

**ALTERNATIVAS DE
GESTIÓN EN EL
ECOVERTEDERO DE
ZARAGOZA**

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN LA GESTIÓN DE RSU | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS: CDR/CSR | 4 |
| 1.2.1. DEFINICIÓN, CLASIFICACIÓN Y ORIGEN | 4 |
| 1.2.2. OBTENCIÓN DE CDR/CSR A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS | 6 |
| 1.2.3. SITUACIÓN DE LOS CDR EN ESPAÑA | 11 |
| 1.3 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN HORNOS DE CLÍNKER DE CEMENTO | 13 |
| 1.3.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CEMENTO | 13 |
| 1.3.2. OPERACIÓN CON COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS | 16 |
| 1.3.3. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA CON CDR/CSR A PARTIR DE RSU | 18 |
| CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO: EL ECOVERTEDERO DE ZARAGOZA | 23 |
| 2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FRACCIÓN RESTO | 23 |
| 2.1.1. ORIGEN DEL RESIDUO | 23 |
| 2.1.2. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE CDR/CSR: VENTAJAS Y LIMITACIONES | 27 |
| CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES | 30 |
| NORMATIVA | 37 |
| ESTÁNDARES EUROPEOS | 39 |

CAPÍTULO 1.

LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA EN LA GESTIÓN DE RSU

1.1 Introducción

La situación actual de la economía de los países desarrollados ha dado origen a diferentes desajustes en cuanto al desarrollo sostenible de la sociedad. Uno de los principales problemas a los que se ven enfrentadas las administraciones de los distintos países, tanto de la UE como del resto de mundo, es el incremento en la generación de residuos, industriales y urbanos. Las consecuencias de la intensiva explotación de recursos naturales para la generación de productos cuyo fin posterior, en un muy elevado porcentaje, es su disposición en vertedero, se ven reflejadas en los impactos sobre el terreno, tanto en ocupación como contaminación, y la emisión de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global. Aunque los objetivos primordiales respecto a los residuos sean evitar su generación, la realidad es que la eliminación en vertederos es una práctica común, y no siempre en las condiciones adecuadas [2].

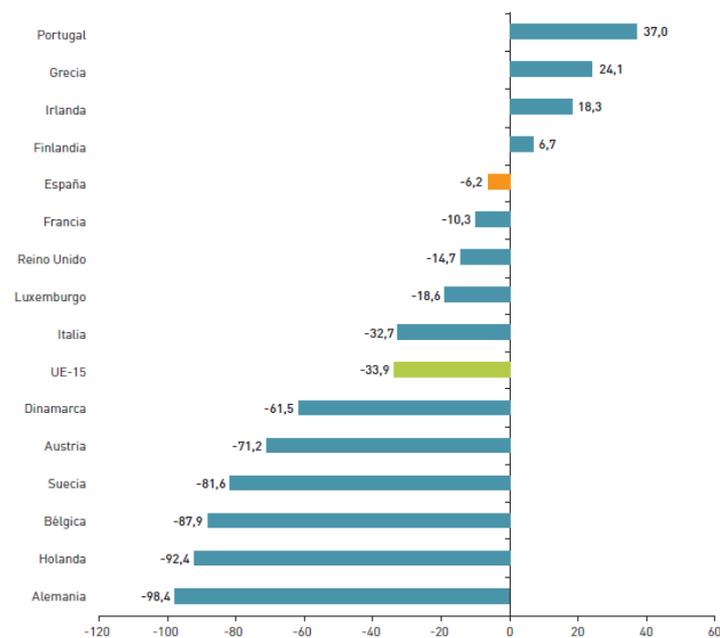


Figura 1. Variación del vertido de residuos urbanos [kg/hab.] en la UE -15, 1995 - 2006 [%]
Fuente: EUROSTAT

En España, la gestión de residuos urbanos se caracteriza por un mayoritario uso del vertedero. Según Eurostat (Figura 1), en el período 1995 – 2006 el vertido de residuos urbanos ha descendido en España un 6,2%. Sin embargo, es un valor muy inferior al de la media de los países de la UE – 15 que experimentó un descenso del 39,9 %.

La actual política de residuos de la UE gira en torno al principio de “jerarquía de residuos”, definida también en la **Ley 10/98 de residuos**, que parte de la base de que la generación de residuos debe minimizarse y los generados deben reutilizarse, reciclarse o valorizarse, siendo el vertido la última opción y la más nociva para el medio ambiente. En España, en el año 2002, según el Ministerio de Medio Ambiente, la gestión de residuos municipales se realizó de la siguiente manera [2]:

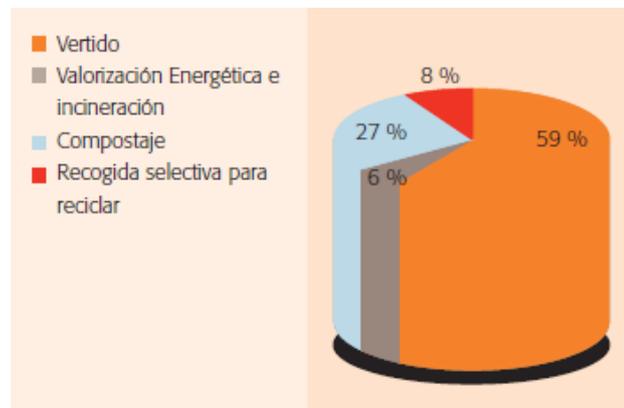


Figura 2. Gestión de residuos municipales en España en 2002. Total 20,5 [Mt]
Fuente: [2]

En la Tabla 1, es posible hacer una comparación de la situación española frente a otros países de la UE en la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU):

Tabla 1: Gestión de Residuos Sólidos Urbanos por países [%] 2004
Fuente: [4]

| | España | Alemania | Austria | Bélgica | Francia | Holanda | Suiza |
|--|--------|----------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Recuperación material | 40,22 | 56,45 | N/A | 67,26 | 19,00 | 52,87 | 48,30 |
| Valorización energética e incineración | 6,62 | 24,55 | 21,69 | 28,65 | 43,00 | 43,04 | 51,30 |
| Vertido | 51,69 | 19,00 | 20,10 | 4,09 | 38,00 | 4,09 | 0,40 |
| Otros métodos de gestión | 1,47 | 0,00 | 58,21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Claramente, en comparación con otros países de la UE, España tiene el mayor porcentaje de vertido y el más bajo en valorización energética e incineración. En el año 2004 la cantidad global de residuos urbanos destinados a vertedero, sin recibir un tratamiento previo, fue de aproximadamente 12 [Mt] entre vertidos controlados e incontrolados. Cabe señalar que los vertidos incontrolados representan todavía el 6,22% del total [4].

Según el Ministerio de Medio Ambiente, los factores que siguen favoreciendo el vertido de residuos valorizables son [9]:

- Insuficiente demanda de los materiales reciclados
- Insuficiente o defectuosa selección y clasificación previa de las diferentes fracciones
- Mayor comodidad y menor precio por el vertido frente a las otras formas de gestión
- El precio repercutido a los usuarios, por los residuos depositados en vertedero, no refleja los costes totales de operación (incluidos costes ambientales)

Existen muchas experiencias en países Europeos acerca de la valorización energética. Las mismas confirman los buenos resultados obtenidos como alternativa de tratamiento de los residuos sólidos urbanos (Tabla 1). Países como Suiza alcanzan más de un 50% de valorización energética de sus residuos sólidos urbanos dejando una fracción mínima para su vertido.

Actualmente, los combustibles alternativos obtenidos del tratamiento de los residuos sólidos urbanos han sido experimentados en la co-combustión o mono-combustión en industrias con un consumo de energía intensivo, tal es el caso de los hornos de cemento y plantas generadoras de energía. En la Comunidad Autónoma de Aragón la situación es muy diferente a la de otros países europeos.

El presente proyecto se enfoca en el estudio de viabilidad técnica, medio ambiental y normativa de valorización energética de la “fracción resto” resultante del tratamiento de los residuos sólidos urbanos depositados en el Ecovertedero de Zaragoza.

Una vez realizado el diagnóstico y análisis de composición y características, tanto físicas como químicas, de la “fracción resto” se procederá a realizar propuestas orientadas a su valorización

energética en hornos de clínker. Se toman en cuenta aspectos legales, medioambientales y técnicos de la opción de valorización mencionada.

Las experiencias realizadas por plantas cementeras con el uso de CDR en otras comunidades autónomas, abren las puertas a seguir dichas experiencias en la comunidad autónoma de Aragón. El tratamiento ecológico de los residuos, la disminución de materias primas, el ahorro de combustibles fósiles, la disminución de las emisiones de CO₂ y sobretodo la alternativa para una gestión integral de residuos acorde con el enfoque de la Ecología Industrial, justifican la realización del presente proyecto.

1.2 Combustibles Alternativos: CDR/CSR

1.2.1. Definición, clasificación y origen

Cuándo se habla de combustibles alternativos, se debe diferenciar entre los Combustibles Derivados de Residuos (CDR) y los Combustibles Sólidos Recuperados (CSR).

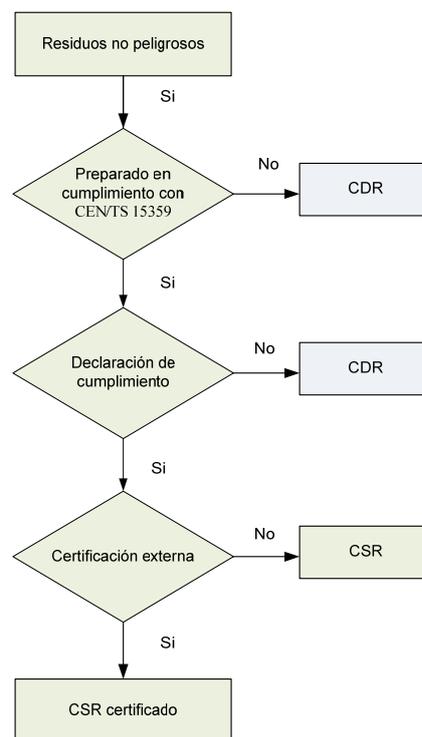


Figura 3. Principios de distinción entre CDR y CSR

Fuente: [27]

Los **Combustibles Sólidos Recuperados** son combustibles sólidos preparados a partir de residuos no peligrosos para ser valorizados energéticamente en plantas de incineración o co-incineración (entre las que estarían incluidas las plantas cementeras), que cumplen la clasificación y especificaciones establecidas en la especificación técnica CEN/TS 15359¹ del Comité Europeo de Normalización.

Los **Combustibles Derivados de Residuos** pueden ser preparados a partir de residuos peligrosos o no peligrosos, pueden presentar un estado físico líquido o sólido, y en cualquier caso, aquellos CDR sólidos producidos a partir de residuos no peligrosos no están sometidos a la especificación técnica CEN/TS 15359 del Comité Europeo de Normalización.

El sistema de clasificación y las especificaciones técnicas de los CSR (las cuales constituyen la principal diferencia con los CDR), se encuentran recogidas en la especificación técnica CEN/TS 15359 del Comité Europeo de Normalización y están basadas en valores límites para tres propiedades importantes del combustible:

- El valor medio para el poder calorífico inferior (**PCI**) en base húmeda
- El valor medio para el contenido en **cloro** en base seca
- Mediana y percentil 80% para el contenido de **mercurio** en relación al PCI en base húmeda

Cada propiedad está dividida en cinco clases, del 1 al 5, con valores límites. Los CSR son designados con un número de clase de cada propiedad. La combinación de dichos números forma el código de clase del combustible. A continuación se presenta el sistema de clasificación especificado en la norma mencionada:

Tabla 2: Sistema de clasificación para Combustibles Sólidos Recuperados
Fuente: CEN/TS 15359:2006 Solid recovered fuels – Specifications and classes

| Propiedad | Medida estadística | Unidad | Clases | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Poder Calorífico Inferior | Valor medio | MJ/kg | ≥25 | ≥20 | ≥15 | ≥10 | ≥3 |
| Contenido en cloro | Valor medio | % | ≤0,2 | ≤0,6 | ≤1,0 | ≤1,5 | ≤3 |
| Contenido en mercurio | Valor medio | mg/MJ | ≤0,02 | ≤0,03 | ≤0,08 | ≤0,15 | ≤0,50 |
| | Percentil 80% | mg/MJ | ≤0,04 | ≤0,06 | ≤0,16 | ≤0,30 | ≤1,00 |

¹ CEN/TS 15359:2006 Solid recovered fuels – Specifications and classes

Cuando se piensa en la mejor opción de tratamiento para la fracción no recuperable de los residuos sólidos urbanos, la valorización, tanto material como energética, es una alternativa interesante que permite obtener determinados beneficios. Sin embargo, existe un debate sobre la aceptación y la compatibilidad de las soluciones tecnológicas, especialmente desde el punto de vista del impacto atmosférico. De este modo, es primordial contar con una fracción combustible con características definidas y apropiadas a la tecnología a emplearse durante su valorización [8].

En la actualidad en España no existe como tal una demanda de CSR producido bajo especificación técnica CEN/TS 15359, sino una demanda emergente y creciente de CDR que cumpla los requisitos técnicos definidos por la instalación de co-incineración de destino y los requisitos medioambientales definidos por el Órgano Ambiental de la Comunidad Autónoma donde se ubica la instalación. Hasta ahora, dicha demanda emergente de CDR se centra principalmente en plantas cementeras.

1.2.2. Obtención de CDR/CSR a partir de residuos sólidos urbanos

La obtención de combustibles alternativos a partir de los residuos sólidos urbanos es una práctica muy empleada en Austria, Alemania y Holanda. En efecto, se estima que la cantidad de CDR producida a partir de RSU en la Unión Europea es de 3 millones de toneladas.

Dentro de las opciones de tratamiento de los RSU, más ampliamente utilizadas actualmente, se encuentra el tratamiento mecánico – biológico (MBT por sus siglas en inglés). El tratamiento MBT es uno de los tratamientos de los residuos sólidos urbanos menos costosos y más empleados. Con la construcción de nuevas plantas de tratamiento MBT, Bélgica, Finlandia, Italia y Holanda se prevé un crecimiento en la producción de CDR y CSR para los próximos años [13].

De modo general, en las plantas de tratamiento mecánico - biológico se separan los materiales inertes, metales y la fracción orgánica (para su estabilización mediante procesos de compostaje, ya sea con o sin una fase de digestión), obteniendo finalmente una “fracción resto”, de la que puede obtenerse combustibles alternativos (CDR y CSR), que se compone principalmente de residuos de papel, plásticos y textiles. Esta última fracción puede resultar también de una “estabilización en seco” en la que la fracción resultante, después de separar metales y materiales inertes, se seca a través de un proceso de compostaje dejando una masa residual con un mayor poder calorífico [13].

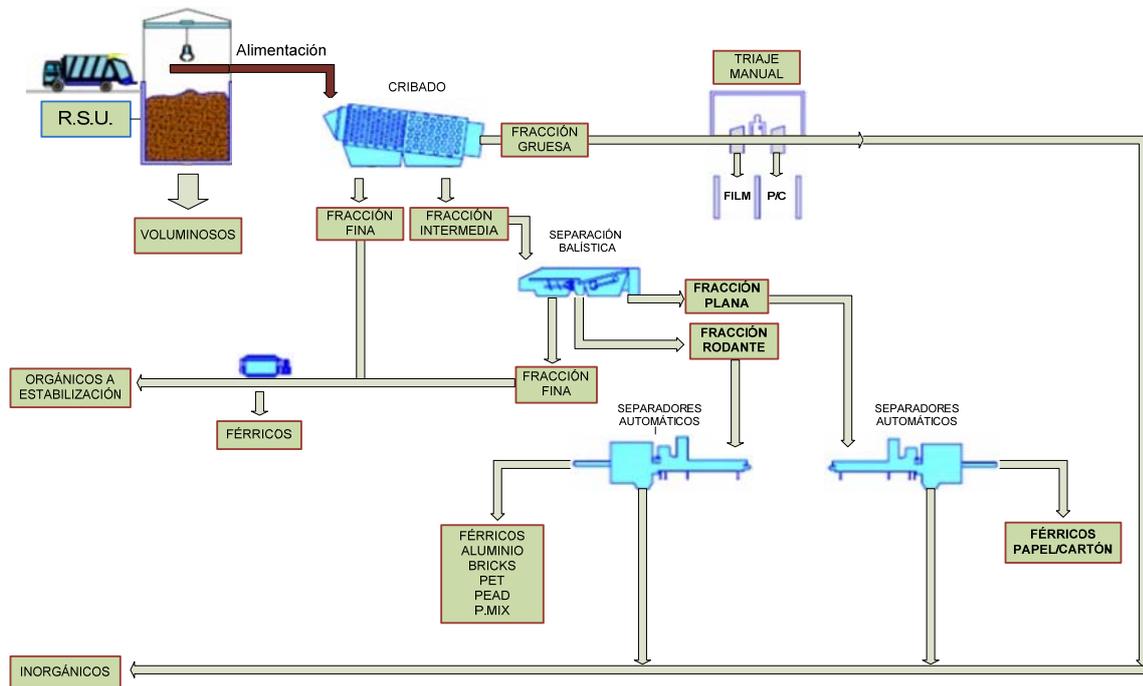


Figura 4. Proceso del tratamiento Mecánico – Biológico de Residuos Sólidos Urbanos
Fuente: [26]

Inicialmente, los RSU pasan por una selección manual donde los elementos voluminosos como aparatos electrónicos, muebles, residuos peligrosos, etc., son separados por los operarios antes de comenzar los tratamientos mecánicos. Mediante la utilización de cribas rotativas se consigue la separación del flujo de residuo en 2 o 3 fracciones de diferentes tamaños. A continuación, con la utilización de diferentes tamices se separa el flujo de residuos en varias fracciones en función de su forma y comportamiento físico. De la fracción gruesa del triado mecánico es posible seleccionar manualmente cartones, papel de periódico, envases de plástico y vidrio, latas de aluminio, etc. De la fracción fina y parte de la intermedia, se descartan de forma mecánica las fracciones orgánicas que seguirán un proceso de estabilización mediante compostaje con o sin una fase de digestión. Con el fin de recuperar la mayor cantidad de materiales adecuados para reciclaje de las fracciones intermedias obtenidas del cribado, los flujos de residuos inorgánicos pasan por operaciones de separación automática, uso de electroimanes, inducción de corrientes de Foucault, rayos infrarrojos y otros.

A partir de las operaciones del tratamiento mecánico – biológico de RSU ya descritas, aún queda una fracción rechazo no reutilizable ni reciclable, y que debido a su composición no es adecuada

para tratamientos biológicos. Esta porción de los residuos sólidos urbanos es llamada “fracción resto”, que procede de los siguientes rechazos [25]:

- **Rechazo del triaje primario:** antes de entrar a la línea de clasificación mecánica, formado principalmente por residuos voluminosos (aprox. 5% s/entrada)
- **Rechazo de las líneas de clasificación y triaje:** material que es embalado y constituye la principal fracción de rechazo (aprox. 29% s/entrada)
- **Rechazos de afino (trómel y mesa densimétrica):** procedente del biorresiduo estabilizado, obtenido en el tratamiento biológico de la fracción orgánica (aprox. 19% s/entrada)

En la siguiente Figura se presentan los valores de rendimiento habituales de las operaciones genéricas empleadas dentro del tratamiento mecánico – biológico de RSU, tal es el caso de la planta de tratamiento del ayuntamiento de Vitoria – Gasteiz.

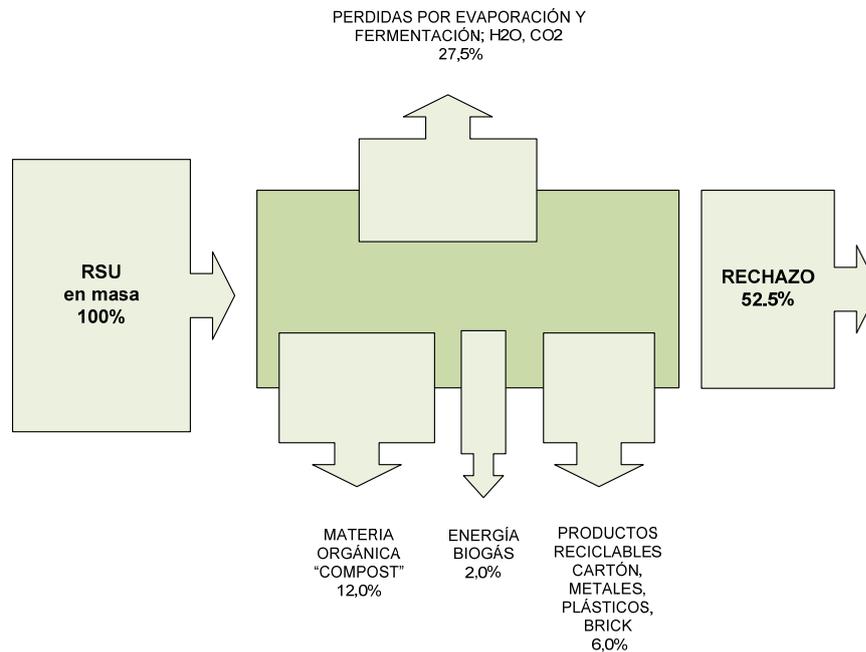


Figura 5. Esquema de los rendimientos de separación del tratamiento Mecánico – Biológico de Residuos Sólidos Urbanos
Fuente: [25]

El porcentaje de rechazo en una planta tipo de estas características, la planta de tratamiento del ayuntamiento de Vitoria – Gasteiz, es ciertamente considerable: el **52,5%**. En el caso específico del Ecovertedero de Zaragoza se estima una cantidad por encima del 40% [6].

Si bien el tratamiento habitual de dicha “fracción resto” o “rechazo” era su deposición en vertedero y la incineración con o sin recuperación de energía, hoy en día varios países de la Unión Europea han intensificado sus acciones hacia la disminución de su vertido por los beneficios que representan, principalmente, en el tema de impactos ambientales [24].

La cantidad de esta fracción depende principalmente, de las estrategias de gestión y las operaciones de tratamiento de los residuos sólidos urbanos, además de la recogida selectiva y de la concienciación ciudadana. Sin embargo, aún en los países con mayores tasas de reciclaje, la “fracción resto” supera ampliamente el 25% del total de RSU producidos [24].

Para la preparación de un CDR/CSR a partir de los rechazos descritos se requiere someterlos, básicamente, a distintos tratamientos para adecuar y texturizar el tamaño de las partículas, eliminar impropios de diversa naturaleza y reducir su humedad. De las especificaciones que se soliciten al material de salida dependerá el tipo de alternativas tecnológicas a utilizar. A continuación se presenta el diagrama general para la producción de CDR/CSR [25]:

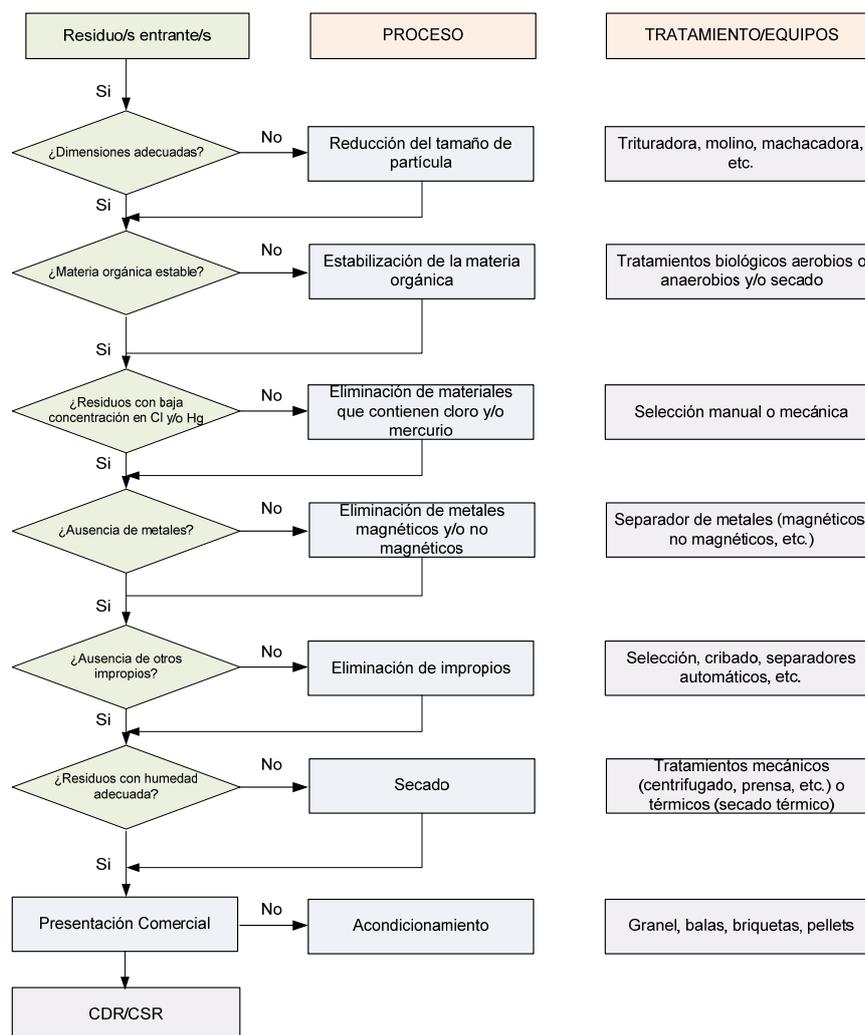


Figura 6. Procesos y tratamientos generales para la producción de CDR/CSR
Fuente: [25]

La producción de dichos combustibles debe adaptarse a los usos previstos, corrigiendo determinados parámetros de calidad en cada caso concreto.

A modo de ejemplo, en el esquema de proceso de fabricación de CSR de la planta de CESPA en Andalucía se observa que se puede obtener un **28,5%** (en masa) **de CSR** del total de la fracción de rechazo del tratamiento de RSU. En el caso de la planta de producción de CDR/CSR del ayuntamiento de Vitoria – Gasteiz se estima que es posible obtener alrededor de un **49% de CSR**. La siguiente figura muestra lo mencionado:

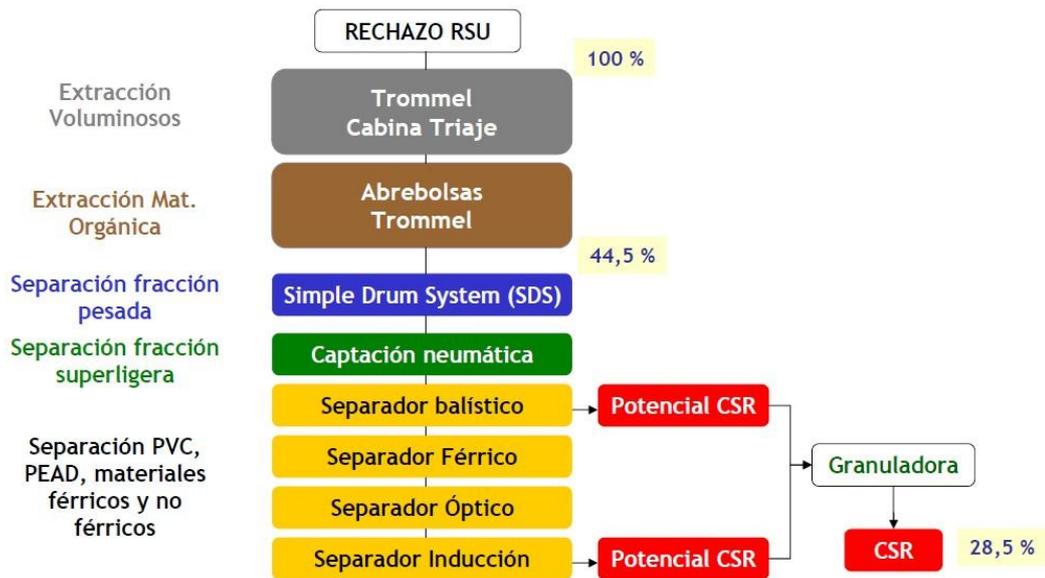


Figura 7. Esquema de fabricación de CSR de la planta de CESP A en Andalucía (50.000 t/año)
Fuente: [28]

1.2.3. Situación de los CDR en España

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad en España no existe como tal una demanda de CSR producido bajo especificación técnica CEN/TS 15359, sino una demanda emergente y creciente de CDR dirigida principalmente para su uso en pantas cementeras. Sin embargo, el Comité Técnico de Normalización de Combustibles Sólidos Recuperados AEN/CTN 301 genera una gran expectación entre empresas e instituciones reflejando el gran interés que tiene este tipo de combustible para muchas industrias.

En España, el consumo de energía procedente de RSU en relación al consumo total de energías renovables aún es muy bajo (4%) como se muestra en la siguiente Figura:

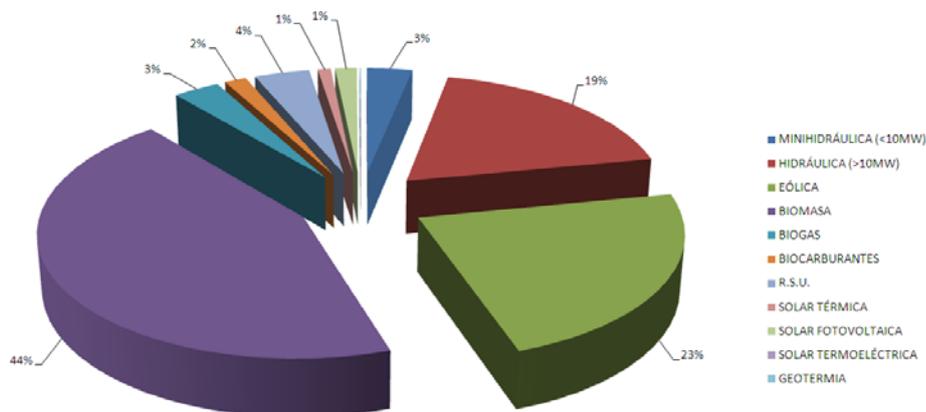


Figura 8. Consumo de energías renovables en España 2007 (ktep)
Fuente: IDAE

La obtención de CDR a partir de residuos sólidos urbanos, ha registrado un crecimiento en España en los últimos años. El Real Decreto 653/2003² sobre incineración de residuos y los planes de residuos que tienden a valorizar los mismos, han tenido importancia en el desarrollo de esta práctica. Desde hace varios meses en España, algunas empresas cementeras han comenzado una serie de pruebas con CDR, por ejemplo, con el tipo de combustible que ha sido registrado en Europa con el nombre de Enerfuel.

Enerfuel es un combustible procedente de residuos sólidos urbanos cuyo destino final era el vertedero. Actualmente, varias empresas que cumplen el papel de Gestores de Residuos, se dedican a la producción de CDR para plantas cementeras. De forma general, las características de este combustible son las siguientes:

² Real Decreto 653/2003 de 30 de mayo sobre incineración de residuos. BOE 14 de Junio de 2003. Se aplica a incineradoras y co-incineradoras cuya finalidad sea la generación de energía o la fabricación de productos materiales y que utilice residuos como combustible habitual o complementario, o bien elimine residuos mediante tratamiento térmico.

Tabla 3: Características de CDR obtenido de residuos sólidos urbanos en España
Fuente: [13]

| Parámetro | Valor | Unidad |
|---------------------|---------|--------|
| Tamaño | 30 - 50 | mm |
| Poder Calorífico | 15 - 20 | MJ/kg |
| Contenido de ceniza | 10 | % |
| Humedad | 10 - 30 | % |
| Azufre | ≥ 0,1 | % |
| Metales pesados | < 500 | ppm |

La composición media de este CDR utilizado en plantas cementeras se presenta a continuación:

Tabla 4: Composición media de CDR
Fuente: Ficha de seguridad CDR - Recicladors Vicente Mallén S.L.

| Categoría | Composición media (%) |
|---------------------------|-----------------------|
| Restos de comida y poda | 16,84 |
| Celulosa sanitaria | 4,23 |
| Papel y cartón | 32,15 |
| Plásticos | 22,20 |
| Vidrio | 1,13 |
| Tetrabrick | 2,03 |
| Madera | 3,25 |
| Calzado | 1,41 |
| Textiles | 7,91 |
| Goma, caucho y cuero | 0,60 |
| Metales | 4,39 |
| RP's | 0,15 |
| Tierra, cenizas, cerámica | 1,42 |
| Otros | 2,29 |

Se observa como más de la mitad de su composición la forman papel, cartón y plásticos. De ellos, el papel y cartón serían consideradas biomasa neutra en la contabilidad de emisiones de CO₂.

1.3 Valorización energética en hornos de clínker de cemento

1.3.1. Proceso de producción de Cemento

De acuerdo a la Norma DIN 1164, el cemento es un conglomerante hidráulico para mortero y hormigón, finamente molido, constituido esencialmente por compuestos de óxidos de calcio junto con óxidos de silicio, aluminio y hierro, obtenidos por sinterización o fusión. [16].

De acuerdo al proceso previo del material antes de su entrada al horno de clínker, se distinguen cuatro tipos de fabricación de cemento: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda y vía húmeda. Siendo que la fabricación de cemento por vía seca es la más empleada en España, a continuación se explicarán las operaciones más importantes de dicho proceso [1], [2]:

- **Molienda de crudo:** los materiales crudos se secan y se muelen finamente en los molinos de crudo formando un producto intermedio llamado “harina cruda”.
- **Silos de homogenización:** la harina cruda es almacenada en los silos de homogenización en los cuales se reduce la variación química del material. Esta etapa del proceso es importante ya que proporciona mayor uniformidad en la calidad del producto posterior al proceso de sinterización.
- **Pre calcinador:** la harina cruda se somete a una serie de etapas de intercambio de calor con los gases de escape del horno rotativo. Ésta ingresa por la parte superior de la torre y desciende por la misma mientras los gases de escape ascienden a contracorriente. El flujo de gases y el material son separados por una serie de ciclones después de cada etapa de intercambio de calor. La temperatura de la harina cruda incrementa desde los 80°C hasta los 1.000 °C en aproximadamente 40 segundos.
- **Horno rotativo:** el material proveniente de la torre de intercambio de calor ingresa en el horno y se somete a un proceso de calcinado. La temperatura del material asciende hasta 1450°C, en la cual las matrices de los minerales de la materia prima son totalmente destruidas formando el “clínker”. En un apartado posterior se describirán de forma detallada las reacciones que ocurren dentro del horno rotativo, por ser éste el corazón del proceso y objeto de estudio del presente proyecto.
- **Proceso de enfriado del clínker:** el clínker que sale del horno a 1.400°C es enfriado rápidamente mediante un flujo de aire frío para bajar su temperatura hasta 100°C formándose el estado vítreo del material. La velocidad de enfriamiento afecta a las propiedades finales del cemento, por lo que el control de esta etapa del proceso es crítico. El aire caliente se recicla como aire secundario para la combustión en el horno o en el pre calcinador.

- **Molienda de cemento:** Por último, tiene lugar la molienda final en la cual se produce la transformación del clínker a cemento. Dicho clínker debe ser pulverizado junto con yeso, como retardador de fraguado, caliza y otras adiciones.

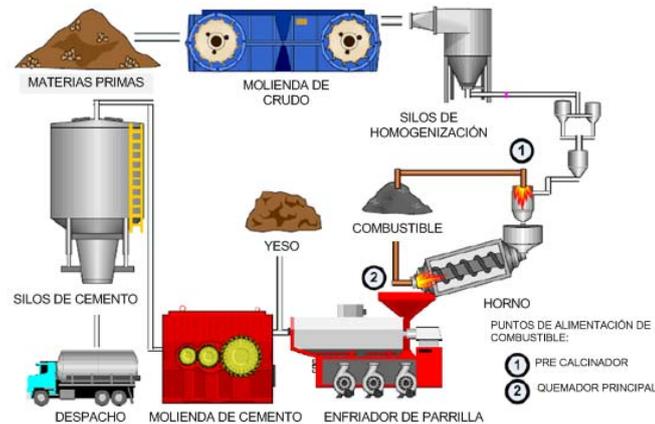


Figura 9. Diagrama del proceso de producción de Cemento
Fuente: [1]

Desde el punto de vista del presente proyecto, se considera el horno rotativo como una etapa crítica en el proceso de fabricación del cemento, ya que en él se lleva a cabo la combustión.

El proceso de formación de clínker requiere que el material mantenga una temperatura de 1.400 a 1.500 °C, lo que supone una temperatura de llama de 2.000 °C. El aire primario, junto con el combustible, es inyectado por la parte inferior del horno y el aire secundario se incorpora mediante unos ventiladores de tiro forzado en la parte superior del mismo.

Desde la zona de combustión, los gases atraviesan el horno a contracorriente al avance del crudo, de este modo, se aumenta la eficiencia energética del proceso. Los gases, antes de ser expulsados a la atmósfera, pasan por un sistema de limpieza de partículas (precipitadores electrostáticos o filtros de mangas). Actualmente, el consumo energético por kg de clínker producido se encuentra entre las 700 y 900 kcal/kg (electricidad y transporte no incluidos).

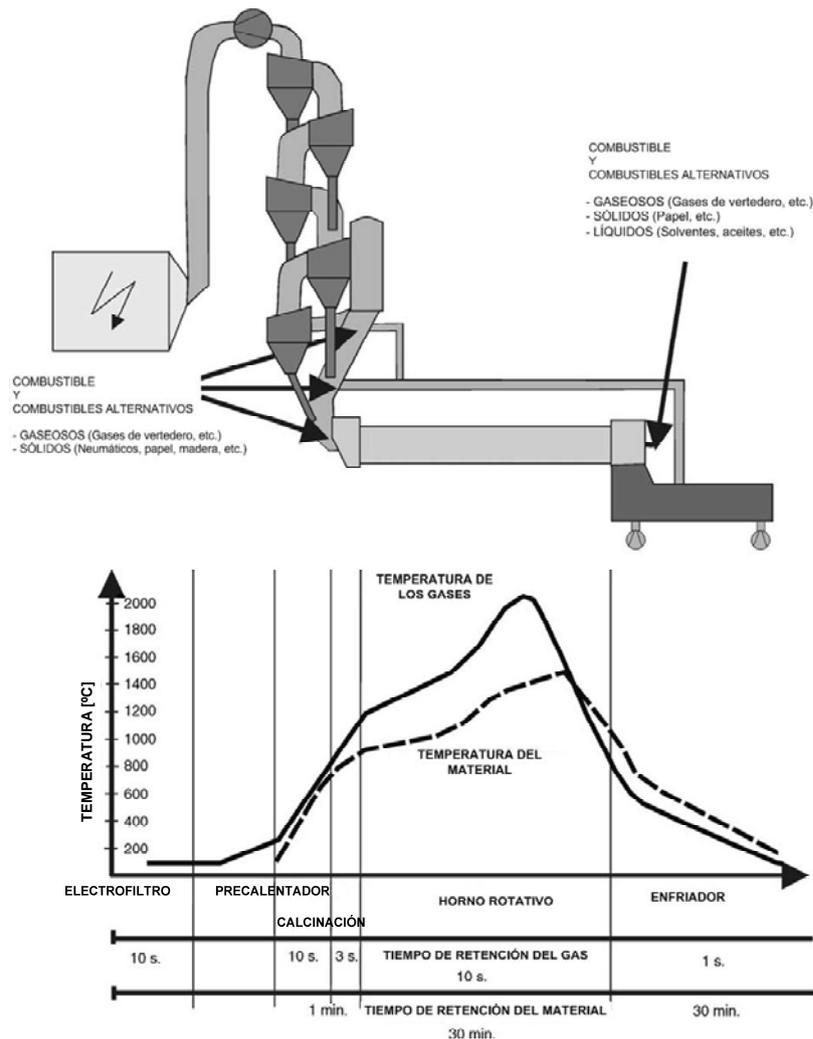


Figura 10. Diagrama de las temperaturas de los gases y materiales en el horno de Cemento
Fuente: [19]

En la figura anterior se observa la evolución de la temperatura de los gases y el material dentro del horno de Cemento. Asimismo, se observan los tiempos de residencia en cada una de las etapas, desde los electrofiltros hasta el enfriador. Por otra parte, se representan los dos puntos de alimentación de combustible, tanto en la llama principal como en el pre calcinador.

1.3.2. Operación con combustibles alternativos

La producción de cemento es un proceso intensivo en energía. Alrededor del 30% a 40% de los costos de producción (excluyendo costos de capital), pertenecen al consumo de energía. Tradicionalmente, la mayoría de los hornos de cemento utilizan el carbón y el coque de petróleo

como combustible primario y, en menor medida, gas natural y fuelóleo. Además de estos combustibles convencionales, la industria cementera utiliza diversos tipos de residuos como combustibles alternativos [10].

La selección de los combustibles alternativos se ve afectada por diversas consideraciones que incluyen [10]:

- Impacto en las emisiones de CO₂ y en el consumo de combustible.
- Impacto en el costo del combustible
- Impacto en otras emisiones
- Impacto en la actividad minera y canteras

La sustitución de los combustibles fósiles por combustibles alternativos es una práctica ya desarrollada en algunos países desde hace casi 30 años. Los combustibles alternativos incluyen materiales tales como: neumáticos usados, harinas de carne y hueso, grasa animal, plásticos, residuos de envases, residuos de madera, aserrines, papel, cartón, lodos (fibra de papel, aguas residuales), residuos orgánicos y de agricultura, lodos de carbón, residuos de destilación, aceites usados, disolventes usados y otros [10].

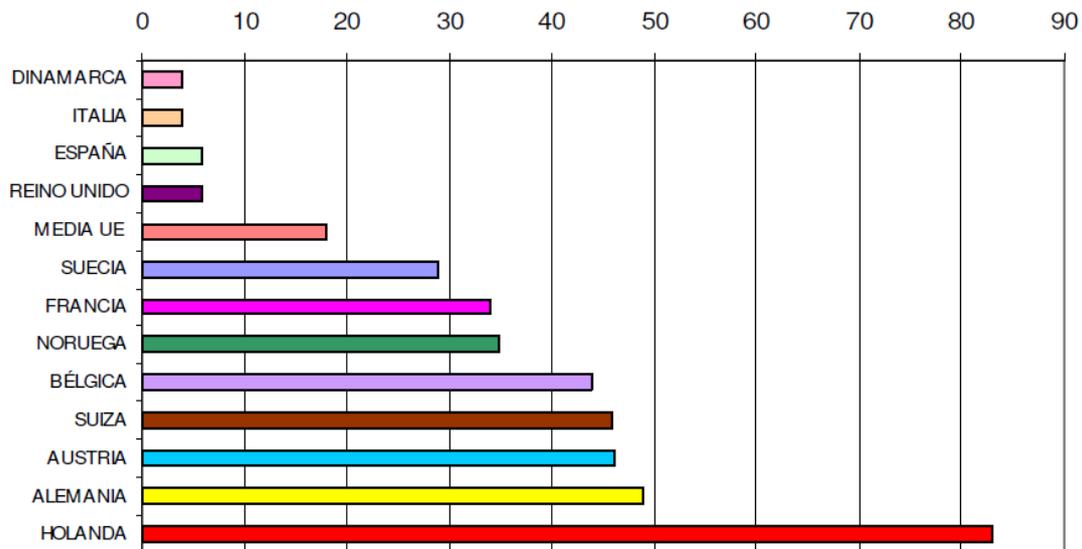


Figura 11. Porcentaje de sustitución de combustibles fósiles por residuos en la Unión Europea (2007): 18%
Fuente: [29]

El empleo de combustibles alternativos es una práctica asentada en la mayoría de los países desarrollados. Destacan por el nivel de sustitución con residuos: Suiza, Holanda, Austria, Francia, Bélgica, Alemania y Japón. El nivel de sustitución en la industria cementera de la Unión Europea mantiene una tendencia creciente. Aproximadamente el 68% de las fábricas de clínker emplean combustibles alternativos con un consumo total equivalente a 3,5 millones de toneladas de carbón [2].

En la siguiente figura podemos ver la evolución de la valorización energética en la industria cementera española, que aún siguiendo una evolución creciente, no alcanza los niveles encontrados en otros países europeos:

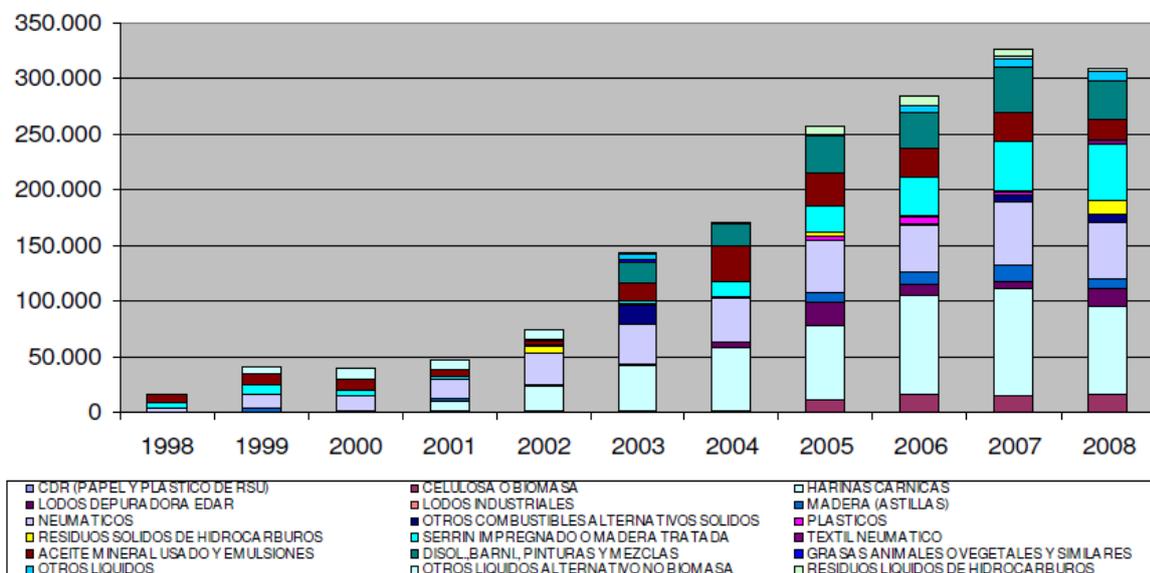


Figura 12. Utilización de combustibles alternativos en toneladas en las cementeras españolas
Fuente: [29]

1.3.3. Valorización energética con CDR/CSR a partir de RSU

Cuando se elige la mejor opción para el destino de la “fracción resto” de los RSU la valorización energética es una de las alternativas más interesantes. Los CDR/CSR obtenidos de dicha fracción resto de los RSU contienen un alto poder calorífico y pueden ser utilizados en plantas tecnológicas (principalmente hornos de cemento) con el fin de recuperar energía útil. Debido a los requerimientos de energía de los hornos de cemento, estas plantas, en principio parecen ser ideales para la destrucción térmica de los residuos sin causar impactos adversos en el medio ambiente [8].

Austria, Bélgica, Dinamarca, Italia y Holanda son ejemplos de países en los cuales se emplea CDR/CSR proveniente de RSU en los hornos de cemento.

Para la valorización energética en hornos de cemento, los combustibles alternativos obtenidos de RSU, deben ser examinados tomando en cuenta las siguientes propiedades [19], [17]:

- Estado físico del combustible (sólido, líquido, gaseoso)
- Toxicidad (compuestos orgánicos, metales pesados)
- Composición en elementos problemáticos para la corrosión y escorificación (Na, K, Cl, S) y contenido de cenizas.
- Contenido de volátiles
- Poder calorífico
- Propiedades físicas (tamaño de partícula, densidad, homogeneidad)
- Propiedades de molienda
- Contenido de humedad

En relación a las características que los residuos deben cumplir para ser valorizados energéticamente, existen muchas referencias en la bibliografía estudiada. Las características varían según el residuo y los elementos que este contiene. Asimismo, los requerimientos se ven influenciados por las características tecnológicas de la instalación en cuestión y por las cantidades de metales u otros elementos presentes en las materias primas naturales. Respecto al poder calorífico, los niveles mínimos establecidos tienen el objeto de optimizar el proceso de combustión en el horno de clínker. Sin embargo, en ocasiones son puramente descriptivas y no responden a una limitación de proceso. De este modo, se debe tomar en cuenta los requerimientos técnicos específicos de cada planta cementera a la hora de hacer el estudio de valorización de un residuo.

Desde el punto de vista medio ambiental, el proceso de fabricación de clínker no genera residuos ni vertidos de agua. Las emisiones a la atmósfera provienen del proceso de combustión dentro el horno de cemento y tienen su origen en las reacciones químicas y físicas de la calcinación de las materias primas. El paso de los gases de combustión por los ciclones, donde transmiten parte

de su calor al la harina cruda descarbonatada, produce un importante efecto de lavado de gases. De este modo, se limpian en gran medida la presencia de gases ácidos y metales pesados. Es importante tener en cuenta que todas estas emisiones son controladas de acuerdo a la Normativa y permanecen muy por debajo de los límites que garantizan la calidad ambiental [2], [20].

La co-combustión de CDR/CSR en los hornos de clínker no debe perjudicar el comportamiento ambiental de la instalación, dificultar la operación del proceso, ni afectar la calidad del cemento. En general, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones [2], [20], [21]:

- Se requiere que los gases de combustión permanezcan más de 2 segundos por encima de 850°C, o por encima de 1.100 °C en presencia de cloro, para evitar la formación de dioxinas y furanos. Por las características de la combustión, en el horno de clínker se duplican las temperaturas necesarias para la destrucción de estos compuestos, y los gases tienen tiempos de residencia relativamente largos (Figura 11).
- Respecto al cloro, estudios realizados por diferentes organismos han demostrado que se debe limitar su presencia en el combustible (por debajo del 1% en peso), ya que puede producir problemas de pegaduras y atascos en los ciclones.
- La fracción inorgánica y los metales pesados se combinan con el clínker de cemento incorporándose a su estructura mineralógica. De este modo quedan fijados químicamente y reducen el potencial de lixiviación de metales pesados al medio acuoso.
- Los metales más volátiles (Hg, Tl), en cierta medida, escapan a la acción del horno y pueden ser emitidos parcialmente a la atmósfera. Por tanto, su contenido en el combustible debe estar sujeto a limitación y control.

Los límites de emisión en España se fijan en el Anexo II del Real Decreto 653/2003 sobre incineración de residuos. En la siguiente Tabla, se establecen los límites de emisión a la atmósfera para las cementeras que realicen valorización energética de combustibles alternativos en sus hornos:

Tabla 5: Valores límite de emisión totales para hornos de cemento que co-incineren residuos
Fuente: [21]

| Contaminante | | Concentración límite de emisión (mg/Nm ³ , salvo indicación) |
|--------------------|---|---|
| Partículas totales | | 30 (50 [*]) |
| NO _x | | 800 (500 ^{**}) (1200 [*]) |
| SO ₂ | | 50 (^{***}) |
| COT | | 10 (^{***}) |
| HCl | | 10 |
| HF | | 1 |
| Dioxinas y furanos | | 0,1 ng I-TEQ/Nm ³ |
| Metales pesados | Cd + Tl | 0,05 |
| | Hg | 0,05 |
| | Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 |

Notas:

(*) La Comunidad Autónoma podrá aplicar ese límite hasta el 1 de Enero de 2008 a las instalaciones que quemen menos de 3 toneladas/hora de residuos.

(**) Límite para hornos de cemento de nueva construcción

(***) La comunidad Autónoma podrá autorizar exenciones en los casos en que el COT y el SO₂ no procedan de la combustión de residuos

Desde el punto de vista medioambiental las emisiones de CO₂ tienen una importancia significativa. Su reducción representa un aspecto clave en el uso de combustibles alternativos dentro de los compromisos adoptados por los estados Europeos para cumplir el protocolo de Kioto. Si bien el ahorro de emisiones es evidente cuando se usan residuos de biomasa, es posible reducirlas con el empleo de otro tipo de residuos. La siguiente figura muestra claramente lo mencionado:

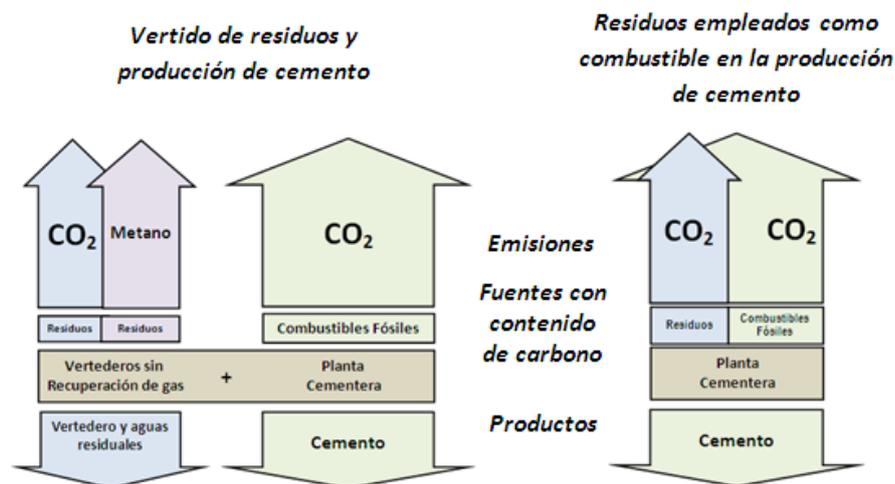


Figura 13. Reducción de las emisiones globales con la valorización
Fuente: [2]

Para cuantificar dichos ahorros es necesario hacer un estudio de análisis de Ciclo de Vida que incluya las operaciones realizadas para el tratamiento de los residuos. Tomando como referencia el estudio realizado por G. Genon y E. Brizio [8], el uso de CDR en el horno de clínker de cemento indica ser positivo. La combustión de CDR en el horno permite una reducción de alrededor de **1,61 kg de CO₂ por kg de CDR** empleado comparando con el uso de combustibles tradicionales, en este caso el carbón.

Por último, cabe señalar que de acuerdo con la **Decisión 589/2007 de la Comisión**, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la **Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo**, las emisiones derivadas de la combustión de la fracción biomásica contenida en los CDR/CSR son consideradas neutras en la contabilización de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Se ha demostrado que la co-combustión de CDR/CSR y carbón en hornos de cemento presenta varias **ventajas** [1]:

- Alta temperatura (alrededor de 1.800°C en el quemador principal y 1.000°C en el precalcinador) y largos tiempos de residencia (5-6 segundos a 1.800°C y 2-6 segundos a > 800°C) en combustión completa
- Proceso de auto limpieza de gases ácidos en el precalentador de ciclones, ya que este se convierte en un sistema altamente efectivo para los gases de combustión que cruzan a contracorriente por un lecho de cal.
- No existen cenizas, éstas se derriten y se convierten en parte del producto final.

Además, basado en consideraciones técnicas y medioambientales, se puede decir que la valorización de dichos combustibles en el horno de cemento no requiere una tecnología especial excepto en el sistema de manipulación y alimentación al horno.

CAPÍTULO 2.

CASO DE ESTUDIO: el ECOVERTEDERO de Zaragoza

2.1. Caracterización de la fracción resto

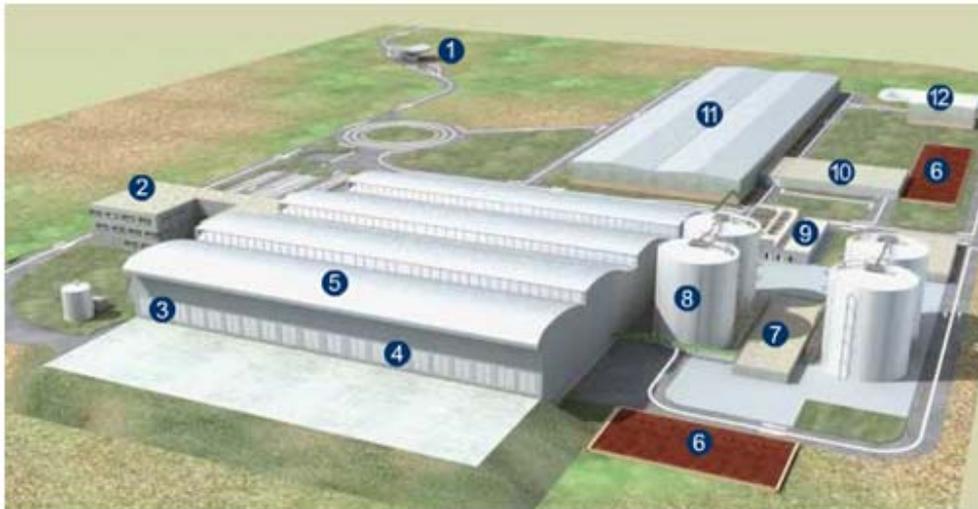
2.1.1. Origen del residuo

El Centro de Reciclaje Zaragoza o “Ecovertedero” presta servicio a más de 750.000 habitantes correspondientes al municipio de Zaragoza más 61 municipios de otras comarcas.

El Ecovertedero tiene una capacidad para procesar 450.000 toneladas al año de RSU y más de 15.000 toneladas de envases (provenientes de los contenedores verdes y amarillos de la ciudad). Del total de RSU que llegan a la planta de tratamiento se puede obtener alrededor de 27.500 toneladas de materiales recuperados, asimismo, la planta de biometanización es capaz de producir 10 millones de metros cúbicos de biogás y 20.000 toneladas de compost al año. Posterior a la producción de compost proveniente de la biometanización, al vertedero de rechazos se envía alrededor del 45% de todos los residuos que llegan al centro de reciclaje [6], [7].

Actualmente, si bien el Ecovertedero evitaría la deposición en vertedero de alrededor de 150.000 toneladas de residuo al año, aún se vierte casi la mitad del total de residuos que recibe.

De manera general, las operaciones que se realizan en el Centro de Reciclaje Zaragoza son las siguientes [6]:



Notas:

- | | |
|--|--|
| 1 Control y báscula | 7 Área de preparación de biometanización |
| 2 Administración y aula medioambiental | 8 Digestores de biometanización |
| 3 Área de recepción de envases | 9 Planta de cogeneración |
| 4 Área de recepción de restos de RSU | 10 Túneles de compostaje |
| 5 Nave de tratamiento primario, clasificación y separación | 11 Nave de maduración y afino de compost |
| 6 Biofiltros | 12 Área de tratamiento de restos de animales |

Figura 14. Plano de distribución del Centro de Reciclaje Zaragoza

Fuente: [6]

- **Control y báscula:** todos los vehículos que ingresan al Centro son pesados para conocer la cantidad de residuos. Además, se realiza un control de la procedencia y naturaleza de los mismos. Dentro del Centro los vehículos se dirigen a las áreas de tratamiento designadas para cada tipo de residuos.
- **Tratamiento primario:** los residuos son descargados en los fosos de recepción. Posteriormente, las cuatro líneas de tratamiento (capacidad 25 ton/hora) son alimentadas a través de unos “pulpos” mecánicos. En cada una de las líneas se procede a la separación de los residuos voluminosos de la materia orgánica. A continuación, se realiza la selección de subproductos reciclables como papel y cartón, bricks, plásticos, materiales férricos y aluminio entre otros.
- **Biometanización:** a través del proceso de fermentación anaeróbica de la materia orgánica, se obtiene biogás. Este es transformado en electricidad y energía térmica en el

área de Cogeneración. La generación de energía eléctrica es destinada al autoconsumo en el propio complejo y los excedentes son exportados a la red eléctrica.

- **Compostaje:** La materia obtenida posterior al proceso de biometanización es deshidratada y mezclada con una fracción vegetal. A través de un proceso de maduración y afino se obtiene compost de valor comercial.
- **Planta de clasificación y separación de envases:** en esta se selecciona y se realiza el tratamiento de la recogida de envases ligeros para su reciclaje. Dichas operaciones se realizan mediante las especificaciones marcadas por los Sistemas Integrados de Gestión.

A parte de las operaciones mencionadas, se cuenta con las áreas de tratamiento de voluminosos (muebles y enseres), lixiviados, procesado de restos de animales, laboratorios, oficinas y un área de pasarela didáctica y control.

De este modo, siendo que la capacidad de procesamiento del Ecovertedero es de 450.000 toneladas al año de RSU, la fracción rechazo estimada corresponde alrededor del 45%, lo que representa 202.500 toneladas anuales. Dicha proporción se asemeja a porcentajes de rechazo en instalaciones de similares características. Así, una vez mencionadas las especificaciones de los procesos descritos y haciendo referencia a instalaciones similares (Figura 4 y Figura 5), es posible hacer una caracterización de la fracción resto procedente de los RSU que son tratados en el Ecovertedero.

En el apartado 1.2.2 se clasificaron los rechazos procedentes de las operaciones más importantes de la planta de tratamiento mecánico – biológico de RSU del ayuntamiento de Vitoria – Gasteiz: triaje primario, clasificación y triaje, y afino (trómel y mesa densimétrica).



Rechazo del triaje de primario:

Antes de entrar en la línea de clasificación mecánica. Formada principalmente por voluminosos (~5% de la entrada)



Rechazo de clasificación y triaje

Constituye la principal fracción de rechazo (~29% de la entrada)



Rechazo de Afino

del biorresiduo estabilizado, obtenido en el tratamiento biológico de la fracción orgánica (~19% de la entrada)

A continuación se presentan las composiciones cuantitativas y cualitativas de las fracciones mencionadas [25]:

Tabla 6: Composición cuantitativa de los rechazos obtenidos del tratamiento mecánico – biológico de RSU
Fuente: [25]

| Material | Voluminoso [%] | Clasificación y triaje [%] | Trómel afino [%] |
|----------------------------|----------------|----------------------------|------------------|
| Materia orgánica | 2,0 | 3,6 | 26,5 |
| Papel – cartón | 1,6 | 22,6 | 5,4 |
| Celulosa sanitaria | 0,2 | 11,3 | 1,4 |
| Plásticos | 14,4 | 25,9 | 34,0 |
| Brick | 0,06 | 3,0 | |
| Madera | 12,5 | 3,8 | 0,0 |
| Cueros y textiles | 50,0 | 15,9 | 4,1 |
| Cauchos y gomas | 1,6 | 0,1 | 0,0 |
| Vidrio | 0,2 | 0,0 | 10,1 |
| Metales férricos | | 3,1 | 1,6 |
| Metales no férricos | 1,5 | 0,4 | 1,1 |
| Peligrosos del hogar | 0,0 | 0,1 | 0,2 |
| Voluminosos ⁽¹⁾ | 7,6 | 0,9 | 0,0 |
| Inertes | 3,4 | 0,9 | 5,2 |
| Otros | 5,0 | 8,3 | 10,4 |

Notas:

1) Pertencientes al registro de aparatos eléctricos y electrónicos

Tabla 7: Composición cualitativa de los rechazos obtenidos del tratamiento mecánico – biológico de RSU

Fuente: [25]

| | Voluminoso | Clasificación y triaje | Trómel afino |
|--|------------|------------------------|--------------|
| Densidad aparente [kg/m ³] | 70 | 60 | 285 |
| Humedad [%] | 20,8 | 48,0 | 13,25 |
| PCI (valor medio) [Kcal/kg] | 4.125 | 3.900 | 4.120 |
| C [%] | 44,5 | 40,0 | 36,6 |
| Cloro [ppm] | 1.950 | 7.500 | 1.710 |
| Hg [mg/kg] ms | 0,13 | 0,14 | 0,70 |
| Cd [mg/kg] ms | <0,1 | 0,2 | 1,0 |
| Pb [mg/kg] ms | 20 | 23 | 44,5 |

A partir de las composiciones cuantitativas como cualitativas de las fracciones de rechazo mencionadas, se hacen las siguientes consideraciones:

- La fracción de voluminosos cuenta con una composición muy variable y heterogénea, bajo contenido de materia orgánica y alto PCI por su contenido mayoritario de madera, plásticos, cueros y textiles.
- La fracción proveniente de la clasificación y triaje presenta, también, una composición variable y heterogénea. Se destaca por su alto PCI debido a su composición mayoritaria de papel, cartón, celulosa sanitaria, plásticos y textiles. Cabe destacar que posee una alta humedad y se constituye como la mayor fracción de rechazo.
- La fracción proveniente del trómel y mesa densimétrica posee un alto contenido de materia orgánica, además de una composición variada y heterogénea. La presencia de dicha materia orgánica seca y estabilizada permiten alcanzar un alto PCI. Por otra parte, su baja humedad se destaca en comparación a las otras fracciones de rechazo.

2.1.2. Valorización energética de CDR/CSR: ventajas y limitaciones

Desde el punto de vista de los efectos globales de la valorización energética de CDR, un report de la Comisión Europea (2003)³ muestra la contribución de una unidad de CDR, suministrada en la

³ EUROPEAN COMMISSION – DIRECTORATE GENERAL ENVIRONMENT
Refuse Derived Fuel Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), Final Report

combustión de un horno de cemento, sobre el calentamiento global, el smog fotoquímico, la acidificación y el consumo de recursos fósiles. La siguiente Tabla refleja lo mencionado:

Tabla 8: Resultado de la evaluación de impacto de quemar 1 [mg] de CDR en un horno de Clinker de cemento
Fuente: [8]

| Categoría de Impacto | Unidad | CDR | Carbón |
|--|-------------------------|----------|----------|
| <i>Consumo de recursos fósiles</i> | | | |
| Petróleo crudo | kg | 2,17E+01 | 2,28E+01 |
| Gas natural | kg | 8,34E+00 | 5,50E+00 |
| Hulla | kg | 3,70E+01 | 5,84E+02 |
| Lignito | kg | 1,05E+02 | 5,38E+01 |
| Total (Demanda de energía acumulada) | kJ | 3,17E+06 | 1,78E+07 |
| <i>Calentamiento Global</i> | | | |
| CO ₂ (Fósil) | kg | 2,46E+03 | 3,93E+03 |
| CH ₄ | kg | 7,46E-01 | 7,41E+00 |
| N ₂ O | kg | 1,53E-02 | 1,01E-02 |
| Potencial de Calentamiento Global (GWP) | kg CO ₂ – Eq | 2,48E+03 | 4,09E+03 |
| <i>Contaminación del aire (Summer smog)</i> | | | |
| CH ₄ | Kg | 7,46E-01 | 7,41E+00 |
| Compuestos orgánicos volátiles sin metano (NMVOC) | Kg | 3,63E-01 | 6,08E-02 |
| NO _x | Kg | 6,85E+00 | 7,21E+00 |
| Nitrógeno corregido potencial de formación fotoquímica de ozono (NCPOCP) | kg | 1,03E+00 | 7,89E-01 |
| <i>Acidificación</i> | | | |
| SO ₂ | kg | 1,01E+00 | 1,00E+00 |
| NO _x | kg | 6,85E+00 | 7,21E+00 |
| NH ₃ | kg | 6,16E-02 | 9,55E-04 |
| HCl | kg | 3,36E-02 | 2,05E-02 |
| HF | kg | 4,51E-03 | 2,46E-03 |

Cabe señalar que estos resultados toman en cuenta los diferentes pasos en el uso de CDR desde la producción hasta su utilización. Si se toman en cuenta las emisiones de CO₂ equivalentes, la valorización de CDR en los hornos de clínker significa una **reducción de 1,61 kg de CO₂ por kg de CDR**, comparado con el carbón. Esto se debe básicamente a la composición química del combustible [8].

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, también existen ventajas en parámetros como el NO_x y SO_x, debido a la composición química de los combustibles y a las condiciones de combustión del horno. El beneficio derivado del uso de CDR está cuantificado por la Comisión Europea (2003) como 0.36 kg NO_x/t de CDR quemado [13], [8].

Para el uso de CDR/CSR en el proceso de producción de clínker de cemento se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones [19]:

- Limitaciones técnicas relacionadas con el volumen de CDR que debe alimentarse simultáneamente al horno. El volumen del combustible depende de la efectividad de la superficie de incineración del horno, es decir, del largo y la capacidad del mismo.
- La propuesta del uso CDR/CSR requiere que se considere la baja densidad del mismo en comparación con los combustibles convencionales. Tomando en cuenta los costos de transporte y almacenamiento por unidad de calor producido, el costo asociado a dichos combustibles por estos conceptos es mayor frente al coque o el carbón.
- En el caso del porcentaje de sustitución de combustible se ha demostrado según [1] que existe un límite superior en el consumo de combustibles derivados de residuos de no más del 30 % en términos de energía con el fin de no incrementar los niveles de emisión como gases ácidos, dioxinas y furanos, etc.

Adicionalmente, se deben tomar en cuenta los problemas de operación presentados en la valorización de Biomasa en la instalación mencionada [18]:

- El transporte neumático es muy dependiente del tamaño de la Biomasa y la cantidad de fibra. En ambos casos presenta problemas de atascos
- Debido a la humedad variable del material, la energía obtenida también es variable
- Variaciones en la longitud de la llama
- Problemas de apelmazamiento en el silo, falta de suministro y ausencia de una trituradora en las instalaciones de la planta.

CAPÍTULO 3.

CONCLUSIONES

Haciendo referencia a las fracciones de rechazo que se obtienen del tratamiento mecánico – biológico de los RSU, se puede extraer las siguientes conclusiones:

- La fracción de voluminosos es parcialmente recuperable para la producción de CDR/CSR. Únicamente se pueden aprovechar la fracción que contiene madera, plástico y textiles, previo proceso de selección y triaje.
- La fracción obtenida de la clasificación y triaje se puede emplear en su totalidad para la producción de CDR/CSR. Debido a su alta humedad, heterogeneidad y contenido de impropios, requiere de un tratamiento intenso de adecuación a los requerimientos finales del combustible.
- La fracción resultante del trómel posee ventajas para su tratamiento debido a su tamaño de partícula y su baja humedad, por cuanto requiere de un proceso menos riguroso de tratamiento para la producción de CDR/CSR.

En el desarrollo del presente proyecto, se ha mencionado que el rendimiento de una planta de producción de CDR/CSR varía entre un 28,5% a un 49% del total de rechazos obtenidos en la planta de tratamiento mecánico – biológica. Tomando en cuenta un rendimiento del 49% que se obtiene en la planta de tratamiento de Vitoria – Gasteiz, se puede estimar que la cantidad potencial de CDR/CSR en el Ecovertedero de Zaragoza es de aproximadamente **99.225 toneladas al año**.

En términos de PCI, se estima que debido al mayor porcentaje de la fracción de rechazo procedente de la clasificación y triaje, seguido de la fracción procedente del trómel, el PCI esperado se situará en torno a las 4.000 kcal/kg correspondiente a 16,74 MJ/kg, adecuado para la operación del horno.

Así mismo, se deben controlar los contenidos en cloro, especialmente en la fracción de clasificación y triaje, con el fin de no pasar el límite de 0,5% o de 5.000 ppm. Cabe señalar que el contenido en cloro determina la tecnología a ser utilizada para la producción de un combustible adecuado a las instalaciones y los requerimientos técnicos del proceso de producción de clínker. En

cuanto al contenido en mercurio, las fracciones se encuentran por debajo de los límites establecidos en la Tabla 10.

Las fracciones combustibles tratadas de los rechazos que se obtienen del tratamiento MTB de RSU se constituyen como un buen combustible desde el punto de vista de su poder calorífico y composición. Sin embargo, para adecuarse a los requerimientos del proceso del horno de cemento es necesario tomar acciones para reducir su humedad, el contenido en cloro y las fracciones inertes de los residuos.

El potencial de composición de CDR/CSR del Ecovertedero se encuentra dentro los estándares mencionados en el presente proyecto y, por lo tanto, representa una oportunidad de aprovechamiento con el fin de reducir el consumo de combustibles convencionales en la producción de clínker de cemento y por ende de los impactos asociados a su consumo.

La “fracción resto” del Ecovertedero posee características óptimas para ser procesada y convertida en CDR/CSR para su valorización energética en el horno de clínker de Morata de Jalón. En cuanto a los contenidos de metales pesados se debe hacer hincapié en la recogida selectiva de materiales peligrosos y la reducción de los mismos en los materiales que constituyen los envases.

La valorización energética de CDR/CSR en hornos de clínker de cemento permite recuperar la energía contenida en los RSU como forma de valorización complementaria al reciclaje y compostaje de los residuos recogidos selectivamente. Asimismo, es la opción más sensata para aprovechar un recurso que en su mayor parte es renovable por su contenido de fracción biodegradable. En cualquier caso, debe recurrirse únicamente a la valorización energética tras agotar los escalones anteriores en la jerarquía de gestión de residuos. Como se observó anteriormente, los países con mayor tasa de reciclaje aún poseen una fracción de rechazo que bien se ha demostrado es posible valorizar energéticamente.

Durante el desarrollo del presente proyecto se han detallado las ventajas principales que favorecen la valorización energética de CDR/CRS en hornos de cemento. Asimismo, se han descrito los aspectos técnicos importantes a ser tomados en cuenta para el uso de dichos combustibles. Las condiciones favorables que se presentan en el horno de clínker de cemento incluyen tiempos de permanencia de los gases de combustión de más de 2 segundos por encima de 1.100 °C, medio alcalino, atmósfera oxidante, gran superficie de intercambio de calor y buena mezcla de gases y productos. Además, la fracción inorgánica y los metales pesados se combinan con el clínker de

cemento incorporándose a su estructura mineralógica y existe un efectivo sistema de depuración de gases ácidos de combustión al atravesar en contracorriente por un lecho de cal en los precalentadores de ciclones.

La valorización energética es una forma sostenible de aprovechar los recursos energéticos contenidos en los residuos que de otra manera serían despilfarrados mediante el depósito en vertedero, convirtiéndose en un foco de contaminación a largo plazo y obligando a recurrir a los combustibles fósiles como fuente de energía. Esta visión forma parte del enfoque de la Ecología Industrial.

En resumen, existe un potencial energético en el Ecovertedero de $16,6 \cdot 10^8$ MJ/año, contenido en el CDR/CSR que puede ser producido a partir de la “fracción resto” que se sepulta bajo toneladas de tierra en el vertedero. Si comparamos esa cantidad de energía en toneladas de combustible, equivaldría a **51.108,51 toneladas de coque al año**, o a **51.076 litros de gasolina al año**.

En término de emisiones de CO₂, teniendo en cuenta la reducción de 1,61 kg de CO₂ por kg de CDR empleado comparado con el carbón, se evitarían una cantidad estimada de **159.752 toneladas de CO₂ al año**.

Por último, aparte del inmenso potencial de reducción de espacio en vertedero, la reducción de emisiones debidas a su explotación y el aprovechamiento de recursos, desde un punto de vista socioeconómico la producción de CDR/CSR genera impactos positivos por la creación de empleos alternativos en la recolección, transporte y tratamiento de los residuos sólidos urbanos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] NITHIKUL J.
2007 *Potential of Refuse Derived Fuel production from Bangkok Municipal Solid Waste*, Thailand, Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development
- [2] ROMAY M.
2004 *La valorización energética de residuos en la industria Española del cemento*, España, Departamento Técnico y de Medio Ambiente OFICEMEN
- [3] MICÓ LL.
2008 *Planta de selección de envases de Constantí (Tarragona)*, España, Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA), Edición Marzo - Abril
- [4] FUNDACIÓN LABORAL DEL CEMENTO Y EL MEDIO AMBIENTE.
2006 *Valorización de residuos en la industria cementera Europea: estudio comparado*, España
- [5] HOGG D.
2005 *Costs and Benefits of residual waste management options – What should we do?*, UK, Eunomia Research and Consulting Ltd.
- [6] CENTRO DE RECICLAJE ZARAGOZA
2009 “Centro de Reciclaje Zaragoza”. En <http://www.zaragozarecicla.org/principal.htm>, (Accedido en Julio de 2009)
- [7] DATOS DE RECOGIDA Y GESTIÓN DE RESIDUOS URBANOS
2009 “Medioambiente”. En <http://portal.aragon.es/portal/page/portal/MEDIOAMBIENTE>, (Accedido en Julio de 2009)
- [8] GENON G.
2007 *Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF*, Italy, Science Direct Waste Management 28 (2008) 2375-2385
- [9] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
2009 “Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino”. En <http://www.marm.es/>, (Accedido en Julio de 2009)
- [10] STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POPs)

- 2006 *Cement kilns firing Hazardous Waste*, Booklet 3
- [11] PAPAGEORGIOU A. et al.
2009 *Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England*, *Journal of Environmental Management* (2009) 1 – 14
- [12] BANCO PÚBLICO DE INDICADORES AMBIENTALES DEL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
2008 *Cantidades de residuos urbanos recogidos tratadas en las diferentes instalaciones de gestión existentes en España*.
- [13] EUROPEAN COMMISSION – DIRECTORATE GENERAL ENVIRONMENT
2003 *Refuse Derived Fuel Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3)*, Final Report
- [14] CAPUTO A., PELAGAGGE P.
2002 *RDF production plants: I Design and costs*. *Applied Thermal Engineering* 22 (2002) 423 – 437
- [15] GIL J.
2006 *Valoración energética de la fracción combustible de los RSU: Centro de tratamiento integral de residuos “Las Lomas”*. URBASER, España
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.
2009 “Deutsches Institut Für Normung E.V.”. En <http://www2.din.de/index.php?lang=en>, (Accedido en Julio de 2009)
- [17] ELIAS X.
2005 *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Díaz de Santos. Primera Edición. España
- [18] CEMEX
2009 “Experiencias industriales en Ecología Industrial. Valorización de biomasa y residuos en la industria cementera”. En <http://www.cemex.com/>, (Accedido en Julio de 2009)
- [19] MOKRZYCKI E., ULIASZ-BOCHENCZYK A.
2003 *Alternative fuels for the cement industry*, Polonia, *Applied Energy* 74 (2003) 95 – 100
- [20] ALTERNATIVE FUELS

- 2008 *Tunisia: Waste management and the cement industry*. Global Cement Magazine – April Edition
- [21] FUNDACIÓN LABORAL DEL CEMENTO Y EL MEDIO AMBIENTE.
2006 *Reciclado y valorización de residuos en la industria cementera en España*, Instituto Cerdá – España
- [22] REGISTRO ESTATAL DE EMISIONES Y FUENTES CONTAMINANTES
2009 “Registro estatal de emisiones y fuentes contaminantes”. En <http://www.prtr-es.es/informes/pollutant.aspx>, (Accedido en Agosto de 2009)
- [23] INCINERACIÓN DE RESIDUOS EN LAS CEMENTERAS
2009 “Incineración de residuos en las cementeras”. En <http://www.ecologistasenaccion.org/spip.php?article11026>, (Accedido en Agosto de 2009)
- [24] SUÁREZ M., COCA J.
2009 *Procesos para el tratamiento de la fracción resto en la eliminación de Residuos Sólidos Urbanos*. Residuos N° 111, pp 14-25
- [25] ALONSO A.
2009 *Estudio de viabilidad de una planta de producción de CSR en el ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz*. Departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad Ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz
- [26] GUIJARRO C.
2009 *Nuevas tecnologías para valorización de las fracciones combustibles procedentes de los rechazos de las plantas de residuos municipales*. SUFI
- [27] EUROPEAN RECOVERED FUEL ORGANISATION
2009 “Facts and figures about SRF”. En <http://erfo.info/About-Erfo.7.0.html>, (Accedido en Noviembre de 2009)
- [28] RELEA F.
2009 *Calidad del CSR a partir de residuos y su impacto en los usuarios finales*. CESP
- [29] GAMINDE N.
2009 *Combustibles Sólidos Recuperados en cementeras en España*. “Combustibles Sólidos Recuperados (CSR) – Una opción sostenible para España” - 2009

[30] DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD AMBIENTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO

2009 *Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón 2009 - 2015*. Gobierno de Aragón,
Departamento de Medio Ambiente

ANEXO A

Normativa

En España el marco legal general sobre los residuos es la **Ley 10/98 de residuos**. Establece fomentar la jerarquía de residuos mencionada en apartados anteriores. Además, define la valorización como todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos. En este sentido, la **Orden Ministerial MAM/304/2002** por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos, indica que la valorización incluye el uso principal como combustible, por ejemplo en hornos de cemento, y no así la incineración [2].

La ley exige que la valorización de residuos cuente con una autorización autonómica y que el Gobierno juntamente con las comunidades autónomas, establezcan los requisitos de las plantas, procesos y productos de la valorización (se toman en cuenta las exigencias de calidad y la tecnología a emplearse para preservar la salud humana y el medio ambiente). Por otra parte, los poseedores de residuos están obligados a gestionarlos por sí mismos o entregarlos a un gestor para su valorización o eliminación [2].

La utilización de residuos como combustible alternativo en los hornos de clínker es una actividad que se encuentra recogida en el **Real Decreto 653/2003, sobre incineración de residuos**. En el se establecen las condicionantes ambientales con el objetivo de limitar o impedir los efectos negativos para el medio ambiente y los riesgos para la salud humana.

Por otra parte, dentro de la normativa estatal referente a los residuos urbanos, **El Plan nacional de Residuos Urbanos (2.000 – 2.006)**, preveía unos objetivos de valorización de un 9% de estos residuos a finales del 2001 y de un 17,7% a finales de 2006. [21]

Dentro del **Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007 – 2015**, en el cual se encuentra el **Plan Nacional de Residuos Urbanos**, se hace referencia a los objetivos de valorización energética de los porcentajes (%) de la “**fracción resto**” de RSU a partir de los años que se indican en la siguiente Tabla:

Tabla 9: Objetivos de Valorización Energética de los porcentajes (%) de la “fracción resto” de RSU

Fuente: Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007 – 2015

| Tratamiento | 2009 | 2012 |
|--|-------|-------|
| Incineración con recuperación de energía | 4 – 6 | 4 – 6 |
| Valorización energética mediante otras tecnologías | 1 | 4 |

En Aragón, el Plan Integral de Residuos – GIRA (2009 – 2015) no hace referencia explícita a la valorización energética de residuos en instalaciones de producción de cemento, como opción para el tratamiento de residuos. Específicamente para los CDR obtenidos de los RSU, es posible clasificar a los mismos dentro el Catálogo Aragonés de Residuos (CAR) con el código de la Lista Europea de Residuos (LER) 19 12 12. En el mismo, no se toma en cuenta la opción de tratamiento R1: Utilización principal como combustible o como otro medio de generar energía. A continuación se presentan las operaciones de tratamiento posibles para dicho residuo según el CAR:

Tabla 10: Operaciones de tratamiento para la clasificación LER 19 12 12 del Catálogo Aragonés de Residuos

Fuente: Catálogo Aragonés de Residuos

| LER | DESCRIPCIÓN | OPERACIÓN/ TRATAMIENTO | |
|----------|--|------------------------|-------------|
| | | VALORIZACIÓN | ELIMINACIÓN |
| 19 | RESIDUOS DE LAS INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS, DE LAS PLANTAS EXTERNAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA PREPARACIÓN DE AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO Y DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL | | |
| 19 12 | Residuos del tratamiento mecánico de residuos [por ejemplo, clasificación, trituración, compactación, peletización] no especificados en otra categoría | | |
| 19 12 12 | Otros residuos (incluidas mezclas de materiales) procedentes del tratamiento mecánico de residuos distintos en las especificaciones en el código 19 12 11 | R3 – R4 – R5 | D5 – D9 |

Notas:

R3 Reciclado o recuperación de sustancias orgánicas que no se utilizan como disolventes (incluidas las operaciones de formación de abono y otras transformaciones biológicas)

R4 Reciclado o recuperación de metales y de compuestos metálicos

R5 Reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas

D5 Vertido en lugares especialmente diseñados (por ejemplo, colocación en celdas estancas separadas, recubiertas y aisladas entre sí y el medio ambiente, etc.).

D9 Tratamiento fisicoquímico no especificado en otro apartado del presente anexo y que dé como resultado compuestos o mezclas que se eliminen mediante uno de los procedimientos enumerados entre D1 y D12 (por ejemplo, evaporación, secado, calcinación, etc.)

ANEXO B

Estándares Europeos

Como se mencionó anteriormente, la producción y los parámetros de calidad de los CDR/CSR están directamente ligados a los requerimientos de uso final, por lo tanto, la calidad de dichos combustibles puede variar entre los distintos productores de los Estados Miembros causando barreras en su comercialización. Los estándares proporcionan una garantía de calidad asegurando una mayor expansión en el mercado. En términos generales describen las propiedades y composiciones de los combustibles, y los métodos de muestreo y ensayo. De este modo, la estandarización permite abrir el mercado de estos combustibles, ayuda a alcanzar los objetivos medioambientales y climáticos de la UE, y facilita la implementación exitosa de la legislación ambiental en cada Estado Miembro.

En el presente apartado se presenta un resumen de los principales estándares Europeos para la fabricación de CDR/CSR, haciendo hincapié en ambos combustibles por separado:

La composición típica de los CDR provenientes de RSU, comparando algunos países de la UE, se presenta en la siguiente Tabla:

Tabla 11: Composición típica de CDR
Fuente: [13]

| Fracción de residuos | Bélgica (Región Flamenca) | | Italia (%) | UK (%) |
|--|---------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| | Proceso de selección (%) | MBT ^{d)} (%) | | |
| Plástico | 31 | 9 | 23 | 11 |
| Papel/cartón | 13 | 64 ^{a)} | 44 | 84 |
| Madera | 12 | | 4,5 | |
| Textiles | 14 | 25 ^{b)} | 12 | 5 ^{e)} |
| Otros | 30 | | 14 ^{c)} | |
| Material indeseable (vidrio, piedras, metales) | - | 2 | 2,5 | |
| Contenido de sólidos secos | 66 | 85 | - | - |

Notas:

- a) Incluye papel, textiles, madera
- b) Incluye gomas, materiales sintéticos
- c) Residuos orgánicos degradables
- d) Tratamiento biológico - mecánico
- e) Incluye vidrio, madera, textiles y metales

El aseguramiento de la calidad en la producción de CDR requiere que se obtenga un alto poder calorífico y bajas concentraciones de tóxicos químicos, especialmente metales pesados y cloro. La calidad afecta además al éxito o fracaso en términos económicos, debido a que la calidad sugerida por las autoridades, los consumidores y productores de CDR varía según el punto de vista de los mismos. Un estudio realizado sobre los estándares de calidad en algunos países de Europa se muestra en la Tabla 6.

Las características fundamentales para el empleo de CDR como combustible son el poder calorífico, la humedad y los contenidos de ceniza, azufre y cloro. Estos valores varían según la fuente de donde provienen los residuos (hogares, oficinas, construcción, etc.), de acuerdo el sistema de recogida (residuos mezclados o recogida selectiva) y los tratamientos aplicados (cribado, clasificación, molienda, secado). A continuación, se presentan dos tablas que recogen los estándares de calidad empleados en Finlandia, Italia y el Reino Unido, y las principales características de calidad de los CDR obtenidos según las fuentes mencionadas:

Tabla 12: Estándares de calidad de los CDR

Fuente: [1]

| Parámetros | Finlandia ^a | Italia | UK |
|-------------------------------|------------------------|---------|---------------------|
| Poder calorífico (MJ/kg) | 13 – 16 | 15 | 18,7 |
| Contenido de humedad (% peso) | 25 – 35 | 25 máx. | 7 – 28 ^b |
| Contenido de cenizas (% peso) | 5 – 10 | 20 | 12 |
| Azufre (% peso) | 0,1 – 0,2 | 0,6 | 0,1 – 0,5 |
| Cloro (% peso) | 0,3 – 1,0 | 0,9 | 0,3 – 1,2 |

Notas:

^a Restricción para residuos domésticos

^b 7 -28 para CDR densificado y 28 para CDR de partículas gruesas

Ahora bien, los estándares Europeos relativos a los CSR han sido publicados por el comité técnico CEN TC 343 - "Solid recovered fuel". Las principales especificaciones técnicas publicadas se presentan a continuación:

Tabla 13: Principales estándares Europeos relativos a CSR publicados por el comité técnico
Fuente: [25]

| Referencia | Título | Fecha de publicación |
|--------------|---|----------------------|
| CEN/TS 15357 | Combustibles Sólidos Recuperados. Terminología, definiciones y descripciones | 10-05-2006 |
| CEN/TS 15358 | Combustibles Sólidos Recuperados. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos particulares para su aplicación a la producción de combustibles sólidos recuperados | 10-05-2006 |
| CEN/TS 15359 | Combustibles Sólidos Recuperados. Especificaciones y clases | 24-05-2006 |
| CEN/TS 15440 | Combustibles Sólidos Recuperados. Método para la determinación del contenido en biomasa | 29-11-2006 |

Dichos estándares Europeos tienen su transposición en estándares de calidad de CSR de los Estados Miembros, a modo de ejemplo se pueden mencionar los siguientes comités técnicos y hacer una comparación de los parámetros establecidos por los mismos (Tabla 10) [28]:

- Finlandia: SFS5875
- Italia: UNI 9903
- Alemania: marca RAL-GZ724
- Caso de la empresa alemana REMONDIS: BPG®, SBS®

Uno de los proyectos destacados y que cabe señalar es el proyecto Quo Vadis: “Quality Management Organisation, Validation of Standards, Developments and Inquiries for Solid Recovered Fuels”. El proyecto es apoyado por la Comisión Europea bajo el programa “Intelligent Energy-Europe Programme” y ERFO (European Recovered Fuel Organisation). Dentro de los principales trabajos de dicho proyecto se encuentra la publicación del documento: “Classification, characterisation and quality management of Solid Recovered Fuels”.

Tabla 14: Comparación de los parámetros establecidos por los diferentes estándares Europeos para CSR

Fuente: [28]

| Parámetros | Unidad | CESPA CSR RSU ⁽¹⁾ | Finlandia SFS5875 Cat. III | Italia UNI 9903 Normal SRF | Alemania RAL- GZ724 | Alemania REMONDIS | | CEN/TC 343 |
|-------------------|--------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------|-------|---------------|
| | | | | | | BPG1 | SBS1 | |
| PCI (base húmeda) | MJ/kg | 17 | - | >15 | - | 16-20 | 13-18 | Clase 3 |
| Cenizas | %sms | 7 | - | <20 | - | <20 | | - |
| Cl | %sms | 0,7 | <1,5 | <1,2 | - | <1 | <0,7 | Clase 3 |
| S | mg/kg | 0,1 | <0,5 | <0,6 | - | <0,2 | <0,5 | - |
| As | mg/kg | 5 | - | <9 | <5 | | <10 | - |
| Cd | mg/kg | 5 | <5 | <7 | <4 | | <9 | - |
| Cr | mg/kg | 100 | - | <100 | <125 | <120 | <250 | - |
| Cu | mg/kg | 30 | - | <300 | <350 | <400 | <1000 | - |
| Hg | mg/kg | 0,3 | <0,5 | <7 | <0,6 | <0,5 | <1 | Clase 1 |
| Ni | mg/kg | 9 | - | <40 | <80 | <50 | <160 | - |
| Pb | mg/kg | 150 | - | <200 | <190 | <100 | <400 | - |
| Sb | mg/kg | 30 | - | - | <25 | | <120 | - |
| Se | mg/kg | 0 | - | - | <3 | <4 | <5 | - |

Notas:

¹⁾ Según diseño planta Andalucía