

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Licenciado en Ciencias Ambientales

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Búsqueda y aplicaciones de  
combustibles alternativos para la  
industria cementera de la  
Comunidad Valenciana”**

***TRABAJO FINAL DE  
CARRERA***

Autor/es:  
**Miguel Santana Fernández**

Directora:  
**Ana María Mellado Romero**

***GANDIA, 2011***



## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVO DEL PROYECTO.....</b>	<b>5</b>
<b>2. LA INDUSTRIA CEMENTERA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 LA INDUSTRIA CEMENTERA EN ESPAÑA.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 DESCRIPCIÓN DE UNA FÁBRICA .....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Preparación del crudo	
2.2.2 Instalación de combustible sólido	
2.2.3 Instalación de cocción	
2.2.4 Molienda de cemento	
2.2.5 Expedición de cemento	
2.2.6 Medidas correctoras anti-contaminación	
<b>2.3 FASES DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 Preparación de materias primas	
2.3.2 Molienda de crudo	
2.3.3 Fabricación de clínker	
2.3.4 Molienda de cemento	
<b>2.4 TIPOS DE COMBUSTIBLE UTILIZADOS .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5 CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADAS AL         USO DE COMBUSTIBLES Y MEDIDAS CORRECTORAS .....</b>	<b>28</b>
<b>3. LÍNEAS BÁSICAS DE LA POLÍTICA DE RESIDUOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2 SITUACIÓN EN EUROPA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3 SITUACIÓN EN ESPAÑA .....</b>	<b>45</b>
<b>4. USO DE HARINAS CÁRNICAS COMO COMBUSTIBLE DE     SUSTITUCIÓN .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO .....</b>	<b>50</b>
4.1.1 Descripción y composición	
4.1.2 Producción del residuo	
4.1.3 Clasificación del residuo	

<b>4.2</b>	<b>GESTIÓN ACTUAL DE LAS HARINAS Y PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL ASOCIADA .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3</b>	<b>ALTERNATIVA DE GESTIÓN PROPUESTA .....</b>	<b>57</b>
4.3.1	Descripción de las pruebas realizadas	
4.3.2	Metodología empleada	
4.3.3	Valoración técnica	
4.3.4	Valoración económica	
4.3.5	Valoración medioambiental	
4.3.6	Medidas correctoras adicionales y programa de vigilancia ambiental	
<b>5.</b>	<b><i>USO DE NEUMÁTICOS TROCEADOS COMO COMBUSTIBLE DE SUSTITUCIÓN .....</i></b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO .....</b>	<b>81</b>
5.1.1	Descripción y composición	
5.1.2	Producción del residuo	
5.1.3	Clasificación del residuo	
<b>5.2</b>	<b>GESTIÓN ACTUAL DE LOS NEUMÁTICOS Y PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL ASOCIADA .....</b>	<b>87</b>
<b>5.3</b>	<b>VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA .....</b>	<b>90</b>
5.3.1	Descripción de la alternativa propuesta	
5.3.2	Metodología empleada	
5.3.3	Valoración técnica	
5.3.4	Valoración económica	
5.3.5	Valoración medioambiental	
5.3.6	Medidas correctoras adicionales y programa de vigilancia ambiental	
<b>6.</b>	<b><i>CONCLUSIONES .....</i></b>	<b>117</b>
<b>7.</b>	<b><i>BIBLIOGRAFÍA .....</i></b>	<b>118</b>

## ***1. OBJETIVO DEL PROYECTO***

El proyecto tiene como objetivo, estudiar la viabilidad de dos residuos (harinas cárnicas y neumáticos usados) como combustible auxiliar en hornos de producción de clínker.

Si bien las harinas cárnicas, se usan como combustible en España desde hace una década, en otros países es un combustible de sustitución con mucha más historia. Algo parecido pasa con el uso de neumáticos, que aunque fue anterior al uso de las harinas, entró relativamente tarde en nuestro país. Según la Asociación de Fabricantes de Caucho (RMA en sus siglas inglesas), en 1995 el 52% de los neumáticos usados en Estados Unidos fueron quemados como combustible. Por su parte, según la Asociación Europea de Fabricantes de Neumáticos y Caucho (ETRMA), en Europa esta cifra se situó en el 31%.

Estudiamos las posibles diferencias medioambientales asociadas al empleo de este tipo de residuos, sustituyéndolos por una fracción del combustible habitual empleado en Europa, el coque de petróleo.

Se pretende conseguir:

- La recuperación de la energía de los residuos a estudiar, con alto valor energético, bajo cloro y contenido metálico.
- La preservación de los combustibles habituales altamente contaminantes, como son el petróleo y el carbón.
- Reducción de costes en la producción del cemento.
- Destrucción de residuos orgánicos peligrosos

## 2. LA INDUSTRIA CEMENTERA

La producción mundial de cemento se sitúa en una cifra aproximada de 1.500 millones de toneladas al año (ver Figura 1)

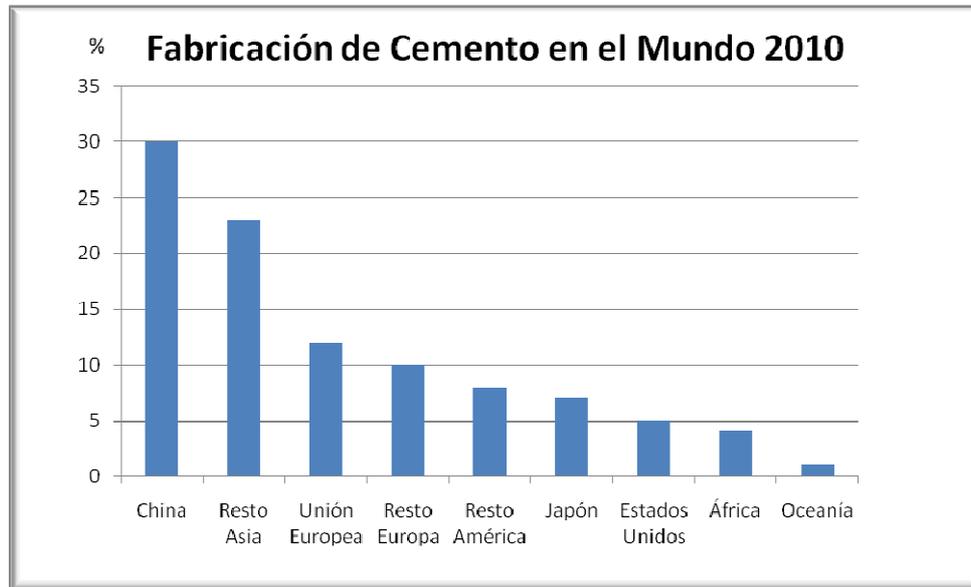


Figura 1. Producción mundial de cemento (2010)

En la Unión Europea, el cemento se fabrica en más de 250 plantas, con una producción en torno a los 170 millones de toneladas al año. Italia, Alemania y España son los mayores productores.

La fabricación de cemento es una actividad industrial de procesamiento de minerales. Se divide en tres etapas básicas:

1. Obtención, preparación y molienda de materias primas (caliza, margas, arcilla, pizarra, etc.) que aportan los siguientes compuestos minerales: carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Se obtiene una mezcla pulverulenta de los minerales denominada crudo o harina.

2. Cocción del crudo en hornos rotatorios hasta alcanzar una temperatura del material cercana a los 1450° C, para ser enfriado bruscamente y obtener un producto intermedio denominado clínker.

3. Molienda del clínker con otros componentes: yeso (regulador de fraguado) y adiciones (escorias de alto horno, cenizas volantes, caliza, puzolanas), para dar lugar a los distintos tipos de cemento.

En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno de clínker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda y vía húmeda.

En el proceso vía seca, la materia prima es introducida en el horno en forma seca, pulverulenta. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno rotatorio. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

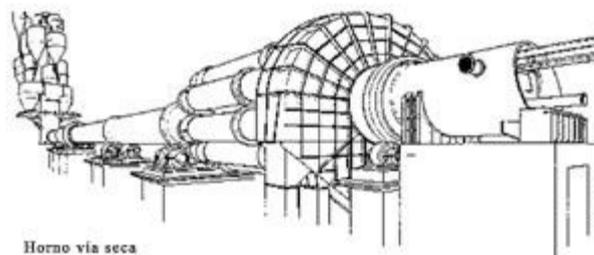


Figura 2. Horno de vía seca

En el proceso vía húmeda, utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad, el material de alimentación se prepara mediante molienda húmeda y la pasta resultante, con contenido de agua de un 30-40%, es alimentada en el extremo más elevado del horno inclinado.

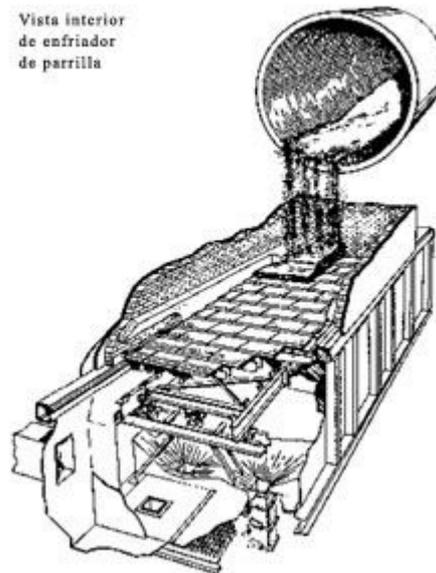


Figura 3. Enfriador de parrilla

En los procesos vía semi-seca y semi-húmeda, el material de alimentación se obtiene añadiendo o eliminando agua (filtros prensa), respectivamente, de forma que se obtienen “pellets” con un 15-20 % de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular los gases calientes provenientes del horno rotatorio.

En la actualidad, en torno al 78 % de la producción de cemento en Europa se realiza en hornos de vía seca; otro 16 % se realiza en hornos vía semi-seca o semi-húmeda; y un 6 % de la producción europea se realiza mediante vía húmeda.

En España, de los cerca de 60 hornos existentes, 6 son de vía húmeda, 4 de vía semi-seca, y el resto de vía seca.

En todos los casos, los gases circulan en sentido contrario al avance de los materiales (contracorriente). El flujo de los gases está forzado mediante aspiración de un ventilador o exhaustor, que mantiene todo el horno a presión inferior a la atmosférica (depresión).

Por otro lado, la fabricación de cemento es un proceso intensivo en energía. En función de las materias primas y el proceso de fabricación, el consumo de combustibles en el horno de clínker se sitúa entre 3000 y 5500 MJ/t<sub>de clínker</sub> (700 - 1300 kcal/kg).

Los combustibles utilizados tradicionalmente son el coque de petróleo, el carbón y el fuelóleo.

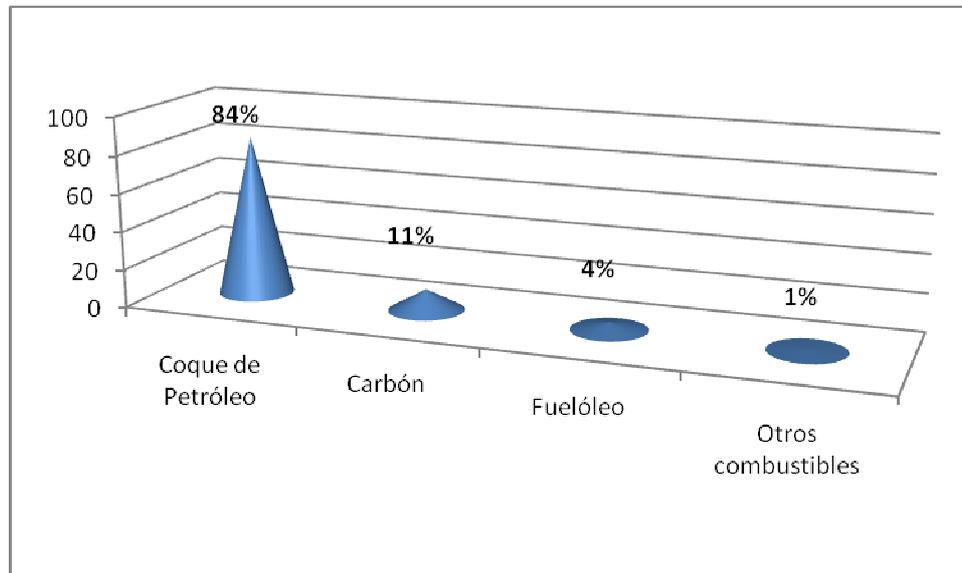


Figura 4. Consumo de combustibles en la industria cementera española (2010)

El consumo de energía eléctrica se destina en su mayor parte a las operaciones de molienda, tanto de las materias primas previo a su cocción, como en la molienda conjunta del clínker y otros minerales para dar lugar al cemento. Estas dos operaciones suponen aproximadamente el 75 % de la electricidad consumida en la fábrica, el resto se emplea en transporte de materiales y en impulsión de gases.

El consumo total se sitúa aproximadamente entre 90 y 120 kwh/t de cemento, en función de la tecnología utilizada y del tipo de cemento fabricado.

Los costes energéticos de combustible y energía eléctrica suman más del 30 % de los costes de fabricación, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las de las fuentes energéticas son factores clave para la competitividad de las empresas cementeras.

## **2.1 LA INDUSTRIA CEMENTERA EN ESPAÑA**

Con respecto a la valorización en hornos de cementeras cabe destacar:

### **1. Condiciones del horno**

Las condiciones del horno y del proceso en general, son idóneos para la valorización de residuos orgánicos peligrosos, dada su alta temperatura (1450° C-2000° C), tiempo de residencia superior a los 2 segundos, ambiente alcalino y ausencia de residuos, tanto líquidos como sólidos, es decir condiciones de tratamiento muy superiores a las establecidas en el Real Decreto 653/2003 de Incineración de Residuos Peligrosos.

**2. El potencial de valorización** de residuos en las cementeras españolas es del orden de 2.000.000 t/a

### **3. Distribución Geográfica**

En España existen actualmente 37 cementeras distribuidas por toda la geografía nacional, lo cual permite cumplir con el principio de proximidad fijado, tanto en la estrategia europea como nacional en la gestión de residuos.

### **4. Experiencia**

La valorización de residuos peligrosos en cementeras es un proceso muy contrastado, ya que actualmente más de 200 cementeras en el mundo desarrollan programas de valorización.

### **5. Impacto ambiental**

La valorización en cementeras contribuye al desarrollo sostenible, ya que al gestionar residuos sin producir otros, se preservan los combustibles fósiles y materiales naturales, además de mejorar la emisión de algunos gases, que producen efecto invernadero.



El material extraído se alimenta por cinta transportadora a un molino de crudo de las siguientes características:

Tipo	Molino de bolas, doble rotator
Dimensiones	Ø 4,4 m. x L= 13 m.
Producción	170 Tn./h.

El material molido se clasifica en separadores de 6 mm. de diámetro. Estos separadores son de velocidad fija y regulación manual. El crudo se almacena en silos de homogeneización, desde donde se alimenta al horno.

### 2.2.2. Instalación de Combustible Sólido

El combustible principal, coque de petróleo, se recibirá en la fábrica en camiones, debido a que su procedencia normalmente es de fuera de España y llega por barco a los puertos más cercanos. Para su homogeneización y almacenamiento, debe existir un parque de combustible cubierto para evitar emisiones de partículas debidas al efecto del viento.

El parque se llena por medio de un apilador, y el combustible homogeneizado se extrae mediante una cadena extractora capaz de un caudal de recogida nominal de 50 T./h.

El coque se muele en molinos verticales de rodillos que están barridos con gases procedentes del horno para el secado del coque.

Las características de los molinos serán las siguientes:

Diámetro de rodillos	850 mm.
Ancho de rodillos	220 mm.
Capacidad nominal unitaria	15 T/h.

El combustible sólido molido (coque de petróleo) se almacena en silos metálicos de almacenaje de 150 T. de capacidad unitaria.

Desde los silos, la mezcla molida se dosifica en continuo mediante un equipo dosificador, que alimenta un sistema de transporte neumático hasta el quemador principal, regulándose así la alimentación de combustible al horno en función de la demanda calorífica del mismo.

El combustible se pulveriza con aporte de aire primario para la combustión, efectuándose esta dentro del tubo del horno. El quemador normalmente es de tobera mixta para combustibles sólidos y líquidos.

### **2.2.3. Instalación de Cocción**

Desde el silo de homogeneización, se alimenta el crudo a un intercambiador formado por una serie de ciclones dispuestos en serie en una torre intercambiadora, donde se realiza el intercambio térmico en contracorriente con los gases de escape del horno, consiguiendo una temperatura de alimentación al horno de 950 ° C en la entrada del mismo.

Las torres son normalmente de 4-5 etapas según el caudal de gases y materiales que la atraviesen. Su diseño debe ser tal que en esta etapa de precalcinación exista un buen intercambio de calor entre gas y sólidos para conseguir que en ella, por un lado se den las reacciones de secado, descarbonatación de las materias primas, y por el otro, la depuración de los gases de escape.

En el horno rotatorio se efectúa la reacción de clinkerización del material a una temperatura aproximada de 1450° C, descargando el producto mediante un enfriador de satélites (tubos concéntricos al del horno).

Las características del horno son para la producción fijada:

Dimensiones	Ø 4,6 m. x L= 80/104,5 m.
Producción	2200 T./día de clínker

El horno rotativo está forrado de ladrillos refractarios, con un espesor de 200 mm., y lleva adosados 9 satélites de 2 m. de diámetro por 18,5 m. de longitud para el enfriamiento del material. El material de los ladrillos refractarios variará en forma y composición según la zona del horno en la que se coloque, es decir, temperatura y tipo de material que deba soportar. El enfriamiento de clínker tipo de un horno de vía seca es el de satélites, aunque también se empiezan a cambiar este tipo por otros sistemas de enfriadores.

El material producido por el horno se almacena en los silos de clínker, debe haber más de uno, para evitar problemas de suministro a los molinos, y dada la producción del horno la suma total de las capacidades de los silos será de 100000 T.

#### 2.2.4. Molienda de Cemento

El clínker se alimenta desde los silos de almacenamiento a una instalación de molienda formada por tres molinos que trabajan normalmente en conjunto, formada por las siguientes máquinas:

Molino principal de cemento	
Tipo	Molino de bolas
Dimensiones	Ø 4,8 m. x L= 15,4 m.
Carga de bolas	300 Tm

Molino refinador de cemento	
Tipo	Molino de bolas
Dimensiones	Ø 3,6 m. x L= 8 m.

Molino de rodillos prensa	
Tipo	Molino de rodillos prensa
Diámetro de rodillos	1700 mm.
Ancho de rodillos	800 mm.

Producción global de la instalación : 225 T/h

El cemento molido se almacena en silos de cemento con una capacidad global de almacenaje de 40.000 T. Desde los mismos se alimentan las instalaciones de ensacado y carga a granel de camiones. Normalmente habrá al menos un silo por cada tipo de cemento producido.

### **2.2.5. Expedición de Cemento**

La expedición de cemento puede ser de dos formas, a granel o en sacos. Por tanto la fábrica debe tener equipos para ambas expediciones.

La fábrica dispone de ensacadoras rotativas, con una capacidad global de 200 T/h., así como paletizadoras con capacidad de 4000 sacos/hora. Normalmente existirán al menos dos equipos de cada tipo para evitar problemas por mantenimiento.

La carga a granel se realiza desde las calles de carga con báscula y despulverización independiente de 150 T/h. de capacidad cada uno sobre camiones cuba.

## 2.2.6. Medidas Correctoras Anti-Contaminación

Las medidas correctoras dispuestas en la planta con el objeto de minimizar la contaminación son las siguientes:

- Existen precipitadores electrostáticos y filtros de mangas en todos los equipos de la instalación. Las características de los instalados en los puntos de emisión más importantes son:

Molinos de coque: Cada molino debe estar conectado a un filtro de mangas en que se recolecta toda la producción y se depura el aire que se emite. La emisión unitaria siempre será menor de  $50\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ .

Horno y molino de crudo: Es necesario que disponga filtros electrostáticos de las siguientes características:

Volumen efectivo de gas/filtro	250000 $\text{m}^3/\text{h}$
Contenido de polvo a la entrada	100 $\text{gr.}/\text{m}^3$
Contenido de polvo a la salida	$<80 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
Superficie activa	8000 $\text{m}^2$

Molino de cemento: Filtros de mangas de las siguientes características:

Caudal a tratar	– 160000 $\text{m}^3/\text{h}$
Nº de mangas	1600
Superficie filtrante	2200 $\text{m}^2$
Emisión promedio	$< 20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

- La totalidad de los restantes equipos de la factoría susceptibles de producir emisiones contaminantes estarán dotados de filtros de mangas. Las concentraciones emitidas a través de estos filtros no son superiores en ningún caso a 50 mg/Nm<sup>3</sup>.
- La planta realizará mediciones de contaminantes periódicas, que se registrarán en los libros oficiales de los equipos correspondientes, y cada dos años se realizarán las mediciones de control por parte de una OCA según se especifica en el Decreto 833/75.

### **2.3 FASES DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO**

El cemento es un producto de construcción básico, que se obtiene del procesado de minerales, mediante una secuencia de:

1. Obtención, preparación y molienda de materias primas (caliza, arcilla y margas principalmente)
2. Cocción de las mismas en hornos para obtener un producto intermedio denominado clínker.
3. Molienda final de éste con yeso y otras adiciones para obtener cemento.

Sus características de conglomerante hidráulico permiten que fragüe y endurezca cuando se amasa con agua y áridos, lo que ha hecho de los productos derivados del cemento (hormigón, prefabricados y morteros) materiales indispensables para la construcción de puertos, carreteras, puentes, presas, viviendas, escuelas, hospitales, etc.

El proceso industrial de cocción en hornos rotatorios que forma parte de la fabricación de cemento aporta la posibilidad de emplear residuos como combustibles alternativos en sustitución de los tradicionales. En el proceso de fabricación, distinguimos estas fases:

### 2.3.1 Preparación de materias primas

La fabricación del cemento se realiza a partir de materiales calizos y arcillosos, extraídos en canteras a cielo abierto y transportados a fábrica, donde son almacenados. A la mezcla de dichos materiales se la añaden pequeñas cantidades de materias denominadas correctoras, con las que se afina la composición deseada.

Como materiales de partida sirven sustancias minerales, que contienen los componentes principales del clinker: cal ( $\text{CaO}$ ), sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Estos componentes raramente se encuentran realmente en proporciones deseadas, en una sola sustancia. Por tanto, la mayoría de las veces se ha de elegir la mezcla de un componente rico en cal (componente calcáreo) con otro pobre en cal pero que contiene más alúmina y óxidos de hierro (componente arcilloso). Estos dos componentes son, por regla general, la caliza y la arcilla o la caliza y la marga.

Dentro de los materiales aportadores de cal, se distinguen tres distintos:

- Calizas: Componente calcáreo cuyo promedio de  $\text{CaO}$  supera el 50%
- Margas Naturales: Componente calcáreo cuyo promedio de  $\text{CaO}$  es inferior al 45%
- Calizas Margosas: Componente calcáreo cuyo promedio de  $\text{CaO}$  está entre el 45 y el 50%

### 2.3.2 Molienda de crudo

El secado y molienda de los materiales se realiza de forma conjunta en un molino de bolas, al que llegan gases calientes procedentes del horno. El material seco y molido, denominado crudo, se almacena en silos para su alimentación al proceso de cocción.

Hay dos aspectos bien diferenciados:

- Aspecto Químico: Buena dosificación de materias primas para conseguir el análisis químico prefijado del crudo.
- Aspecto Físico: Obtención del crudo con una finura determinada, para que pueda reaccionar en el horno y formar el clínker de forma correcta.

### 2.3.3 Fabricación de clínker

El crudo es alimentado al intercambiador de calor, donde entra en contacto con los gases calientes del horno, que ceden su energía térmica al crudo. Los procesos que sufre el crudo son los siguientes:

1. Secado, hasta una temperatura de 150° C.
2. Eliminación del agua de constitución de la arcilla hasta unos 500° C, en la parte media de la torre.
3. Descarbonatación del carbonato cálcico hasta unos 1100° C, en la de salida del intercambiador y en la primera zona del horno rotatorio.
4. Clínkerización (Sintetización) de los minerales, hasta unos 1450° C, en la zona próxima a la llama del quemador principal.

El combustible se alimenta molido en dos puntos: en el mechero principal para obtener temperaturas de llama de cerca de 2000° C, y en la zona de calcinación, en la parte inferior de la torre de ciclones, con temperaturas de gas de unos 1200° C.

A la salida del horno, el clínker se enfría en contacto con aire a contracorriente. El aire caliente sirve de comburente en la combustión descrita anteriormente. El clínker se almacena para su posterior molienda en silos estancos.

### 2.3.4 Molienda de cemento

El cemento se obtiene en la molienda conjunta del clínker, yeso y otros componentes autorizados para conseguir distintos tipos de cemento. La relación de los distintos materiales molidos y la finura del material final obtenido, dan lugar a los diferentes tipos de cemento y a las distintas categorías resistentes.

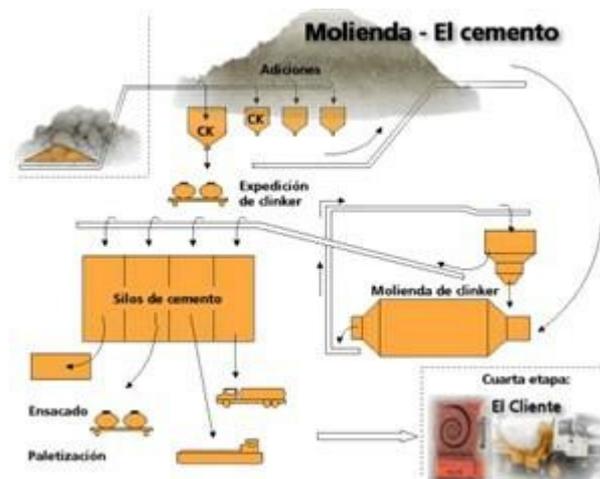


Figura 6. Proceso de molienda

## 2.4 TIPOS DE COMBUSTIBLE UTILIZADOS

Se utilizan dos tipos de combustibles:

### Combustibles sólidos

Se utiliza como combustible principal el combustible sólido, coque de petróleo, habiendo utilizado alternativamente, otros combustibles sólidos como hullas de diferentes procedencias, nacionales e importadas.

### Combustibles líquidos.

Actualmente se utiliza fuel-óleo pesado, únicamente durante los períodos de calentamiento de los hornos.

En España, los combustibles más empleados son, aproximadamente:

Coque de petróleo	84 %
Carbón	11 %
Fuel-óleo	4 %
Otros	< 1 %

Donde la composición típica de un coque de petróleo, sería la siguiente:

Humedad	7 %
Cenizas	0.6 %
Materias Volátiles	10.8 %
Azufre	5 %
Potencia calorífica superior	8000 Kcal/Kg
Índice de hardgrove	63

### ❖ Combustibles alternativos

Combustibles alternativos son aquellos que pueden sustituir total o parcialmente a los combustibles habituales: carbón, fuelóleo, coque de petróleo o gas natural.

En España, los combustibles más empleados son, aproximadamente:

Carbón	53 %
Coque de petróleo	41 %
Fuel-óleo	5 %

Los tipos posibles de combustibles alternativos podemos clasificarlos de la siguiente manera:

**a) Renovables**, que a su vez se subdividen en: Biomasa y Residuos Urbanos.

- *Biomasa*: residuos forestales, ganaderos o agrícolas: astillas, orujo de uva o aceituna, cáscara de arroz o de café, serrín, piñas, etc. Se utilizan con frecuencia en el hogar auxiliar, generando gases calientes para secado de crudo. Debido a su bajo poder calorífico no suelen usarse como combustibles en la clinkerización. Pueden presentar problemas de atascos en las parrillas del hogar.

- *Biomasa*: residuos industriales: combustibles sintéticos, residuos de pinturas, plásticos recuperados, neumáticos usados, etc. Los residuos provenientes de la industria del automóvil: neumáticos usados, goma y plástico de desechos y desguaces, se utilizan con mucha frecuencia.

Fundamentalmente se emplean de tres formas:

- Semipulverizados o troceados muy finamente: pueden emplearse en el mechero principal del horno. Se han hecho pruebas y en algunos casos pueden proporcionar hasta un 50% del combustible necesario en el horno.

- Neumáticos pequeños de automóviles y plásticos sin trocear o poco troceados: introduciéndolos bien a la entrada del horno, bien en hogares auxiliares.

En este caso hay que tener en consideración la influencia que pudieran tener los cables de acero de los neumáticos en la composición del clínker. Normalmente se introducen en el tubo ascendente de la precalcinación o en la culata del horno. Pueden reemplazar hasta un 25% del combustible convencional.

- Neumáticos, plásticos y goma vieja troceados o granulados. Para poder emplear todo tipo de neumáticos y plásticos se puede incorporar al circuito de alimentación una máquina de trocear para alimentar con tamaños inferiores a 200-250 mm. Este tipo de alimentación consigue mantener una secuencia continua de la combustión. Su empleo es el mismo que en el caso anterior.

- *Biomasa*: procedentes de cultivos energéticos, ya sea mediante combustión directa o mediante transformación de los mismos: bioalcohol, biogás, etc.

- *Residuos Urbanos*, sólidos y líquidos.

Mediante pirólisis puede obtenerse gas caliente para insuflar en la parte baja del intercambiador. Además se consiguen aditivos tipo puzolanas, que se pueden incorporar al cemento.

También se pueden quemar en el horno, en cuyo caso las escorias producidas se añaden al clínker sin disminuir su calidad. Este sistema es muy eficaz para deshacerse de los residuos no reciclables,

Hay una gran diversidad de sistemas que ya emplean los residuos urbanos, fundamentalmente en Europa.

**b) Combustibles fósiles pobres:** pueden utilizarse en el mechero principal, o incorporarse al crudo:

Esquistos y barros bituminosos

Carbones pobres: turba, lignito

Carbón vegetal

Cenizas de central térmica en lecho fluido, que además pueden emplearse, una vez quemadas, como aditivos al cemento

**c) Residuos industriales tóxicos o contaminantes especiales:**

Aunque son energías renovables, su combustión puede presentar dos objetivos: su empleo como combustible, o su incineración como residuos tóxicos y contaminantes. Por ejemplo: Aceites usados de vehículos o maquinaria, Residuos peligrosos, Disolventes residuales. Un sistema muy eficaz para deshacerse de estos residuos es quemarlos en el mechero principal de un horno de cemento.

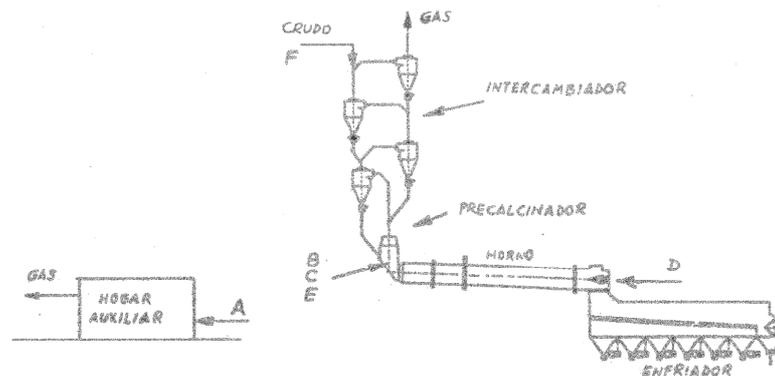
Con frecuencia los residuos sólidos o líquidos se introducen en pequeños contenedores herméticos de forma cilíndrica. Se disparan dentro del horno mediante un cañón accionado neumática o hidráulicamente.

Es muy importante calcular la trayectoria y frecuencia de los disparos, ya que la legislación europea es muy estricta en cuanto al tiempo de residencia de este tipo de residuos a una temperatura superior a 1200° C.

El proceso de combustión del clínker ofrece grandes posibilidades de utilización de combustibles alternativos secundarios. Las razones para su empleo podrían ser:

- Menor coste energético.
- Colaborar con la Administración para deshacerse de combustibles peligrosos o nocivos.

Los combustibles alternos se pueden emplear en distintas localizaciones del horno de clínker, como se aprecia en el esquema:



TIPO DE COMBUSTIBLE	EMPLEO
1. Sólidos: Madera, Neumáticos, Pajas	A, B, C, E
2. Granulados: Neumáticos, Plásticos, Serrín	A, B, C, D, E
3. Líquidos: Aceites usados, Dieciséis	A, B, C, D
4. Pólvoras: Líquidos, en Polvo, Granulados	F
5. Noévos: Sólidos, Líquidos	D

A. Hogar Auxiliar	D. Mechero Principal del Horno
B. Intercambiador	E. Culata del horno o Parrilla Lepol
C. Precalcinador	F. Mezclado con el crudo

- Mechero principal del horno.
- Zona inferior del intercambiador.
- Precalcinación.
- Parrillas Lepol.
- Hogares auxiliares para secado de crudo, carbón, puzolanas, etc.
- Vía húmeda.
- Mezclados con el crudo

Las condiciones para la utilización de los combustibles alternativos en hornos de cementeras son:

- Precio de compra barato o gratis.
- Posibilidad de obtener subvenciones por su empleo.

Precauciones: Pueden producir disturbios en la llama, fluctuaciones de temperatura, mayor aire falso, contaminación, problemas de calidad.

El mejor sistema para su empleo debe pasar por realizar previamente un estudio de rentabilidad considerando el caso particular de cada fábrica.

En un análisis efectuado en 2004 en aproximadamente 100 fábricas de cemento en Europa, Asia, África y América se trató de estudiar el uso de combustibles alternativos y su porcentaje de utilización respecto a los combustibles tradicionales.

Ver tabla a continuación:

<b>Combustibles Alternativos</b>		
<b>Cantidad de Fábricas</b>	<b>Tipo</b>	<b>% sobre Total</b>
1	Biogás	10
1	Orujo de aceituna	4
2	Orujo de uva	5
2	Esquistos y pizarras en el crudo	Sin Datos
3	Gas Oil	2
3	Residuos tóxicos	1
4	Cenizas en el crudo	Sin Datos
5	Carbón vegetal	57
5	Residuos de petróleo de alta viscosidad	86
5	Pinturas, plásticos, etc.	3
6	Turba, lignito	28
7	Serrín, astillas, piñas, etc.	5
8	Desperdicios y basuras	41
10	Cáscara de arroz, cafés, cocos, etc.	4
10	Otros	1
10	Aceite industrial	22
13	Neumáticos	7

En dichas fábricas, los combustibles usados han sido:

Carbón	30 %
Coque de petróleo	30 %
Fuel-oil	20 %
Gas	8 %
Alternativos	12 %

Algunos de estos combustibles se incorporan al crudo y otros se emplean en generadores de gases calientes para secado del crudo.

## **2.5 CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES ASOCIADAS AL USO DE COMBUSTIBLES Y MEDIDAS CORRECTORAS**

Los principales problemas medioambientales que tiene la industria del cemento debido al uso de combustibles, son las emisiones de partículas; SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO y en menor medida, metales y COV's.

### **➤ Emisión de contaminantes**

En la industria del cemento, tanto el producto final como los intermedios son pulverizados. La producción de polvo es un hecho inevitable que acompaña a todo el proceso de molturación y trasiego de los componentes materiales.

Para impedir que el polvo pase al ambiente, todas las máquinas trabajan en depresión, lo que hace necesario el movimiento y posterior limpieza de grandes masas de aire.

Los principales focos emisores de polvo en las fábricas de cemento, están localizados en las diferentes etapas del proceso, y son:

- Gas de salida de los molinos secadores del crudo
- Gas de salida de los hornos de calcinación
- Aire de salida procedente de los molinos de cemento
- Aire de salida de los molinos de carbón

Para la despulverización de todos estos caudales de aire antes de su emisión a la atmósfera, se utilizan distintos sistemas captadores de polvo. En nuestro caso se emplean principalmente ciclones, filtros de mangas y filtros electroestáticos.

Apartes de éstas fuentes, existen multitud de fuentes dispersas de menor entidad a lo largo de todo el proceso, como pueden ser transferencias de cintas, caídas, transportes neumáticos, silos, elevadores, tolvas, roscas... que hacen necesario la construcción de aspiraciones localizadas y el transporte de ese aire a algún sistema colector de polvo.

Los principales sistemas de despulverización empelados en nuestra fábrica son:

- Ciclones separadores
- Filtros de mangas
- Electrofiltros

En cuanto a la emisión de  $\text{SO}_2$ , es debida principalmente a la alimentación de azufre en el combustible, por lo que se reduce utilizando combustibles con un porcentaje en azufre bajo.

Además, las especiales características de los hornos, con atmósfera alcalinas, en la que los gases están en contacto con la materia prima, mayoritariamente caliza, provoca que el dióxido de azufre quede fijado como sulfato en el clínker.

La emisión de óxidos de nitrógeno es debida a la combustión a altas temperaturas, su reducción será con quemadores por etapas, o reducción catalítica.

La emisión de CO es debida al proceso de combustión, por lo que hay que mejorar la eficacia de la combustión para reducirla.

➤ **Medidas correctoras**

**Horno de clínker**

El diseño del propio horno de clínker es una medida correctora de la emisión de gases. La combustión de residuos en hornos de clínker presenta las siguientes ventajas:

1. La elevada temperatura de los gases (hasta 2000° C) y el tiempo de residencia (hasta 6 seg.), aseguran una destrucción efectiva de las sustancias tóxicas. Recordemos que las condiciones aceptadas para una correcta destrucción de residuos son de 850° C y 2 seg. de tiempo de residencia en atmósfera oxidante.
2. Las especiales características químicas del horno de clínker permiten que se realice una captación de sustancias contaminantes: formación de sulfatos alcalinos, captando el SO<sub>2</sub>, e incorporación de metales pesados al clínker. El comportamiento de la instalación, en lo que a emisiones se refiere, no varía sustancialmente respecto del de una planta que no utiliza residuos como combustible secundario.

La relación en masa combustible/clínker, alrededor del 10% para los hornos de vía seca, hace que el incremento de las condiciones de metales pesados en el clínker, provenientes del combustible secundario, no afecte a la calidad del cemento.

3. Inexistencia de residuos de tratamiento (cenizas)

## Ciclones separadores

En la industria del cemento, los ciclones se usan principalmente, como separadores dentro del proceso de producción y como pre depuradores de otros colectores de polvo en los cuales se suelen tratar gases con elevadas cargas de polvo.

Un ciclón consta de dos partes, una cilíndrica y una cónica. El gas entra por la parte alta del cuerpo cilíndrico, tangencialmente y se mueve en espiral, a lo largo de la pared hacia abajo, casi hasta la parte inferior del cono (torbellino exterior), desde aquí comienza a ocupar el espacio interno del ciclón, donde se mueve hacia arriba y también en espiral (torbellino interior). La fuerza centrífuga hace que las partículas de polvo del gas se depositen sobre la pared del ciclón y tanto por la acción de la gravedad, como por la del torbellino exterior, se desplazan hacia abajo. La mayor parte de las partículas cae en un colector de donde se extraen mediante una exclusiva celular. El torbellino gaseoso que sube es el gas depurado que, sin embargo todavía contiene cierta cantidad de partículas finas sólidas.

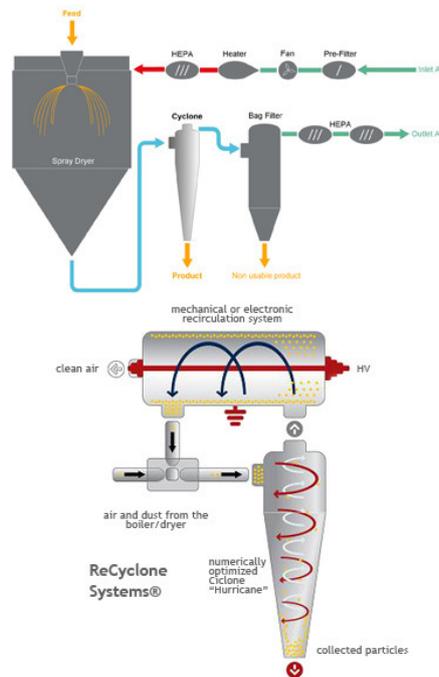


Figura 7. Ciclón

## **Filtro de mangas**

Este sistema consiste fundamentalmente en hacer pasar el aire extraído y cargado de polvo a través de un medio poroso que es un elemento textil y que retiene las partículas de polvo. Estos elementos textiles normalmente se confeccionan en forma de tubos cilíndricos o mangas y en su interior llevan una jaula metálica que tiene la función de mantener esa manga completamente estirada. El número de mangas de un filtro dependerá del caudal de aire que se tiene que filtrar variando en nuestra fábrica desde 10 unidades a 1584 unidades. Estas mangas van colgadas en un bastidor y todo el filtro se distribuye en varias cámaras o compartimentos independientes.



Figura 8. Filtro de mangas

## Electrofiltros

Los filtros electrostáticos se basan en utilizar el efecto de ionización de los gases en un campo eléctrico intenso, formado entre los electrodos emisores negativos y los electrodos de precipitación positivos. Si la tensión eléctrica entre ambos electrodos es suficientemente alta, el electrodo emisor comienza a desprender electrones y, con ello, se logra que las moléculas del gas que rodean el electrodo queden cargadas en forma de iones positivos y negativos.

Bajo la influencia de la intensidad de campo, los iones negativos se desplazan hacia los electrodos positivos conectados a tierra. Si el gas contiene polvo, entonces los iones negativos ceden su carga a esas partículas de polvo, las cuales se desplazarán hacia el electrodo positivo, se depositan allí y quedan neutralizadas. Por percusión, se suelta el polvo acumulado sobre los electrodos y cae en la cámara colectora. Sin embargo, una parte pequeña resulta cargada positivamente y se deposita sobre los electrodos emisores, por lo que también se deben limpiar por percusión.



Figura 9. Electrofiltros

### ***3. LÍNEAS BÁSICAS DE LA POLÍTICA DE RESIDUOS***

España se encuentra, comparado con otros países de nuestro entorno en los inicios de la gestión de residuos, desarrollando políticas de acuerdo con las directrices comunitarias.

La Ley Básica de Residuos define las líneas básicas de actuación en el campo de los residuos, permitiendo un desarrollo reglamentario en el que se establezcan responsabilidades en la gestión, tratamiento y correcta eliminación de los mismos.

La política de las Comunidades Europeas establece unos objetivos cuando se aborda la problemática asociada a un determinado tipo de residuo; en la Resolución del Consejo de Mayo-92 se establecen los siguientes Principios Básicos en la Estrategia Comunitaria de Residuos:

- Prevención, tratando de impulsar y desarrollar las tecnologías limpias.
- Recuperación, impulsando los mecanismos tecnológicos y financieros para disponer de un mercado de productos reciclados.
- Valorización, impulsando la recuperación material y energética de los residuos.
- Eliminación, de los residuos a los que no puedan aplicar los anteriores criterios, siendo su eliminación segura y controlada.

#### **Minimización**

Con toda probabilidad el criterio de actuación más importante para la gestión de residuos se concreta en un concepto: minimización. Este concepto engloba las acciones de: reducción en origen (tecnologías limpias), reciclaje y recuperación.

Hay que señalar que la apuesta por la minimización debe ser decidida, pero no implica la exclusión de la necesidad de los sistemas de tratamiento y eliminación, sino la limitación de los mismos en su participación en la solución del problema.

En la figura 10 se recoge un esquema de las Técnicas de Minimización haciendo una descripción somera de cada apartado.



Figura 10. Técnicas de minimización

### Tecnologías limpias

Se define como el método de fabricar productos en el que todas las materias primas y energía son utilizadas en la forma más racional e integrada en el ciclo (recursos naturales o materiales secundarios) de manera que el impacto sobre el normal funcionamiento del medio ambiente sea mínimo. Esto se puede conseguir:

- Diseñar procesos productivos o modificar los existentes de forma que los residuos generados (sólidos, líquidos o gaseosos) sean los menos posibles.
- Reutilizando o reciclando dichos residuos en el propio.

En general está demostrado que la minimización de residuos, es normalmente rentable para la industria, además de suponer una mejora para el medio ambiente

## **Recuperación y Reciclaje**

Existen varias técnicas muy específicas para la de reutilización de residuos. Existe tecnología que permite alcanzar importantes objetivos en el ámbito del reciclaje y la recuperación, sin embargo en muchos casos estas tecnologías suponen un gasto no recuperado por parte de la industria.

Es imprescindible para conseguir incrementar las técnicas de reciclaje y recuperación en el sistema productivo incentivar de a la industria de un modo u otro, como por ejemplo:

- Responsabilización en la solución del problema de fabricantes que han puesto en el mercado productos que con su uso producen residuos peligrosos, asegurando el sistema de financiación.
- Obligación por parte de los fabricantes de utilizar en su proceso productivo un tanto por ciento de materias primas recicladas de sus propios productos.

Es preferible reciclar que simplemente desechar puesto que implica conservación de energía y de recursos. La elección de los materiales que van a conformar un producto es clave a la hora de mejorar su reciclabilidad.

## **Sistemas de tratamiento y eliminación**

Los sistemas de tratamiento y eliminación que existen en la actualidad para el tratamiento de los residuos industriales son:

## **La incineración**

La incineración es un procedimiento susceptible de ser utilizado para la eliminación de residuos a través de un tratamiento térmico, utilizando aquellos como combustibles y recuperando el calor producido en la combustión en forma de energía.

El parámetro de diseño determinante de los residuos susceptibles de incineración es el Poder Calorífico Inferior (PCI). Los residuos cuyo poder calorífico es comparable al de un combustible convencional como el fuel o el gas natural, son incinerables directamente en unas horas. Mientras que residuos con bajo PCI, requieren el apoyo de un combustible para su coincineración.

Con carácter general, los residuos que por sus propiedades físicas, químicas y térmicas son susceptibles de ser incinerados son los siguientes:

- Sólidos, lodos, líquidos orgánicos halogenados y no halogenados y cianuros sólidos, otros residuos (de tenerías y otros)

Un aspecto importante del sistema de incineración es la recuperación del calor de los gases, con la consiguiente producción de vapor y/o electricidad (cogeneración).

## **Tratamiento físico-químico**

Los tratamientos físico-químicos comprenden un conjunto de técnicas que se utilizan para alterar su propia composición con el fin de evitar la descarga de materiales peligrosos en el medio ambiente.

Los residuos que se someten a tratamiento físico-químico están constituidos en general por baños gastados, procedentes en su mayoría de la industria de transformados metálicos y contienen sobre todo sustancias inorgánicas disueltas o en suspensión.

## **Depósitos de Seguridad**

El Depósito de Seguridad cumple la función de aislar los residuos durante períodos amplios, adecuados a las características y peligrosidad de los materiales en él contenidos.

El Depósito de Seguridad es necesario para la gestión de algunos tipos de residuos peligrosos, dado que en el estado actual de la técnica no es posible una eliminación completa de éstos, sin requerir en un momento u otro de la cadena un vertido que garantice la ausencia de daños a la salud humana y al medio, y con unos costes asumibles. Existe por tanto una relación entre este sistema de gestión y los otros dos ya expuestos, ya que el depósito de seguridad recibe lodos desecados de las plantas de tratamiento físico-químico y cenizas de la incineradora, mientras que necesitan enviar sus lixiviados a la planta de tratamiento físico-químico.

### **3.1 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO**

La Directiva 2009/28 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables establece, para cada Estado Miembro, objetivos de contribución de las energías renovables al consumo de energía final para el año 2020, siendo el 10% el valor fijado para España.

Los valores recogidos en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables son aún más ambiciosos y apuntan a una contribución en España del 12,7%.

Entre otras fuentes de energía renovable, esta Directiva define como biomasa a; “la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”.

Esta definición implica que los residuos, junto con el resto de fuentes de energía renovables, deberán ser considerados a la hora de alcanzar los mencionados objetivos de contribución de las energías renovables al mix energético nacional en el año 2020.

Por otro lado, la normativa europea sobre residuos ha sido actualizada mediante la Directiva 2008/98. Esta Directiva recoge la siguiente jerarquía de gestión de residuos que ha de servir de orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de residuos:

- Prevención
- Preparación para la reutilización
- Reciclado
- Otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética
- Eliminación.

Es decir, la valorización energética (ya sea en incineradoras con recuperación eficiente de energía o en hornos industriales) es una operación de gestión de los residuos a la que ha de darse prioridad frente a operaciones de eliminación (como el depósito de los residuos en vertederos).

Además, esta Directiva define los conceptos de subproducto y fin de la condición de residuo, conceptos estos que pueden resultar relevantes en el futuro de cara a promover el desvío de vertedero de productos aprovechables tanto desde el punto de vista material como energético.

En la actualidad, la Directiva 2009/28 y la Directiva 2008/98 están en proceso de transposición al marco legislativo español.

Además de los ya mencionados, hay que tener en consideración otra serie de actos legislativos y normativos elaborados a nivel europeo que influyen de forma directa o indirecta en las operaciones de valorización energética de residuos:

- Directiva 1999/31 relativa al vertido de residuos, transpuesta a la legislación nacional mediante el Real Decreto 1481/2001, y que establece una serie de objetivos de desvío de vertedero de residuos biodegradables. Estos objetivos son:

- En 2009, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 50% de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995.

- En 2016, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 35% de la cantidad de residuos urbanos biodegradables generados en 1995.

Esta tendencia de desvío de vertedero de los residuos biodegradables promovida a nivel europeo, se ve refrendada por la ya mencionada Directiva 2008/98, donde además se definen los biorresiduos (residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos) y se promueve su desvío del vertedero; y por la reciente comunicación sobre biorresiduos de la Comisión Europea (mayo 2010) que, entre otros, recomienda a los Estados Miembros perseguir que no se depositen en vertedero biorresiduos que no hayan sido tratados previamente.

En este sentido, apunta a que todas las opciones de gestión prioritarias al vertedero (incluida la incineración energéticamente eficiente) pueden contribuir a este objetivo.

Otros dos actos legislativos que resultan relevantes para las instalaciones de valorización energética y que suponen una garantía de su control ambiental, son la Directiva 96/61 sobre prevención y control integrados de la contaminación (transpuesta mediante la Ley 16/2002) y la Directiva 2000/76 relativa a la incineración de residuos (transpuesta mediante el Real Decreto 653/2003).

La primera implica que todas las instalaciones de incineración de residuos y las instalaciones industriales que suelen coincidir residuos (cementeras, etc.) deben disponer de una autorización ambiental integrada para poder operar. En esta autorización se recogen toda una serie de considerandos que dicta la autoridad ambiental competente (la correspondiente a la Comunidad Autónoma donde esté implantada la instalación). Para este tipo de instalaciones, entre otros, se tienen en cuenta los estrictos valores límites de emisión al aire recogidos en el Real Decreto 653/2003 de incineración de residuos. Estos límites son los más exigentes que ha de cumplir una instalación industrial.

Es decir, si, como se ha visto anteriormente, la legislación comunitaria afirma que la parte biodegradable de los residuos es una fuente renovable de energía y que debe promoverse que el depósito en vertedero sea, efectivamente, la última opción de gestión, ahora se constata que los grandes esfuerzos realizados en materia de medio ambiente industrial a nivel europeo en los últimos años, unidos a los desarrollos de las tecnologías de valorización y de depuración de gases, permiten llevar a cabo la valorización energética de residuos de una forma controlada y respetuosa con el medio ambiente.

### 3.2 SITUACIÓN EN EUROPA

Echar un vistazo a la situación a nivel europeo en materia de gestión de residuos puede ayudar a romper otra de las ideas preconcebidas que suele condicionar el desarrollo de la valorización energética, que es la consideración de que el reciclado y la valorización energética son opciones de gestión contrarias. Si se observa la figura 11, se puede concluir que no sólo no son herramientas antagónicas, sino que son complementarias.

PAÍS	RSU GENERADOS (kg/persona)	RSU TRATADOS (%)			
		VERTEDERO	INCINERACIÓN	RECICLADO	COMPOSTAJE
UE-27	524	40	20	23	17
Bélgica	493	5	36	35	25
Bulgaria	467	100	0	0	0
República Checa	306	83	13	2	2
Dinamarca	802	4	54	24	18
Alemania	581	1	35	48	17
Estonia	515	75	0	18	8
Irlanda	733	62	3	32	3
Grecia	453	77	0	21	2
España	575	57	9	14	20
Francia	543	36	32	18	15
Italia	561	44	11	11	34
Chipre	770	87	0	13	0
Letonia	331	93	0	6	1
Lituania	407	96	0	3	1
Luxemburgo	701	19	36	25	20
Hungría	453	74	9	15	2
Malta	696	97	0	3	0
Holanda	622	1	39	32	27
Austria	601	3	27	29	40
Polonia	320	87	1	9	4
Portugal	477	65	19	9	8
Rumanía	382	99	0	1	0
Eslovenia	459	66	1	31	2
Eslovaquia	328	83	10	3	5
Finlandia	522	50	17	25	8
Suecia	515	3	49	35	13
Reino Unido	565	55	10	23	12

Fuente: Eurostat

Figura 11. Gestión de RSU por Estados miembros de la UE (2008).

Se puede observar que en la UE-27 la media del vertedero es del 40% y la de incineración del 20%, pero es preciso resaltar que ambos valores están fuertemente condicionados por la contribución de los países del Este de la UE, que tienen tasas de vertedero altísimas: 100% en Bulgaria, 99% en Rumanía, 96% en Lituania, 97% en Malta y 87% en Polonia; mientras que países más avanzados en materia de gestión de residuos, como Bélgica, Dinamarca, Alemania, Holanda o Suecia presentan valores inferiores al 5%.

Parece claro pues que conseguir el depósito en vertedero de fracciones bajas de residuos urbanos es posible, pero... ¿cómo?

La respuesta a esta pregunta se obtiene al observar un comportamiento similar en determinados países: los países de la Unión Europea que presentan altas tasas de reciclado y bajas tasas de vertedero (Bélgica, Dinamarca, Alemania, Holanda, Austria, Suecia) también son los que presentan tasas de incineración más elevadas.

Es decir, parece que la vía escogida por los Estados Miembros que han conseguido obtener unas bajas tasas de depósito de residuos en vertedero ha sido apostar por el reciclado y la incineración.

Los distintos mix de opciones de gestión escogidos en los países de la Unión Europea conducen a la figura 12, donde se representa la producción de electricidad renovable a partir de RSU (valores en GWh) en la Unión Europea en el año 2007.

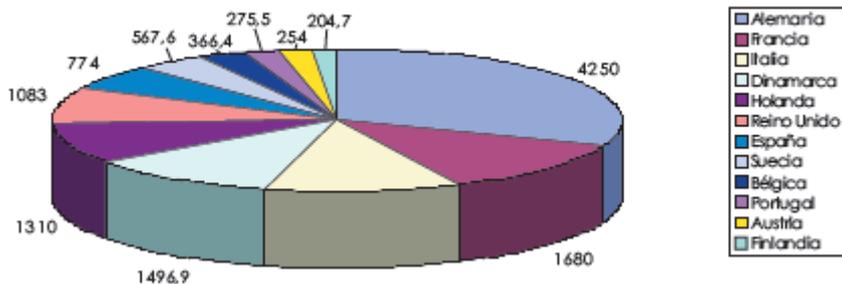


Figura 12. Generación de electricidad renovable (GWh) en la UE, año 2007.

La producción de energía primaria (en tep por cada 1.000 habitantes), que pone de manifiesto más a las claras la distancia que hay entre la generación eléctrica a partir de RSU en España y en la mayor parte la UE-15 (salvo Reino Unido), puede observarse en la figura 13.

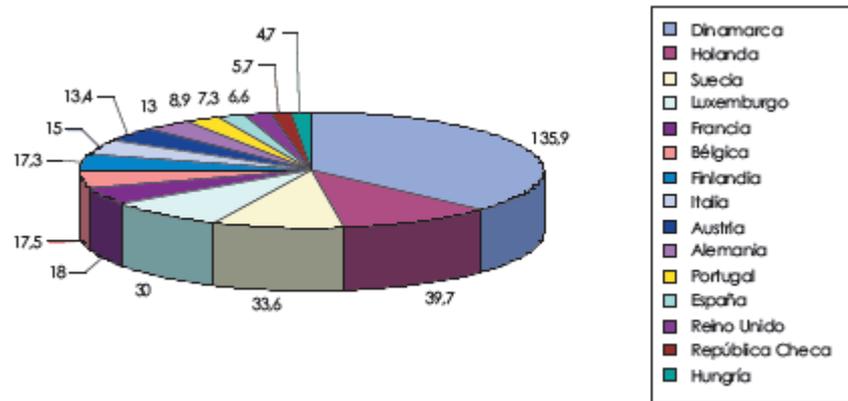


Figura 13. Producción de energía primaria (tep por cada 1.000 habitantes)

En cuanto al uso de residuos como combustibles en hornos industriales, a nivel europeo existen experiencias en sectores como el cementero, el papelero o las centrales térmicas. La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero europeo varía de forma importante en función del país al que se haga referencia.



Figura 14. Grado de sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos en la industria cementera europea, año 2008.

De nuevo puede observarse que países como Alemania, Austria, Bélgica, Holanda o Suecia presentan altas tasas de sustitución, superiores en la mayor parte de los casos al 40%.

El sector papelero europeo también es muy activo en lo que a valorización energética de residuos se refiere, tanto comercializando combustibles preparados a partir de sus propios residuos como en plantas de valorización energética ubicadas en la propia fábrica.

En cuanto a las centrales térmicas, países como Alemania usan lodos de depuradora (tanto urbana como de industrias papeleras) o combustibles derivados de residuos (obtenidos a partir de maderas usadas o plásticos) para sustituir parcialmente el carbón tradicionalmente utilizado.

### **3.3 SITUACIÓN EN ESPAÑA**

La política energética española obedece tanto a los compromisos adquiridos a nivel europeo como a las particularidades propias de nuestro país, pobre en recursos energéticos autóctonos. Esta escasez de recursos origina una dependencia energética exterior (alrededor del 80%) superior a la media comunitaria (que es del 53%), y otorga un valor estratégico añadido al desarrollo de recursos propios, como son las energías renovables, que además son medioambientalmente más respetuosas que las fuentes fósiles de energía.

Las sinergias entre esta política energética y el desarrollo de la gestión de residuos son evidentes: desde la desgasificación de vertederos con aprovechamiento del biogás captado hasta la incineración con recuperación energética, pasando por la digestión anaerobia de la fracción orgánica separada en origen de los residuos municipales o la sustitución en hornos industriales de combustibles fósiles por residuos que cumplan determinadas especificaciones.

Estas sinergias, están actualmente condicionadas por un excesivo peso del vertedero como opción de gestión de residuos que minora el potencial de contribución energética que podrían tener los residuos en España y que no es coherente con las normativas comunitarias, cada vez más resueltas a que el depósito en vertedero de los residuos sea realmente la última opción de gestión disponible.

La situación española en materia de gestión de residuos ha sido descrita en profundidad en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

Según el PNIR, en 2009 se generaron en España 23.648.032 t de RSU, que fueron gestionados de la siguiente manera:

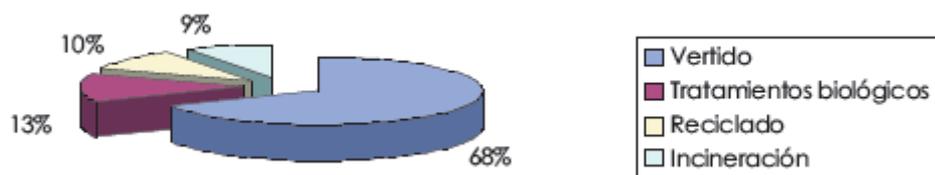


Figura 15. Gestión de RSU en España, año 2009

También según el PNIR, aproximadamente el 60% de las cantidades de residuos que entran en las plantas de tratamiento mecánico-biológico y en las plantas de clasificación de envases, tuvieron como destino final el vertedero o la incineración.

En relación con las estadísticas anteriormente recogidas que ofrece Eurostat para el año 2008, se puede observar cómo ha aumentado en porcentaje el compostaje y el reciclado, mientras que la incineración ha permanecido constante.

Dado que el compostaje para 2008 ya recoge valores (20%) alineados con los valores de los países con bajas tasas de vertedero, el reciclaje y la incineración parecen ser las herramientas a las que se puede recurrir para emular a los países que ya han tenido éxito en convertir al vertedero en una opción de gestión residual.

A día de hoy, la generación de electricidad a partir de RSU en España se lleva a cabo en 10 instalaciones.

INSTALACIÓN	CANTIDAD RSU TRATADA (t/año)	POTENCIA INSTALADA (MW)*	TIPO DE HORNO**
Meruelo (Cantabria)	64.018	9,9	Parrilla de rodillos
Girona (Cataluña)	699.170	2,0	Parrilla Martin
San Adriá de Besós (Cataluña)		24,0	Parrilla deslizante (von roll)
Mataró (Cataluña)		11,25	Parrilla móvil (Martin)
Tarragona (Cataluña)		7,4	Parrilla de rodillos
Mallorca (Baleares)	323.866	34,11	Parrilla de rodillos
Madrid (Madrid)	241.000	29,8	Lecho fluido burbujeante
La Coruña (Galicia)	533.452	50	Lecho fluido circulante
Melilla (Melilla)	36.000	2,8	Parrilla de dientes
Bilbao (País Vasco)	240.000	99,5	Parrilla deslizante (Martin)
<b>TOTAL</b>	<b>2.024.586</b>		

Figura 16. Instalaciones de incineración de RSU en España (2010).

Como puede observarse, la opción del horno de parrilla es la más extendida, con sólo 2 instalaciones que han optado por el lecho fluido.

Otras opciones tecnológicas de valorización energética de residuos, como la gasificación, la pirólisis o el plasma, aún no pueden considerarse tan maduras en su aplicación a los RSU como la incineración en horno de parrillas o lecho fluido.

A estas alturas, ya es evidente que una capacidad instalada de incineración de poco más de 2.000.000 de t de RSU/año es incompatible con un modelo de gestión de residuos sostenible.

Estudios contratados por IDAE, que han tenido en cuenta en todo momento la jerarquía de gestión de residuos y han contado con la participación de un amplio abanico de agentes del sector de la gestión de residuos, apuntan a que una capacidad instalada de incineración razonable, que permitiera poder equiparar nuestro modelo de gestión de residuos con el modelo de los países de la UE más avanzados en la materia, sería de alrededor del triple de la actual.

Con una capacidad de incineración de esa índole, la generación de electricidad renovable a partir de RSU podría rondar los 2.200 GWh.

En cuanto al uso de residuos en hornos industriales, en España el principal agente valorizador es el sector cementero. A pesar de ser un sector líder en cuanto a producción de cemento a nivel europeo, en 2008 el porcentaje de sustitución de combustibles fósiles por combustibles obtenidos a partir de residuos fue del 6,9% (correspondiendo, según datos de Oficemen, un 3,9% a combustibles obtenidos a partir de residuos no biomásicos y un 3% a combustibles obtenidos a partir de residuos biomásicos).

Este valor es casi 3 veces inferior a la media comunitaria (18%) y 6-7 veces inferior a los valores de sustitución en países como Alemania, Austria o Bélgica.

La evolución (en toneladas) del consumo en el sector cementero de combustibles obtenidos a partir de residuos puede observarse en la figura 17.

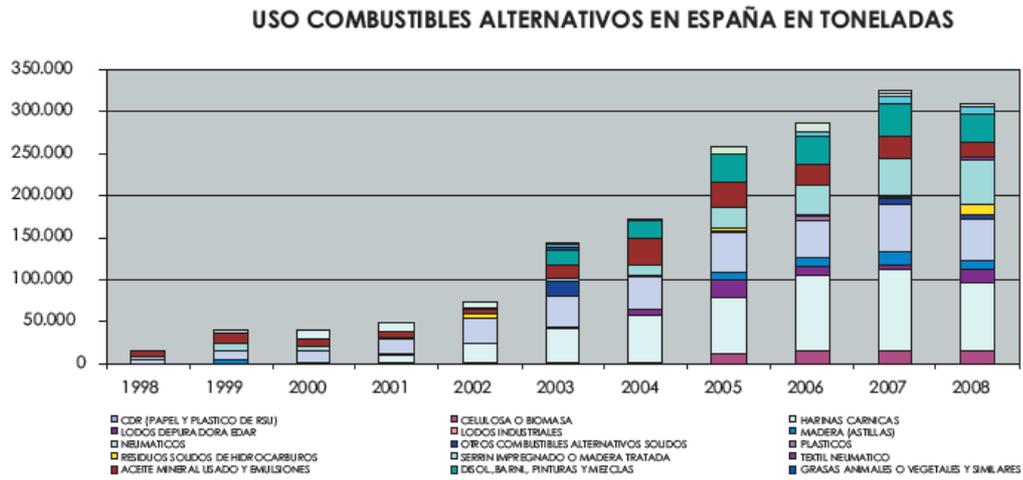


Figura 17. Evolución del uso de combustibles alternativos en España.

Es de reseñar también el interés de otros sectores españoles, como el del papel, por introducir prácticas que ya son habituales a nivel europeo.

Así, según la Guía de Gestión de Residuos publicada en 2008 por ASPAPEL, existen distintas opciones de valorización de los residuos generados por el propio sector (valorización energética *in situ*, valorización energética en una instalación externa o producción de combustibles derivados de residuos o combustibles sólidos recuperados) que se podrían utilizar una vez agotadas las vías de gestión prioritarias que dicta la jerarquía comunitaria. Como prueba de este interés, en junio de 2009 la Comunidad Autónoma de Aragón concedió la autorización ambiental integrada a una importante empresa papelera para valorizar energéticamente *in situ* más de 190.000 t rechazo púlper/año y más de 190.000 t lodos/año, con una potencia total instalada de 45 MW y una generación eléctrica esperada de más de 320.000 MWh/ año.

Dado el interés del sector y el amplio número de experiencias a nivel europeo, es de esperar que en los próximos años se desarrollen más instalaciones de valorización energética de residuos en el sector papelero, en cualquier de las tres modalidades comentadas.

## ***4. USO DE HARINAS CÁRNICAS COMO COMBUSTIBLE DE SUSTITUCIÓN***

El aprovechamiento de harinas cárnicas en plantas cementeras en España fue un hecho totalmente novedoso, y al igual que en el caso de neumáticos, existen ejemplos similares en países de nuestros entorno (Bélgica y Francia por ejemplo).

En este proyecto se estudia la valorización de harinas cárnicas que se emplearían como combustible en un horno de la línea de fabricación de clínker. Dicho horno, suponemos que tiene una capacidad promedio diaria de producción de clínker para cemento de 2.200 T (horno de tamaño medio).

Las harinas cárnicas, al igual como en el caso de los neumáticos, nunca se utilizarán como combustible primario del horno. Se adicionarán al combustible principal. El porcentaje de sustitución utilizado será del 20 % en peso del combustible principal.

### **4.1 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO**

#### **4.1.1 Descripción y composición**

Las harinas de animales están formadas en casi su totalidad por sustancias orgánicas, únicamente los restos provenientes de los huesos tienen naturaleza inorgánica.

En las tablas que se muestran a continuación, se recogen los resultados de los análisis necesarios para una correcta caracterización de las harinas.

ANÁLISIS INMEDIATO	
Humedad	4.9 %
Materia Volátil	70-75 %
Cenizas	22-28 %
PCS	4218 cal/g
PCI	3908 cal/g
Cloruros	0.68 %

ANÁLISIS ELEMENTAL	
Carbono	40-45%
Nitrógeno	6-9 %
Azufre	0.7-1.5 %
Hidrógeno	4-7 %
Metales	0.01 %
Inertes	22-28 %

ANÁLISIS DE LAS CENIZAS	
COMPONENTE	PORCENTAJE EN PESO
SiO <sub>2</sub>	1-1.5 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70-77 %
CaO	5-15 %
Na <sub>2</sub> O	1.5-3 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-0.15 %
K <sub>2</sub> O	0.1-0.5 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10-15%
SO <sub>3</sub>	0.5-1 %
Cu	7-10 ppm
Mn	6-10 ppm
Zn	75-100 ppm

#### 4.1.2 Producción del residuo

La producción de harinas cárnicas en España es de 370000 T/año, mientras que en la Comunidad Valenciana es de 40000 T/año.

Durante los procesos de despiece de los animales sacrificados en mataderos para la producción humana, así como los restos de los establecimientos de venta de estos productos al usuario final, se generan una serie de residuos, que podemos clasificar en dos grupos:

- Visceras, y demás elementos peligrosos que puedan contener el prión causante de la enfermedad. Estos materiales son los llamados MER (materiales específicos de riesgo).
- Restos de materiales generados, se trata principalmente de restos de carne y músculos, restos óseos, plumas, etc.

En este proyecto sólo trataremos los materiales agrupados en el segundo grupo.

Una vez generados, estos materiales son transportados a las plantas de producción de harinas cárnicas, en las que se lleva a cabo un proceso de trituración y esterilización en autoclave para eliminar los patógenos presentes, incluidos los priones. En estas plantas se obtienen dos productos, las harinas cárnicas y las grasas, extraídas durante la trituración.

Mientras que las grasas se siguen comercializando para piensos animales y otros usos, las harinas ya no se pueden utilizar para producción de piensos de rumiantes, por lo que hay un gran excedente de material.

### 4.1.3 Clasificación del residuo

La posible utilización de harinas cárnicas como combustible complementario en hornos de producción de clínker, al contrario que en el caso de los neumáticos, tiene un componente más social que económico.

Dada la enorme alarma social suscitada con la encefalopatía espongiforme bovina, “mal de las vacas locas”, y de acuerdo con la Decisión 2001/25/CE, de 27 diciembre de 2000, por la cual se prohíbe el uso de determinados subproductos en alimentación animal, está prohibido utilizar harinas animales para alimentación de animales destinados al consumo humano, las administraciones Centrales y autonómicas se han visto obligadas a estudiar la destrucción de miles de toneladas de harinas cárnicas generadas tras el tratamiento de los restos animales de alimentación humana.

Dado que, como se ha demostrado en la introducción de este proyecto, los hornos de producción de clínker son ideales para la destrucción de compuestos orgánicos, por sus condiciones de trabajo, la administración autonómica ha negociado con las cementeras la destrucción de dichas harinas.

La normativa que regula la utilización de harinas en fábricas de cemento, está contenida en el Real Decreto-Ley 4/2001 de 16 de febrero, sobre régimen de intervención administrativa aplicable a la valorización energética de harinas de origen animal procedentes de la transformación de residuos y de cadáveres de animales. En este Real Decreto-Ley se establece:

- Las harinas animales inactivadas de acuerdo a las condiciones que establece la normativa comunitaria (133° C, 3 atmósferas, 20 minutos) no constituyen material de riesgo y pueden ser gestionadas como cualquier residuo no peligroso.

- La valorización energética de harinas animales está exenta de la autorización administrativa establecida en el artículo 13.1 de la Ley 10/98 de 21 de Abril de Residuos, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:
- La cantidad de harinas valorizadas ha de ser inferior al 10 % de la capacidad de producción individual de cada planta.
- Los niveles de emisión de contaminantes deben cumplir las prescripciones establecidas en materia de protección del ambiente atmosférico.

#### **4.2 GESTIÓN ACTUAL DE LAS HARINAS Y PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL ASOCIADA**

De acuerdo con la decisión 2000/418/CE de la comisión, de 29 de Junio de 2000, por la cual se reglamenta el uso de los materiales de riesgo en relación con las Encefalopatías Espongiformes Transmisibles, existen dos posibles alternativas para tratar los Materiales Especificados de Riesgo (MER), constituidos por los tejidos de animales bovinos, ovinos y caprinos de los cuales pueden presentar la Encefalopatía Espongiforme.

Estas alternativas son:

- Incineración
- Transformación en harinas para la destrucción del prión (a 133° C, 3 atmosferas, 20 minutos) y posterior eliminación de las harinas en las siguientes instalaciones:
  - Incineradora, hornos de cemento u otras instalaciones de incineración.
  - Vertedero.

El depósito en vertedero es la peor solución y la inicialmente practicada en España. El principal problema del depósito en vertedero es la enorme producción diaria de harinas y su naturaleza orgánica. Al igual como en el caso de los neumáticos, este material es “ideal” para la aparición de roedores, moscas y demás animales atraídos por este material. Otro problema es el fuerte olor producido por las harinas, que al tratarse de un material orgánico, en presencia de humedad y temperatura, fermenta con facilidad agudizándose el problema.

Por último, la valorización energética de estos residuos es la solución escogida por las autoridades competentes. Las razones para ello son: posibilidad de destrucción de gran cantidad de material y garantía de destrucción completa del prión.

✓ **Problemática ambiental asociada**

▪ **Problemas en vertederos**

La acumulación de harinas en vertederos, tanto controlados como incontrolados, crea riesgos tanto ambientales, como de salud y seguridad.

La composición de estas harinas con proporciones de materia orgánica degradable muy alta, provoca que en condiciones favorables de humedad y temperatura se aceleren las reacciones de fermentación con la consecuente generación de gases tóxicos y combustibles...

Una ruptura en la capa de arcilla permite la infiltración de lluvia o agua superficial que puede entonces aumentar la cantidad de lixiviados que, a su vez, contaminarán el suelo de los alrededores y/o acuíferos.

La ruptura de la capa del vertedero es un riesgo potencial para la salud, creando un acceso para roedores, insectos y pájaros.

Además, estas harinas, debido a su baja densidad, ocupan un volumen considerable. Por otro lado, aunque el proceso de producción de harinas garantiza la destrucción de agentes patógenos, el riesgo de deposición en vertedero es muy grande.

Por otro lado, este tipo de material tiene un olor desagradable que empeora con el transcurso del tiempo, debido a las reacciones que sufre.

- **Incendio de las harinas**

Las harinas amontonadas sin control, son un riesgo potencial de incendio, debido a su composición, si se dan unas condiciones adecuadas, pueden entrar en autocombustión.

Los gases generados en su fermentación son fácilmente combustibles, por lo que el riesgo, como se ha visto en algún vertedero español, es real.

- **Harinas como precursor de la presencia de insectos**

La presencia de harinas cárnicas, provoca la aparición de insectos (moscas y mosquitos) y de roedores (ratas), que pueden transmitir enfermedades infecciosas, debido a que se alimentan tanto de animales muertos como de vivos.

### **4.3 ALTERNATIVA DE GESTIÓN PROPUESTA**

Generalmente se utilizan dos sistemas: Combustión de las harinas introducidas por el quemador principal, o bien, por el precalcinador.

Se ha escogido la de introducción por el quemador, debido a su menor costo de inversión y operación, así como a su mejor y más segura combustión en el horno.

Estas harinas nunca se utilizarán como combustible primario del horno. Se añadirán al combustible principal. El porcentaje de sustitución no superará el 10% en potencia del combustible principal, es decir, el 20% en peso.

#### **4.3.1 Descripción de las pruebas realizadas**

- **Almacenamiento de las harinas**

La planta recibirá las harinas, que ya habrán sufrido el correspondiente tratamiento térmico a través de los propios fabricantes de harinas. La cantidad promedio estimada para la Comunidad Valenciana es de aproximadamente 40000 T/año.

El transporte se realiza en camiones propiedad de los fabricantes de harinas. Transportan al menos 20 T con una densidad de producto en torno al 0.5 kg/l.

Una vez en planta, el camión pasa por la báscula para el pesaje y descargará a continuación en los silos de acero preparados para ello.

#### ▪ **Dosificación y alimentación al horno**

Existe un silo de harinas que alimenta al horno, dotado de una báscula dosificadora. El sistema es neumático para evitar fugas y el contacto con los operarios.

Para evitar retenciones y atascos de material, se evitarán codos y se enfriará el material de manera que se evite la condensación de la grasa que provoca pegaduras. La salida del silo irá conectada al quemador principal, donde entrará al horno, mezclándose con el coque.

#### **4.3.2 Metodología empleada**

El procedimiento normal para la realización de pruebas de emisiones de metales pesados a la atmósfera, consiste en hacer una caracterización total de la contribución de materias primas y combustibles al contenido total de cada uno de los metales en estudio.

Cuando tengamos las entradas, se analizarán las salidas, es decir, el clínker y las emisiones, y así, poder realizar un balance para conocer el porcentaje de fijación de cada metal.

Analizaremos muestras sólidas, digeridas en un horno de microondas con distintos volúmenes de ácidos, que será por regla general, el ácido nítrico, clorhídrico y/o fluorhídrico, con su método correspondiente.

La muestra digerida es recuperada, aforada a un determinado volumen y se dispone a analizar por plasma (ICP).

El siguiente paso es la medición de las emisiones de los distintos contaminantes. El muestreo se lleva a cabo bajo este método.

La muestra es tomada isocinéticamente y las emisiones de partículas son colectadas en la sonda del tren de muestreo y el filtro. Por otro lado, las emisiones gaseosas de metales, se colectan en borboteadores que contienen soluciones acuosas de ácido nítrico-peróxido de hidrógeno (en dos borboteadores) y solución ácida de permanganato de potasio (en otros dos borboteadores).

### **4.3.3 Valoración técnica**

- **Viabilidad de la utilización del proceso**

Cabe analizar:

- a) Condiciones térmicas del horno

Además de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia, el horno aporta una gran inercia térmica, lo que le garantiza que la eliminación de residuos se realiza en condiciones estables.

Como posee una gran capacidad calorífica, no es posible un cambio significativo de temperatura en un breve periodo de tiempo. Por ello, si hubiera algún fallo, se destruirían de manera total los residuos orgánicos que pudiera haber en ese momento en el horno, a la vez que se cortaría la alimentación de harinas al horno.

- b) Tratamiento termo-químico de los gases de combustión en contacto con el crudo circulante en el proceso.

La combustión de residuos suele venir acompañada de la formación de compuestos tóxicos: compuestos halogenados, metales pesados, óxidos de azufre, etc. Ello obliga a tratar los gases de escape para reducir la emisión de dichos compuestos tóxicos.

En el caso del horno de clínker el tratamiento se realiza por interacción termo-química con las materias primas entrantes al proceso.

Las características alcalinas de los materiales empleados permiten la captación de los elementos halógenos y del azufre, mediante la formación de sales y sulfatos alcalinos respectivamente.

Los hornos de cemento no poseen dispositivos para la depuración de ácidos porque el medio del horno de cemento es alcalino. Uno de los principales pasos en la producción de cemento es la calcinación del carbonato de calcio para producir cal, que es el mismo material utilizado en los dispositivos para la depuración de ácidos de un incinerador de residuos peligrosos.

Otros componentes alcalinos, tales como el óxido de magnesio, se generan también en el proceso de producción. Por lo tanto, cuando los gases se desplazan desde de la zona de combustión a través de las zonas de calcinación y secado, la mayoría de estos gases son neutralizados por el material alcalino que hay en el horno

- c) Captación de metales

En el caso de metales, la capacidad de retención en el clínker es muy elevada, sustituyendo átomos de calcio en la red cristalina de los silicatos.

▪ **Limitaciones del proceso**

- ❖ El contenido en grasa del material no debe sobrepasar el 15 % debido a los problemas de transporte que supone.
- ❖ El contenido en Cloro no debe sobrepasar el 0.5 % como Cl<sub>2</sub>, debido a los problemas de pegaduras que suponen un aumento del cloro en el interior del sistema.
- ❖ La temperatura del material debe ser menor de 45° C para evitar problemas en la descarga del camión.
- ❖ El porcentaje en fósforo expresado como P debe ser inferior al 8%, para evitar problemas de calidad en el clínker.
- ❖ Debe ajustarse la presión de aire en el quemador, para evitar la formación de CO, y para que la altura de llama sea la adecuada para la correcta combustión en el horno.

Suponiendo una sustitución del 10% en potencia (20 % en peso), y considerando un consumo calorífico promedio del horno de 843 Kcal/Kg. de clínker producido, así como una producción promedio del horno de 782.000 T de clínker/año, el consumo anual posible de harinas sería:

$$782.000 \text{ T clínker/año} * 843 \text{ kcal/Kg clínker} * 0.1 / 4200 \text{ Kcal/Kg. de harina} = \mathbf{15696 \text{ T harinas/año}}$$

Con lo que se demuestra la capacidad del horno para eliminar las harinas producidas, donde aproximadamente se destruirían más de la tercera parte de las harinas generadas en la Comunidad Valenciana.

▪ **Efectos de la combustión de harinas sobre el cemento**

La combustión de las harinas se realiza siempre en condiciones que aseguren que la calidad de los cementos permanece inalterada, imponiendo cuando sea preciso límites al grado de sustitución energética (el límite usual de sustitución para harinas se fija en el entorno del 20% en peso).

Dado que el porcentaje en metales de las harinas es muy inferior al del coque, es de suponer que el porcentaje de metales en el clínker va a ser un poco menor (en función de la sustitución) con harinas que sin ellas, de ahí que se suponga que la lixiviación va a ser inferior.

Una de las mayores preocupaciones públicas es el potencial de los metales en el cemento para lixiviarse hacia el medio ambiente una vez que el cemento ha sido usado en el proyecto de construcción (ej., carreteras, edificios, o patios).

Existen estudios donde se aprecia que en los ensayos realizados hasta el momento, tanto en Europa como en Estados Unidos, han demostrado que no hay diferencias de comportamiento entre los cementos fabricados con combustibles tradicionales y aquellos en que se han utilizado combustibles secundarios.

Un ejemplo de la capacidad fijadora del cemento es que, en países de nuestro entorno, se utiliza habitualmente para la solidificación y estabilización de residuos orgánicos con alto contenido en metales pesados, garantizando la inertización de los mismos.

▪ **Elementos de maquinaria de nueva introducción**

Las necesidades generadas por la introducción de este proceso, comportarán nuevas instalaciones, incluyendo los siguientes elementos:

- Silos de descarga para los camiones. Su interior estará fluidificado con aire frío, por lo que será necesario una instalación para ello. La capacidad global de estos silos será de 200 T.
- Tolva de almacenamiento de 270 m<sup>3</sup> de capacidad cubierta.
- Sistema automático de almacenamiento y alimentación, compuesto por una cuchara de garras múltiples desplazable por monorraíl, sobre la tolva de almacenamiento y la de descarga de camiones. Su rendimiento máximo de alimentación es de 1,9 T/hora.
- Tolva de carga
- Transportador de placas para vaciado
- Tambor de alisado
- Cinta pesadora
- Cinta transportadora de artesas desde instalación de almacenamiento y dosificación al horno
- Compuerta de triple clapeta para la alimentación al horno.
- Estructuras soporte
- Instalación eléctrica y de control

#### 4.3.4 Valoración económica

La valoración energética de un residuo por parte de una cementera, conlleva una mejora medioambiental por no llevarse el residuo al vertedero. Esto supone un ahorro económico debido a no pagar canon de depósito de vertedero. El precio de este canon difiere de cada país, como observamos en la siguiente tabla:

PAÍS	Canon (USA \$ / T)
Reino Unido	40
Alemania	50-100
Dinamarca	80-100
Japón	90-120
España	0-50

Puede observarse que en España, el canon es especialmente bajo, y la tendencia será sin ninguna duda al alza, lo cual será un factor que apoyará la valorización energética del residuo.

Las inversiones según datos de OFICEMEN para la utilización de harinas en cementeras, es de 3 millones de euros.

Para el estudio económico, utilizaremos el dato de consumo de harinas para un horno de 2200 T clínker/día, que es de 16000 T harinas / año. Conocemos también la potencia calorífica superior del material, 4200 kcal/kg. El estudio se realiza para una inversión de 1.8 millones de euros amortizados en 5 años.

Para calcular el beneficio obtenido, se parte del precio que una cementera paga por termia (1termia = 1.000 kcal) de energía térmica generada: 0,003 – 0,006 €/termia. Usaremos 0.003 €/termia en el peor de los casos.

Teniendo en cuenta que según la caracterización realizada, el poder calorífico superior del material, es de 4200 kcal/kg, resulta:

$$\text{Beneficio ( €/kg )} = 4,2 \text{ (termia/kg)} * 0,003 \text{ ( €/termia)} = 0.0126 \text{ €/kg}$$

Por tanto, los ingresos netos por unidad de masa serían:

$$\text{Ingresos ( €/kg )} = 0.0126 - (360000/\text{harinas (kg/año)})$$

Por tanto, necesitaríamos 28572 T de harinas para empezar a rentabilizar.

Como estamos hablando de valorizar 16000 T de harinas, sería necesario poner un canon de gestión para valorizar el residuo. En este momento, el canon es de 0.036 €/kg.

En la siguiente tabla se muestra el coste de depositar las harinas en el vertedero, los beneficios de la sustitución de esas harinas por coque y los ingresos finales al descontar el coste de la instalación (amortización en 5 años). Se toma como base 16000 T de harinas al año.

	€/ kg	€/ año (16000 T)
Vertedero	- 0.048	- 768000
Beneficios	0.013	208000
Ingresos (sin canon)	- 0.01	- 160000
Ingresos (con canon)	0.026	416000

NOTA: En los ingresos no se ha tenido en cuenta el que se obtendría de no llevar esa cantidad de harinas al vertedero.

#### **4.3.5 Valoración medioambiental**

En condiciones normales de funcionamiento (sin valorizar ningún residuo), también se emitirían una serie de contaminantes a la atmósfera por la chimenea del horno estudiado. La empresa tendrá la obligación de controlar esas emisiones periódicamente, así como bianualmente un OCA realizará sus verificaciones, tal y como está previsto legalmente.

##### **➤ Captación de gases tóxicos**

La combustión de residuos suele venir acompañada de la formación de compuestos tóxicos: compuestos halogenados, metales pesados, óxidos de azufre, etc. Ello obliga a tratar los gases de escape para reducir la emisión de dichos compuestos tóxicos.

En el caso del horno de clínker, el tratamiento se realiza por interacción termo-química con las materias primas entrantes al proceso.

Las características alcalinas de los materiales empleados permiten la captación de los elementos halógenos y del azufre, mediante la formación de sales y sulfatos alcalinos respectivamente.

Uno de los problemas de la incineración de residuos peligrosos es la generación de gases ácidos (ej., HCl). Como consecuencia de esto, los incineradores de residuos peligrosos tienen dispositivos para la depuración de ácidos, que utilizan compuestos alcalinos, tales como hidróxido de sodio o de cal, para neutralizar los gases. Los hornos de cemento no poseen dispositivos para la depuración de ácidos porque el medio del horno de cemento es alcalino.

Uno de los principales pasos en la producción de cemento es la calcinación del carbonato de calcio para producir cal, que es el mismo material utilizado en los dispositivos para la depuración de ácidos de un incinerador de residuos peligrosos.

Otros componentes alcalinos, tales como el óxido de magnesio, se generan también en el proceso de producción. Por lo tanto, cuando los gases se desplazan desde de la zona de combustión a través de las zonas de calcinación y secado, la mayoría de estos gases son neutralizados por el material alcalino que hay en el horno.

A continuación, y en subsiguientes apartados se analizan distintos parámetros de contaminación atmosférica de importancia contemplados en la legislación.

#### ➤ **Emisión de partículas**

La emisión de partículas está limitada según la legislación vigente, el Decreto 833/1975 de 6 de febrero por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico. En su anexo IV, sección 9 relativa a instalaciones industriales de fabricación de cemento, limita la emisión de partículas a un máximo de 150 mg/Nm<sup>3</sup>.

Dado que según el Real Decreto-Ley 4/2001 de 16 de febrero, la utilización de las harinas como combustible secundario para un porcentaje de sustitución menor del 10 %, se considera combustible, el límite de emisión sería el mismo.

En condiciones normales de funcionamiento, un horno de vía seca, con un electrofiltro asociado como sistema de depuración de gases, tiene unas concentraciones de emisión muy inferiores a ese valor.

De cualquier manera, el hecho de alimentar harinas como combustible no supone un aumento de las emisiones de partículas con respecto a condiciones de funcionamiento normales.

Como ejemplo, en las pruebas realizadas en una planta de cementos en el País Vasco, se comparan entre otras cosas, la emisión con consumo de harinas y la previa a ese consumo, con los siguientes resultados en el caso de partículas:

Compuesto	Unidad	Adición harinas	Sin Adición harinas
Partículas sólidas	Mg/Nm <sup>3</sup>	17	2-49

Los valores sin adición de harinas son el rango de emisión en que se mueve la planta en condiciones normales. Como se aprecia no hay un aumento de la emisión de partículas por valorizar harinas.

#### ➤ **Óxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y Oxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

El azufre de las harinas se neutraliza en forma de sulfatos, como se ha explicado previamente. Esta transformación se debe a la naturaleza altamente alcalina de la materia prima en fusión en la fabricación del clínker. La presencia en el horno de una carga importante de materia caliente y una gran cantidad de refractario, induce una fuerte inercia térmica que contribuye a la fiabilidad de este proceso de eliminación.

Por otra parte, el contenido en azufre de las harinas es muy inferior al del combustible tradicional (coque de petróleo), por lo que se mejora la situación desde este punto de vista.

El contenido medio de azufre en los combustibles es:

	<b>% AZUFRE (S)</b>
Harina	1.0
Coque	5.0
Neumático	1.3

Al igual que el coque, el contenido de azufre en las harinas es variable dependiendo de las distintas remesas de combustible. Un análisis tipo revela los siguientes contenidos:

<b>PARÁMETROS</b>	<b>Harinas</b>	<b>Coque</b>
Potencia Calorífica Superior (Cal/gr)	4200	8600
Potencia Calorífica Inferior (Cal/gr)	3900	8300
Azufre (%)	1.0	5.0
SO <sub>3</sub> (%)	2.5	12.5

La legislación española aplicable, el Decreto 833/1975 de 6 de febrero por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico, indica en su anexo IV sobre niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera que la emisión de SO<sub>2</sub> para instalaciones de combustión industrial que utilizan carbón y sus derivados será como máximo de 2400 mg/Nm<sup>3</sup>.

En el caso de hornos de vía seca, la emisión de SO<sub>2</sub>, si el diseño de la torre de precalcinación es correcto y favorece el perfecto contacto entre gases ácidos y crudo alcalino, es menor de 30 mg/Nm<sup>3</sup>.

Al igual que en el caso de los neumáticos, es esperable una reducción de la emisión de SO<sub>2</sub>, dado que las harinas tienen un contenido en azufre muy inferior al coque de petróleo.

En el caso de los óxidos de nitrógeno, que se producen debido a la reacción a alta temperatura entre el Oxígeno y el Nitrógeno de aire primario y del combustible, no se prevé que aumenten debido a la valorización de las harinas.

Según el informe de la cementera vasca:

Compuesto	Unidad	Adición harinas	Sin Adición harinas
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	51	3 - 82
NO <sub>x</sub>	ppm	189	41-471

No existe límite de emisión de NO<sub>x</sub> para cementeras, aunque estas están tomando como límite de emisión 800 mg/Nm<sup>3</sup>)

#### ➤ Emisión de metales

El sistema de combustión de harinas como combustible secundario no va a generar un cambio radical en las características de estas emisiones de metales.

En el caso de metales, la capacidad de retención en el clínker es muy elevada, sustituyendo átomos de calcio en la red cristalina de los silicatos.

Como hemos visto antes, los porcentajes de fijación de los metales en el clínker son muy altos:

<b>METALES</b>		<b>% DE RETENCION EN EL CLÍNKER (%)</b>
Cd		99.5550 +/- 0.4418
Tl		90.1219 +/- 10.7113
Hg		61.300 +/- 32.5000
Sb		99.7690 +/- 0.0785
As		99.8868 +/- 0.2916
Pb		99.8531 +/- 0.2008
Cr		99.8553 +/- 0.3990
Co		99.9574 +/- 0.0108
Cu		99.8553 +/- 0.3990
Mn		99.8420 +/- 0.1839
Ni		99.9574 +/- 0.0108
V		99.9922 +/- 0.0007
Sn		99.8553 +/- 0.3990

Estos valores son similares para todos los sistemas de hornos de clínker e independientes de la procedencia de los metales: crudo, combustible, etc.

La gran mayoría de los metales a estudiar tienen un comportamiento no volátil. Los metales más volátiles y, por lo tanto, que más hay que controlar, son el Talio y el Mercurio, metales que por otra parte no forman parte de la composición de las harinas.

Según el informe del que estamos hablando en este capítulo:

Compuesto	Unidad	Adición harinas	Sin Adición harinas
Cd	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 12	< 10 - < 20
Hg	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 20	< 10 - < 35
Ni	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 6	< 10 - 87
As	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 6	< 10 - < 35
Se	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 60	< 10 - < 50
Zn	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	42	16 - 3473
Pb	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 12	< 10 - < 50
Cr	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 6	< 10 - 49
Cu	$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	< 6	< 10 - 19

Nota: < valor, indica no detectado, menor del límite de detección.

Como se puede apreciar en esta tabla de resultados, con adición de harinas sólo se detecta Zn, pero en una concentración dentro del rango de emisión de condiciones normales. Existen metales que sí se aprecian en condiciones normales, y que desaparecen al sustituir harinas por coque.

Para obtener conclusiones sobre la influencia de la valorización de harinas en los hornos de producción de clínker en la emisión de metales, es necesario realizar un balance de los mismos. Partimos de los mismos datos que para el caso de combustibles.

Primero, es necesario realizar una determinación del contenido de metales durante la producción convencional de cemento de los siguientes productos:

ENTRADAS		SALIDAS	
Combustible (coque de carbón)	Crudo (caliza y marga)	Clínker	Emisiones atmosféricas

Los datos de flujos máxicos utilizados para el cálculo del balance son:

- Caudal de gases en chimenea: 243000 m<sup>3</sup>/h
- Alimentación de crudo: 156 T/h
- Alimentación de coque: 9.8 T/h
- Producción de clínker: 92.5 T/h

Si tomamos estos resultados como iniciales, los valores con un signo menor indican que no se detecta y ese valor es el límite de detección:

<b>Metal</b>	<b>Emisión en gases (Kg/h)</b>	<b>Emisión en partículas (Kg/h)</b>	<b>Emisiones totales (Kg/h)</b>	<b>Clínker (Kg/h)</b>	<b>Crudo (Kg/h)</b>	<b>Combustible (Kg/h)</b>
As	<1,16E-3	<0,093E-03	<0,00125	0,971	1,045	<0,009
Cd	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Co	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Cr	<0,58E-3	0,00068	<0,00126	2,044	<0,936	<0,058
Cu	0,01271	0,02150	0,03421	13,127	9,809	<0,058
Hg	0,00699	0,000002	0,00699	0,010	0,016	0,004
Mn	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	15,245	17,068	0,074
Ni	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	2,064
Pb	0,05433	0,00174	0,05607	10,366	10,485	0,136
Sb	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Se	<0,58E-3	<0,9313E-03	<0,00151	<1,110	<1,872	<0,117
Sn	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	1,025	0,635	0,375
Tl	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
V	<0,58E-3	1,517E-03	<0,00210	14,449	1,891	8,753
Zn	0,124	7,046E-03	0,13075	45,615	48,274	0,597

Una vez obtenido el balance de metales, se calcula el porcentaje de fijación de estos elementos en el clínker.

Metal	Entradas (Kg/h)		Salidas (Kg/h)		Porcentaje de fijación
	Crudo (Kg/h)	Combustible (Kg/h)	Clínker (Kg/h)	Emisiones (Kg/h)	
As	1,045	<0,009	0,971	<0,001253	99,8712%
Cd	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Co	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Cr	<0,936	<0,058	2,044	<0,001262	99,9383%
Cu	9,809	<0,058	13,127	0,0342123	99,7400%
Hg	0,016	0,004	0,010	0,0069922	59,3292%
Mn	17,068	0,074	15,245	<0,0010457	99,9931%
Ni	<0,936	2,064	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Pb	10,485	0,136	10,366	0,0560657	99,4620%
Sb	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Se	<1,8720	<0,117	<1,110	<0,0015113	99,8640%
Sn	0,635	0,375	1,025	<0,0010457	99,8981%
Tl	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
V	1,891	8,753	14,449	<0,0020971	99,9855%
Zn	48,274	0,597	45,615	0,1307456	99,7142%

La proporción de fijación en el clínker es en general muy alta.

A continuación se reproducen los resultados obtenidos del análisis de harinas. Para el cálculo de los valores en Kg/h se ha previsto una sustitución del 10% de combustible convencional por un 20 % en peso de harinas.

	Harina cárnica (mg/Kg)	Harina cárnica (Kg/h)
As	<1	<0,001
Cd	<6	<0,012
Co	<6	<0,012
Cr	<6	<0.012
Cu	8.8	0.017
Hg	<1	<0,001
Mn	7.3	0,014
Ni	<6	<0,012
Pb	<6	<0.012
Sb	<6	<0,012
Se	<12	<0,023
Sn	<6	< 0.012
Tl	<6	<0,012
V	<6	<0,012
Zn	83.7	0.134

Una vez se dispone de todos los datos, se realiza el cálculo de las emisiones previstas con la sustitución de un 10% de combustible por harina (20% en peso) y, por tanto, 80% de combustible convencional.

	ENTRADAS					SALIDAS		
	Harina 20% de alimentación (Kg/h)	Crudo (Kg/h)	Combustible (Kg/h)	Combustible 80% (Kg/h)	Suma entradas (Kg/h)	Proporción fijación clínker	Clínker(Kg/h)	Emisiones (Kg/h)
As	<0,001	1,045	<0,009	<0,0072	<1,053	0,998711506	<1,052	<0,001
Cd	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,993	<0,002
Co	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,993	<0,002
Cr	< 0.012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,999383024	<0,993	<0,0007
Cu	0,016	9,809	<0,058	<0,0464	<9.873	0,997400461	<9.847	<0,026
Hg	< 0.001	0,016	0,004	0,00352	< 0,020	0,593292307	< 0,012	< 0,008
Mn	0,014	17,068	0,074	0,05944	17,142	0,999931411	17,141	0,001
Ni	<0,012	<0,936	2,064	1,65112	<2.599	0,998119399	<2,594	<0,005
Pb	< 0.012	10,485	0,136	0,10912	10,606	0,994620223	<10.549	<0,057
Sb	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,992	<0,002
Se	<0,023	<1,8720	<0,117	<0,0936	<1,977	0,99864032	<1,975	<0,003
Sn	< 0.012	0,635	0,375	0,29968	0.947	0,998980547	< 0.946	< 0.001
Tl	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,992	<0,002
V	< 0.012	1,891	8,753	7,00208	8,905	0,999854878	< 8,903	< 0,001
Zn	0.134	48,274	0,597	0,47744	48.886	0,997141876	48.746	0.140

Dado que en la legislación española o autonómica actualmente vigente no se hace referencia alguna a la limitación de emisiones atmosféricas de metales por combustión en hornos de clínker de residuos no especiales, se compararán los resultados a la Directiva 94/67/CE del Consejo, de 16 de diciembre de 1994, relativa a la incineración de residuos peligrosos y a su transposición en la legislación española, el Real Decreto 1217/1997 de 18 de julio sobre incineración de residuos peligrosos.

	EMISIONES ACTUALES		EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%	
	Emisiones (Kg/h)	Emisiones (mg/m <sup>3</sup> )	Emisiones (Kg/h)	Emisiones (mg/m <sup>3</sup> )
As	<0,0013	<0,0052	<0,0013	<0,0056
Cd	<0,0010	<0,00432	<0,0019	<0,0077
Co	<0,0010	<0,00432	<0,0019	<0,0077
Cr	<0,0013	<0,0052	<0,0006	<0,0025
Cu	0,0342	0,1408	<0,0256	<0,1056
Hg	0,0070	0,0288	< 0,008	<0,0337
Mn	<0,0010	<0,0043	0,0012	0,0048
Ni	<0,0010	<0,0043	<0,0049	<0,0201
Pb	0,0561	0,2307	<0,0571	<0,2348
Sb	<0,0010	<0,0043	<0,0019	<0,0077
Se	<0,0015	<0,0062	<0,0027	<0,0111
Sn	<0,0010	<0,0043	<0,0009	<0,0040
Tl	<0,0010	<0,0043	<0,0019	<0,0077
V	<0,0021	<0,0086	<0,0013	<0,0053
Zn	0,1307	0,5380	0,1397	0,5749

Como se puede apreciar no hay grandes variaciones entre las emisiones con y sin combustión de harinas.

DIRECTIVA INCINERACIÓN RESIDUOS ESPECIALES			
PARÁMETROS	EMISIONES ACTUALES (mg/m <sup>3</sup> )	EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%	VALOR LÍMITE (mg/m <sup>3</sup> )
Cd+Tl	<0,0086	<0,0154	0,05
Hg	0,0288	0,0337	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+ Cu+Mn+Ni+V+Sn	<0,4120	<0,398	0,5

Dado que el Zinc no aparece en esta legislación, se aplica otra tabla extraída de la legislación francesa, para emisiones de metales en hornos de clínker:

<b>LEGISLACIÓN FRANCESA</b>			
<b>PARÁMETROS</b>	<b>EMISIONES ACTUALES (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%</b>	<b>VALOR LÍMITE (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Cd+Hg+Tl	<0,0374	<0,0491	0,2
Ni+As+Se+Co	<0,0199	<0,0445	1
Pb+Cr+Cu+Zn+Sb+Mn+V	<0,9319	<0,9357	5

#### 4.3.6 Medidas correctoras adicionales y programa de vigilancia ambiental

##### ➤ Medidas correctoras adicionales

Las medidas correctoras de la contaminación atmosférica provocada por la incineración de harinass, serán las mismas que están instaladas en los hornos de clínker sin ningún tipo de combustión de alternos, es decir, un electrofiltro. El propio horno de clínker, debido a su diseño y características de atmósfera alcalina, reduce la emisión de óxidos de azufre y metales pesados, que se fijan en el clínker.

El azufre (promedio de 1.0% en peso de las harinas) se neutraliza en forma de sulfatos. Ésta transformación se debe a la naturaleza altamente alcalina de la materia en fusión en la fabricación del clínker. La presencia en el horno de una carga importante de materia caliente y una gran cantidad de refractario, induce una fuerte inercia térmica que contribuye a la fiabilidad de este proceso de eliminación.

Desde el punto de vista del contenido en metales, el material del que estamos hablando, no contiene prácticamente metales, muchos menos y en menor proporción que el coque y por supuesto, los neumáticos.

➤ **Programa de vigilancia ambiental**

El programa de vigilancia ambiental, tiene como objetivos, controlar la aplicación correcta de las medidas correctoras y hacer un seguimiento de una serie de parámetros de seguimiento, que den una idea de cómo evolucionaría el entorno a partir de la construcción y funcionamiento de la obra.

En el presente caso, se realizará un seguimiento de las emisiones atmosféricas y de la efectividad de las medidas correctoras propuestas, que son tan sólo las ya existentes.

Se propone realizar un seguimiento de los siguientes parámetros, aplicados a las emisiones atmosféricas de la chimenea del horno:

- ❖ Partículas
- ❖ Óxidos de Azufre (SOx)
- ❖ Metales:
  - . Antimonio (Sb)
  - . Arsénico (As)
  - . Cadmio (Cd)
  - . Cinc (Zn)
  - . Cobalto (Co)
  - . Cobre (Cu)
  - . Estaño (Sn)
  - . Manganeseo (Mn)
  - . Mercurio (Hg)
  - . Níquel (Ni)
  - . Plomo (Pb)
  - . Selenio (Se)
  - . Talio (Tl)
  - . Vanadio (V)

➤ **Condiciones de seguimiento**

Se propone realizar dos tipos de control:

**Controles en fase de pruebas**

Durante los primeros seis meses de funcionamiento del sistema.

*Control interno*

- Medición de partículas en continuo, cuyos resultados se enviarán al órgano medioambiental competente, con la periodicidad establecida en la legislación vigente.
- Medición de metales y SO<sub>2</sub>. Se realizará bimensualmente, y se enviarán los resultados al órgano medioambiental competente.

**Controles en fase de funcionamiento**

*Control interno*

- Medición de partículas en continuo, cuyos resultados se enviarán al órgano medioambiental competente, con la periodicidad establecida en la legislación vigente.
- Medición de metales y SO<sub>2</sub>. Se realizará bimensualmente, y se enviarán los resultados al órgano medioambiental competente.

*Control externo*

- Mediante las mediciones realizadas por un OCA que efectuará mediciones de partículas, balance de metales y SO<sub>2</sub> a los seis meses de la puesta en marcha del sistema de combustión, al año, y posteriormente bianualmente.

## ***5. USO DE NEUMÁTICOS TROCEADOS COMO COMBUSTIBLE DE SUSTITUCIÓN***

El aprovechamiento de neumáticos usados como combustible en plantas de fabricación de cemento es una práctica usual en la industria mundial. En Europa, América y Japón, se ha convertido en la mejor práctica para la eliminación de este residuo.

Sólo en los Estados Unidos, el número de hornos cementeros quemando neumáticos, se ha multiplicado por cuarenta en los últimos diez años. La Asociación para la Manipulación de Neumáticos Usados (Scrap Tire Management Council), considera que en 2009 se quemaron en hornos cementeros, más de 100 millones de neumáticos usados en los Estados Unidos.

En Europa, comenzaron las pruebas en los años 70, habiéndose generalizado su empleo en países como Alemania, Francia, Bélgica y Austria entre otros. En 2009 se quemaron en hornos de cemento en Alemania más de 150.000 T. de neumáticos usados y en Francia más de 135.000 T.

### **5.1 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO**

#### **5.1.1 Descripción y composición**

Los neumáticos de automóvil están formados por un complejo entramado de materiales diversos como son el acero, las fibras textiles y los elastómeros.

En un neumático de turismo, el porcentaje de materiales respecto de la masa total del mismo, es:

<b>MATERIAL</b>	<b>%</b>
Caucho natural y sintético	48
Negro de humo	23
Hilos de acero	18
Cableado textil	3
Otros productos químicos	8

Un 70% de la masa de los neumáticos está constituida por derivados de hidrocarburos. Así pues, se trata de substratos adecuados a la obtención de combustibles y productos químicos por medio de transformaciones termoquímicas.

El contenido energético medio de un neumático de turismo equivale a 27 litros de petróleo (21 litros en materias primas y 6 en el proceso de fabricación). Este potencial energético nos da una pista acerca de las posibles técnicas de eliminación provechosa de neumáticos de desecho. La Potencia Calorífica Inferior de los neumáticos está en torno a 6500 kcal/kg.

En la tabla que se muestra a continuación, se recogen los pesos medios aproximados de los neumáticos según el tipo de vehículo y del tamaño.

<b>TIPO</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Peso (en kg)</b>
Turismo	165-R13	7
Turismo/camioneta	175-R15/170-R14	8-10
Camión ligero	205-R16	16-20
Camión	1100-R20/1200-R20	55-80

En las tablas que se muestran a continuación, se recogen los resultados de los análisis necesarios para una correcta caracterización de los neumáticos.

➤ Análisis Inmediato

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje en peso</b>
Humedad	0%
Materia Volátil	60-65%
Cenizas	5-10%
Carbono fijo	30-35%

➤ Análisis Elemental

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje en peso</b>
Carbono	80-85%
Nitrógeno	0,2-0,4%
Azufre	1-1,4%
Hidrógeno	6-7%
Metales	11-12%
Inertes	2-3%

➤ Análisis de las Cenizas

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje en peso</b>
SiO <sub>2</sub>	2-5%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,12-1%
CaO	0,35-0,5%
Na <sub>2</sub> O	0,15-0,2%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35%
K <sub>2</sub> O	0,08-0,14%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05-0,1%
TiO <sub>2</sub>	0,1-0,15%
SO <sub>3</sub>	0,8-1%
Cr	535 ppm
W	853 ppm
Zn	11630 ppm

### 5.1.2 Producción del residuo

En el caso de los residuos provenientes de neumáticos, es muy importante tener en cuenta que los neumáticos provenientes de vehículos fuera de uso (VFU), representan una parte muy pequeña respecto a los neumáticos provenientes de reposición.

Para los neumáticos provenientes de VFU se ha estimado un peso por vehículo de 30 Kg, lo que da lugar a las estimaciones que aparecen en la tabla de previsión de generación de neumáticos provenientes de VFU:

	2000			2011		
	Mínimo	Esperado	Máximo	Mínimo	Esperado	Máximo
VFU generados	600000	700000	800000	675000	825000	980000
T/año de residuo de VFU	18000	21000	24000	20000	25000	30000

Cada año se generan en España unas 250.000 toneladas de neumáticos fuera de uso, incluidos los anteriores, de las que el 82,8 por ciento acaba en vertido, abandono o depósito en vertedero, como ocurre en la mayoría de los países europeos.

Anualmente se producen en la Comunidad Valenciana 40.000 toneladas de neumáticos, el 55% va a parar a los vertederos, el 20% se reutiliza, otro 20% se destina al recauchutado y el 5% sirve para la valorización en otras comunidades autónomas.

### 5.1.3 Clasificación del residuo

La posible utilización de neumáticos usados como combustible de sustitución, se trata de una actividad de valorización energética de residuos, de acuerdo a la Ley 10/1998 de 21 de Abril, de Residuos, que rige estas actividades.

En el apartado 2 del artículo 11 de dicha Ley se indica textualmente: “Todo residuo potencialmente reciclable o valorizable deberá ser destinado a estos fines, evitando su eliminación en todos los casos posibles”.

Para ello, los neumáticos se obtendrán de un gestor autorizado de residuos no peligrosos. Así mismo, la planta en la que se realizará la valoración deberá ser declarada como gestor o valorizador autorizado de residuos no peligrosos.

El 88% de los neumáticos, está formado por carbono y oxígeno. A temperaturas superiores de 800° C y con tiempos de residencia del gas a elevada temperatura como se dan en el horno de cemento, se asegura la destrucción completa del neumático. Esta completa destrucción impide la formación de productos intermedios fruto de combustión incompleta, humos negros y olores. El resultado de la combustión total es la producción de CO<sub>2</sub> a partir de los componentes orgánicos de los neumáticos.

El Azufre (promedio de 1.3% en peso de los neumáticos) se neutraliza en forma de sulfatos. Esta transformación se debe a la naturaleza altamente alcalina de la materia en fusión en la fabricación del clínker. La presencia en el horno de una carga importante de materia caliente y una gran cantidad de refractario, induce una fuerte inercia térmica que contribuye a la fiabilidad de este proceso de eliminación.

Por otra parte, el contenido en Azufre de los neumáticos es inferior al del combustible tradicional (coque de petróleo), por lo que se mejora la situación desde este punto de vista.

El componente metálico de los neumáticos puede sustituir en parte a las adiciones férricas utilizadas como fundente en la composición del crudo de cemento.

➤ **Justificación de la Condición de Residuos No Peligrosos de los Neumáticos**

En la Resolución de 17 de noviembre de 1998, de la Dirección General de calidad y Evaluación Ambiental, por la que se dispone la publicación del catálogo europeo de residuos (CER), aprobado mediante la Decisión 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de Diciembre de 1993, las cenizas volantes de carbón aparecen con el código 16 01 03, dentro del epígrafe 16 00 00 (Residuos no especificados en otra categoría del catálogo).

El Comité para la adaptación de los progresos científicos y técnicos de la legislación europea sobre residuos, en su documento de trabajo del 10/12/92, en que se evalúan los residuos, de acuerdo a los criterios indicados en las Directivas 91/689/EEC, 67/584/EEC y 88/379/EEC, considera a los neumáticos usados dentro de la categoría N (no peligrosos).

Por lo que antecede se puede considerar a los neumáticos usados como: Residuos no peligrosos.

## **5.2 GESTIÓN ACTUAL DE LOS NEUMÁTICOS Y PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL ASOCIADA**

Las posibles vías de gestión para los neumáticos fuera de uso (NFU) son las siguientes:

- Depósito en vertedero
- Reutilización
- Reciclado
- Valorización energética

El depósito en vertedero es la solución peor y una de las más practicadas actualmente en España, motivado fundamentalmente por las dificultades y el coste de la logística de recogida, transporte y almacenamiento de neumáticos para su tratamiento en una planta al propósito.

Sin embargo, esta práctica está cambiando rápidamente y comienzan a proliferar el resto de soluciones. La reutilización mediante el recauchutado de los neumáticos es útil para neumáticos de gran tamaño provenientes de camiones y vehículos industriales. El reciclado de los neumáticos es posible a partir de la separación de los distintos constituyentes del neumático: caucho, acero y fibras, principalmente.

El problema es que no todos los neumáticos admiten ser recauchutados, es decir esa reutilización no es infinita, por lo que tenemos un porcentaje de neumáticos que ya inicialmente no pueden ser gestionados de este modo. Además, tanto la cantidad de neumáticos generada, como el coste de las tecnologías necesarias dificultan considerablemente el reciclado.

Finalmente, la valorización energética es una solución muy a tener en cuenta debido al alto poder calorífico de los NFU.

- **Problemas medioambientales generados por los neumáticos usados**

- ✓ **Problemas de vertederos**

La acumulación de neumáticos usados en vertederos, tanto controlados como incontrolados, crea riesgos tanto ambientales, como de salud y de seguridad. El aire y el agua que quedan ocluidos en los neumáticos enterrados en vertederos, hacen que los neumáticos asciendan.

Estos neumáticos que suben hacia la parte alta del vertedero ya enterrado, eventualmente pueden romper la capa de arcilla que protege el desecho enterrado. Una ruptura en la capa de arcilla permite que los gases producidos ocluidos escapen a la superficie y también permite la infiltración de lluvia o agua superficial que puede entonces aumentar la cantidad de lixiviados que a su vez contaminarán el suelo de los alrededores y/o acuíferos. La ruptura de la capa del vertedero es un riesgo potencial para la salud, creando un acceso para roedores, insectos y pájaros.

Además, los neumáticos ocupan una cantidad de volumen importante y no son biodegradables. Sólo 13 neumáticos pueden ocupar un volumen de un metro cúbico en el vertedero. Muchos dueños de vertederos no aceptan neumáticos usados debido a estos problemas de eliminación. Aquellos que sí los aceptan, normalmente cobran una tasa de eliminación.

- ✓ **Incendio de neumáticos**

Como los neumáticos se acumulan en basureros o montones incontrolados, son un riesgo potencial de incendio.

El 31 de octubre de 1983, comenzó un incendio en Winchester, Virginia (USA) que duró cerca de nueve meses. El fuego comenzó en un basurero que contenía aproximadamente 5 millones de neumáticos de coche y camión. El 4 de noviembre de ese año se recogieron muestras de aire en el penacho del humo, y se analizó con el fin de determinar los tipos y concentraciones de los contaminantes y de otras emisiones que estuvieran en dicho humo.

Las muestras se analizaron para conocer la posible presencia de nitroaminas, metales, partículas totales, hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAHs) y otros vapores orgánicos. Los resultados indicaron que existían niveles peligrosos de monóxido de carbono y PAHs. Los niveles de CO eran de 15 a 65 veces superiores a los límites permitidos por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) para una exposición media de 10 horas. Al menos se encontraron siete componentes PAH cuyas concentraciones estaban entre 3 y 461  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estas concentraciones resultan ser peligrosas para la salud. Los residuos de la combustión de estos neumáticos tenían un espesor de 100 pies y estaban compuestos de negro de carbón, restos carbonizados, metales y gomas.

Para determinar las emisiones al aire de combustiones abiertas de neumáticos usados, se realizó un estudio por la USEPA, durante este estudio se identificaron más de 50 componentes orgánicos volátiles (VOCs). Los resultados indicaron que los principales productos emitidos debido a esta combustión incompleta eran hidrocarburos mono y poliaromáticos. Además el zinc se encontraba en una proporción de cerca del 50 % de las cenizas.

En la Comunidad Valenciana, en el término de Aldaia, se produjo durante el año 2001 un incendio en un vertedero no controlado de neumáticos que permaneció activo durante una semana, con la consecuente nube contaminante que afectó al área metropolitana de la ciudad de Valencia.

### ✓ **Neumáticos como criadero para insectos**

Además de lo visto anteriormente, los basureros de neumáticos son un hábitat ideal para crecimiento de roedores e insectos, especialmente mosquitos. El agua que se acumula en los neumáticos se calienta por los rayos solares que son absorbidos por la superficie negra del mismo. Estas condiciones crean un hábitat excelente para los mosquitos, y esto unido a la ausencia de depredadores y alejados de insecticidas, permite a los mosquitos crecer 4000 veces más rápido que en su hábitat natural.

### ➤ **Roedores**

Los neumáticos también suministran un abrigo agradable para roedores. Por ejemplo, neumáticos con un suministro adecuado de agua son un hábitat ideal para la *Rattus norvegicus* (Rata Noruega). Estas ratas, tanto hacen madrigueras bajo los neumáticos, como crecen dentro de ellos. La rata noruega es la especie más común en los vertederos y puede tener camadas de hasta 12 miembros. Pueden transmitir enfermedades infecciosas debido a que son omnívoras y se alimentan tanto de animales muertos, como de vivos.

## **5.3 VALORACIÓN DE LA ALTERNATIVA**

Generalmente se utilizan dos sistemas:

- Combustión de neumáticos enteros
- Combustión de neumáticos troceados

La solución que se ha escogido, es la de los neumáticos troceados, debido a su menor costo de inversión y operación, así como a su mejor facilidad de combustión en el horno, y menores problemas logísticos planteados para la fábrica.

Los neumáticos se recibirán ya troceados, provenientes de un gestor autorizado para la recogida, almacenamiento y trituración de los mismos. La cantidad promedio que se estima se recibirá es de 20000 T/año.

Vamos a describir los procesos, elementos y equipos necesarios para llevar a cabo la utilización de neumáticos troceados como combustible de sustitución.

En el proyecto se estudia la valorización de neumáticos troceados como combustible en un horno de clínker, con una capacidad promedio diaria de producción de clínker para cemento de 2200 T (horno de tamaño medio).

Los neumáticos nunca se utilizarán como combustible primario del horno. Se adicionarán al combustible principal. El porcentaje de sustitución nunca superará el 20% del principal, estimándose un 10% en condiciones normales del horno.

### **5.3.1 Descripción de la alternativa propuesta**

#### **▪ Almacenamiento de los neumáticos**

La planta recibirá los neumáticos, previamente triturados. La cantidad promedio estimada para la Comunidad Valenciana es de aproximadamente 40000 T/año.

El transporte se realiza en camiones basculantes cerrados con lonas para evitar el vertido durante el transporte.

Una vez en planta, el camión pasa por la báscula para el pesaje y descargará los neumáticos en una tolva de hormigón con una capacidad de 270 m<sup>3</sup>. Esta tolva cubre las necesidades de consumo durante un tiempo estimado de unos cinco días, para cubrir cualquier contingencia.

Los neumáticos los recoge una cuchara de garras múltiples, que se desplaza por un monorraíl.

#### ▪ **Dosificación y alimentación al horno**

La cuchara de garras toma los neumáticos desde la tolva y los vierte en una tolva de carga pequeña, que se descarga mediante una cinta transportadora.

Para evitar retenciones y atascos de material, se coloca un tambor de alisado que se mueve en sentido contrario al avance de la cinta.

### **5.3.2 Metodología empleada**

El procedimiento normal para la realización de pruebas de emisiones de metales pesados a la atmósfera, consiste en hacer una caracterización total de la contribución de materias primas y combustibles al contenido total de cada uno de los metales en estudio.

Cuando tengamos las entradas, se analizarán las salidas, es decir, el clínker y las emisiones, y así, poder realizar un balance para conocer el porcentaje de fijación de cada metal.

Analizaremos muestras sólidas, digeridas en un horno de microondas con distintos volúmenes de ácidos, que será por regla general, el ácido nítrico, clorhídrico y/o fluorhídrico, con su método correspondiente.

La muestra digerida es recuperada, aforada a un determinado volumen y se dispone a analizar por plasma (ICP).

El siguiente paso es la medición de las emisiones de los distintos contaminantes. El muestreo se lleva a cabo bajo el método de U.S.E.P.A.

La muestra es tomada isocinéticamente y las emisiones de partículas son colectadas en la sonda del tren de muestreo y el filtro. Por otro lado, las emisiones gaseosas de metales, se colectan en borboteadores que contienen soluciones acuosas de ácido nítrico-peróxido de hidrógeno (en dos borboteadores) y solución ácida de permanganato de potasio (en otros dos borboteadores).

### **5.3.3 Valoración técnica**

#### **▪ Viabilidad de la utilización del proceso**

Cabe analizar:

##### a) Condiciones térmicas del horno

Además de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia, el horno aporta una gran inercia térmica, lo que le garantiza que la eliminación de residuos se realiza en condiciones estables.

Como posee una gran capacidad calorífica, no es posible un cambio significativo de temperatura en un breve periodo de tiempo. Por ello, si hubiera algún fallo, se destruirían de manera total los residuos orgánicos que pudiera haber en ese momento en el horno, a la vez que se cortaría la alimentación de harinas al horno.

b) Tratamiento termo-químico de los gases de combustión en contacto con el crudo circulante en el proceso.

La combustión de residuos suele venir acompañada de la formación de compuestos tóxicos: compuestos halogenados, metales pesados, óxidos de azufre, etc. Ello obliga a tratar los gases de escape para reducir la emisión de dichos compuestos tóxicos.

En el caso del horno de clínker el tratamiento se realiza por interacción termo-química con las materias primas entrantes al proceso.

Las características alcalinas de los materiales empleados permiten la captación de los elementos halógenos y del azufre, mediante la formación de sales y sulfatos alcalinos respectivamente.

Los hornos de cemento no poseen dispositivos para la depuración de ácidos porque el medio del horno de cemento es alcalino. Uno de los principales pasos en la producción de cemento es la calcinación del carbonato de calcio para producir cal, que es el mismo material utilizado en los dispositivos para la depuración de ácidos de un incinerador de residuos peligrosos.

Otros componentes alcalinos, tales como el óxido de magnesio, se generan también en el proceso de producción. Por lo tanto, cuando los gases se desplazan desde de la zona de combustión a través de las zonas de calcinación y secado, la mayoría de estos gases son neutralizados por el material alcalino que hay en el horno.

c) Captación de metales

En el caso de metales, la capacidad de retención en el clínker es muy elevada, sustituyendo átomos de calcio en la red cristalina de los silicatos.

### ➤ **Limitaciones del proceso**

Las condiciones limitantes del proceso son:

- Sustitución parcial del combustible entre el 10 y el 20%.
- Necesidad de incrementar el exceso de aire para evitar la formación de CO lo que repercute en una disminución del rendimiento calorífico.
- Mayor cantidad de gases e incremento de su temperatura de salida (40- 50 ° C).

Suponiendo una sustitución del 20%, y considerando un consumo calorífico promedio del horno de 850 Kcal/Kg. de clínker producido, así como una producción promedio del horno de 782.000 T de clínker/año, el consumo anual posible de neumáticos sería:

$782.000 \text{ T clínker/año} * 850 \text{ kcal/Kg clínker} * 0.2 / 6.500 \text{ Kcal/Kg. de neumáticos triturados} = 20.452 \text{ T neumáticos al año}$

Con lo que se demuestra la capacidad del horno para eliminar los neumáticos producidos, aproximadamente se destruirían la mitad de los neumáticos generados en la Comunidad Valenciana.

### ➤ **Efectos de la combustión de neumáticos sobre el cemento producido**

La combustión de los neumáticos se realiza siempre en condiciones que aseguren que la calidad de los cementos permanece inalterada, imponiendo cuando sea preciso límites al grado de sustitución energética (el límite usual de sustitución para neumáticos se fija en el entorno del 20%).

Otro aspecto importante a considerar es la compatibilidad ambiental del cemento fabricado con residuos como combustible secundario, especialmente en lo que se refiere a la posible lixiviación de los metales (Zn) incorporados al cemento.

Los problemas concernientes al cemento tienen que ver con las concentraciones reales de los metales en el cemento y el potencial de los metales para lixiviarse del mismo, una vez que el producto ha sido utilizado en cualquier obra.

El promedio de las concentraciones metálicas en el clínker producido por hornos de cemento que queman residuos no parece diferir sustancialmente del promedio de concentraciones metálicas en el clínker generado por los hornos que queman solamente combustible convencional.

La mayoría de las concentraciones metálicas del clínker para el cadmio, mercurio, selenio, y talio están por debajo de los límites de detección tanto para los hornos que queman residuos peligrosos como para aquellos que sólo queman combustible convencional.

Una de las mayores preocupaciones públicas es el potencial de los metales en el cemento para lixiviarse hacia el medio ambiente una vez que el cemento ha sido usado en el proyecto de construcción (ej., carreteras, edificios, o patios).

En Estados Unidos, utilizan el TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), y la concentración máxima de metales permitida en el lixiviado, basándose en estándares de salud se refleja en la siguiente tabla:

METAL	CONCENTRACIÓN (ppm)
Sb	1
As	5
Ba	100
Be	0,007
Cd	1
Cr	5
Pb	5
Hg	0,2
Ni	70
Se	1
Ag	5
Tl	7

Realizado el lixiviado sobre muestras de polvo, se obtuvieron los siguientes resultados:

METAL	CONC. MEDIA (ppm)	CONC. MIN. (ppm)	CONC. MAX. (ppm)
Sb	0,012	0,003	0,031
As	0,066	0,003	0,636
Ba	1,04	0,12	9,19
Be	0,0004	0,0001	0,0029
Cd	0,0289	0,0001	0,2200
Cr	0,10	0,01	1,29
Pb	0,349	0,002	9,718
Hg	0,00183	0,00015	0,02230
Ni	0,13	0,06	0,32
Se	0,152	0,006	1,711
Ag	0,07	0,03	0,17
Tl	0,38	0,01	4,50

Ninguno de los valores medios sobrepasa los valores límite, y solamente dos de ellos (plomo y selenio) los sobrepasan en el caso de las concentraciones máximas. Sin embargo, en ambos metales dichos valores máximos se obtuvieron de hornos que no utilizaban residuos como combustible secundario.

Otro aspecto interesante que se observó es que no existe correlación de unas muestras a otras entre la concentración de un metal en el polvo y la obtenida en su lixiviado. Estos resultados obtenidos son interesantes desde el punto de vista de la posible contaminación de aguas subterráneas cuando se deposita los polvos de procesos de depuración en vertedero de inertes.

Los ensayos realizados hasta el momento, tanto en Europa como en Estados Unidos, han demostrado que no hay diferencias de comportamiento entre los cementos fabricados con combustibles tradicionales y aquellos en que se han utilizado combustibles secundarios. Un ejemplo de la capacidad fijadora del cemento es que, en países de nuestro entorno, se utiliza habitualmente para la solidificación y estabilización de residuos orgánicos con alto contenido en metales pesados, garantizando la inertización de los mismos.

#### ➤ **Elementos de maquinaria de nueva introducción**

De acuerdo a lo indicado en el punto anterior, las necesidades generadas por la introducción de este proceso comportarán nuevas instalaciones incluyendo los siguientes elementos:

- Tolva de descarga de camiones de 90 m<sup>3</sup> de capacidad con protecciones para evitar el vuelco de camiones en la descarga
- Tolva de almacenamiento de 270 m<sup>3</sup> de capacidad cubierta
- Sistema automático de almacenamiento y alimentación, compuesto por una cuchara de garras múltiples desplazable por monorraíl sobre la tolva de almacenamiento y la de descarga de camiones.. Su rendimiento máximo de alimentación es de 1,9 T/hora.
- Tolva de carga
- Transportador de placas para vaciado
- Tambor de alisado
- Cinta pesadora

- Cinta transportadora de artesas desde instalación de almacenamiento y dosificación al horno
- Compuerta de triple clapeta para la alimentación al horno.
- Estructuras soporte
- Instalación eléctrica y de control.

#### 4.3.4 Valoración económica

La valoración energética de un residuo por parte de una cementera, conlleva una mejora medioambiental por no llevarse el residuo al vertedero. Esto supone un ahorro económico debido a no pagar canon de depósito de vertedero. El precio de este canon difiere de cada país, como observamos en la siguiente tabla:

PAÍS	Canon (USA \$ / T)
Reino Unido	40
Alemania	50-100
Dinamarca	80-100
Japón	90-120
España	0-50

Puede observarse que en España, el canon es especialmente bajo, y la tendencia será sin ninguna duda al alza, lo cual será un factor que apoyará la valorización energética del residuo.

Las inversiones según datos de OFICEMEN para la utilización de harinas en cementeras, es de 2.4 millones de euros para neumáticos enteros y 1.5 millones para neumáticos troceados.

Para el estudio económico, utilizaremos el dato de consumo de neumáticos para un horno de 2200 T clínker/día, que es de 20452 T neumáticos / año. Conocemos también la potencia calorífica superior del neumático, 6500 kcal/kg. El estudio se realiza para una inversión de 1.5 millones amortizados en 5 años.

Para calcular el beneficio obtenido, se parte del precio que una cementera paga por termia (1termia = 1.000 kcal) de energía térmica generada: 0,003 – 0,006 €/termia. Usaremos 0.003 €/termia en el peor de los casos.

Teniendo en cuenta el poder calorífico de los neumáticos:

$$\text{Beneficio ( €/kg )} = 6,5 \text{ (termia/kg)} * 0,003 \text{ ( €/termia)} = 0.0195 \text{ €/kg}$$

Por tanto, los ingresos netos por unidad de masa serían:

$$\text{Ingresos ( €/kg )} = 0.0195 - (300000/\text{harinas (kg/año)})$$

Por tanto, necesitaríamos 15385 T de neumáticos para empezar a rentabilizar.

Como estamos hablando de valorizar 20452 T de neumáticos, no sería necesario poner un canon de gestión para valorizar el residuo.

En la siguiente tabla se muestra el coste de depositar las harinas en el vertedero, los beneficios de la sustitución de esas harinas por coque y los ingresos finales al descontar el coste de la instalación (amortización en 5 años). Se toma como base 20000 T de harinas al año.

	€/ kg	€/ año (20000 T)
Vertedero	- 0.054	- 1080000
Beneficios	0.019	380000
Ingresos	0.004	80000

En los ingresos no se ha tenido en cuenta el que se obtendría de no llevar esa cantidad de neumáticos al vertedero.

### 5.3.5 Valoración medioambiental

Previamente a la valorización en el horno de clínker, se producirían emisiones atmosféricas desde la chimenea del horno estudiado, normales en la producción de cemento, controladas periódicamente por la propia fábrica con sus sistemas de control y verificadas bianualmente por una E.C.A; y previstas en los permisos actualmente vigentes.

#### ➤ Captación de gases tóxicos

La combustión de residuos suele venir acompañada de la formación de compuestos tóxicos: compuestos halogenados, metales pesados, óxidos de azufre, etc. Ello obliga a tratar los gases de escape para reducir la emisión de dichos compuestos tóxicos.

En el caso del horno de clínker el tratamiento se realiza por interacción termo-química con las materias primas entrantes al proceso.

Las características alcalinas de los materiales empleados permiten la captación de los elementos halógenos y del azufre, mediante la formación de sales y sulfatos alcalinos respectivamente.

Uno de los problemas de la incineración de residuos peligrosos es la generación de gases ácidos (ej., HCl). Como consecuencia de esto, los incineradores de residuos peligrosos tienen dispositivos para la depuración de ácidos, que utilizan compuestos alcalinos, tales como hidróxido de sodio o de cal, para neutralizar los gases. Los hornos de cemento no poseen dispositivos para la depuración de ácidos porque el medio del horno de cemento es alcalino. Uno de los principales pasos en la producción de cemento es la calcinación del carbonato de calcio para producir cal, que es el mismo material utilizado en los dispositivos para la depuración de ácidos de un incinerador de residuos peligrosos. Otros componentes alcalinos, tales como el óxido de magnesio, se generan también en el proceso de producción.

Por lo tanto, cuando los gases se desplazan desde de la zona de combustión a través de las zonas de calcinación y secado, la mayoría de estos gases son neutralizados por el material alcalino que hay en el horno.

A continuación, y en subsiguientes apartados se analizan distintos parámetros de contaminación atmosférica de importancia contemplados en la legislación.

#### ➤ **Emisión de partículas**

La emisión de partículas está limitada según la legislación vigente, el Decreto 833/1975 de 6 de febrero por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico. En su anexo IV, sección 9 relativa a instalaciones industriales de fabricación de cemento, limita la emisión de partículas a un máximo de 150 mg/Nm<sup>3</sup>.

Suponiendo que no va a haber incremento en la emisión de partículas, y aplicando la Directiva 94/67/CE del Consejo, de 16 de diciembre de 1994, relativa a la incineración de residuos peligrosos y a su transposición en la legislación española, el Real Decreto 1217/1997 de 18 de julio sobre incineración de residuos peligrosos, pese a que los neumáticos no lo son, encontramos un límite máximo de 10 mg/Nm<sup>3</sup>. Utilizando la proporcionalidad admitida por esta norma, y suponiendo una sustitución máxima del 20% de combustible por neumáticos troceados, aplicamos a cada tramo su límite de la siguiente manera:

80% DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS CORRESPONDIENTES A LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLE CONVENCIONAL (COQUE)	LÍMITE LEGISLACIÓN: 150 mg/Nm <sup>3</sup>	Decreto 833/1975 sobre protección del ambiente atmosférico	0.8x150=120 mg/Nm <sup>3</sup>
20% DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS, CORRESPONDIENTES A LA COMBUSTIÓN DE NEUMÁTICOS	LÍMITE LEGISLACIÓN: 10mg/Nm <sup>3</sup>	Legislación sobre incineración de residuos peligrosos	0.2x10=2 mg/Nm <sup>3</sup>

En condiciones normales de funcionamiento, un horno de vía seca con un electrofiltro asociado como sistema de depuración de gases tiene unas concentraciones de emisión muy inferiores a ese valor. De cualquier manera, el hecho de valorizar neumáticos no supone un aumento de las emisiones de partículas con respecto a condiciones de funcionamiento normales.

### ➤ Óxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

El azufre de los neumáticos se neutraliza en forma de sulfatos, como se ha explicado previamente. Esta transformación se debe a la naturaleza altamente alcalina de la materia prima en fusión en la fabricación del clínker.

La presencia en el horno de una carga importante de materia caliente y una gran cantidad de refractario, induce una fuerte inercia térmica que contribuye a la fiabilidad de este proceso de eliminación. Por otra parte, el contenido en azufre de los neumáticos es inferior al del combustible tradicional (coque de petróleo), por lo que se mejora la situación desde este punto de vista.

Los contenidos medios de Azufre en neumáticos son:

	<b>% AZUFRE (S)</b>
COCHE	1,34
CAMIÓN	1,05
COQUE	5.00

El contenido de azufre en coque es variable dependiendo de las distintas remesas de combustible. Un análisis tipo revela los siguientes contenidos:

<b>PARÁMETROS</b>	<b>Coque</b>
Potencia Calorífica Superior (Cal/gr)	8600
Potencia Calorífica Inferior (Cal/gr)	8300
Azufre (%)	5.0
SO3 (%)	12.5

La legislación española aplicable, el Decreto 833/1975 de 6 de febrero por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico, indica en su anexo IV sobre niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera que la emisión de SO<sub>2</sub> para instalaciones de combustión industrial que utilizan carbón y sus derivados será como máximo de 2400 mg/Nm<sup>3</sup>.

En el caso de hornos de vía seca, la emisión de SO<sub>2</sub> si el diseño de la torre de precalcificación es correcto y favorece el perfecto contacto entre gases ácidos y crudo alcalino, es menor de 30 mg/Nm<sup>3</sup>.

Como es fácilmente comprensible, es esperable una rebaja en las emisiones de SO<sub>2</sub> cuando se realice la sustitución de parte del combustible (coque) por neumáticos, con menor contenido en Azufre.

### ➤ Emisión de metales

El sistema de combustión de neumáticos como combustible secundario puede generar un cambio en las características de estas emisiones, por la introducción de nuevos elementos en el horno de combustión, los más destacables de los cuales son los metales.

En el caso de metales, la capacidad de retención en el clínker es muy elevada, sustituyendo átomos de calcio en la red cristalina de los silicatos.

Los valores típicos de retención en el clínker, según bibliografía y estudios realizados experimentalmente son:

<i><b>METALES</b></i>	<b>% DE RETENCION EN EL CLÍNKER (%)</b>
Cd	99.5550 +/- 0.4418
Tl	90.1219 +/- 10.7113
Hg	61.300 +/- 32.5000
Sb	99.7690 +/- 0.0785
As	99.8868 +/- 0.2916
Pb	99.8531 +/- 0.2008
Cr	99.8553 +/- 0.3990
Co	99.9574 +/- 0.0108
Cu	99.8553 +/- 0.3990
Mn	99.8420 +/- 0.1839
Ni	99.9574 +/- 0.0108
V	99.9922 +/- 0.0007
Sn	99.8553 +/- 0.3990

Estos valores son similares para todos los sistemas de hornos de clínker e independientes de la procedencia de los metales: crudo, combustible, etc.

La gran mayoría de los metales a estudiar tienen un comportamiento no volátil. Los metales más volátiles y, por lo tanto, que más hay que controlar, son el Talio y el Mercurio, metales que por otra parte no forman parte de la composición de los neumáticos.

Para obtener conclusiones sobre la influencia de la valorización de neumáticos en los hornos de producción de clínker en la emisión de metales es necesario realizar un balance de los mismos.

Primero es necesario realizar una determinación del contenido de metales durante la producción convencional de cemento de los siguientes productos:

ENTRADAS		SALIDAS	
Combustible (coque de petróleo)	Crudo (caliza y marga)	Clínker	Emisiones atmosféricas

Los datos de flujos másicos utilizados para el cálculo del balance son:

- Caudal de gases en chimenea: 243000 m<sup>3</sup>/h
- Alimentación de crudo: 156 T/h
- Alimentación de coque: 9.8 T/h
- Producción de clínker: 92.5 T/h

Si tomamos estos resultados como iniciales, los valores con un signo menor indican que no se detecta y ese valor es el límite de detección:

<b>Metal</b>	<b>Emisión en gases (Kg/h)</b>	<b>Emisión en partículas (Kg/h)</b>	<b>Emisiones totales (Kg/h)</b>	<b>Clínker (Kg/h)</b>	<b>Crudo (Kg/h)</b>	<b>Combustible (Kg/h)</b>
As	<1,16E-3	<0,093E-03	<0,00125	0,971	1,045	<0,009
Cd	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Co	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Cr	<0,58E-3	0,00068	<0,00126	2,044	<0,936	<0,058
Cu	0,01271	0,02150	0,03421	13,127	9,809	<0,058
Hg	0,00699	0,000002	0,00699	0,010	0,016	0,004
Mn	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	15,245	17,068	0,074
Ni	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	2,064
Pb	0,05433	0,00174	0,05607	10,366	10,485	0,136
Sb	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
Se	<0,58E-3	<0,9313E-03	<0,00151	<1,110	<1,872	<0,117
Sn	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	1,025	0,635	0,375
Tl	<0,58E-3	<0,4657E-03	<0,00105	<0,555	<0,936	<0,058
V	<0,58E-3	1,517E-03	<0,00210	14,449	1,891	8,753
Zn	0,124	7,046E-03	0,13075	45,615	48,274	0,597

Una vez obtenido el balance de metales, se calcula el porcentaje de fijación de estos elementos en el clínker.

Metal	Entradas (Kg/h)		Salidas (Kg/h)		Porcentaje de fijación
	Crudo (Kg/h)	Combustible (Kg/h)	Clínker (Kg/h)	Emisiones (Kg/h)	
As	1,045	<0,009	0,971	<0,001253	99,8712%
Cd	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Co	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Cr	<0,936	<0,058	2,044	<0,001262	99,9383%
Cu	9,809	<0,058	13,127	0,0342123	99,7400%
Hg	0,016	0,004	0,010	0,0069922	59,3292%
Mn	17,068	0,074	15,245	<0,0010457	99,9931%
Ni	<0,936	2,064	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Pb	10,485	0,136	10,366	0,0560657	99,4620%
Sb	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
Se	<1,8720	<0,117	<1,110	<0,0015113	99,8640%
Sn	0,635	0,375	1,025	<0,0010457	99,8981%
Tl	<0,936	<0,058	<0,555	<0,0010457	99,8119%
V	1,891	8,753	14,449	<0,0020971	99,9855%
Zn	48,274	0,597	45,615	0,1307456	99,7142%

La proporción de fijación en el clínker es en general muy alta.

A continuación se reproducen los resultados obtenidos del análisis de neumáticos troceados. Para el cálculo de los valores en Kg/h se ha previsto una sustitución del 20% de combustible convencional por neumáticos.

	Neumático troceado coche (mg/Kg)	Neumático troceado coche (Kg/h)	Neumático troceado camión (mg/Kg)	Neumático troceado camión (Kg/h)
As	<1	<0,001	<1	<0,001
Cd	<6	<0,012	34,810	0,068
Co	<6	<0,012	<6	<0,012
Cr	30,380	0,060	124,930	0,245
Cu	140,440	0,275	311,390	0,610
Hg	2,520	0,005	3,910	0,008
Mn	112,350	0,220	680,370	1,334
Ni	<6	<0,012	<6	<0,012
Pb	104,200	0,204	108,600	0,213
Sb	<6	<0,012	<6	<0,012
Se	<12	<0,023	<12	<0,023
Sn	50,000	0,098	57,143	0,112
Tl	<6	<0,012	<6	<0,012
V	8,980	0,018	37,440	0,073
Zn	14452,500	28,327	15046,700	29,492

Una vez se dispone de todos los datos, se realiza el cálculo de las emisiones previstas con la sustitución de un 20% de combustible por neumático troceado y, por tanto, 80% de combustible convencional. En cuanto a neumáticos, se supone una utilización del 80% de material procedente de coche y un 20% de camión.

	ENTRADAS							SALIDAS		
	Neumático coche 20% de alimentación (Kg/h)	Neumático camión 20% alimentación (Kg/h)	Contenido proporcional neumáticos (80% coches) (Kg/h)	Crudo (Kg/h)	Combustible (Kg/h)	Combustible 80% (Kg/h)	Suma entradas (Kg/h)	Proporción fijación clínker	Clínker(Kg/h)	Emisiones (Kg/h)
As	<0,001	<0,001	<0,001	1,045	<0,009	<0,0072	<1,053	0,998711506	<1,0520427	<0,0013573
Cd	<0,012	0,068	<0,02324552	<0,936	<0,058	<0,0464	<1,006	0,998119399	<1,003754302	<0,001891218
Co	<0,012	<0,012	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,992529931	<0,001870069
Cr	0,060	0,245	0,0966084	<0,936	<0,058	<0,0464	<1,079	0,999383024	<1,078342678	<0,000665722
Cu	0,275	0,610	0,3422748	9,809	<0,058	<0,0464	<10,198	0,997400461	<10,17146477	<0,026510029
Hg	0,005	0,008	0,00548408	0,016	0,004	0,00352	0,025	0,593292307	0,014597411	0,010006669
Mn	0,220	1,334	0,44286984	17,068	0,074	0,05944	17,570	0,999931411	17,56910471	0,001205125
Ni	<0,012	<0,012	<0,012	<0,936	2,064	1,65112	<2,599	0,998119399	<2,594232093	<0,004887907
Pb	0,204	0,213	0,2059568	10,485	0,136	0,10912	10,800	0,994620223	10,74177587	0,058100929
Sb	<0,012	<0,012	<0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,992529931	<0,001870069
Se	<0,023	<0,023	<0,023	<1,8720	<0,117	<0,0936	<1,989	0,99864032	<1,98589614	<0,00270386
Sn	0,098	0,112	0,1008	0,635	0,375	0,29968	1,036	0,998980547	1,034624172	0,001055828
Tl	<0,012	<0,012	0,012	<0,936	<0,058	<0,0464	<0,994	0,998119399	<0,992529931	<0,001870069
V	0,018	0,073	0,02875712	1,891	8,753	7,00208	8,922	0,999854878	8,920242408	0,001294712
Zn	28,327	29,492	28,5598264	48,274	0,597	0,47744	77,311	0,997141876	77,09050062	0,220965784

A continuación se presenta el cuadro de cálculos para una sustitución menor en el combustible: 10% de neumático y el resto de coque de carbón. El cálculo anterior de alimentación de neumáticos en kg/h se ha modificado a un 10%.

	ENTRADAS						SALIDAS			
	Neumático coche 10% alimentación (Kg/h)	Neumático camión 10% alimentación (Kg/h)	Contenido proporcional neumáticos (80% coches) (Kg/h)	Crudo (Kg/h)	Combustible (Kg/h)	Combustible 80% (Kg/h)	Suma entradas (Kg/h)	Proporción fijación clínker	Clínker(Kg/h)	Emisiones (Kg/h)
As	<0,001	<0,001	<0,000985	1,045	<0,009	<0,0081	<1,054	0,998711506	<1,05292656	<0,00135844
Cd	<0,006	0,034	<0,01158557	<0,936	<0,058	<0,0522	<1,000	0,998119399	<0,997905372	<0,001880198
Co	<0,006	<0,006	<0,00591	<0,936	<0,058	<0,0522	<0,994	0,998119399	<0,992240476	<0,001869524
Cr	0,030	0,123	0,04855065	<0,936	<0,058	<0,0522	<1,037	0,999383024	<1,036111	<0,00063965
Cu	0,138	0,307	0,17201055	9,809	<0,058	<0,0522	<10,034	0,997400461	<10,00742805	<0,026082498
Hg	0,002	0,004	0,00275603	0,016	0,004	0,00396	0,022	0,593292307	0,013239929	0,009076101
Mn	0,111	0,670	0,22256469	17,068	0,074	0,06687	17,357	0,999931411	17,35624417	0,001190524
Ni	<0,006	<0,006	<0,00591	<0,936	2,064	1,85751	<2,799	0,998119399	<2,794155408	<0,005264592
Pb	0,103	0,107	0,1035038	10,485	0,136	0,12276	10,711	0,994620223	10,65344066	0,057623135
Sb	<0,006	<0,006	<0,00591	<0,936	<0,058	<0,0522	<0,994	0,998119399	<0,992240476	0,001869524
Se	<0,012	<0,012	<0,01182	<1,872	<0,117	<0,1053	<1,989	0,99864032	<1,986415433	<0,002704567
Sn	0,001	0,001	0,000985	0,635	0,375	0,33714	0,973	0,998980547	0,97233274	0,00099226
Tl	<0,006	<0,006	0,00591	<0,936	<0,058	<0,0522	<0,994	0,998119399	<0,992240476	<0,001869524
V	0,009	0,037	0,01445192	1,891	8,753	7,87734	9,782	0,999854878	9,781072265	0,001419655
Zn	14,236	14,821	14,3527699	48,274	0,597	0,53712	63,164	0,997141876	62,98355908	0,180530823

Dado que en la legislación española o autonómica actualmente vigente no se hace referencia alguna a la limitación de emisiones atmosféricas de metales por combustión en hornos de clínker de residuos no especiales, se compararán los resultados a la Directiva 94/67/CE del Consejo, de 16 de diciembre de 1994, relativa a la incineración de residuos peligrosos y a su transposición en la legislación española, el Real Decreto 1217/1997 de 18 de julio sobre incineración de residuos peligrosos pese a que los neumáticos no son residuos peligrosos. Se comparan los resultados de las emisiones actuales, las emisiones previstas para una sustitución del 20% y para una sustitución del 10%.

	EMISIONES ACTUALES		EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%		EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 10%	
	Emisiones (Kg/h)	Emisiones (mg/m <sup>3</sup> )	Emisiones (Kg/h)	Emisiones (mg/m <sup>3</sup> )	Emisiones (Kg/h)	Emisiones (mg/m <sup>3</sup> )
As	<0,001253	<0,005155695	<0,0013573	<0,005584856	<0,00135844	<0,005589548
Cd	<0,0010457	<0,004302722	<0,001891218	<0,007781758	<0,001880198	<0,007736413
Co	<0,0010457	<0,004302722	<0,001870069	<0,007694739	<0,001869524	<0,007692495
Cr	<0,001262	<0,005192728	<0,000665722	<0,002739233	<0,00063965	<0,002631955
Cu	0,0342123	0,140772704	<0,026510029	<0,109080317	<0,026082498	<0,107321163
Hg	0,0069922	0,028770673	0,010006669	0,04117425	0,009076101	0,037345262
Mn	<0,0010457	<0,004302722	0,001205125	0,004958706	0,001190524	0,004898628
Ni	<0,0010457	<0,004302722	<0,004887907	<0,020112179	<0,005264592	<0,021662115
Pb	0,0560657	0,230692476	0,058100929	0,239066796	0,057623135	0,237100825
Sb	<0,0010457	<0,004302722	<0,001870069	<0,007694739	0,001869524	0,007692495
Se	<0,0015113	<0,006218518	<0,00270386	<0,011125523	<0,002704567	<0,011128432
Sn	<0,0010457	<0,004302722	0,001055828	0,004344394	0,00099226	0,004082832
Tl	<0,0010457	<0,004302722	<0,001870069	<0,007694739	<0,001869524	<0,007692495
V	<0,0020971	0,008628898	0,001294712	0,005327325	0,001419655	0,005841428
Zn	0,1307456	0,537976449	0,220965784	0,909203735	0,180530823	0,742826765

Como se puede apreciar no hay grandes variaciones entre las emisiones con y sin combustión de neumáticos, únicamente el valor del cinc aumenta de manera llamativa.

<b>DIRECTIVA INCINERACIÓN RESIDUOS ESPECIALES</b>				
<b>PARÁMETROS</b>	<b>EMISIONES ACTUALES (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%</b>	<b>EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 10%</b>	<b>VALOR LÍMITE (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Cd+Tl	<0,008605444	<0,015476498	<0,015428909	0,05
Hg	0,028770673	0,04117425	0,037345262	0,05
Sb+As+Pb+Cr+Co+ Cu+Mn+Ni+V+Sn	<0,411956111	<0,406603285	<0,404513485	0,5

Dado que el Zinc no aparece en esta legislación, se aplica otra tabla extraída de la legislación francesa, para emisiones de metales en hornos de clínker:

<b>LEGISLACIÓN FRANCESA</b>				
<b>PARÁMETROS</b>	<b>EMISIONES ACTUALES (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 20%</b>	<b>EMISIONES PREVISTAS SUSTITUCIÓN 10%</b>	<b>VALOR LÍMITE (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Cd+Hg+Tl	<0,037376117	<0,056650748	<0,05277417	0,2
Ni+As+Se+Co	<0,019979657	<0,044517297	<0,04607259	1
Pb+Cr+Cu+Zn+Sb+ Mn+V	<0,931868699	<1,278070852	<1,10831326	5

### **5.3.6 Medidas correctoras adicionales y programa de vigilancia ambiental**

#### **➤ Medidas correctoras adicionales**

Las medidas correctoras de la contaminación atmosférica provocada por la incineración de neumáticos, serán las mismas que están instaladas en los hornos de clínker sin ningún tipo de combustión de alternos, es decir, un electrofiltro. El propio horno de clínker, debido a su diseño y características de atmósfera alcalina, reduce la emisión de óxidos de azufre y metales pesados, que se fijan en el clínker.

#### **➤ Programa de vigilancia ambiental**

El programa de vigilancia ambiental, tiene como objetivos, controlar la aplicación correcta de las medidas correctoras y hacer un seguimiento de una serie de parámetros de seguimiento, que den una idea de cómo evolucionaría el entorno a partir de la construcción y funcionamiento de la obra.

En el presente caso, se realizará un seguimiento de las emisiones atmosféricas y de la efectividad de las medidas correctoras propuestas, que son tan sólo las ya existentes.

Se propone realizar un seguimiento de los siguientes parámetros, aplicados a las emisiones atmosféricas de la chimenea del horno:

- ❖ Partículas
- ❖ Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>)
- ❖ Metales:
  - . Antimonio (Sb)
  - . Arsénico (As)
  - . Cadmio (Cd)
  - . Cinc (Zn)
  - . Cobalto (Co)
  - . Cobre (Cu)
  - . Estaño (Sn)
  - . Manganeso (Mn)
  - . Mercurio (Hg)
  - . Níquel (Ni)
  - . Plomo (Pb)
  - . Selenio (Se)
  - . Talio (Tl)
  - . Vanadio (V)

➤ **Condiciones de seguimiento**

Se propone realizar dos tipos de control:

**Controles en fase de pruebas**

Durante los primeros seis meses de funcionamiento del sistema.

*Control interno*

- . Medición de partículas en continuo, cuyos resultados se enviarán al órgano medioambiental competente, con la periodicidad establecida en la legislación vigente.

- . Medición de metales y SO<sub>2</sub>. Se realizará bimensualmente, y se enviarán los resultados al órgano medioambiental competente.

### **Controles en fase de funcionamiento**

#### *Control interno*

- . Medición de partículas en continuo, cuyos resultados se enviarán al órgano medioambiental competente, con la periodicidad establecida en la legislación vigente.
- . Medición de metales y SO<sub>2</sub>. Se realizará bimensualmente, y se enviarán los resultados al órgano medioambiental competente.

#### *Control externo*

- . Mediante las mediciones realizadas por una O.C.A que efectuará mediciones de partículas, balance de metales y SO<sub>2</sub> a los seis meses de la puesta en marcha del sistema de combustión, al año, y posteriormente bianualmente.

## **6. CONCLUSIONES**

Como conclusión, se puede afirmar que las emisiones previstas en el momento de la puesta en funcionamiento, tanto del sistema de combustión de harinas como de neumáticos, cumplirán la legislación, no apreciándose en ningún caso una variación significativa de las emisiones.

Un horno medio de 2200 T clínker/día, podría contribuir a la destrucción de la mitad de los neumáticos generados en la Comunidad Valenciana y a la tercera parte de las harinas producidas. Teniendo en cuenta que en esta Comunidad Autónoma, existen tres fábricas de clínker, la solución por valorización energética es factible.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- <http://www.cma.gva.es/Agenda/ver.aspx?idnodo=54803&idioma=C>  
“Revista Reutil”
- Francisca Puertas, I. García-Díaz, M. Palacios, Sagrario Martínez-Ramírez, A. Barba, M. F. Gazulla, M. P. Gómez “Empleo de residuos como combustibles alternativos para la fabricación de clínker de cemento pórtland” Marzo 2009
- <http://www.oficemen.com> “Desarrollo Sostenible” 2010
- Marín Andrés, Félix Sánchez de Rojas, María Isabel Rivera Lozano, Julián Frías, Moisés Pérez “Valorización de neumático como sustituto de combustibles para hacer cemento” 2005
- Alejandro Martín “Valorización de residuos en la industria del cemento” 2005
- <http://www.portal-watch.es/index.php?reGfg=1> 2010
- Serra Biarnes, Miguel Angel. “Revalorización energética de residuos en hornos de clínker” cemento y hormigón, nº 734. 1994
- Von Seebach “Metal emissions are predictable” Rocks Products. 1991
- Benestad, C. Incineration of hazardous waste in cement kilns. Waste Management & Research 7. 1999