Materias primas

Hasta ahora se han descrito los procesos a los cuales se somete el residuo sólido en concreto, en este caso al vidrio, para su posterior reciclaje o revalorización. En el siguiente apartado se describirán los procesos mediante los cuales durante estos años se han obtenido los mismos productos con similares características pero, esta vez, a partir de las fuentes primarias.

Partiendo del vidrio como RSU se obtienen, como se ha comentado, vidrio para envases (recogida selectiva) y un porcentaje de vidrio contenido en la escoria de incineración (fracción resto), cuya aplicación principal es la de sub-base para carreteras. Por lo tanto, a continuación se describirá el proceso para la obtención de envases, a partir de la extracción de las fuentes primarias de vidrio, y el proceso para la fabricación de sub-bases de carreteras, a partir de la extracción de áridos.

5.4.1. Vidrio

El proceso de producción de una fábrica de vidrio mediante la fusión de 100% fuentes primarias, el cual puede observarse mediante la Figura 5.6.

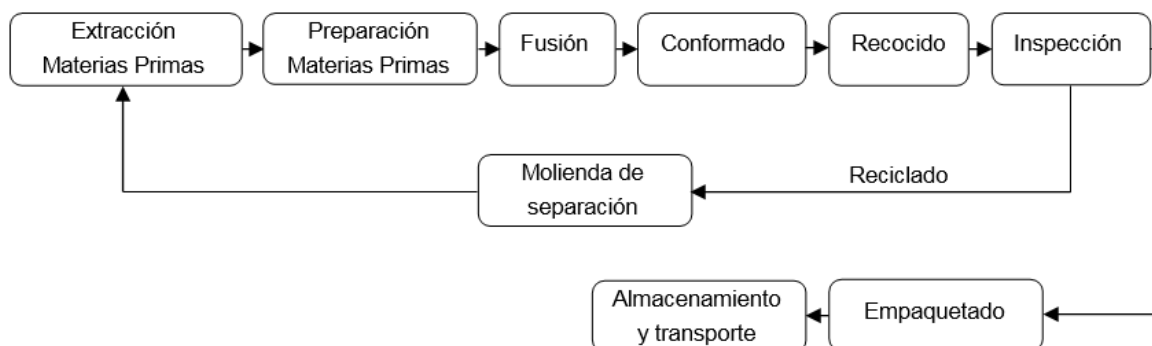


Figura 5.6 - Etapas en el proceso de producción de vidrio.

El proceso se inicia con la extracción de fuentes primarias. Éstas, con unas características de granulometría, humedad y propiedades químicas determinadas, se dosifican y mezclan con objeto de conseguir el tipo de vidrio deseado. En esta etapa del proceso se consume una importante cantidad de energía, procedente de los vehículos empleados para la posible extracción de las fuentes primarias.

La fundición (la mezcla de materias primas a alta temperatura para obtener vidrio fundido) es la parte más importante del proceso productivo. Se trata de una compleja combinación

de reacciones químicas y procesos físicos, que puede dividirse en varias fases: fusión; afino y homogenización; y acondicionamiento.

A medida que las materias primas son recibidas, se muelen y almacenan en depósitos en altura, en espera del momento en que serán transferidas a través de un sistema de alimentación por gravedad a los pesadores y mezcladores. En los mezcladores las materias primas son dosificadas y combinadas con vidrio reciclado, **del mismo proceso**, para formar una mezcla homogénea, la cual es trasladada por medio de cintas transportadoras a un sistema de almacenamiento de cargas (batch) donde es contenida antes de ser depositada en el alimentador del horno de fundición.

Al entrar la carga al horno a través de los alimentadores y cuya temperatura se encuentra a 1.500°C, ésta flota en la superficie de la masa de vidrio fundida. Una vez que se funde, pasa al frente del baño y eventualmente fluye a través de la garganta de carga al refinador, donde es acondicionada, a la temperatura adecuada, para la fabricación de cada modelo eliminándose las burbujas de CO₂ procedente de la descomposición de carbonatos. El enfriamiento se lleva a cabo de forma controlada, por lo que es necesario un aporte de calor adicional, proporcionado generalmente por energía eléctrica o por combustión de gas. Al final de cada canal de acondicionamiento, la masa de vidrio se distribuye en forma de gotas.

Es en el conformado donde se le da la forma deseada a la gota de vidrio mediante diversos procesos. El proceso de conformación del vidrio para envases, se realiza en dos fases: la conformación inicial de la pieza en tosco por prensado con un émbolo percutor o por soplado con aire comprimido; y el moldeo final por soplado para obtener la forma hueca terminada. En consecuencia, estos dos procesos se denominan “prensado-soplado” y “soplado-soplado”, respectivamente. Para fabricar los envases se utilizan casi exclusivamente máquinas de secciones individuales.

La etapa de recocido consiste en un tratamiento térmico en el que se eliminan las tensiones que han podido originarse durante el proceso de enfriamiento.

Posteriormente, el producto final es sometido a diversos controles de calidad. Aquél producto resultante que no sea apto, se triturará y se devolverá al horno de partida.

Finalmente, aquellos productos aptos para su posterior aplicación, son empaquetados y posteriormente almacenados.

5.4.2. Árido natural

Se entiende por árido, en el ámbito de la industria de la construcción y de la obra civil, aquella roca que, tras un proceso de tratamiento industrial, se emplea en la industria de la construcción en múltiples aplicaciones, que van desde la elaboración, junto con un material ligante (Cemento portland, cales hidráulicas, yesos, alquitrán, etc.), de hormigones, morteros y aglomerados asfálticos, hasta la construcción de bases y sub-bases para carreteras, balastos y sub-balastos para las vías de ferrocarril, o escolleras para la defensa y construcción de puertos marítimos. Es un material granular (pequeños trozos de roca) que, en la mayoría de los casos, ha de tener una distribución granulométrica adecuada [36].

Existen dos tipos de áridos naturales[36]: Los **granulados**, que son aquellos que se obtienen de yacimientos naturales (Areneros y graveras) y que se usan tras haber sufrido un lavado y una clasificación, es decir, se usan después de haber sufrido únicamente una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las especificaciones exigidas; y los de **machaqueo**, que son aquellos que se producen en canteras tras arrancar los materiales de los macizos rocosos y someterlos posteriormente a una trituración, molienda y clasificación.

De estos dos tipos de áridos naturales, el estudio se centrará en los áridos de machaqueo, cuyo proceso consta de las siguientes etapas (Figura 5.7):

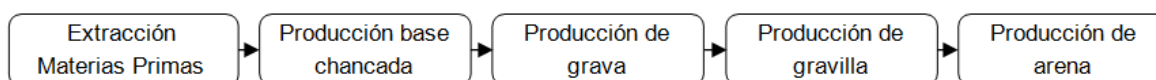


Figura 5.7 - Proceso de producción de árido natural [42].

El proceso empieza con la extracción de material integral y trasvase de éstas al camión. Para la extracción del denominado material integral se emplea dragalina, pala y retro. Posteriormente, tiene lugar el trasvase del material integral desde la pala de la excavadora hacia la tolva de un camión. Éste traslada el material desde el lugar de la extracción hasta la planta procesadora.

La planta procesadora recibe el material mediante un cargador frontal y es entonces cuando se inicia la producción base chancada. La chancada es la fragmentación de rocas de forma artificial mediante el cual, se obtiene la primera granulometría que corresponde a la grava.

Una vez producida la chancada, el material es nuevamente trasladado, esta vez, a la planta de producción de grava, mediante un cargador frontal.

En la producción de grava se vuelve a triturar el material hasta obtener la granulometría que la conforma. El proceso se repite nuevamente para la obtención de gravilla y arena.

6. ESTIMACIONES

A continuación se mostrarán las diferentes etapas dominantes de cada proceso, con las entradas y salidas que los rigen, y las estimaciones establecidas en cada una de las etapas, con la finalidad de justificar los resultados posteriores.

6.1. Análisis Eco-Auditoría del vidrio

La fabricación de cualquier producto de vidrio es esencialmente un proceso energético y, por tanto, la elección de la fuente de energía y calor y de los sistemas de recuperación son los aspectos que rigen el rendimiento económico del proceso, la eficiencia energética de la fusión y las afecciones medioambientales que se pueden generar.

La principal fuente de energía son los combustibles fósiles, que se consumen mayoritariamente en la etapa de fusión, aunque también en las etapas de conformado, recocido, temple y acondicionamiento de las cargas [43]. En cuanto a la energía eléctrica, se consume principalmente en las máquinas de conformado, en la generación de aire comprimido, en el transporte de materiales, en algunos procesos de calentamiento, etc.

En general, la energía necesaria para la fusión del vidrio supone más del 75% del total de energía consumida en el proceso de fabricación (Figura 6.1), por lo que la elección de técnicas que puedan reducir el consumo energético es de vital importancia [43].

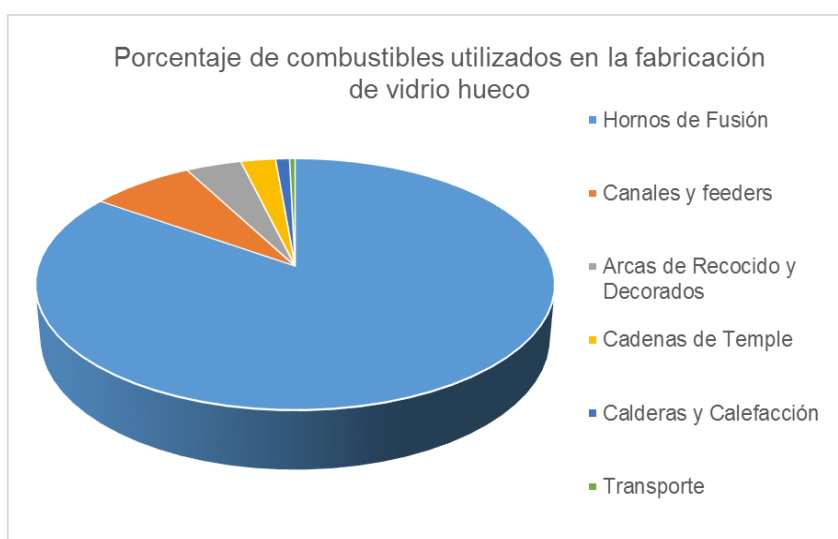


Figura 6.1 - Porcentaje de consumos energéticos, combustibles, en la fabricación de vidrio hueco

[43].

Además, el transporte forma parte del grupo de procesos de soporte, y desde el punto de vista medioambiental, es el que mayor emisiones suele producir, por lo que es objeto de estudio específico, no teniéndose en cuenta otros procesos de soporte que puedan existir en el sistema de estudio.

Bajo estas consideraciones, se han realizado dos esquemas de proceso comparativos, teniendo en cuenta sólo aquellas etapas del proceso en los que la emisión de CO₂ y consumo de energía se ven agravados.

La Figura 6.2 muestra las etapas seleccionadas, de los dos esquemas de proceso explicados anteriormente. La Figura 6.2.a. pertenece al proceso de fabricación del vidrio hueco, a partir de los residuos obtenidos mediante la recogida selectiva de los mismos, y donde se tendrá en cuenta la recogida, selección y molienda (en la planta de tratamiento) y fusión (en la planta de envases). La Figura 6.2.b. esquematiza el proceso de producción de el mismo vidrio hueco pero a partir de la extracción de fuentes primarias. Este segundo proceso lo formarán la extracción y preparación de fuentes primarias, y finalmente, su fusión. Ambas serán posteriormente analizadas en base a las referencias bibliográficas encontradas.

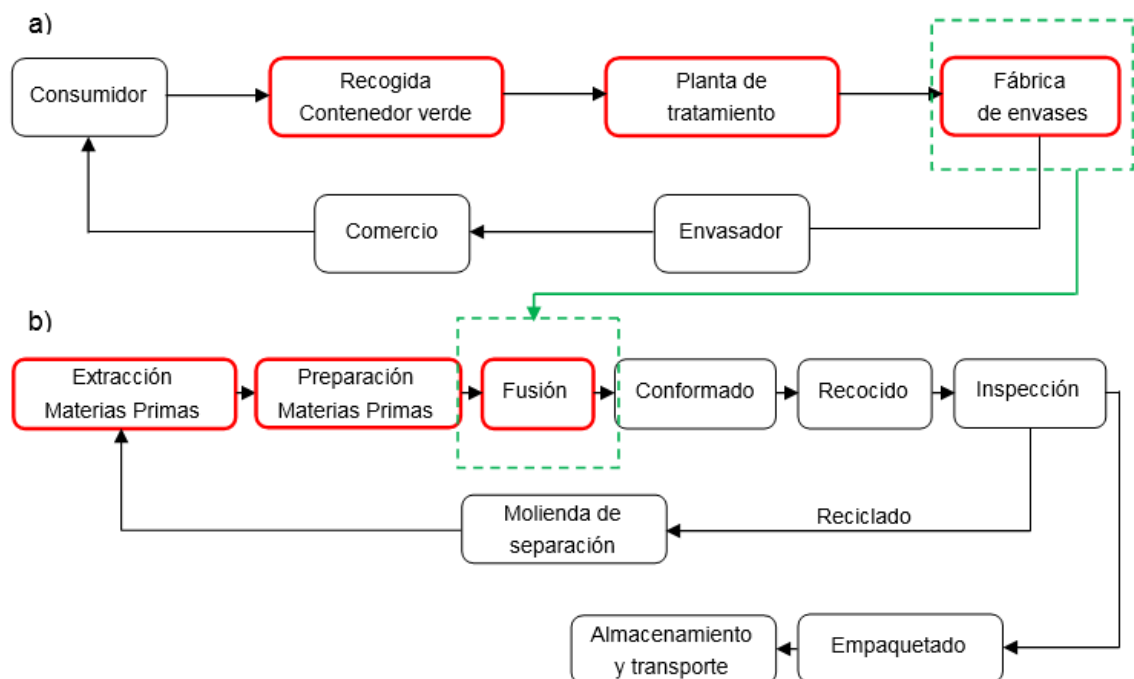


Figura 6.2 - Etapas de los procesos seleccionadas para el estudio Eco-Auditoría de: a) Proceso de fabricación del vidrio a través de vidrio 100% reciclado; b) Proceso de fabricación del vidrio a partir de 100% materias primas.

6.1.1. Envases reciclados

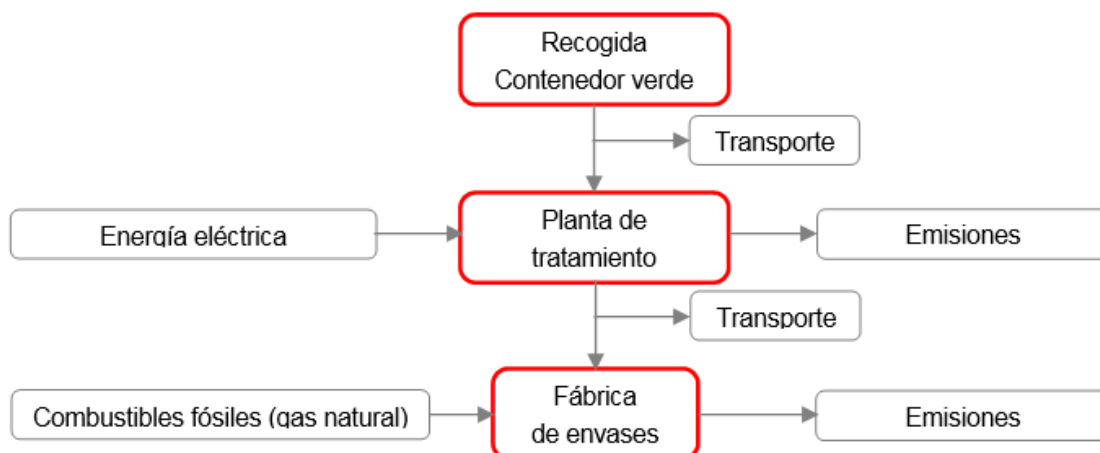


Figura 6.3 - Esquema de proceso, con las entradas y salidas, para la producción del vidrio hueco a partir del vidrio 100% reciclado.

6.1.1.1. Transporte

Se estipula un transporte mediante un camión pesado de 40 t de peso y 25 t de capacidad con un consumo de 0.63 MJ/t·km [37]. La variable del consumo por transporte será la distancia recorrida. Normalmente las plantas de fabricación de envases reciclados se sitúan próximas a las de tratamiento de los RSU. Para la evaluación de este proceso en concreto se establecerá que la distancia media recorrida por los camiones que transportan los residuos de vidrio de los contenedores a triturar, y de éstos a la planta de tratamiento, es de 20 km [17].

6.1.1.2. Planta de tratamiento

Se consideran dos subprocesos realizados en esta etapa:

6.1.1.2.1 Clasificadora de vidrio

Datos extraídos de ECOINVENT estipulan que en el proceso de clasificación de vidrio supone un consumo de electricidad de 1.37kWh/t y 1.76 L/t de diésel [41].

6.1.1.2.2 Trituradora de vidrio

La trituración supone un consumo energético de 24.69 MJ/t, procedente de la electricidad consumida para disminuir el tamaño del vidrio [38].

6.1.1.3. Fábrica de envases

Como se ha comentado en el apartado de metodología, en esta etapa sólo se tendrá en cuenta la fusión. Para el consumo energético de éste se ha considerado que la fusión era sólo con material reciclado. La fusión del reciclado requiere de una temperatura de 1.200°C, la cual supone un consumo de energía de, aproximadamente, 4.953 MJ/t [19] [39].

6.1.2. Envases 100% fuentes primarias

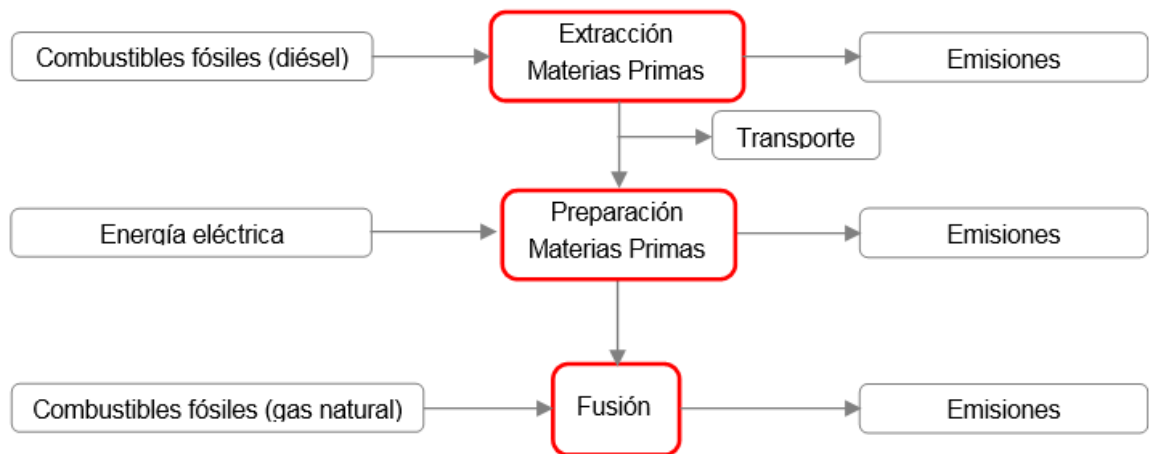


Figura 6.4 - Esquema de proceso, con las entradas y salidas, para la producción del vidrio hueco a partir de la extracción de materias primas.

6.1.2.1. Extracción de fuentes primarias

6.1.2.1.1 Fuentes primarias consideradas

A partir de datos de ANFEVI (Figura 6.5), se considera que el porcentaje de extracción de fuentes primarias combinado con calcín (vidrio reciclado) es el siguiente:

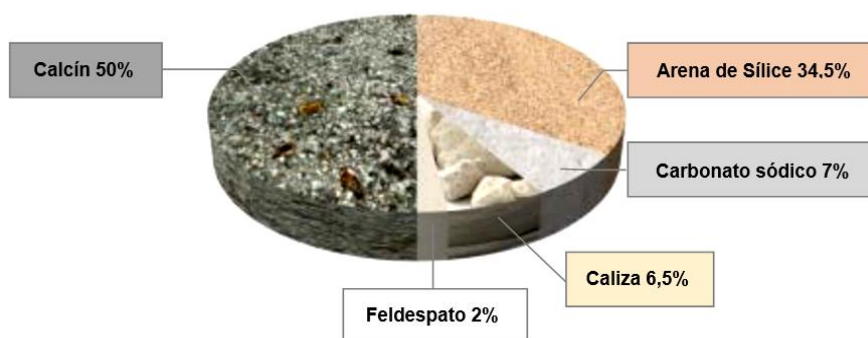


Figura 6.5 - Distribución en peso de las materias primas necesarias para un 50% de material reciclado [19].

Teniendo en cuenta los porcentajes de materia prima utilizada para un 50% de material reciclado, se extrapolan los porcentajes para adecuarlos a nuestro caso de estudio (100% materias primas). De este modo, se considera que en el proceso de fabricación se utilizarán el doble de los porcentajes para el reciclado de una botella con material reciclado. Finalmente, los porcentajes en peso de extracción de fuentes primarias, serán: **69% Arena de sílice; 14% Carbonato sódico; 13% Caliza y 2% Feldespato.**

6.1.2.1.2 Maquinaria considerada

De forma genérica, el ciclo básico de producción de una cantera desempeña las siguientes operaciones:

- Perforación.
- Voladura.
- Carga.
- Transporte (volquetes y cintas transportadoras).

La cantidad total de energía consumida, está formulada por el sumatorio de las energías empleadas en el conjunto de operaciones desarrolladas [46]. La energía que fundamentalmente se emplea es química (combustibles) y eléctrica.

Se ha considerado que la maquinaria empleada, para las operaciones arriba mencionadas, genera un consumo de energía de 592 MJ/t (por el consumo de combustibles) y un consumo eléctrico de 253 MJ/t [45].

6.1.2.2. Transporte

En este caso también se tratará el transporte mediante un camión pesado de 40 t de peso y 25 t de capacidad con un consumo de 0.63 MJ/t·km ^[37]. A diferencia del reciclado, las canteras donde se produce la extracción del mineral, distan, de las fábricas de producción, a una distancia aproximada de 100 km ^[40], siendo este el valor que se tendrá en cuenta.

6.1.2.3. Fusión

A diferencia del material reciclado, las materias primas extraídas requieren de mayor temperatura para la fusión. Concretamente, 1.500°C son necesarios y suponen un consumo de 6.188 MJ/t ^{[19] [39]}.

6.2. Análisis Eco-Auditoría del árido

Bajo los mismos criterios citados en el proceso productivo del vidrio, a continuación se detallarán las estimaciones realizadas para el proceso de la obtención de la Escograva y para la obtención del árido natural.

6.2.1. Escorias de incineración

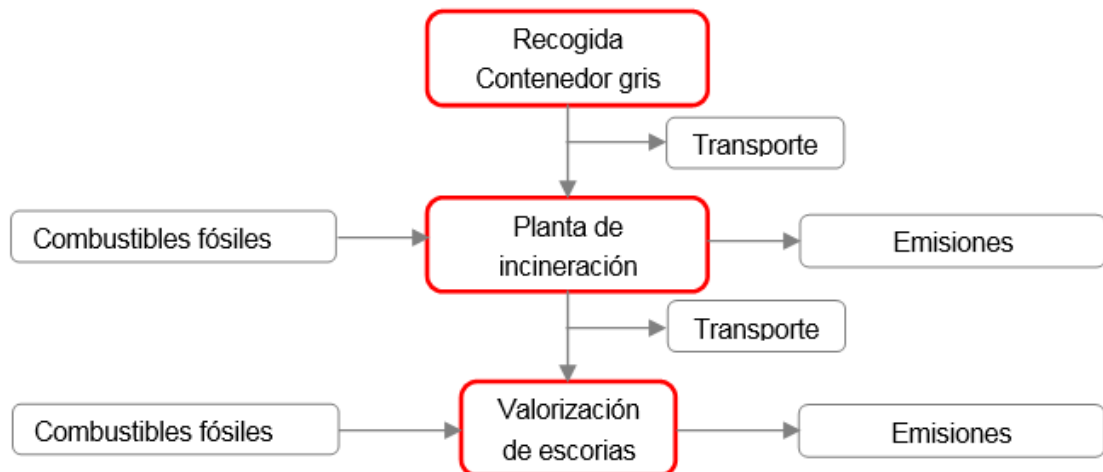


Figura 6.6 - Esquema de proceso, con las entradas y salidas, para la producción de Escograva a partir de la escoria de incineración.

Todos los datos extraídos de este proceso, se han realizado a partir de los datos que se muestran en el artículo de Chimenos, 2014 ^[17]. Considerando de esta manera una energía

total, consumida en el transporte, de 322 MJ/t; 238 MJ/t consumida en la planta de incineración; y un total de 57 MJ/t en el proceso de valorización de las escorias, según datos facilitados por la planta incineradora de Tarragona (SIRUSA) y la planta de acondicionamiento de la Escograva, VECSA.

6.2.2. Árido natural

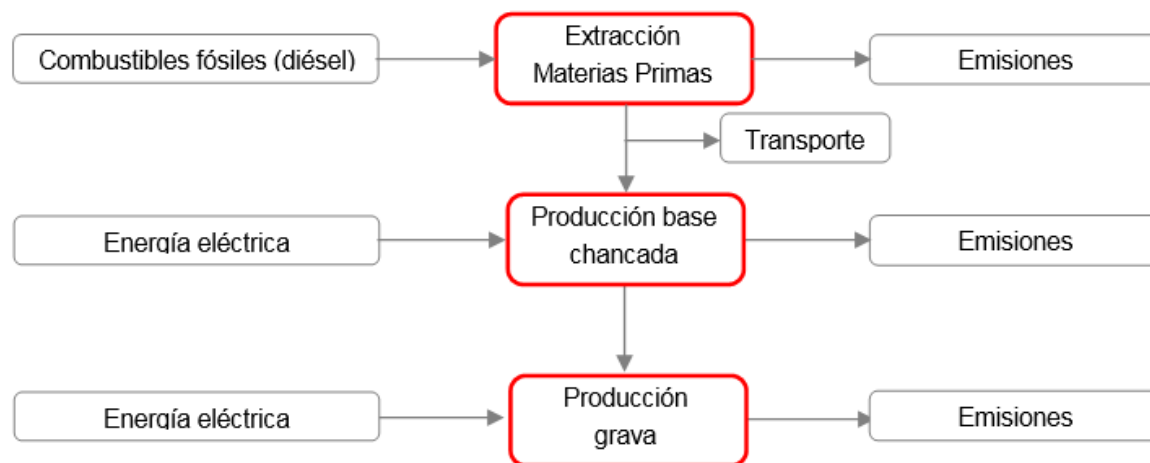


Figura 6.7 - Esquema de proceso, con las entradas y salidas, para la producción de árido natural a partir de su extracción.

6.2.2.1. Extracción de materias primas

Los pocos valores encontrados en la bibliografía, así como también la elevada desviación habida en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas, hacen que en esta etapa se considere el mismo valor empleado en la extracción de fuentes primarias para la producción de envases de vidrio. El valor empleado por tanto, será de 845 MJ/t, de los cuales, 592 MJ/t serán por el consumo de combustibles y 253 MJ/t por el consumo eléctrico [45].

6.2.2.2. Transporte

En este apartado se establecerán los mismos parámetros que en caso de obtención de envases a partir de fuentes naturales: un camión pesado de 40 t de peso y 25 t de capacidad con un consumo de 0.63 MJ/t·km [37], cuya distancia de recorrido es de 100 km.

6.2.2.3. Producción base chancada

A partir de la bibliografía consultada, se considerará que el machaqueo de las rocas generan un consumo energético de 190 MJ/t ^[42] ^[45].

6.2.2.4. Producción grava

Bajo el mismo criterio que en el caso anterior, la disminución de la granulometría hasta la obtención de grava tendrá un consumo energético de 65 MJ/t ^[42] ^[45].

7. RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados comparativos entre ambos procesos de reciclaje versus sus equitativos procesos de fabricación, a partir de materias primas.

Los resultados obtenidos sólo pretenden dar una idea de los consumos desarrollados en las etapas dominantes, seleccionadas para cada proceso productivo. Puesto que se han obtenido de varias referencias bibliográficas y, por tanto, no forman parte del resultado de un cálculo a partir de resultados experimentales, los resultados no pueden establecerse como parámetros fijos relevantes.

7.1. Vidrio para envases

Bajo las estimaciones desglosadas en el capítulo anterior y, teniendo en cuenta que 1 kWh son 3,6 MJ y la energía consumida por un vehículo diésel es de 38 MJ/L ^[1], se obtiene la siguiente tabla de resultados para los consumos de energía de ambos procesos para la obtención de envase de vidrio.

Tabla 7.1 - Consumo energético para los envases de vidrio no reciclados y los reciclados ^[17]^[19]^[37]

^[39] ^[40] ^[41].

	Envases NO Reciclados	Envases Reciclados
	MJ/t	MJ/t
Extracción de materias primas	845	-
Consumo eléctrico		253
Consumo combustible		592
Transporte	63,0	12,6
Planta de tratamiento RSU	-	73,6
Clasificadora de vidrio	-	48,9
Consumo eléctrico		29,0
Consumo combustible		20,0
Trituradora	-	24,7
Fusión 1.500°C	6188	-
Fusión 1.200°C	-	4953
TOTAL Consumo Energético	7096	5039

Para el cálculo de emisiones de CO₂ se han multiplicado el total de combustibles fósiles, consumidos durante el proceso, por el promedio mundial de 0.098 kg CO₂/MJ ^[28]. La Tabla 7.2 y la Tabla 7.3 muestran el resultado de esta operación para la producción de envases a partir de vidrio reciclado y no reciclado, respectivamente.

Tabla 7.2 - Resultados totales de consumo de combustibles y emisión de CO₂ para la producción de envases reciclados.

TOTAL Consumo combustibles	TOTAL Emisiones CO₂
MJ/t	kg CO₂/t
4986	489

Tabla 7.3 - Resultados totales de consumo de combustibles y emisión de CO₂ para la producción de envases NO reciclados.

TOTAL Consumo combustibles	TOTAL Emisiones CO₂
MJ/t	kg CO₂/t
6843	671

A continuación la Tabla 7.4 muestra el ahorro obtenido, tanto en consumo de combustibles como en emisión de CO₂, en el proceso de reciclaje del envase de vidrio.

Tabla 7.4 - Ahorro de combustibles y de emisiones de CO₂ mediante el reciclaje del vidrio.

Ahorro Consumo de combustibles		Ahorro Emisiones CO₂
MJ/t	%	kg CO₂/t
1857	27,1	182

7.2. Árido

Los consumos y emisiones para la producción de Escograva son los siguientes:

Tabla 7.5 - Consumos energéticos para la producción de la Escograva [17].

	Energía Consumida
	MJ/t
Transporte	303
Planta de incineración	238
Transporte incineradora	18,8
Valorización de escorias	57,5
TOTAL Consumo Energético	617

Tabla 7.6 - Resultados totales de consumo de combustibles y emisión de CO₂ para la producción de Escograva.

TOTAL Consumo combustibles	TOTAL Emisiones CO₂
MJ/t	kg CO₂/t
617	60,5

Por otro lado, la Tabla 7.7 y la Tabla 7.8 muestran el consumo energético y emisiones de CO₂, respectivamente, para la obtención de árido natural.

Tabla 7.7 - Consumos energéticos para la producción de árido natural ^[42 a 45].

	Energía Consumida
	MJ/t
Extracción material	845
Producción base chancada	190
Producción grava	65,0
Transporte	63,0
TOTAL Consumo Energético	1163

Tabla 7.8 - Resultados totales de consumo de combustibles y emisión de CO₂ para la producción de árido natural.

TOTAL Consumo combustibles	TOTAL Emisiones CO₂
MJ/t	kg CO₂/t
1163	114

Tabla 7.9 - Ahorro de combustibles y de emisiones de CO₂ mediante la Escograva.

Ahorro Consumo de combustibles		Ahorro Emisiones CO₂
MJ/t	%	kg CO₂/t
546	47,0	53,5

8. VIABILIDAD ECONÓMICA

En este apartado se considera que el coste, en la realización del proyecto, es aquél producido por el consumo eléctrico del ordenador, así como también el de los desplazamientos del propio vehículo a la universidad. La Tabla 8.1 detalla los datos empleados para el cálculo del coste que ha tenido el proyecto durante su realización:

Tabla 8.1 - Desglose de los costes generados durante la realización del proyecto por consumo eléctrico y de combustible.

Por consumo eléctrico

Horas de elaboración del proyecto: 4 horas/día x 5 días/semana x 15 semanas = 300 horas
 Energía consumida por 400 horas: 180 kWh
 Precio de la energía: 0.08 €/kWh

Subtotal: **14,40 €**

Por consumo de combustible

Precio el km: 0,10 €
 Precio estimado del carburante: 1,30 €/L
 Consumo estimado: 0,05 L/km
 Distancia por trayecto: 27 km
 Número de trayectos: 18
 Distancia total: 486 km
 Coste de desplazamiento: 486 km [(0,05 L/km · 1,30 €/L) + 0,10 €/km]

Subtotal: **80,20 €**

TOTAL **94,60 €**

9. IMPACTO AMBIENTAL

Los impactos medioambientales generados en los procesos productivos de los envases de vidrio y los generados en la producción de áridos para la industria de la construcción, quedan detallados en el apartado número 7, Resultados. En él se puede obtener una estimación del consumo energético y emisiones de CO₂ generados en cada uno de los procesos.

Puesto que el proyecto es de carácter bibliográfico, éste no repercute en ninguna alteración medioambiental de manera significativa. Sin embargo, el desarrollo del proyecto ha supuesto un consumo energético y unas emisiones determinadas, asociadas al desplazamiento del vehículo privado hasta la universidad.

- Distancia recorrida por trayecto: 27 km.
- Duración del trayecto: 25 minutos.
- Emisiones de CO₂ por km: 117 g CO₂/km.
- Emisiones de CO₂ por trayecto: 3,20 kg CO₂.
- Número total de trayectos: 18.
- Masa total de CO₂ emitida: 58 kg CO₂.

Finalmente, para la entrega del proyecto, tal y como dicta la normativa de proyectos fin de carrera de la ETSEIB, se han impreso dos copias de la memoria y utilizado cinco discos compactos.

Conclusiones

- La recogida selectiva del vidrio comporta la disminución de impactos ambientales provocados por la extracción de las materias primas que lo forman (sílice, caliza y carbonato sódico). Puesto que proceso productivo del reciclaje del vidrio, se ve limitado por el color de los envases, es necesario la extracción (en mayor o menor cantidad) de materias primas. Aun así, la disminución de la extracción repercute positivamente en los impactos ambientales que conlleva, y eso es lo que interesa.

Además, no sólo la no extracción de fuentes primarias conlleva una disminución energética y de emisiones. La disminución de la temperatura de fusión que acompaña al calcín (vidrio reciclado) provoca la disminución de combustible, y por tanto de emisiones, para fundir la misma cantidad de vidrio a partir de materias primeras, donde necesitaríamos una temperatura superior.

Los resultados muestran un ahorro energético del 27% de energía para la fabricación de envases de vidrio a partir de vidrio reciclado. Teniendo en cuenta que por cada 4% de calcín se disminuye un 1% de la energía consumida (es decir, una reducción del 25%), el resultado obtenido sólo presenta un 2% de desviación.

- La incineración de la fracción resto de los RSU supone una disminución de material vertido así como también una generación de energía paralela. Pese a los inconvenientes ambientales que presenta de antemano, este proceso de valorización permite la obtención de escorias aptas como material granular para sub-base de carreteras.

Con los valores obtenidos en las bibliografías consultadas, se ha podido dar una estimación del consumo energético y de emisiones de CO₂ que comporta dicho proceso. Los resultados obtenidos muestran que el proceso de incineración de residuos para la formación de Escograva, es una alternativa viable al proceso de extracción de áridos naturales, cuyas energías empleadas y emisiones asociadas, se ven duplicadas.

Cabe mencionar que muchas de las bibliografías consultadas afirman que la energía consumida en obtención de material árido a partir de fuentes primarias es 5, hasta 7 veces, superior a la consumida en el proceso de incineración. Los resultados mostrados en este proyecto sólo muestran una diferencia del doble de energía consumida, entre ambos procesos. Esta diferencia recae en los datos. Éstos se han obtenido a partir de diferentes referencias bibliográficas y, por consiguiente, no pueden tener un valor constatado.

Agradecimientos

Ante todo quiero agradecer la realización de este proyecto a mi tutor, Josep Chimenos, no sólo por haberme dado toda la ayuda y apoyo necesario, sino por ofrecer un proyecto de carácter teórico para que, estudiantes y trabajadores (ambas cosas a la vez), hayamos podido hacer la realización de un Proyecto Final de Carrera sin la necesidad de contener una parte experimental.

A Inés Fernández por haberme ayudado siempre, en todo momento, con temas de gestión de la universidad así como en asesoramiento personal. Además, quiero agradecerle también el esfuerzo por haber querido formar parte del tribunal.

A Carles Oriol por haber hecho posible la anticipada entrega de este proyecto, pese a todas las complicaciones surgidas en el transcurso de éste.

A Lluís Llanes y Joan Formosa, por la predisposición, desde el primer momento, en querer formar parte de mi tribunal.

Finalmente a mi pareja, madre y amigas, por todo el apoyo recibido en este tiempo.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Michael F. Ashby. *Materials and the Environment. Eco-Informed Material Choice*. Editorial ELSEVIER (Second Edition). ISBN 978-0-12-385971-6
- [2] Instituto de Estadística de Cataluña, 2014. Población 2014. [<http://www.idescat.net>]
- [3] Agència de Residus de Catalunya, 2012. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya. [www.arc-cat.net]
- [4] Consorci ECOPARC, 2014. La Fracció Resta. [<http://www.consorciecop4rc.cat>]
- [5] Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient. *Catàleg de Residus de Catalunya*. (1era edició) Barcelona, Diciembre 1999.
- [6] Colaboradores de Wikipedia. *Categoría de Desechos Sólidos*. Wikipedia, La enciclopedia libre. Enero 2014.
[http://es.wikipedia.org/wiki/Basura#Clasificaci.C3.B3n_de_los_residuos]
- [7] Boletín Oficial del Estado. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. *Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*. Jueves, 26 de Febrero de 2009 p.19893 – 20016.
- [8] UNED, 2014. *Gestión y tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos*.
[<http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina3.htm>]
- [9] Ajuntament de Barcelona, 2014. Neteja i gestió de residus. *Un contenidor per a cada cosa*.
[http://w110.bcn.cat/portal/site/MediAmbient/menuitem.37ea1e76b6660e13e9c5e9c5a2ef8a0c/?vgnextoid=a4ba37b03948d210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&vgnnextchannel=a4ba37b03948d210VgnVCM10000074fea8c0RCRD&lang=ca_ES]

- [10] Asociación de empresas de valorización energética de R.S.U. (AEVERSU), 2014. *Cómo funciona una planta de incineración*.
[<http://www.aeversu.org/valorizacion-energetica/como-funciona-una-planta-de-incineracion/>]
- [11] Ministerio de Fomento. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. *Escorias y cenizas de incineradora de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)*. Diciembre, 2014.
- [12] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). D) *Gestión de Residuos*. Actividades del Ministerio durante el 2012. Junio, 2013.
- [13] Asociación Española de la Industria Eléctrica. (UNESA). *Central incineradora de R.S.U.*
[<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1348-central-rsu>]
- [14] Romero Sánchez, Alberto. *Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía*. Proyecto de ingeniería industrial, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, 25 de Junio 2007.
- [15] Nadal, Ramon. *18 años de experiencia en incineración de RSU en Tarragona*. Servei d'incineració de Residus Sòlids Urbans SA. (SIRUSA). Barcelona, 27 de Mayo de 2009.
- [16] Macías García, M^aA. *Viabilidad del empleo de cenizas de incineración en los Materiales de Construcción*, Construcción y Medio Ambiente: XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción CCEMCO 98, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- [17] Chimenos, J.M., Del Valle-Zermeño, R., Giró Paloma, J., Prieto, M., Formosa, J. *Glass content in MSWI Bottom Ash: Effectiveness assessment of recycling over time*, Barcelona 2014.
- [18] Eusden, J.D., Eighmy, T.T., Hockert, K., Holland, E. *Petrogenesis of municipal solid waste combustion bottom ash*. *Appl Geochemistry* 14, 1073-1091. 1999.

- [19] Sección de Vidrios de la SECV y VIDRIOESPAÑA, con el apoyo de la Sección de Medioambiente de la SECV. *Medio Ambiente e Industria del vidrio. Análisis Bref 2012. Emisiones y mejoras tecnológicas disponibles en la fabricación de vidrio*. Salón de Actos del Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC). 23 de mayo 2013.
- [20] Izquierdo Ramonet, Maria. *Valorització d'escòries d'incineració de residus sòlids urbans en capes granulars de ferm*. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció. 28 de Fbrero de 2005.
- [21] Oficina de Comunicado de Prensa de la Generalitat de Catalunya. *Catalunya redueix la generació de residus domèstics i queda situada per sota de la mitjana europea*. Departament de Territori i Sostenibilitat. 11 de Julio 2014.
- [22] Kanari, N., Allain, E., Gaballah, I., Hernández, A., García, F.: *Caracterización de elementos contaminantes en escorias procedentes de la incineración de residuos de la industria química y metalúrgica*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Rev. Metal Madrid, 35 (1), 1999.
- [23] Federal Highway Administration (FHWA): *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. 1997.
- [24] Collinsl, R.J., Miller R.H.: *Technology for use of Incinerator Residue as Highway Material*, Federal Highway Administration, report no. FHWA-RD-76-12. Washington, D.C 1975.
- [25] Haynes, J., Ledbetter, W.B.: *Incinerator Residue in bituminous Case Construction*, Federal Highway Administration Report no. FHWA-RD-76-12. Washington, D.C. 1975.
- [26] Collins, R.J.; Ciesielsky, S.K.: *Recycling and use of waste materials and subproducts in the highway construction*, NCHRP Synthesis of highway Practice 199, Transportation Research Board. Washington, D.C. 1994.
- [27] Chandler ET AL.: *An International Perspective on Characterisation and Management of Residues from Municipal solid Waste Incineration*, Summary Report, International Energy Agency. 1994.

- [28] Colaboradores de Wikipedia. *Contenido energético*. Wikipedia, La enciclopedia libre. Enero 2014.
[http://es.wikipedia.org/wiki/Contenido_energ%C3%A9tico]
- [29] Generalitat de Catalunya i Oficina Catalana del Canvi Climàtic. *Càlcul de les emissions de GEH derivades de la gestió dels residus municipals. Metodologia per a organitzacions*. Departament de Territori i Sostenibilitat. Marzo 2014.
- [30] Rincón, Jose M^a. *Materia primas para la industria del vidrio*. Grupo/Lab. Materiales vítreos y cerámicos. Instituto E. Torroja de ciencias de la construcción CSIC. Marzo 2008.
- [31] Cempre Uruguay. *Manual de gestión integral de los residuos sólidos urbanos. El reciclaje del vidrio*. 1998.
- [32] Ecovidrio, 2014. [www.ecovidrio.es]
- [33] Álvarez, Clemente: *¿Por qué un suizo recicla el vidrio por colores?*. El País semanal, blogs. 22 Abril 2010.
[<http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/04/por-que-un-suizo-recicla-el-vidrio-por-colores.html>]
- [34] Biogeociencias. *El reciclaje del vidrio*. OCU Compra Maestra, 245. Enero 2001.
[http://www.biogeociencias.com/08_contaminacion_residuos_impactosambientales/010130_Recicladedelvidrio.htm]
- [35] European Federation of Glass Recyclers. [www.ferver.eu]
- [36] Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales. *Áridos*.
[<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/LECCION3.MaterialesPetreosNATURALES.5-ARIDOS.Introduccion.pdf>]
- [37] Bovea, M.D., Gallardo, A., Colomer, F., Carlos, M., Díaz-Albo, E. *Identificación de aspectos ambientales clave en diferentes modelos de recogida selectiva de residuos mediante la aplicación de técnicas ACV*. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. REDISA. Castellón 23-24 Julio 2008.
- [38] Cardim de Carballo, Arnaldo. *Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de vida de los inventarios del ciclo de vida del*

cemento. Tesis doctoral en Ingeniería Civil. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Barcelona. Julio 2001.

- [39] Estructplan. *Impactos ambientales y Actividades productivas. Industria del vidrio*. [<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=192>]
- [40] Seller. *Cantera de Caliza Alba*. [<http://www.marmolseller.es/index.php/cantera/caliza-alba>]
- [41] Bernad-Beltrán, David; D. Bovea, María; Gallardo, Antonio; Colomer, Francisco J. *Integración de análisis del ciclo de vida (ACV) y sistemas de información geográfica (SIG) para la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos*. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I de Castellón. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Valencia, 11-13 de julio de 2012
- [42] González Loiza, Alberto J. *Evaluación del proceso de extracción y procesamiento de áridos mediante el análisis del ciclo de vida*. Proyecto Ingeniería de la construcción. Universidad de la Frontera. Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración. Departamento de ingeniería de obras civiles. 2010.
- [43] Canales Canales, Carmen. *Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector de la fabricación del vidrio*. Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 2007.
- [44] Olsson, Susanna; Kärrman, Erik; Gustafsson, Jon Petter. *Environmental system analysis of the use of bottom ash from incinerator of municipal waste for road construction*. Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology (KTH). Sweden, 17 November 2005.
- [45] Salazar Jaramillo, Alejandro. *Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones colombianas*. Contrato número 000001351 1. Santiago de Cali, 3 Septiembre 2012.
- [46] Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. *Guía de ahorro y eficiencia energética en canteras*. Conserjería de economía y hacienda. Madrid, 2011.