



Fundación de la Energía de
la Comunidad de Madrid

Energy Management Agency
Intelligent Energy Europe

www.fenercom.com



Madrid
Ahorra
con Energía



La Suma de Todos



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA

Comunidad de Madrid

www.madrid.org

Guía de valoración energética de residuos

GUÍA DE VALORACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS



MINISTERIO
DE INDUSTRIA, TURISMO
Y COMERCIO

IDAE Instituto para la
Diversificación y
Ahorro de la Energía



Medida de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética para España (2004/2012) puesta en marcha por la Comunidad de Madrid, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y el Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).



Guía de valorización energética de residuos

Madrid, 2010



Fundación de la Energía de
la Comunidad de Madrid



www.fenercom.com



CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y HACIENDA

Comunidad de Madrid

www.madrid.org

Esta Guía se puede descargar en formato pdf desde la sección de publicaciones de las páginas web:

www.madrid.org

(Consejería de Economía y Hacienda, organización Dirección General de Industria, Energía y Minas)

www.fenercom.com

Si desea recibir ejemplares de esta publicación en formato papel puede contactar con:

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid

dgtecnico@madrid.org

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

fundacion@fenercom.com

La Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, respetuosa con la libertad intelectual de sus colaboradores, reproduce los originales que se le entregan, pero no se identifica necesariamente con las ideas y opiniones que en ellos se exponen y, por tanto, no asume responsabilidad alguna de la información contenida en esta publicación.

La Comunidad de Madrid y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, no se hacen responsables de las opiniones, imágenes, textos y trabajos de los autores de esta guía.

Depósito Legal: M. 44.970-2010

Impresión Gráfica: Gráficas Arias Montano, S. A.

28935 MÓSTOLES (Madrid)

Autores

- Capítulo 1 Situación de la valoración energética de residuos
D. Miguel Rodrigo
IDAE
- Capítulo 2 Aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos
D. Luis Manuel Centeno
TECONMA, S.A.
- Capítulo 3 La incineración de los residuos sólidos urbanos.
Aporte energético y ambiental
D. José Muruais y D. Alfonso Maíllo
AEVERSU (Asociación Española de Valorización
Energética de Residuos Sólidos Urbanos)
- Capítulo 4 Tratamiento integral de los residuos urbanos: la
experiencia del centro de tratamiento integral de
Las Lomas en Valdemingómez
D.º M.º Jesús Ramírez
Tirmadrid, S.A.
- Capítulo 5 Valorización energética de residuos en la industria
cementera española
D. Dimas Vallina
Fundación Laboral del Cemento y Medio Ambiente
(Fundación CEMA)
- Capítulo 6 Tratamiento de residuos, reciclaje y valorización. La
experiencia de la generación de energía a partir de
biogás en Madrid. Planta de Biometanización de Pinto
D. Eduardo Tolosa
GEDESMA



Índice

PRÓLOGO	9
1. SITUACIÓN DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS	11
2. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	25
3. LA INCINERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU). APOORTE ENERGÉTICO Y AMBIENTAL	49
4. TRATAMIENTO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS URBANOS: LA EXPERIENCIA DEL CENTRO DE TRATAMIENTO INTEGRAL DE LAS LOMAS EN VALDEMINGÓMEZ	89
5. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA ESPAÑOLA	103
6. TRATAMIENTO DE RESIDUOS, RECICLAJE Y VALORIZACIÓN. LA EXPERIENCIA DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOGÁS EN MADRID. PLANTA DE BIOMETANIZACIÓN DE PINTO	129



P

RÓLOGO

El incremento de residuos generados por el hombre se está convirtiendo en un grave problema para la sociedad. Gran parte de esta cantidad de residuos son reciclados o destinados a su depósito en un vertedero controlado. Pero existe una alternativa a estos dos procesos que cada año aumenta su presencia e implantación. Se trata de la valorización con recuperación energética de estos residuos.

Los residuos se someten a ciertos procesos, de forma que se reduce su volumen y se generan, por un lado, unas pequeñas cantidades de residuos y, a su vez, energía proveniente de los materiales contenidos. Esta energía obtenida es equiparable en muchas ocasiones y dependiendo del residuo a los combustibles convencionales.

Por ello, la Consejería de Economía y Hacienda, a través de la Dirección General de Industria, Energía y Minas, junto con la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid y dentro de la campaña Madrid Ahorra con Energía, editan esta Guía, con el fin de proporcionar a todos los lectores una visión general de la valorización energética de residuos a través de diversas experiencias prácticas, aplicaciones y posibilidades de desarrollo futuro.

Carlos López Jimeno

Director General de Industria, Energía y Minas
Consejería de Economía y Hacienda
Comunidad de Madrid



1

SITUACIÓN DE LA VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS



1. Introducción

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, como se verá más adelante, 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.

2. Marco legislativo y normativo

La Directiva 2009/28 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables establece, para cada Estado Miembro, obje-



tivos de contribución de las energías renovables al consumo de energía final para el año 2020, siendo el 20% el valor fijado para España. Los valores recogidos en el borrador del Plan de Acción Nacional de Energías Renovables son aún más ambiciosos y apuntan a una contribución en España del 22,7%.

Entre otras fuentes de energía renovable, esta Directiva define como biomasa «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; y
- 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 relevan-

tes 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 co-incinerar 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. 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 Tabla 1.1, se puede concluir que no sólo no son herramientas antagónicas, sino que son complementarias.

TABLA 1.1. Gestión de RSU por Estados miembros de la UE (2008).

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

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 Fig. 1.1, donde se representa la producción de electricidad renovable a partir de RSU (valores en GWh) en la Unión Europea en el año 2007.

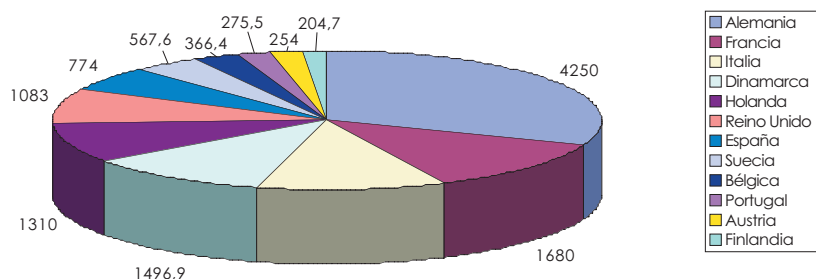
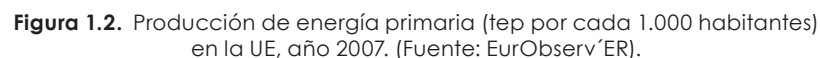
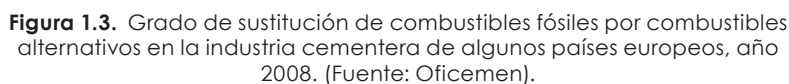


Figura 1.1. Generación de electricidad renovable (GWh) en la UE, año 2007. (Fuente: EurObserv'ER).

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 Fig. 1.2.



La sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero europeo varía de forma importante en función del país al que se haga referencia (Fig. 1.3).





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.

4. Situación en España

La situación española en materia de gestión de residuos ha sido descrita en profundidad en el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2012 (PNIR) elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

Según el PNIR, en 2006 se generaron en España 23.648.032 t de RSU, que fueron gestionados de la siguiente manera, Fig. 1.4.

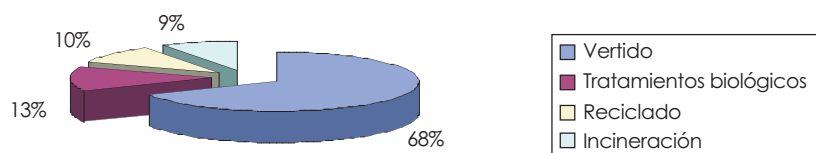


Figura 1.4. Gestión de RSU en España, año 2006. (Fuente: PNIR).

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 (Tabla 1.2).

TABLA 1.2. Instalaciones de incineración de RSU en España (2010).

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 (Balears)	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)
TOTAL	2.024.586		

Fuente: Borrador Plan Nacional Integrado de Residuos (oct-2008)

* **Fuente:** Elaboración propia.

** **Fuente:** Aeversu.

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 Fig. 1.5.

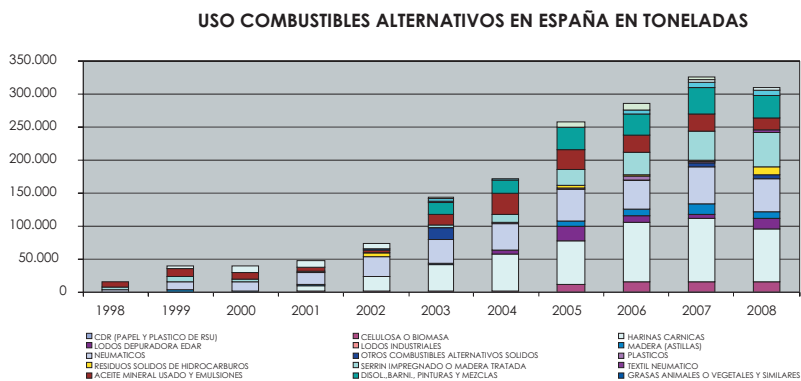


Figura 1.5. Evolución del uso de combustibles «alternativos» en España.
(Fuente: Oficemen).

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

peo. 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 papero, en cualquier de las tres modalidades comentadas.

5. Combustibles sólidos recuperados

Para concluir con este breve repaso a la situación de la valorización energética de residuos en España, conviene definir un tipo de combustible que puede jugar un papel importante en el necesario desarrollo de la valorización energética en nuestro país en los próximos años: los combustibles sólidos recuperados.

Según definición del Comité Europeo de Normalización (CEN), los combustibles sólidos recuperados son combustibles sólidos preparados a partir de residuos no peligrosos para ser utilizados para recuperación energética en plantas de incineración o co-incineración y que cumplen los requisitos de clasificación y especificaciones establecidas en la prEN 15359 (proyecto de norma sobre especificaciones y clases de los combustibles sólidos recuperados, de inminente publicación).

Dentro del complejo maremágnum de términos que caracteriza al sector de los residuos, es de agradecer que, promovido por la Comisión Europea, el CEN haya dedicado esfuerzos a definir lo que son los combustibles sólidos recuperados.

Frente a otras acepciones, como los combustibles derivados de residuos o los combustibles alternativos, los combustibles sólidos recu-





perados sólo recogen aquellos combustibles preparados a partir de sólidos no peligrosos y que cumplen con una serie concreta y armonizada de requisitos.

Un productor de combustibles sólidos recuperados tendrá que clasificar su producto según las siguientes categorías (Tabla 1.3).

TABLA 1.3. Parámetros para clasificar los combustibles sólidos recuperados.

PARÁMETRO	MEDIDA ESTADÍSTICA	UNIDAD	CLASE				
			1	2	3	4	5
PCI	Media	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cloro (Cl)	Media	% s/MS	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$
Mercurio (Hg)	Mediana	mg/MJ	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	Percentil 80	mg/MJ	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,0$

Además, tendrá que proporcionar al consumidor de este combustible la información recogida en la parte 1 del anexo A de la norma 15359, que incluye, entre otros, tamaño de partícula, contenido en cenizas, humedad, PCI, contenido en cloro, mercurio y otros metales pesados. Así mismo, en la parte 2 del anexo A de la norma, se recoge toda una serie de parámetros que se considera opcional suministrar.

El CEN ha desarrollado toda una batería de normas «de acompañamiento», que recogen desde las metodologías necesarias para determinar el contenido en biomasa y en determinados elementos, hasta los requisitos necesarios para implantar un sistema de control de calidad (basado en la ISO 9001). Todas estas normas se irán aprobando, en buena medida, a lo largo del año 2010, debiendo ser posteriormente incorporadas al marco nacional mediante el comité técnico de normalización 301 sobre combustibles sólidos recuperados creado en AENOR, cuya secretaría ostenta la asociación española de recuperadores de madera (ASERMA).

Países como Reino Unido, Italia, Alemania o Finlandia, llevan años ya trabajando en este sector, y la Asociación Europea de Combustibles Recuperados, ERFO, cuenta entre sus integrantes con empresas españolas.

6. Bibliografía

1. Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, elaborado por el MARM.

2. www.aeversu.es
3. Anuario 2008 de Oficemen.
4. Guía de Gestión de Residuos (fábricas de pasta, papel y cartón) elaborada por Aspapel.
5. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
6. www.eurobserv-er.org
7. www.cen.eu



2

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS



1. Introducción

La evolución de los usos y costumbres de la sociedad ha originado un cambio sustancial en la composición de la bolsa de la basura de los hogares a lo largo de los años, así como un aumento progresivo de la cantidad de basura que se genera en los domicilios.

La gestión de esos residuos de origen doméstico que se generan en las ciudades es competencia municipal y, en la actualidad, es uno de los mayores problemas con que se encuentran los municipios españoles.

En los términos municipales se generan distintos tipos de residuos. Por ejemplo, las materias primas minerales y agrícolas se utilizan para producir bienes de consumo y satisfacer la demanda de los ciudadanos, pero antes de llegar al consumidor se someten a numerosos procesos y tratamientos, produciéndose residuos en cada uno de ellos.

Los subproductos de esa elaboración constituyen los Residuos Industriales. La gestión de estos residuos es competencia de las empresas que los generan.

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), en cambio, contienen todos los productos que, comprados por los consumidores, son desechados después de su utilización al final de su vida.

Un esquema de esta diferente generación de residuos se puede apreciar en la Fig. 2.1.

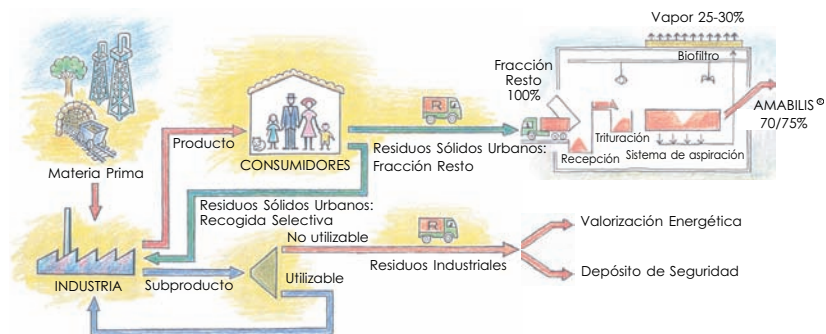


Figura 2.1. Esquema de generación de residuos. (Fuente: ECODECO).

En los países industrializados, especialmente en Europa, en las últimas décadas las industrias han modificado los procesos productivos para reducir o hacer utilizables los propios desechos de elaboración. Como consecuencia de estas innovaciones productivas, los Residuos Industriales se han reducido un 80% en treinta años.

Por el contrario, el aumento del consumo como consecuencia de la mayor riqueza, ha implicado un aumento en la cantidad de Residuos Sólidos Urbanos generados.

Debido a ello, la legislación europea en materia de residuos, abanderando los principios de prevención, reuso, reciclado y otras recuperaciones (incluida la energética), establece, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, unos requisitos cada vez más exigentes en contra del depósito en vertedero de materiales reciclables o valorizables y de materia orgánica.

Alrededor del 40% de los materiales que constituyen los RSU son recuperables a través de la recogida selectiva. El 60% restante, que constituye la Fracción Resto, está constituida por materiales no separables fácilmente o no recuperables, pero ricos en energía.

Para separar los diferentes materiales que componen los RSU se necesita energía; por este motivo, la separación en origen, utilizando la Recogida Selectiva, es, en general, el sistema más eficiente y el que se suele promover por las distintas instituciones.

Recoger y transportar separadamente las distintas Fracciones comporta, sin embargo, una mayor utilización de materiales y energía. Por

ejemplo, hacen falta más bolsas, más contenedores, más recogidas y más transporte.

Por lo tanto, el mejor sistema será el que optimice el balance ambiental entre el consumo de energía y los materiales recuperados.

En general, puesto que los materiales recogidos separadamente necesitan menos energía para ser recuperados pero más energía para ser recogidos, hay una situación intermedia óptima de la Recogida Selectiva que presenta los costes ambientales mínimos (ver Fig. 2.2).

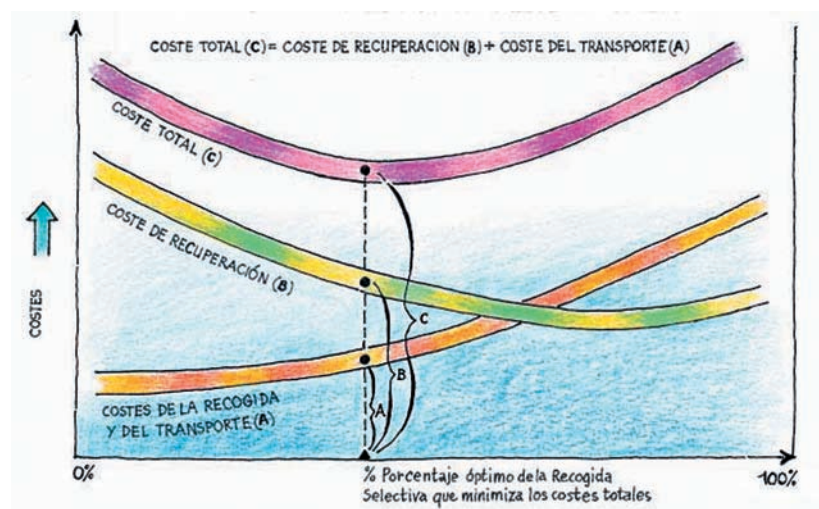


Figura 2.2. Representación del punto donde los costes totales son mínimos para un determinado valor porcentual de la Recogida Selectiva. (Fuente: ECODECO).

Los procesos térmicos fueron de los primeros tratamientos empleados para la gestión de las basuras por los municipios y particulares. Los problemas ambientales surgidos como consecuencia de la utilización de sistemas sin contar con los medios de protección adecuados, han creado una mala imagen a estos métodos que, hoy en día, siguen lastrando su uso.

Sin embargo, las tecnologías empleadas en la actualidad, así como las exigencias normativas en vigor, hacen que no tenga sentido la prevención manifestada por determinados sectores de la opinión pública, pudiéndose emplear la valorización energética de residuos como cualquier otro sistema de gestión de los mismos.





De hecho, cuando se analizan los datos estadísticos publicados por EUROSTAT sobre el tratamiento de los RSU en los 27 estados de la Unión Europea, se puede apreciar que en los países donde más se utilizan los sistemas de incineración y valorización energética es también donde más materiales se reciclan y, por lo tanto, donde menos cantidad de residuos se deposita en vertederos.

Por otra parte, es de gran importancia la cantidad de energía considerada como renovable, según la fuente de los residuos y el sistema de tratamiento energético. En la Tabla 2.1 se pueden apreciar los porcentajes de energía renovable de distintos sistemas de tratamiento de residuos.

TABLA 2.1. Porcentaje de energía renovable en tratamientos térmicos de los residuos.

TRATAMIENTO	FUENTE RESIDUOS	FORMA DE ENERGÍA	% ENERGÍA RENOVABLE
Incineración con Recuperación de Energía	Fracción Resto	Vapor → Electricidad y Calor	Prm. 45% Rango 48 – 80%
Gas de Vertedero	Fracción Resto o Residuos en Bruto	Biogás → Electricidad (y Calor)	100%
Combustible Sólido Recuperado	Fracciones de RSU o RCD	Sustitución Combustible en Cementeras o Térmicas	Prm. 50% Rango 30 – 55%
Digestión Anaerobia	Fracción Orgánica RSU o biomasa selectiva	Biogás → Electricidad y Calor	100%
Plantas Biomasa (Incineración gasificación)	Madera recogida y seleccionada	Vapor → Electricidad y Calor	95 – 100%

2. Aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos

El primer sistema utilizado para aprovechar la energía contenida en los residuos fue la incineración, que se basa en una combustión controlada en la que el elemento combustible son los propios residuos. El proceso tiene lugar con un gran desprendimiento de calor, generalmente suficiente como para mantener la reacción de combustión.

Desde el punto de vista químico, la incineración es un conjunto de reacciones de oxidación que tienen lugar, preferentemente, en fase gaseosa y por mecanismos de radicales libres, lo que conduce a la recombinación de las diferentes especies químicas presentes. previa-

mente, existen otros mecanismos de gasificación y vaporización de los compuestos volátiles, preferentemente orgánicos. Las reacciones de oxidación y de destrucción térmica originan la formación de moléculas sencillas, como el CO_2 , H_2O , NO_x , etc., que son los componentes mayoritarios de los gases de la combustión, junto con el nitrógeno atmosférico.

Un elemento determinante en el tipo de proceso térmico y en los resultados del mismo es la cantidad de oxígeno presente en relación con las necesidades estequiométricas (cantidad de oxígeno necesario para que se realice la combustión):

- Si existe un exceso moderado de oxígeno puede hablarse propiamente de incineración. Las reacciones se producen a temperaturas elevadas, relativamente cercanas a las de combustión adiabática. Los productos de la reacción son las especies posibles más oxidadas (CO_2 , H_2O , NO_x , etc.). Debido a la temperatura elevada, parte de los compuestos inorgánicos volátiles estarán en las cenizas volantes. Los residuos sólidos de la combustión estarán exentos de compuestos volátiles y los metales estarán en su forma oxidada, lo que, previsiblemente, les confiere un carácter inerte.
- Si existe un defecto de oxígeno, de forma deliberada o momentánea, los procesos combinados de transferencia de masa y de calor pueden desarrollarse de dos formas distintas:
 - Si la temperatura es suficientemente elevada se produce una pirólisis, en la que las estructuras moleculares se rompen dando lugar a gases parcialmente oxidados (CO , CH_4 , etc.) y a residuos sólidos carbonizados. También suelen producirse vapores orgánicos que, al enfriarse, condensan en forma de mezclas de hidrocarburos pesados. No es segura la destrucción de todos los compuestos orgánicos vaporizados ni de que todos los metales no vaporizados estén en estado de oxidación completa.
 - Si la temperatura no es muy elevada no se produce la rotura molecular ni ningún tipo de reacción química, sino la destilación y evaporación de sustancias volátiles que, en una posterior condensación, dan lugar a líquidos o sólidos pastosos.
- Si el exceso de oxígeno es muy elevado, la combustión tendrá lugar a temperatura baja, por la gran cantidad de inertes en la mezcla





de gases (por la presencia de nitrógeno). Independientemente de la ineficacia en la recuperación energética, no puede garantizarse la destrucción de los compuestos orgánicos presentes en los residuos.

La eficacia de la incineración como forma de tratamiento de residuos descansa fundamentalmente en la posibilidad de realizar las diferentes reacciones químicas, de forma que los productos de reacción sean moléculas sencillas y se minimice la formación de productos de combustión incompleta, ya que éstos suelen tener características tóxicas y son un índice de que la reacción no se ha llevado a cabo de forma controlada.

Además del exceso de aire, los parámetros más importantes de las diferentes tecnologías de incineración están relacionados con la optimización de los procesos de transferencia de masa y de energía, de forma que los productos de reacción sean los deseados. Los parámetros que se utilizan como indicadores externos de la calidad del proceso de destrucción son: la **temperatura mínima** de combustión y el **tiempo de permanencia** a esta temperatura mínima. Habría un tercer parámetro que es la **turbulencia**, que facilitaría la adecuada interacción entre moléculas.

Estos parámetros están recogidos en la Directiva 2000/76/CE del Parlamento y del Consejo, relativa a la incineración de residuos, (que ha sido transpuesta al Derecho español por el RD 653/2003), con los siguientes valores:

- Temperatura mínima de combustión de **850 °C**. Cuando los residuos a incinerar contengan más del 1% de cloro orgánico, esta temperatura mínima se elevará a 1.100 °C.
- El tiempo mínimo de permanencia a la temperatura señalada, tras la última inyección de aire, será de **dos segundos**.
- Las instalaciones se explotarán de forma que el contenido de carbono orgánico total de las escorias y cenizas sea inferior al **3%**.
- No existen especificaciones concretas sobre el exceso de oxígeno, pero sí un control muy estricto de las emisiones de CO, lo que, indirectamente, obliga a un determinado exceso del mismo.

Debe señalarse que la incineración puede realizarse en dos tipos de instalaciones:

- Las diseñadas específicamente para la destrucción de residuos, con o sin recuperación de energía. En estas instalaciones el objetivo fundamental es la destrucción de los residuos. La recuperación de energía debe considerarse como un objetivo secundario aunque, de acuerdo con la Directiva, la recuperación energética deberá aplicarse siempre que sea posible.
- Otras instalaciones diseñadas para otros fines pero que, por sus características, son susceptibles de ser usadas en el tratamiento de residuos. Para estas instalaciones (cementeras, ciertas centrales térmicas, etc.) el tratamiento de residuos persigue la reducción del coste energético de otras producciones mediante la sustitución de combustibles tradicionales por residuos.

Entre los principales sistemas de aprovechamiento energético de los residuos municipales se pueden citar los siguientes:

- Incineración con recuperación de energía.
- Co-incineración en procesos industriales a altas temperaturas.
- Biometanización.
- Desgasificación de vertederos.
- Procesos basados en la generación de plasma.
- Incineración catalítica.
- Gasificación.
- Pirólisis.
- Termólisis.
- Incineración electroquímica.

Como en esta Guía se dedica un capítulo a la incineración de residuos con recuperación de energía, en este capítulo sobre aprovechamien-





to energético de los residuos sólidos urbanos se tratarán otros sistemas de valorización térmica complementarios a la incineración.

3. Otros procesos de aprovechamiento energético

3.1. Desgasificación de vertederos

Aunque no es un proceso que pueda aplicarse con vistas al futuro, sí lo es para recuperar los vertederos antiguos de residuos municipales.

La razón por la que no se prevé su aplicación en el futuro es como consecuencia de los objetivos que se incluyen en el R.D. 1481/2001, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, consistentes en la limitación de la cantidad de residuos biodegradables que se pueden depositar en vertederos. Si dichos objetivos se cumplen, no habrá suficiente materia orgánica fácilmente degradable en los vertederos como para permitir un aprovechamiento energético del metano que se pudiera generar en los mismos.

En cambio, para los vertederos antiguos sí es muy conveniente la desgasificación de los mismos, ya que el componente principal de esos gases es el metano, que, por una parte, tiene un poder calorífico suficiente para su aprovechamiento energético y, por otra, si dicho metano acabara en la atmósfera sería muy pernicioso de cara al efecto invernadero (su actividad en ese aspecto es 21 veces superior al CO_2).

El gas que se recupera del vertedero primeramente se depura para eliminar impurezas que pudieran dañar los equipos de valorización y, a continuación, se inyectan en motores de combustión interna que, acoplados a alternadores, pueden generar energía eléctrica. También existe la posibilidad de incorporar el biogás, debidamente depurado y acondicionado, a las redes de distribución de gas o su utilización como combustible gaseoso en las flotas municipales de camiones y autobuses.

3.2. Biometanización

Otra posible forma de aprovechamiento de los residuos municipales consiste en la biometanización de los residuos biodegradables mediante la fermentación anaerobia (en ausencia de oxígeno), de forma que se obtiene un gas combustible, mayoritariamente compuesto por metano.

En las plantas de biometanización, en primer lugar se realiza un tratamiento de la materia seca con objeto de clasificar materiales recuperables. A continuación se realiza el tratamiento de la materia húmeda, de forma que el flujo de residuos quede en condiciones adecuadas para su alimentación a un digestor, en el cual se realiza la biodigestión con desprendimiento del gas combustible. El último paso consistiría en la estabilización de la materia orgánica digerida mediante su compostaje (fermentación aerobia, es decir, en presencia de oxígeno).

Una vez que el residuo se ha acondicionado y homogeneizado suficientemente hasta conseguir la hidrólisis, se alimenta a los digestores donde se realiza la fermentación anaerobia. El biogás producido en ellos se extrae por su parte superior y se depura para su almacenamiento en un gasómetro, desde donde se alimentan unos motores de generación eléctrica.

3.3. Procesos basados en la generación de plasma

El plasma se define como un gas ionizado eléctricamente neutro. Es, por tanto, un estado de equilibrio dinámico entre partículas cargadas y neutras.

Existen varias maneras de generar plasma. Una de ellas consiste en la formación de un arco eléctrico haciendo pasar una corriente continua entre dos electrodos. El aire existente entre ellos se calienta alcanzando temperaturas muy elevadas, de forma que si se hace pasar una corriente de un gas inerte, frecuentemente argón, a través de dicho arco, se crea una antorcha de plasma con una temperatura que suele superar los 10.000 °C.

3.4. Pirólisis / Termólisis

Hay otros sistemas de gasificación de los residuos, aunque menos experimentados en los residuos municipales, y que, a día de hoy, requieren de un mayor desarrollo tecnológico para una aplicación masiva en el aprovechamiento energético de dichos residuos.

Estos procesos consisten en el tratamiento de los residuos en condiciones de escasez (pirólisis) o ausencia total (termólisis) de oxígeno.

La pirólisis consiste en someter los residuos a temperaturas en torno a 800–1.100 °C para que se produzca una reacción con déficit





de aire global, por combustión de una parte del residuo con aire. El producto resultante de esa reacción es un gas compuesto por metano, hidrógeno, monóxido de carbono, nitrógeno, agua y un residuo inerte.

En la termólisis se somete a los residuos a temperaturas del orden de 400 °C, en un reactor en el que hay ausencia total de oxígeno, mediante la aplicación de energía externa (por ejemplo, eléctrica). En esas condiciones se produce una destilación de los residuos, generando un gas combustible y un producto carbonado (coque), que puede utilizarse como carbón activo o valorizarse como combustible.

4. Preparación de combustibles sólidos recuperados (CSR)

Los procesos clásicos de incineración se alimentan con los residuos municipales, generalmente, tal como se reciben o con ligeros acondicionamientos, con una gran humedad y un poder calorífico muy bajo. Ello tiene como consecuencia que el proceso, aunque útil desde el punto de vista de gestión de los residuos, no es un sistema eficiente desde un punto de vista de generación de energía eléctrica, no tanto por la dificultad de obtener energía de los RSU, como por su escala, ciento de veces más pequeña que la de una central termoeléctrica.

Concentrar los residuos en grandes plantas de incineración tiene el inconveniente del transporte de dichos residuos desde los puntos de generación, por lo que se han desarrollado procesos que, por un lado, estabilicen los residuos y, por otro, sean capaces de prepararlos para su utilización como combustibles eficientes, dando lugar a lo que se ha llamado los Combustibles Sólidos Recuperados (CSR), los de alta calidad, y Combustibles Derivados de Residuos (CDR), los de inferior calidad.

Por otra parte, las plantas de incineración o plantas de valorización energética (PVE) son unas soluciones tecnológicas que requieren unas inversiones de capital muy elevadas, por lo que es tremendamente importante que el proyecto de este tipo de instalaciones se mantenga válido durante muchos años (varias décadas), independientemente de los cambios en la calidad y cantidad de los residuos producidos en su área de influencia.

Sin embargo, la basura doméstica que se genera en los municipios ha sufrido y sufrirá a lo largo de los años múltiples cambios en sus características, incluso existen variaciones entre la basura generada en invierno y la generada en verano. Por ello, será importante, a la hora de diseñar las plantas, evaluar correctamente determinados parámetros que originan las diferencias comentadas, como pueden ser:

- Cambios en las costumbres sociales.
- Modificación en la escala de la economía (distribución y venta más universal de productos, etc.).
- Ratios de generación *per capita*.
- Fuentes de reducción, reciclaje, compostaje, etc.
- Presente y futuro del valor del combustible procedente de residuos.
- Desarrollo/inención de nuevos materiales (tetrabrik, etc.).
- Cambios en el uso de materiales (por ejemplo, el cambio de vidrio por plástico).
- Evoluciones de la normativa.
- Modificaciones en los criterios de gestión de los residuos (por ejemplo, desarrollo de la recogida selectiva en origen, modificaciones de las técnicas de recogida, etc.).

Estos y otros aspectos pueden originar cambios en la cantidad de residuos (incrementando o reduciendo), en su calidad (por ejemplo, contenido de humedad, poder calorífico, contenidos de cloro y azufre, etc.) y cambios en porcentaje de residuos voluminosos y de materiales no combustibles.

Así, uno de los parámetros que han ido modificándose a lo largo de los últimos años es el Poder Calorífico Inferior (PCI) de los residuos producidos en los domicilios. Por ejemplo, en la Fig. 2.3 se puede apreciar cómo ha cambiado el PCI de los residuos desde 1989 a 2005 y el contenido en compuestos biogénicos o no-biogénicos:



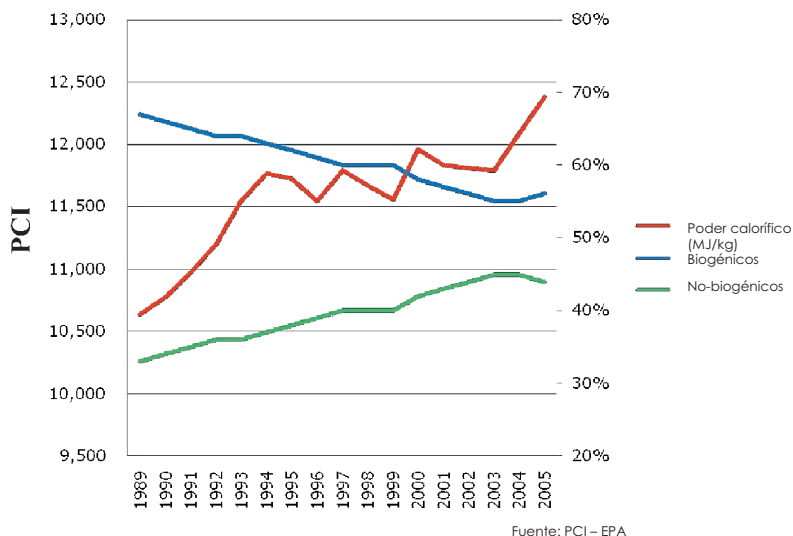


Figura 2.3. Evolución temporal del Poder Calorífico de los residuos.

Si aumenta el PCI de los residuos que alimentan a una planta de valorización energética (PVE) y se llega al límite térmico de la instalación, habrá que reducir la cantidad de residuos a introducir en la misma o ampliar la planta de combustión, con el consiguiente coste que ello supone.

Todos estos aspectos pueden afectar directamente a la viabilidad del proyecto de una incineradora, por lo que es necesario anticiparse a los mismos introduciendo sistemas y pretratamientos que protejan la planta de incineración contra las fluctuaciones anteriormente comentadas.

En lugar de sobredimensionar las instalaciones de incineración, una de las soluciones más inteligentes puede ser la de realizar un tratamiento de biosecado de los residuos, de forma que se consiga introducir en la planta de combustión un producto lo más uniforme posible y que se mantenga constante aunque los residuos de entrada hayan variado sustancialmente. De esta forma, se protege la planta de combustión contra las fluctuaciones del poder calorífico y de la humedad de los residuos generados.

Por ello, se puede decir que el tratamiento previo a la incineración mediante el biosecado tiene una serie de ventajas como pueden ser las siguientes:



1. **Protege** a la instalación de combustión de las fluctuaciones a lo largo de los años y de la calidad de los residuos de la zona, tanto si mantiene una tendencia a aumentar el PCI (como ha venido sucediendo hasta hoy) como si se produce una inversión de dicha tendencia.
2. Garantiza un **tratamiento constante** de los residuos de entrada y determina un aprovechamiento constante, tanto en cantidad como en calidad, en el horno (24 horas/día, 7 días/semana).
3. Se **disminuye la cantidad de residuos** en la entrada del horno y permite preparar con mayor esmero una mejor combustión: mejor distribución del material sobre la parrilla, control de la temperatura, reducción de la cantidad de subproductos (escorias), etc.
4. Permite alcanzar una **eficiencia energética superior** en la instalación de combustión: la alimentación del horno con un combustible de características constantes en el tiempo, permite fijar con mayor precisión los parámetros de combustión, reduciendo los márgenes de seguridad y aproximándose mucho al límite superior de las prestaciones del horno.
5. Consigue la **higienización y la estabilización** del material, lo que además de reducir los riesgos de incendio y mejorar las condiciones higiénicas y de salud durante su manipulación, facilita el almacenamiento del material biosecado durante las paradas del horno incinerador (tanto durante las paradas programadas como durante las paradas no programadas), cerca del 10% del tiempo anual de funcionamiento del horno. La posibilidad de almacenamiento tiene una importante consecuencia positiva:
 - Elimina los inconvenientes debidos a las paradas no programadas del horno.
 - No obliga a encontrar otros canales de tratamiento alternativos durante los periodos de parada (en otro incinerador o en un vertedero).
 - Permite explotar en el horno todo el «potencial energético» de los residuos generados en la zona.
6. Como consecuencia de todo lo anterior, se reducen los costes de gestión y mantenimiento de la instalación de valorización energética.



La gran versatilidad de funcionamiento que se le proporciona a un sistema formado por un tratamiento previo mediante biosecado y una instalación de valorización energética, permite afrontar cualquier variación que se presente en el futuro.

Sin embargo, la mayor ventaja del biosecado en el sistema anterior se presenta cuando se desea una sola instalación de valorización energética para dar servicio a un gran territorio, ya que permitiría solucionar la tremenda dificultad del transporte y del almacenamiento del residuo, que está compuesto de una mezcla húmeda y putrescible de materiales, lo que ocasionaría molestias durante dicha operación.

En cambio, si se utiliza una red de plantas de biosecado situadas cerca de donde se generan los residuos, es el producto biosecado el que se transporta hacia la gran planta de valorización energética, lo que permite unas condiciones óptimas tanto para su almacenamiento como para su transporte.

4.1. Descripción del proceso de biosecado

El proceso de biosecado es un tratamiento biológico tan obvio como innovador. Toda la fracción putrescible se oxida aeróbicamente y la energía liberada (en forma de calor) se utiliza para secar e higienizar el residuo, con el objeto de obtener unas condiciones más eficientes y salubres para la posterior manipulación de los materiales presentes en el mismo.

A causa de la elevada temperatura que se alcanza en el interior de la masa de residuos (50-60 °C), el proceso aeróbico es un eficaz sistema de estabilización, desodorización e higienización del material.

Durante el proceso, debido a la evaporación del agua contenida en los residuos y a la degradación de parte de la materia orgánica, se produce una reducción en peso del 25-30%, dependiendo de las condiciones de entrada.

El proceso se desarrolla siguiendo las siguientes fases:

- Recepción de RSU.
- Trituración.

- Estabilización y biosecado.
- Tratamiento de gases.
- Afino (preparación de CSR/CDR).

Toda la manipulación de los residuos en el interior de la instalación se realiza a través de un sistema compuesto por un conjunto de puentes grúa (dos para cada línea de tratamiento), completamente automáticos y controlados por radiofrecuencia desde el interior de la sala de control (ver Foto 2.1).



Foto 2.1. Puentes grúa y cazo para manipular RSU y asimilables.
(Fuente: ECODECO).

Cada grúa es redundante de la otra, lo que permite que mientras una está en labores de mantenimiento, se puede seguir trabajando normalmente con la otra.

Se pueden programar una serie de tareas, de forma que la máquina puede funcionar en automático en total ausencia del operador de control durante largos periodos de tiempo. El sistema se opera normalmente desde la sala de control, aunque también puede manejarse lejos de la nave donde trabaja el puente grúa, con un adecuado sistema de telecámaras que suplan la falta de visión directa.





Guía de valorización energética de residuos

Todo el proceso se realiza dentro de una nave industrial, de unos 22 – 24 m de ancho, sometida a depresión, que evita la propagación de olores al exterior. En dicha nave, los residuos son descargados directamente por los camiones de recogida en unos fosos de recepción (ver Foto 2.2).



Foto 2.2. Descarga de residuos y foso de recepción.
(Fuente: ECODECO y L. Martínez Centeno).

Para evitar la propagación de olores hacia el exterior del edificio, así como el tránsito potencial de insectos, se cuenta con dos medidas:

- Una depresión en el interior del edificio, que se combina con el hecho de que el flujo de salida principal de aire del edificio es a través del biofiltro. De esta manera, se pretende minimizar la emisión de caudales de aire que no hayan sido depurados.
- Sistemas de rociado de agua micro-pulverizada, accionados automáticamente con la apertura de las puertas de descarga del foso de recepción.

Los posibles lixiviados que se puedan producir en la zona de recepción se recogerán y enviarán, conjuntamente con el resto de lixiviados de la planta, al depósito de lixiviados.

La fase de trituración se realiza durante el día y bajo el control de un operario desde la sala de control, que inspecciona visualmente cada descarga, de forma que, eventualmente, interviene interrumpiendo la secuencia automática y accionando manualmente el puente grúa para eliminar los residuos incompatibles con el proceso (como bombonas de gas, bloques de cemento, neumáticos, etc.).

El primer puente grúa con cazo bivalvo alimenta de forma automática al triturador. La capacidad de este equipo se calcula para que pueda triturar durante 8 – 10 horas toda la basura recibida en el día. Esta máquina generalmente va colocada sobre un puente móvil que permite el llenado homogéneo del foso de almacenamiento.

El llenado homogéneo de los fosos tiene gran importancia debido al funcionamiento automático de las grúas para evitar pérdidas de tiempo y de rendimiento.

La trituración se realiza a un tamaño de 25 – 30 cm, con el objeto de homogeneizar el material y, adicionalmente, mejorar las condiciones de fermentación, facilitando el contacto de la parte orgánica de los residuos con el oxígeno del aire que pasa a través de la masa de los mismos. En la Foto 2.3 se puede apreciar el triturador y el foso de recepción.

Con la trituración también se consigue la rotura de las bolsas de basura de manera eficaz, no planteándose posteriormente problemas por esta causa.



Foto 2.3. Vista del interior: descarga, trituración y zona de biosecado.
(Fuente: ECODECO).

La fase de biosecado consiste en la evaporación de parte de la humedad contenida en los residuos municipales recibidos y tri-



turados, así como en la estabilización parcial de los mismos. La circulación de una corriente de aire forzada a través de la pila formada por los residuos y el calor producido en las reacciones de degradación aeróbica de la materia orgánica, son los mecanismos principales del proceso, tal como se ha descrito. La reacción se produce de forma natural bajo las condiciones del área de biosecado.

Una vez triturados los desperdicios a la medida deseada, se trasladan mediante el puente grúa hasta la sección de biosecado, depositándolos en pilas de unos 5 – 6 m de altura, agrupando los residuos de cada día en pilas contiguas.

El pavimento del área de biosecado está formado por parrillas prefabricadas de hormigón, perforadas para permitir el paso de la corriente de aire desde el interior de la nave hacia un *plenum* situado debajo de los residuos, desde donde se envía al biofiltro, que se encarga del tratamiento de los gases.

El proceso tiene una duración de, aproximadamente, 14 – 15 días, suficiente para obtener un material seco y estabilizado, sin patógenos ni olores.

El control del caudal de aire comprende la toma de datos de humedad y temperatura. La temperatura es el parámetro fundamental que determina el régimen de funcionamiento de los ventiladores de aspiración hacia el biofiltro.

La cantidad de aire que circula entre los residuos se regula pues en función de la temperatura que se alcanza en el aire a la entrada del biofiltro.

Los ventiladores situados al lado del biofiltro crean la corriente necesaria para aspirar el aire a través de los orificios del pavimento de la zona de biosecado.

El biofiltro actúa como sistema biológico de depuración de gases. Los compuestos son transferidos de la fase gaseosa a un lecho sólido donde, con un adecuado grado de humedad, son degradados biológicamente por los microorganismos presentes en el lecho. En la Foto 2.4 se puede apreciar la configuración de los biofiltros.



Foto 2.4. Biofiltros colocados en el techo de la planta y en el suelo.
(Fuente: ECODECO).



En el biofiltro las sustancias a depurar son enviadas hacia un sustrato de aproximadamente un metro de material blando y poroso, generalmente de origen vegetal donde, en condiciones controladas de humedad, pH, tiempo de contacto y nutrientes inorgánicos y orgánicos, los microorganismos metabolizan los contaminantes contenidos por el flujo gaseoso a depurar.

El biofiltro dispone de un sistema automático de humidificación y un sistema de drenaje para eliminar el exceso de agua, la cual será conducida al tanque de almacenamiento de lixiviados.

El área de biofiltro se dimensiona para cubrir las necesidades de extracción de aire de la zona de biosecado y la zona de recepción/trituración.

La siguiente fase, la de afino y preparación de CSR, dependerá del destino que se quiera dar al producto de salida de la planta. Cuando lo que se quiere es preparar un combustible a partir del residuo biosecado, se deposita el material mediante el puente grúa en una tolva situada en la nave de biosecado, desde donde se conduce por medio de cintas transportadoras para su tratamiento posterior en la sección de afino.

A continuación, se abre un amplio abanico de posibilidades que permite distintas configuraciones de preparación en función de las características del producto final deseado.

Si el destino va a ser un planta de valorización energética, generalmente no se hace nada más, únicamente lo necesario para su envío al destino final. Solamente si se quiere reducir en mayor medida el ta-



maño de la planta posterior, se realizan otras operaciones destinadas a retirar otras fracciones que no aportan poder calorífico, como son los inertes presentes en el producto biosecado.

En cambio, si lo que se desea es preparar combustible con destino a hornos industriales, lo que se suele hacer es introducir la mezcla en un trómel (criba giratoria) con el objetivo de separar el rechazo y el producto final.

Esta etapa de afino también comprende la extracción de los metales féreos y no féreos mediante una cinta transportadora magnética (extracción de metales féreos) y un equipo de corrientes de Foucault (extracción de aluminio y metales no féreos). Los materiales recuperados se gestionan adecuadamente para su reciclado.

Tras el cribado, el material seleccionado para formar el CSR se tritura al tamaño requerido por el consumidor final, mientras que la fracción fina se trata como rechazo del proceso.

Con la operación de afino se puede obtener un producto que, dado su elevado poder calorífico (del orden de 14.000 – 16.000 kJ/kg), se puede utilizar en centrales térmicas, cementeras o en instalaciones de cogeneración propias.

La sección de afino se dota de un sistema de aspiración para la eliminación de polvo a través de un filtro de mangas.

Los productos finales se conducen mediante una cinta transportadora hacia la prensa electrohidráulica que los compacta, dando lugar a unos materiales de mayor densidad, lo que facilita su transporte y manipulación, si así fuera necesario.

Una de las principales ventajas que tiene disponer de un producto de este tipo es que puede ser transportado y almacenado, por lo que la instalación destinada a producir energía eléctrica a partir de dicho producto ya no es necesario que esté ligada al lugar de generación de los residuos origen del mismo, sino que se puede colocar en un emplazamiento racional y adaptado para recibir esa materia prima desde varias instalaciones similares, o bien aprovechar instalaciones existentes con anterioridad para mejorar los rendimientos.

En la Fig. 2.4 se puede apreciar un esquema de flujo general de una planta de biosecado.

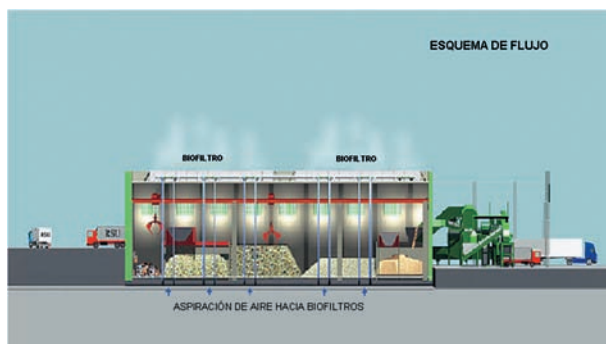


Figura 2.4. Esquema de flujo de una instalación de biosecado.

5. El biorreactor activable

Otra forma de aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos es la que permite obtener biogás del residuo biosecado descrito anteriormente.

Dicho residuo es un material seco, parcialmente estabilizado e higienizado, que está formado por dos grandes grupos de materiales: una fracción degradable más húmeda, rica en madera, papel, cartón, tejidos de fibra natural y material orgánico (fracción renovable) y una fracción no degradable más seca, rica en poliolefinas, es decir, materiales plásticos no clorados (fracción no renovable).

Debido a ello, en los residuos biosecados hay una parte energéticamente muy interesante, la no renovable, a la que se le pueden quitar los metales y los inertes, en el caso de que no se hubieran eliminado anteriormente, con lo que se podría obtener un poder calorífico del orden de 20.000 kJ/kg, que podría utilizarse para alimentar instalaciones térmicas convencionales, o bien, hornos de cementeras; mientras que la parte restante, la renovable o degradable se podría emplear en un nuevo tipo de instalación, los Biorreactores Activables, donde también podría aprovecharse la energía en ellos contenida.

En el Biorreactor Activable, la fracción degradable se conserva durante muchísimo tiempo en estado seco, pero si se le adiciona agua en condiciones anaerobias adecuadas, se puede activar la produc-





ción de un biogás de elevada calidad, utilizable para la producción de energía eléctrica, usando generadores eléctricos accionados por motores endotérmicos que tienen un buen rendimiento, incluso para una potencia instalada reducida, o se pueden depurar y enviar a las redes de distribución de gas.

En los vertederos convencionales, con la experiencia adquirida, se considera como un dato optimista recoger 100 Nm^3 de biogás por tonelada de residuos (una parte del biogás producido también se dispersa en la atmósfera) durante unos 15 – 20 años. En cambio, cuando se utilizan los Biorreactores Activables, la producción de biogás sería la misma pero sin dispersión en la atmósfera, ya que cuando se activa y empieza a producir biogás ya está sellada la celda, es decir, se podría recuperar $180 - 200 \text{ Nm}^3/\text{t}$ de residuo, pero en un tiempo mucho más breve, en 4 – 6 años, con picos de caudal de biogás hasta 4 veces superior.

El Biorreactor Activable puede tener el formato que se estime conveniente en cada situación. Puede construirse en celdas de arcilla y láminas plásticas impermeables, sistema empleado para las celdas de los vertederos convencionales (ver Fig. 2.5), o bien utilizar celdas de otros tipos.



Figura 2.5. Esquema de un Biorreactor Activable en celdas de vertedero.

La secuencia de explotación de un Biorreactor Activable se puede presentar en cinco fases (ver Fig. 2.6): vertido, activación, mineralización, extracción y reutilización. En la primera fase se procede a depositar los residuos de mayor contenido en celulosa, junto con los inertes bioestabilizados.

La segunda sería la activación y generación de biogás, con alto contenido en metano, que puede aprovecharse para generar energía eléctrica, como ya se ha explicado.

Una vez que ha fermentado en su totalidad la fracción renovable, el material que queda en la celda son los inertes y compuestos húmicos, es decir, un material sumamente estable (índice dinámico de respiración de $100 - 150 \text{ mg O}_2 / \text{kg SS}^{-1}\text{h}^{-1}$).

A partir de ese momento es cuando se vuelve a estabilizar dicho producto, soplando aire durante el tiempo suficiente para conseguir la total estabilidad del mencionado producto que permanece en el interior (fase tres).

En este momento se puede optar por clausurar la celda y preparar otra celda nueva encima de la anterior, o bien retirar los inertes y los productos húmicos de la celda original y volver a iniciar el ciclo en la fase primera (fases cuatro y cinco, respectivamente).

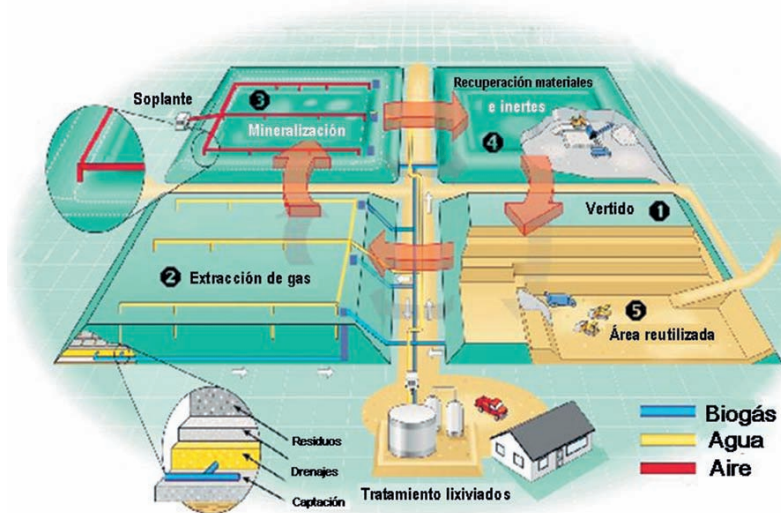


Figura 2.6. Secuencia de explotación de un Biorreactor Activable.
(Fuente: ECODECO).

También se puede depositar todo el producto biosecado (extraídos solamente los metales) en un Biorreactor Activable, ponerlo en operación y, una vez agotada la obtención de biogás, abrirlo para recuperar plásticos y materiales combustibles que formarían un CDR de alto poder calorífico. Los inertes y el mantillo restante se podrían utilizar para otros usos, o bien dejarlo en un vertedero, sin actividad biológica y de mucho menor tamaño.



6. Bibliografía

- ECODECO (2005): Comunicación interna. Italia.
- ECODECO (varios años): «Cuadernos ECODECO de ecología aplicada». Italia.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2003): «Europe's Environment: the third assessment: Waste Generation and Management». Europa / Dinamarca.
- EUROSTAT (2007 y anteriores): «Treatment of MSW in the EU 27». Europa.
- FEDERAMBIENTE (2002): «Bilancio ambientale, energetico ed economico di diverse strategie per il recupero di energia nel contesto di sistemi integrati per la gestione di Rifiuti Solidi Urbani». Noviembre 2002. Italia.
- GARUTI, G., (2005): «Los residuos después de la recogida selectiva». II Conferencia sobre BIOENERGÍA. Madrid, España.
- MARTÍNEZ CENTENO, L. M. (2001): «Valorización energética de lodos de depuradora». ISR. Sevilla, España.
- MARTÍNEZ CENTENO, L. M. (2002): «Incineración de residuos sólidos urbanos». Master en gestión y administración ambiental. Fundación Biodiversidad. Madrid, España.
- MARTÍNEZ CENTENO, L. M. (2004): «Tecnologías para el tratamiento de residuos». Encuentro iberoamericano sobre calidad del aire y residuos. MIMAM. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- MARTÍNEZ CENTENO, L. M. (2005): «El tratamiento biológico-mecánico». ISR. Madrid, España.
- MARTÍNEZ CENTENO, L. M. (2006): «Aprovechamiento energético de los residuos sólidos municipales», Capítulo 7 de la Guía sobre Gestión Energética Municipal. COMUNIDAD DE MADRID y FEDERACIÓN DE MUNICIPIOS DE MADRID. Madrid, España.
- TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H., y VIGIL, S. (1993): «Integrated Solid Waste Management», Chapter 4, McGraw-Hill, New York. Estados Unidos.
- THEMELIS, N. J.; KIM, Y. H., y BRADY, M. K. (2002): «Renewable energy recovery from New York City solid wastes». Waste Management and Research, 20: 223-233. Estados Unidos.

3

LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (R.S.U.)

Aporte energético y ambiental



1. Introducción

Existen dos axiomas en cuestión de residuos que es necesario tener en cuenta si se quiere realizar un tratamiento lógico de los mismos:

1. Sólo los seres vivos (vegetales y animales) producen residuos.
2. Todos los residuos contienen energía.

Sobre el primero de ellos, la propia Naturaleza ha organizado su círculo de tal manera que reutiliza aquello que, en principio, parece un residuo. Sin embargo, este círculo lo ha abierto el Hombre, principalmente mediante las grandes producciones puntuales de residuos y la generación de otros (nuevos materiales, productos multicapa, etc.) cuya eliminación es imposible o muy lenta con los procesos que la Naturaleza ha ido gestando, y es el Hombre el que debe hacer lo necesario para cerrarlo de nuevo.

En la Tabla 3.1. y en las Figs. 3.1, 3.2 y 3.3 se indican las cantidades de residuos en general, y residuos sólidos urbanos en particular, que se generan en la Unión Europea 27 según los datos aparecidos en Eurostat y Euroserver.



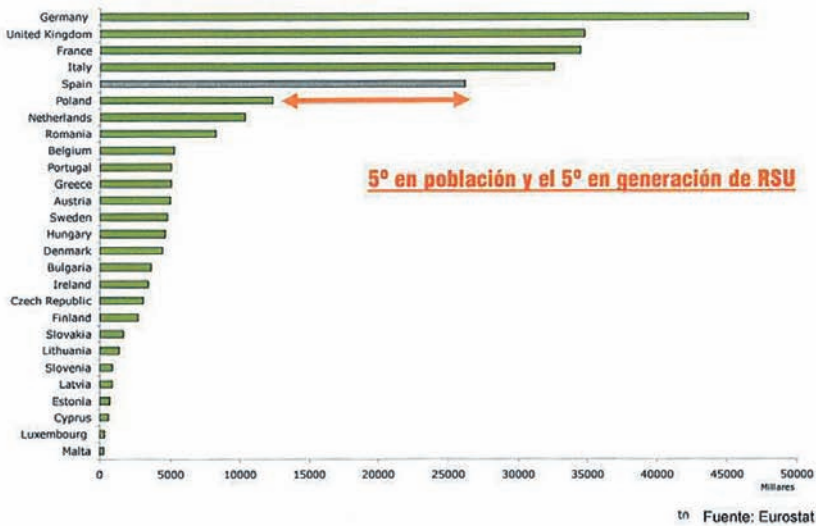
TABLA 3.1. Residuos totales generados (peligrosos y no peligrosos) en 2004.

	(thousand tonnes)		
	Hazardous Waste	Non- Hazardous Waste	Total Waste
EU-27	74 056	2 693 230	2 767 290
EU-15	58 841	1 855 488	1 914 332
Belgium	5 197	47 612	52 809
Bulgaria	528	251 530	252 058
Czech Republic	1 446	27 830	29 276
Denmark	322	12 492	12 814
Germany	20 000	344 022	364 022
Estonia	7 333	13 527	20 861
Ireland	724	23 789	24 513
Greece	278	28 518	28 796
Spain	3 116	157 552	160 668
France	7 553	399 170	406 723
Italy	6 134	133 672	139 806
Cyprus	77	1 450	1 527
Latvia	17	1 240	1 257
Lithuania	87	5 174	5 261
Luxembourg	124	8 188	8 313
Hungary	1 365	23 296	24 661
Malta	2	2 480	2 482
Netherlands	1 876	85 869	87 744
Austria	1 014	52 007	53 021
Poland	1 593	136 214	137 807
Portugal	773	37 515	38 288
Romania	2 238	359 091	361 329
Slovenia	108	5 663	5 771
Slovakia	422	10 246	10 668
Finland	2 508	71 854	74 361
Sweden	1 249	103 659	104 910
United Kingdom	7 973	349 571	357 544
Iceland	8	493	501
Norway	670	6 784	7 454
Croatia	113	7 095	7 209
Turkey	998	57 823	58 820

Data Source: Eurostat



Generación total de RSU en 2.007



Generación de RSU por cápita en 2.007

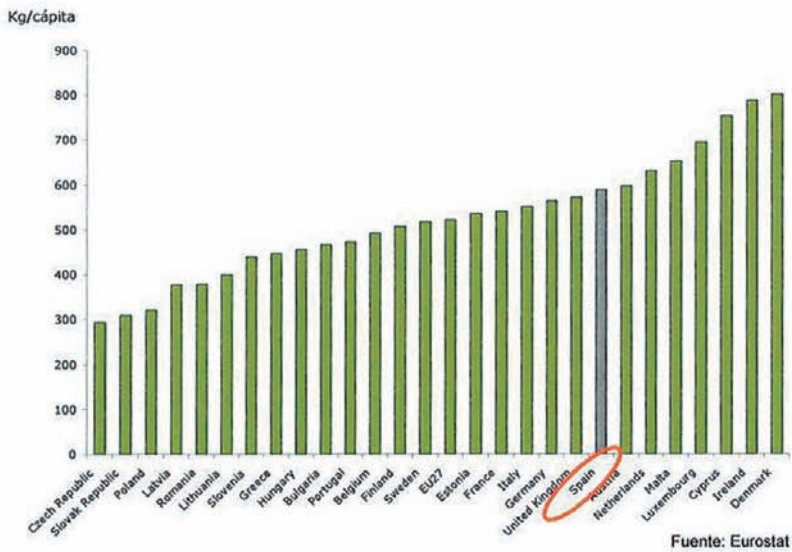
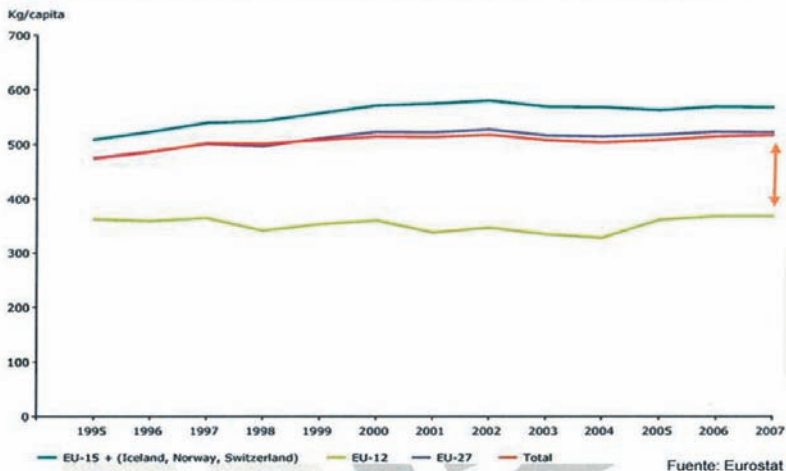


Figura 3.1. Generación de RSU en la Unión Europea en 2007.

Evolución de la generación de RSU (1.995-2.007)



Generación de RSU por cápita (2.000-2.007)

Generation per capita (kg/capita)	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
EU15 + EFTA	571	575	580	589	598	603	603	608
NHS12	360	338	347	335	328	352	358	368
EU27	521	521	528	536	544	547	547	552
Total EU-27 + EFTA + Turkey + Croatia (but without Croatia 1995-1999 and 2006-2007)	514	512	517	507	502	507	514	516
EU-15								
Austria	581	578	609	609	620	620	653	597
Belgium	474	467	480	469	489	482	483	492
Denmark	665	658	665	672	696	737	741	801
Finland	503	466	459	466	470	479	495	507
France	516	528	532	533	523	532	538	541
Germany	643	633	640	601	587	564	563	564
Greece	408	417	423	428	433	438	443	448
Ireland	603	705	688	735	745	740	808	788
Italy	509	516	534	534	538	542	553	550
Luxembourg	628	650	656	684	683	678	684	699
Netherlands	616	615	622	610	625	634	622	630
Portugal	477	477	478	447	436	446	454	472
Spain	662	658	663	655	668	697	699	688
Sweden	436	443	462	471	447	447	466	469
United Kingdom	578	592	600	593	605	585	587	572
EFTA								
Iceland	466	469	478	485	506	521	520	566
Norway	615	635	627	696	724	759	793	824
Switzerland	657	662	678	670	662	663	711	724
New Member States (NHS12)								
Bulgaria	516	491	500	499	471	475	446	468
Cyprus	680	703	709	724	739	739	745	754
Czech Republic	334	221	229	280	238	268	286	284
Estonia	440	372	406	418	449	436	468	538
Hungary	445	451	457	463	454	460	468	456
Latvia	720	352	338	358	311	310	411	377
Lithuania	363	377	401	383	366	376	390	400
Malta	335	342	343	383	425	424	424	432
Poland	316	280	295	283	266	316	316	317
Romania	363	345	383	350	345	377	388	379
Slovak Republic	294	239	283	257	274	289	301	309
Slovenia	513	479	487	418	417	423	431	441
Croatia	350	346	228	228	504	504	438	430
Turkey	458	457	450	445	421	438	415	430

Fuente: Eurostat

Figura 3.2. Generación de RSU en la Unión Europea en 1995-2007.

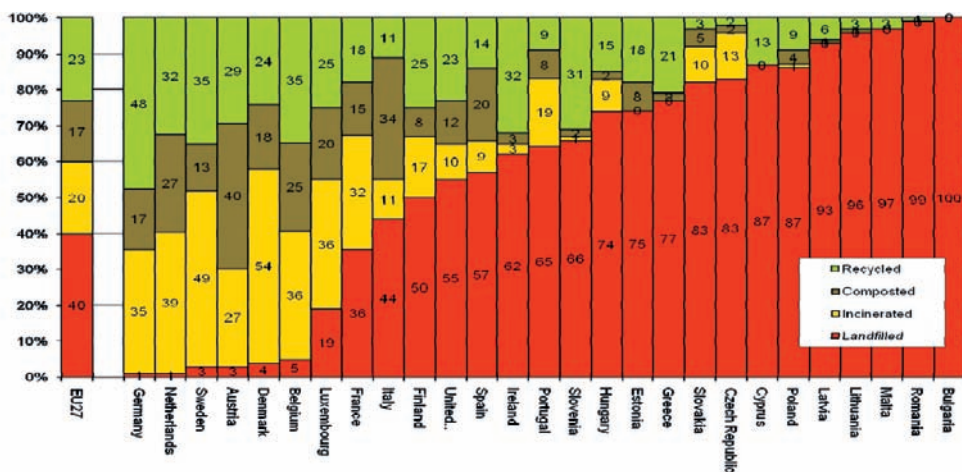


Figura 3.3. Residuos municipales tratados. Eurostat-2008.

Esas cantidades ingentes de residuos son, a la vez, cantidades ingentes de recursos que se desperdician.

La Unión Europea, ya desde 1975, comenzó a trabajar para dar normas que todos los países miembros pudieran y debieran cumplir para lograr, en primer lugar, la reducción en la generación de residuos y, después, lograr la mejor y más eficiente recuperación de materiales y energía, quedando una mínima parte (*el residuo del residuo*) como fracción a enviar a un vertedero controlado.

En la última Directiva 2008/98/CE se indica expresamente la jerarquía de acciones a cumplir y se compromete a fijar unos objetivos de reducción y reciclaje en un próximo futuro.

En cuanto al segundo axioma (todos los residuos contienen energía), sirve de base para justificar los procesos en los cuales se recupera la energía química de los diferentes productos-residuos, transformándola en gas combustible (procesos de biometanización, gasificación, pirólisis, plasma) o en calor (procesos de combustión o incineración). Particularmente, tanto el gas combustible como el calor pueden transformarse en electricidad con diferentes rendimientos.

Sólo la energía de los residuos inertes (vidrio, metales, piedras, etc.) no se puede recuperar fácilmente. Sin embargo, al ser reciclados necesitan menos cantidad de aporte de energía externa que si procedieran de materia virgen. Es una forma de *recuperar energía*.

A continuación se justifican y explican los diferentes procesos térmicos utilizados para el tratamiento de los residuos con sus características específicas, haciendo hincapié en los sistemas de incineración – combustión, ya que son los comúnmente utilizados.

2. Procesos térmicos

Un parámetro que puede diferenciar los distintos procesos de tratamiento es la *temperatura*. Así, existen procesos a *baja temperatura* (en frío) y procesos a *alta temperatura* (en caliente).

Los procesos de baja temperatura son procesos que utilizan sistemas mecánicos y procesos biológicos, y que únicamente seleccionan los residuos o los modifican pero sin llegar a destruirlos o eliminarlos. Es





decir, tratan de recuperar materiales (pretratamiento, compostaje y biometanización).

Los procesos *en caliente* operan a temperaturas más altas (superior a 850 °C, pudiendo llegar a cerca de los 3.000 °C) y se conocen como *tratamientos térmicos*. Estos procesos destruyen el residuo, a excepción de la fracción inerte y, en general, permiten recuperar gran parte de la energía contenida en el residuo.

Los tratamientos térmicos adoptan diversas modalidades operativas: combustión-incineración, gasificación, pirólisis, plasma, disociación molecular, co-combustión y oxicomustión, con características específicas cada uno de ellos, que se analizan a continuación.

2.1. Combustión - Incineración

Es un proceso de oxidación completa (en realidad con exceso de oxígeno) de los elementos combustibles (principalmente carbono e hidrógeno) de los residuos.

Las reacciones estequiométricas (100% de rendimiento) son del tipo:



Este proceso es exotérmico y cede una importante cantidad de energía:



y, a la vez, destruye gran parte del producto sólido convirtiéndolo en gases y vapor de agua con una cantidad limitada de residuo sólido que depende de la cantidad de inertes introducidos en el proceso/horno.

En cuanto a la emisión de gases por chimenea, su cantidad depende del valor nominal estequiométrico, en función de la cantidad de carbono e hidrógeno que tengan los residuos y del exceso de aire que cada tecnología necesite para garantizar la más perfecta combustión posible.

Existe como proceso térmico aplicado a R.S.U. desde hace más de 100 años y en más de 1.100 plantas y, actualmente, se dispone de más de 10 tecnologías bien probadas, con referencias de amplio rango de capacidad de tratamiento (toneladas/hora) y con tecnologías muy seguras en la limpieza de gases.

2.2. Gasificación

Es un proceso de oxidación parcial (en defecto de oxígeno, por debajo del estequiométrico) de la materia combustible de los residuos. El resultado es un gas pobre, llamado *syngás*, y formado por una mezcla de varios gases: anhídrido carbónico (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), vapor de agua, nitrógeno y otros posibles hidrocarburos (alquitranes).

Es una reacción también exotérmica, pero la energía necesaria procede de la gasificación del residuo, aunque a veces se acude a energía externa, con objeto de controlar mejor el proceso.

Las reacciones tipo de gasificación son:



Y la energía desprendida se realiza según las reacciones:



Este proceso también reduce de forma importante la cantidad sólida del residuo y sólo permanecen los inertes que entraron al gasificador. El *syngás* combustible tiene un alto porcentaje de vapor de agua y no muy alto poder calorífico. Puede ser quemado inmediatamente con exceso de oxígeno y, de esta manera, se impide que al enfriarse se formen los alquitranes que producen grandes problemas a los equipos mecánicos y a las tuberías.





También puede depurarse este syngás y utilizarse en otros procesos industriales que puedan estar ubicados lejos del lugar donde se realizó la gasificación.

Existen muchas tecnologías en diferentes fases de desarrollo, pero muy pocas han sido aplicadas a los R.S.U., sobre todo debido a su heterogeneidad, la cual impone una gran inestabilidad al proceso.

El balance térmico es un poco peor que el de la incineración por la mayor complejidad del proceso, estando sometido a la misma normativa ambiental.

2.3. Pirólisis

Consiste en un calentamiento indirecto, la mayoría de las veces, del material, en ausencia de oxígeno. Este calentamiento produce una rotura de las moléculas orgánicas complejas del residuo, seguido de una condensación. Como resultado se obtienen tres productos: gases combustibles, líquido combustible y sólido combustible con los inertes que entran con el residuo y no han sido transformados.

Las reacciones típicas de pirólisis son:



El gas quemado, también llamado *syngás*, es una mezcla de varios gases y con un poder calorífico variable (10.000 a 20.000 kJ/Nm³).

La fracción líquida (líquidos pirolíticos) está formada por varios hidrocarburos, agua y catrami.

La fracción sólida está formada por carbono y por aquellos materiales inertes (piedras, vidrio, metales, etc.) que han entrado con los residuos y que a la reducida temperatura de pirólisis (500/900 °C) no han sufrido alteración en el horno pirolítico.

La energía necesaria suele proceder de una parte del syngás generado.

Este proceso también dispone de bastantes tecnologías pero no se utiliza para R.S.U. debido a que la heterogeneidad del residuo gene-

ra tres productos, también heterogéneos, en su calidad y alguno de ellos, como, por ejemplo, el sólido, está contaminado por los sólidos inertes no transformados.

2.4. Disociación molecular

Este proceso puede considerarse como *gasificación*, pero con unas características especiales.

Es una gasificación con una cantidad de oxígeno *muy* limitada y actuando a baja temperatura: 350/550 °C.

Esta baja temperatura le hace ser un proceso lento, del orden de un día completo, para lograr una buena destrucción de la materia entrante, pero, por otra parte, requiere menos energía para mantener el proceso (sólo al comienzo se requiere un quemador que aporte la primera energía).

Se genera un *syngás* similar al de la gasificación, pero con menos poder calorífico.

No existen referencias comerciales para tratar los R.S.U.

2.5. Plasma

El plasma es conocido también como el cuarto estado de la materia. Es un gas conductor a muy alta temperatura (5.000/20.000 K) eléctricamente neutro, por tener igual número de partículas de carga positiva y negativa, y que se genera de diversas formas o modalidades.

Generalmente se forma al hacer pasar un gas (argón, vapor de agua, etc.) a través de un arco eléctrico (antorcha) creado entre los electrodos (ánodo y cátodo) por una diferencia de potencial eléctrico. Dentro del arco eléctrico se produce la ionización del gas y los choques entre partículas, generando con ello la altísima temperatura.

Dependiendo de la situación de los electrodos, el arco formado se llama:

- Plasma de *arco transferido*.
- Plasma de *arco no transferido*.





En el primer caso, el material a tratar actúa como uno de los electrodos, y en el segundo, ambos electrodos están en el mismo bloque y el arco salta entre ellos produciendo un dardo o antorcha a través del cual pasa el gas plasmógeno.

El dardo de plasma tiene como única misión transmitir energía al residuo que se transforma en un syngás y en un material fundido que posteriormente se *vitrifica* y queda inertizado.

Por tanto, es similar al proceso de gasificación, pero con la diferencia de que en ésta el aporte de energía necesario para el proceso procede de la oxidación parcial del residuo, mientras que en el proceso de plasma la energía necesaria es externa (10/20 kW/tonelada de residuo) y todo el material se gasifica, con lo cual la calidad del syngás cambia, ya que está formado en su mayor parte por componentes elementales en estado atómico y molecular.

Las principales reacciones que tienen lugar se deben a:

- La alta temperatura produce un *cracking* (rotura) térmico y cinético mediante el cual las grandes moléculas orgánicas se subdividen en otras más pequeñas y ligeras, dando lugar a una fracción volátil, mientras que el carbono y el hidrógeno del residuo dan lugar a hidrocarburos gaseosos e hidrógeno.
- El oxígeno que entra con el residuo y el que se aporta al proceso, da lugar a la formación de monóxido de carbono (CO), así como CO₂ y H₂O por oxidación completa exotérmica del carbono.
- También se produce reacción de *reforming*, formándose nuevos productos según las reacciones:



La alta temperatura favorece la aparición de H₂ y CO que son más estables a esa temperatura respecto al CO₂ y al CH₄.

Esta alta temperatura también produce la fusión de los materiales inertes (metales, piedra, vidrio, cerámica, etc.) que, posteriormente, se vitrifican al enfriarse rápidamente, con lo cual se encapsulan los metales pesados. Sin embargo, hay ciertos componentes peligrosos que no desaparecen, como, por ejemplo, el cloro, bromo o mercurio, que deben eliminarse posteriormente del syngás.

Este proceso debe ser analizado cuidadosamente en función del tipo de residuo tratado, pues la relación coste/beneficio es muy variable dependiendo tanto del tipo de residuo como del resultado de la operación y del coste de la limpieza del syngás.

Las referencias de la utilización de plasma para tratar R.S.U. están a nivel de plantas piloto o preindustriales y será necesario esperar algunos años hasta comprobar los resultados comerciales de estas primeras plantas de plasma aplicadas a los R.S.U.

2.6. Oxidcombustión (combustión sin llama)

Es un proceso de combustión que puede aplicarse, en principio, a combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

Consiste en utilizar oxígeno como oxidante y con una gran recirculación del gas de descarga.

El oxígeno genera CO_2 y H_2O que son activos en el campo infrarrojo y producen dentro del horno un campo radiante que, unido a la mezcla turbulenta producida por la gran recirculación de gas de descarga, dan como resultado una homogeneización del combustible dentro del reactor (horno).

No existe una generación clara de llama y, por ello, el proceso se conoce como sin llama.

Opera entre 1.700 a 2.000 K con temperaturas en la pared del horno en torno a los 1.700 K, lo que favorece el intercambio radiativo y produce la fusión de las escorias y cenizas.

La pequeña cantidad de oxígeno viene acompañada también de una pequeña cantidad de nitrógeno y, por consiguiente, pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno. Esto tiene como consecuencia que la concentración de CO_2 es mayor, siendo, por





tanto, un buen proceso que permite el secuestro de carbono vía CO_2 .

Las referencias comerciales no existen para tratar los R.S.U.

3. Tipos de tecnologías e instalaciones de tratamiento térmico

Aunque todos los procesos indicados en el punto anterior son conocidos a nivel teórico y de laboratorio, no sucede lo mismo en cuanto a desarrollos comerciales, como se ha indicado brevemente. Hay procesos bien desarrollados con gran **flexibilidad, fiabilidad, disponibilidad, robustez y eficiencia energética**, como, por ejemplo, la incineración, que responden adecuadamente para tratar un material tan especial como los R.S.U. (heterogeneidad, variabilidad térmica, producción continua y en crecimiento, etc.) y otros que sólo disponen de plantas piloto o de demostración y que deben demostrar que cumplen las tres condiciones esenciales:

- **Disponibilidad** en cuanto que son capaces de tratar un material que se genera continuamente y que si no se trata a diario, debe ir a vertedero.
- **Disponer de referencias** reales que demuestren esa disponibilidad al tratar el R.S.U. de cada lugar.
- **Que el coste total** (inversión y operación) sea adecuado al precio del mercado local donde se trata de instalar y sustituir o complementar a otros procesos (vertedero, plantas de pretratamiento, tratamientos mecánico – biológicos, etc.).

A continuación se desarrolla brevemente la tecnología de combustión – incineración, ya que es la más utilizada en el tratamiento térmico de los R.S.U.

3.1. Tecnologías de combustión o incineración

Existen tres tipos principales de tecnologías aplicadas a los R.S.U.:

- a. Hornos de parrilla.
- b. Hornos de lecho fluidizado.
- c. Hornos rotativos.



3.1.1. Hornos de parrilla

Es la tecnología más y mejor consolidada, con gran número de instalaciones que, después de más de cien años y con sus continuas mejoras, demuestra una gran fiabilidad y flexibilidad en su funcionamiento, con capacidades normales de tratamiento que van de 3 a 50 t/hora/línea y la posibilidad de tratar residuos con poder calorífico inferior entre 1.400 y 4.500 kcal/kg sin añadir combustible auxiliar.

El sistema (Fig. 3.4 y Foto 3.1) consiste en una tolva de carga donde se reciben los residuos urbanos en masa o procedentes, como rechazo, de las plantas de pretratamiento. Se almacenan en un foso con capacidad para, al menos, tres días de alimentación de los hornos, con el fin de garantizar su funcionamiento continuo en condiciones nominales o, como mínimo, en condiciones con garantía.

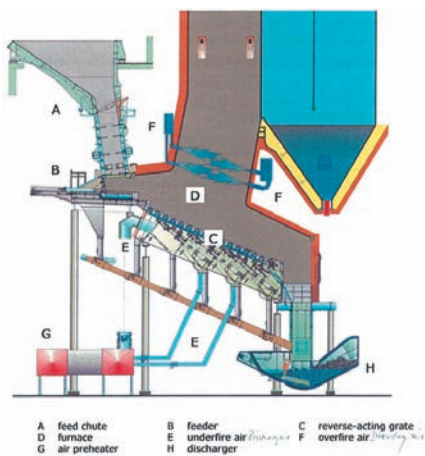
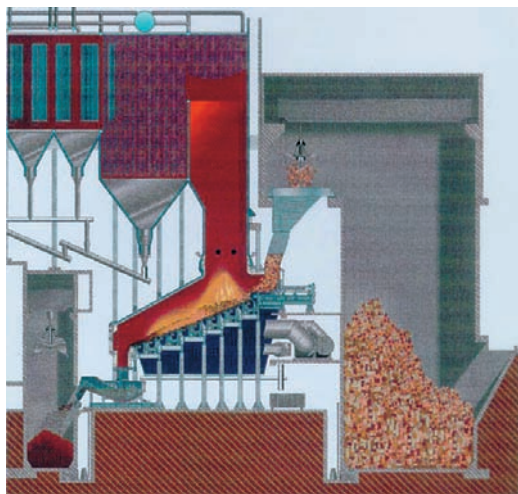


Fig. 1 MARTIN waste combustion system

Figura 3.4. Incinerador de parrilla.

Esta tolva desemboca en la parrilla del horno a través de un conducto aislado térmicamente y dotado de una clapeta de cierre con objeto de poder independizar la tolva de la parrilla. Al final del conducto de alimentación están situados los alimentadores del horno, que son unas placas movidas hidráulicamente, con movimientos alternativos adelante/atrás y que empujan e introducen el residuo en el horno.

Se conoce como **parrilla** al suelo del horno que está formado por una serie de líneas de tejas que se mueven alternativamente por sistema hidráulico, tipo biela/manivela, y hacen avanzar al residuo dentro del horno. Este avance está facilitado por la inclinación de la parrilla-



Guía de valorización energética de residuos

lla (15/30°) desde la entrada a la salida. Con ello se consigue que el residuo se desmenuce dentro del horno y permita que se ponga en contacto con el aire combustible (aire primario) que entra a través de las pequeñas ranuras que existen entre las tejas del suelo.



Foto 3.1. Parrilla.

Antes de comenzar a introducir residuo en el horno es necesario precalentarlo mediante quemadores auxiliares que utilizan cualquier combustible fósil (gas natural, gas-oil, fuel-oil, etc.) hasta una temperatura superior a los 850 °C.

Cuando se ha alcanzado esta temperatura, se introduce el residuo y comienza el proceso de combustión que, realmente, es una sucesión de distintas fases: en primer lugar, se produce un secado del residuo al entrar en un ambiente muy caliente emitiendo vapor de agua. A continuación, se produce un proceso de pirólisis – gasificación, ya que la altura de la masa de residuo que entra es del orden de 1 m de altura por varios metros de anchura, dependiendo de la capacidad (t/h) diseñados. Por la parte inferior entra aire primario, pero en pequeña cantidad, por lo cual hay defecto de oxígeno y, por tanto, tiene lugar una gasificación, emitiendo syngás combustible que se quema en la parte superior del horno al recibir más oxígeno por la entrada del aire secundario y generando calor.

Al avanzar el residuo en la parrilla empujado por el nuevo material que entra y por el movimiento alternativo de las zonas de la parrilla y por la pendiente de la misma, va disminuyendo la altura de la capa de residuo a la vez que recibe mayor cantidad de aire primario y, por tanto, de oxígeno, produciéndose la combustión y la llama, ya que se logra la conjunción de los tres elementos de una buena combustión: combustible, comburente y temperatura.

Todos los diseños de parrilla tratan de lograr que estas tres condiciones se produzcan cuanto antes y durante el mayor tiempo posible mientras los residuos están en el horno y, para ello, se diseñan con el objeto de mezclar y desmenuzar la masa de residuos para garantizar que todo el elemento combustible tenga la oportunidad de ponerse en contacto con el oxígeno suficiente a la temperatura de combustión adecuada y lograr que todo el carbono pase a CO_2 y ceda toda su energía, en lugar de generar CO que sólo es parcialmente exotérmico. La medida de este CO es la que confirma si existe una buena o mala combustión y, por ello, es el parámetro que se mide de forma continua, en lugar de medir el CO_2 .

Al final de la parrilla queda el material inerte incombustible que sale a alta temperatura por el fondo de la parrilla como escoria y cae a un baño de agua donde se enfría y, a la vez, absorbe agua. Desde allí se envía al fondo de escorias para ser post-tratado para eliminarle los elementos metálicos reciclables.

Las escorias, que representan el porcentaje de inertes del residuo entrante, son normalmente materiales reutilizables en obra civil o cementeras, aunque suelen tener todavía un porcentaje entre el 1 y el 2% del peso de las escorias como material combustible inquemado al haber fallado alguna de las condiciones indicadas de una buena combustión: comburente o temperatura.

El tiempo de permanencia del residuo dentro del horno de parrilla oscila entre 45 y 90 minutos.

La regulación y control de la combustión se logra controlando varios parámetros: cantidad de aire, cantidad de residuos alimentados y velocidad de avance del residuo en la parrilla según la zona donde se encuentre y según el poder calorífico del residuo que entra, que siempre es variable.





El producto del Poder Calorífico por la cantidad de residuo alimentado es la carga térmica que debe procesar la parrilla. Esta cifra oscila entre 400.000 a 800.000 kcal/m²/h equivalente, a 200/340 kg/m²/h, dependiendo sobre todo del poder calorífico inferior (P.C.I.) del residuo entrante.

Las modernas tecnologías de parrilla enfrían las tejas del suelo mediante agua fría que las recorre interiormente y, de esta manera, pueden procesar R.S.U. de mayor P.C.I. (hasta 4.500 kcal/kg), aspecto que anteriormente era imposible cuando sólo se refrigeraban con el aire primario entrante.

Las paredes del horno se forran de refractario por dentro de la chapa metálica que forma la pared y, por fuera, se aíslan (lana de roca o similar), junto a una chapa de protección para garantizar que la temperatura exterior no sobrepase un valor que no se pueda aguantar al tacto ($\approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.1.2. Horno de lecho fluidizado

Su nombre procede del hecho de utilizar como elemento de calentamiento del residuo combustible un material inerte (suele ser arena de sílice) que, siendo un producto *sólido*, se comporta como un *fluido* al ser *activado* por aire dentro de un recipiente cerrado. Evidentemente, la arena no es un fluido, pero en esas circunstancias, se comporta como tal y, por eso, se llama al sistema de lecho fluidizado y no lecho fluido.

En este caso, el fondo del horno es un *plenum* fijo, sin necesidad de tejas móviles, formado por una chapa metálica recubierta de refractario y perforada por múltiples toberas por las que se inyecta el aire primario.

Existen dos tipos de lecho fluidizado en función de la velocidad y presión a que se inyecta este aire primario y de cómo se mueve la arena en el interior del horno, pero siempre a presión atmosférica:

1. Así, en el **lecho fluidizado burbujeante** (ver Fig. 3.5) la arena se mueve como si estuviera hirviendo, de un lado para otro, pues el aire que se inyecta no tiene suficiente fuerza y sólo trata de pasar a través del lecho de arena (de una altura de 1 m, aproximadamente), produciendo el movimiento de los millones de partículas que previamente se calientan por medio de quemadores que utilizan

combustible fósil (gas natural, gas-oil, etc.) y cuya llama se dirige hacia la arena hasta calentarla alrededor de 600 °C.

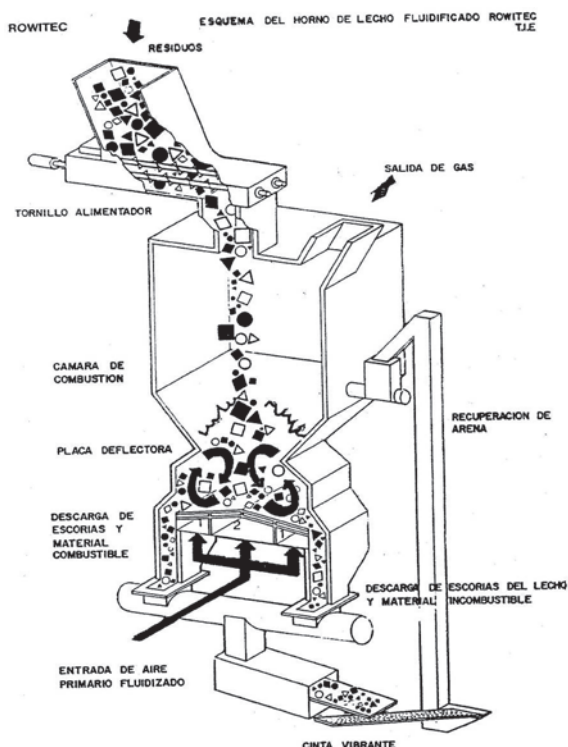


Figura 3.5. Esquema del horno de lecho fluidizado. (Fuente: Rowitec).

El tamaño de la arena tiene una granulometría inferior a 1 mm lo cual exige una velocidad de fluidificación del orden de 3 m/s.

Una vez que se ha alcanzado una temperatura superior a 850 °C en la cámara superior de postcombustión mediante la utilización de quemadores auxiliares, y que la arena ha alcanzado su temperatura, se introduce el residuo, el cual es engullido por la arena. Los millones de partículas presentan varios efectos:

- En primer lugar, desmenuzan y separan las posibles aglutinaciones que pueden tener los residuos al entrar, debido al fuerte movimiento de burbujeo de la arena.
- En segundo lugar, transmiten por conducción el calor de la arena a cada pieza del residuo combustible, alcanzando éste su temperatura de combustión.





- En tercer lugar, el aire primario que produce el burbujeo de la arena suministra a la vez el oxígeno necesario para la combustión y la llama parece brotar desde dentro de la misma.

En la parte superior del horno se introduce el aire secundario con objeto de que exista oxígeno en exceso para garantizar una perfecta combustión, con lo cual los *inquemados* en las escorias son casi nulos ($< 0,2\%$) y, además, se asegura un tiempo de permanencia superior a 5 segundos de los gases por encima de $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los elementos inertes salen del horno secos y limpios por el fondo, junto con arena que se separa mediante una criba y se vuelve al horno.

Otras diferencias con los hornos de parrilla se pueden identificar como:

- El intervalo de proceso respecto al poder calorífico es mayor ($1.600/4.200\text{ kcal/kg}$).
- La carga mecánica ($\text{kg/m}^2/\text{h}$) de residuos sobre el fondo es mucho mayor.
- No hay movimiento de piezas dentro del horno a alta temperatura.
- Se reduce el exceso de aire y por tanto de humos a tratar.
- Se pueden neutralizar los gases áridos (HCl , HF , SO_x) dentro del propio horno, lo cual permite elevar la temperatura de las condiciones de vapor y mejorar la eficiencia eléctrica.
- Riesgo de rotura de la fluidificación si el residuo se introduce con muchos materiales inertes.
- Exige no sobrepasar un tamaño máximo de elementos al quemar, lo cual puede obligar a una trituración del residuo con el consiguiente coste de inversión y mantenimiento que, además, asegura una mejor homogeneidad del residuo.
- Tampoco es conveniente alimentar con residuo demasiado seco o demasiado fino, ya que éste puede quemarse en la cámara de postcombustión y alterar el control de la combustión.

- Exige un rápido control de la combustión dado el pequeño tiempo de combustión (algunos minutos) y existe el riesgo de generar picos de CO, aunque suelen ser de poca duración.
- Existen menos instalaciones de referencia respecto a las parrillas, aunque ya las hay funcionando con amplia capacidad de tratamiento y buena disponibilidad.
- Es discutible la ventaja teórica de menos inversión.

2. En el **lecho fluidizado circulante** (Fig. 3.6) la velocidad de fluidificación aumenta hasta 8 - 10 m/s, lo cual produce una distribución de la arena como si estuviera flotando en toda la cámara de postcombustión.

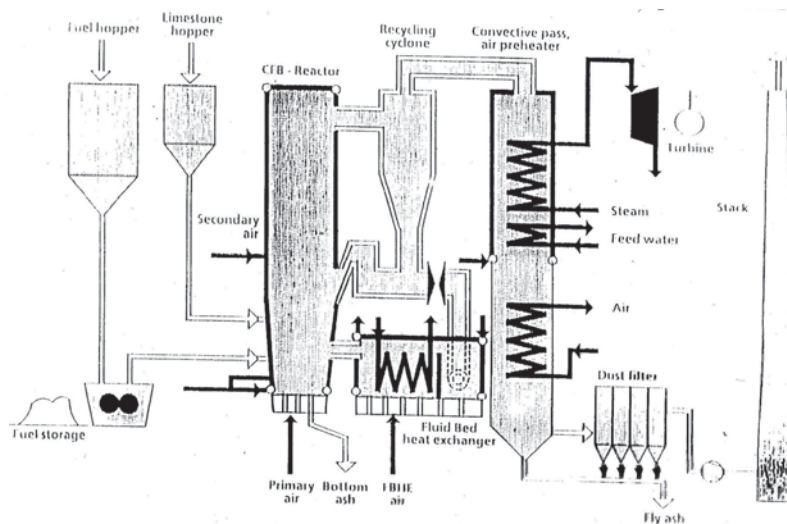


Figura 3.6. Sistema de incineración con intercambiador de calor de lecho fluido.

El contacto con el residuo (comburente) y su consiguiente elevación de temperatura se realiza también en toda la cámara, para lo cual el residuo debe también *volar* por la inyección del aire primario. Esto obliga a que la dimensión del residuo a introducir en el horno sea más reducida aún que la exigida en el *lecho fluidizado burbujeante*, siendo menor de 9 cm, lo cual exige una trituración más fina (más coste de consumo eléctrico y de mantenimiento).





Guía de valorización energética de residuos

Los gases de escape de la cámara de postcombustión pasan a un ciclón donde se separan los elementos inertes (arena y cenizas) que vuelven a introducirse en el horno (por eso se llama *circulante*), mientras que los gases pasan a la caldera donde ceden su calor al agua, recuperándose gran parte de su energía térmica.

Este sistema es muy adecuado para combustibles de muy alto poder calorífico a la vez que ha demostrado su capacidad para operar con grandes potencias térmicas, reduciendo así el número de líneas necesarias con la consiguiente reducción de inversión.

Otra posible ventaja es desviar la arena caliente que se separa en el ciclón e introducirla en un depósito auxiliar donde se engulle el último *sobrecalentador* de la caldera, consiguiéndose una última elevación de temperatura del agua hasta 450 °C o más y sin los riesgos de corrosión de la tubería que contiene el vapor, ya que, evidentemente, en ese depósito no hay contacto con los gases corrosivos, que son los que impiden trabajar a altas temperaturas de vapor cuando se queman residuos urbanos, según se muestra en el gráfico de la Fig. 3.7.

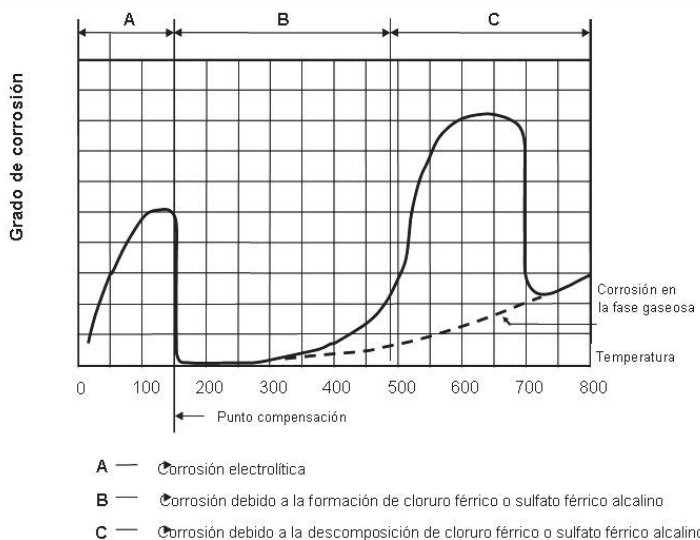


Figura 3.7. Grado de corrosión en función de la temperatura de la pared metálica del tubo.

Por lo demás, sus características son similares a las del lecho fluidizado burbujeante.

Existen referencias suficientes y hay varios tecnólogos que disponen de diseños reales con este proceso.

Como ya se ha indicado, el Lecho Fluidizado Circulante es adecuado para combustibles de alto poder calorífico y bajo contenido en inertes y, por tanto, es adecuado para tratar el combustible sólido de residuos (C.S.R.) resultante del pretratamiento de los R.S.U. en masa y que tiene un mayor poder calorífico al haber eliminado la fracción orgánica, los inertes y la humedad.

3.1.3. Horno rotativo

Es de concepción sencilla, pues consta de un tambor metálico que da vueltas encima de unas ruedas giratorias que le transmiten por adherencia el movimiento, aunque a veces también se hace mediante un mecanismo de *rueda-piñón*.

La velocidad de rotación no es muy alta 0,3 - 1,5 r/min, lo cual produce el desmenuzamiento del residuo al caer dentro del horno por el movimiento de rotación. El residuo entra por una boca y sale quemado por la otra (escoria) ayudado por la pequeña inclinación del tubo (1 - 3%).

La combustión se produce por contacto del residuo con la pared del tubo, la cual está protegida con material refractario. Esta forma de actuación dificulta la buena interacción combustible/comburente que se mejora cuando el residuo se queda adherido a la pared del tubo y se eleva al girar, cayendo por gravedad cuando el peso supera a la adherencia y a la fuerza centrífuga de rotación y entonces, produciéndose un desmenuzamiento y mejor contacto con el oxígeno comburente.

El aire se introduce tanto en *equicorriente* como en *contracorriente*, con el avance del residuo en el tubo, aunque para R.S.U. suelen ser más habituales las soluciones en *equicorriente*, es decir, que el aire y el residuo se introducen por la misma boca y salen por la contraria en forma de gases y escoria.

En esta tecnología, la segunda combustión o cámara de postcombustión está separada del tambor rotativo y allí se introduce el aire secundario que la completa.

Para reducir las pérdidas por radiación, el diámetro del tambor suele estar entre 1,5 y 4,5 m con longitudes de 10 a 15 metros.





Sus parámetros principales son:

- La intensidad volumétrica de combustión ($\text{kcal/m}^3/\text{h}$).
- La intensidad de combustión por área ($\text{kcal/m}^2/\text{h}$).

El primero condiciona las dimensiones del tambor, sección y longitud, para garantizar el tiempo de permanencia para una completa combustión, así como la inclinación y la velocidad de rotación que asegure el avance del residuo.

El segundo indica la carga térmica para cada sección del tambor.

Los valores normales del primer parámetro están entre 50.000 y 200.000 $\text{kcal/m}^3/\text{h}$ y los del segundo entre 500.000 y 1.000.000 $\text{kcal/m}^2/\text{h}$.

La indicada dificultad de contacto combustible/comburente hace necesaria la utilización de mayor exceso de aire por encima del estequiométrico que las soluciones de parrilla o lecho fluidizado.

Sin embargo, el tambor rotativo ha demostrado poseer una gran flexibilidad para tratar residuos de características heterogéneas tanto en su poder calorífico como en su estado físico (sólido, líquido o gaseoso) y, por ello, ha encontrado un buen campo de acción para tratar residuos industriales peligrosos, más que para residuos urbanos.

La necesidad de una segunda cámara de postcombustión también complica la instalación y su aplicación a los R.S.U. se ha visto reducida.

3.2. Gasificación y pirólisis

Ya se indicó anteriormente el concepto en que se fundamenta cada uno de estos procesos que, a veces, se producen de forma sucesiva, en una misma tecnología y cuya separación no es sencilla (Fig. 3.8).

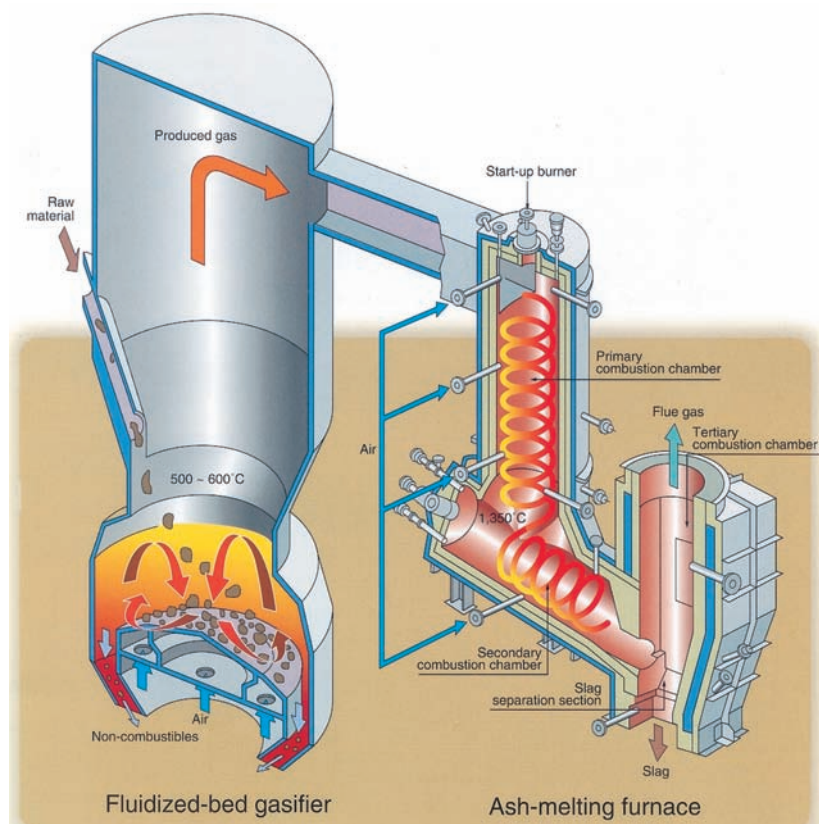


Figura 3.8. Gasificación. Configuración de Ebara.

La aplicación a los R.S.U. ha sido analizada muchas veces ya que, en principio, presenta las siguientes ventajas:

1. Utiliza poco oxígeno (gasificación) o nada (pirólisis).
2. Genera un syngás combustible (aunque pobre) que, una vez limpio, puede ser utilizado en diferente lugar de donde se ha generado, a diferencia de la incineración, ya que el calor que ésta produce no puede ser transportado a grandes distancias.
3. No necesita altas temperaturas de proceso, aunque, si se aplica a R.S.U., se deben alcanzar en los gases los 850 °C durante al menos 2 segundos después de la última entrada de aire.

Sin embargo, la realización de instalaciones a tamaño industrial aplicadas a R.S.U. han fracasado la mayor parte de ellas y, por tanto, no



se disponen de referencias en número similar a las de parrilla o lecho fluidizado.

Solamente los procesos en los que el syngás caliente es quemado de forma rápida, con exceso de oxígeno, son los que disponen de referencias aplicables a los R.S.U. que están demostrando buena disponibilidad y eficiencia (aunque tienen mayor consumo interno). Para estabilizar los procesos muchos de ellos utilizan un combustible auxiliar (5 - 10%), como coque o gas natural.

A estos procesos se les acusa de que son una incineración en dos etapas, aunque, realmente, los residuos se gasifican y posterior e inmediatamente se quema el syngás, con exceso de oxígeno.

Los más conocidos son: Thermoselect, Siemens, Energós, Ebara y Noel.

Utilizan diferentes diseños de hornos (parrilla, lecho fluidizado y tambor rotativo) para producir la gasificación/pirólisis y utilizan a veces oxígeno o aires enriquecidos para estabilizar el proceso, aunque incrementando los costes.

El proceso Thermoselect es el único que limpia el syngás para que luego pueda ser utilizado en turbinas de gas, motores o gas sintético en la industria, pero el coste de limpieza es muy alto.

En Japón es donde existen mayor número de referencias de algunos de los muchos procesos investigados de gasificación/pirólisis para R.S.U.

3.3. Disociación molecular

Como ya se ha comentado, es un proceso de gasificación muy pobre en oxígeno a baja temperatura, lento y discontinuo y, por tanto, de poca capacidad de tratamiento y cuyas características le alejan de ser solución para los R.S.U., los cuales se generan de forma continua.

3.4. Plasma

Esta tecnología está actualmente en fase de experimentación industrial aplicada a los R.S.U. (ver Fig. 3.9) y se está encontrando con

mayores dificultades que las inicialmente esperadas. Por tanto, se desconocen características fundamentales como disponibilidad, capacidad de tratamiento, sistemas de limpieza de gases, costes de inversión y operación, tipo de pretratamiento requerido para los residuos entrantes, etc., que permitan analizar su integración y comparación con el resto de las tecnologías de tratamiento térmico aplicables a los R.S.U.

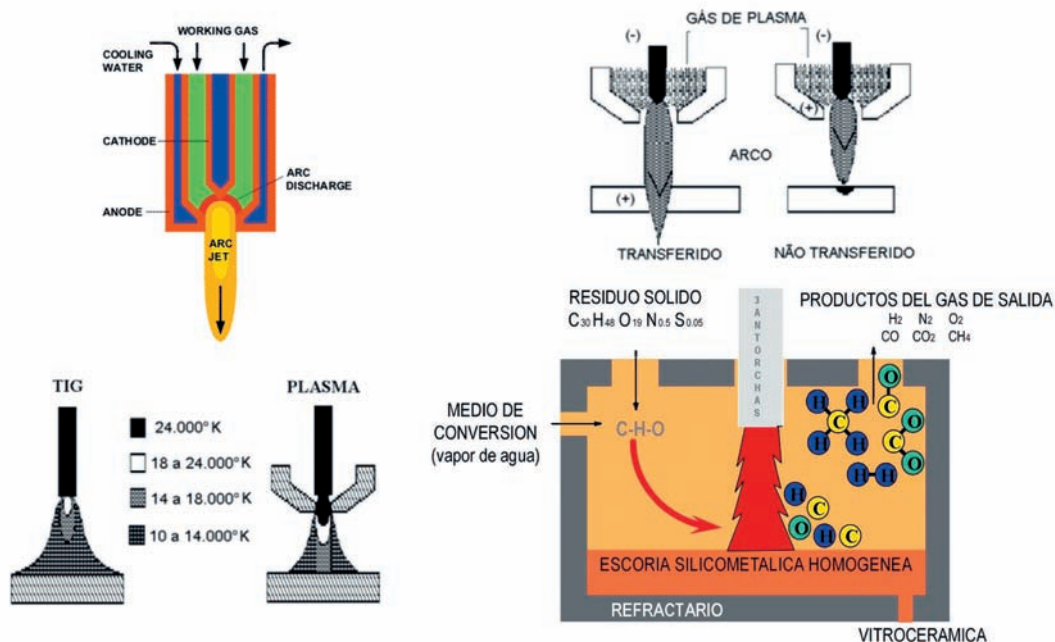


Figura 3.9. Plasma.

Hasta ahora se ha aplicado a cierto tipo de residuos peligrosos y bastante homogéneos, como cenizas volantes, armas químicas, hospitalarios, etc., que permiten unos costes mayores que los normales aplicados a R.S.U.

3.5. Oxidación (combustión sin llama)

Es un proceso cuya teoría es bien conocida pero cuyas realizaciones prácticas son pequeñas y reducidas al campo de instalaciones de demostración no industriales, y menos con R.S.U.

Por tanto, es uno más de los procesos teóricamente posibles, pero que está lejos de poder ser aplicado a los R.S.U. debido a las par-



ticulares y especiales exigencias que este tipo de material requiere.

3.6. Conclusiones respecto a las tecnologías de tratamiento térmico

Como se ha explicado, existe una amplia variedad de procesos y tecnologías dentro de cada proceso que pueden ser aplicables como tratamientos térmicos de los residuos y, dentro de ellos, de los R.S.U.

Sin embargo, sólo los conocidos como convencionales (parrilla, lecho fluidizado y tambor rotativo) tienen, en este momento, referencias más que suficientes (ver Fig. 3.10) para confiar que pueden aplicarse al tratamiento térmico de los R.S.U. También se ha indicado que el tambor rotativo es más adecuado para tratar residuos peligrosos (sólidos, líquidos y gaseosos).

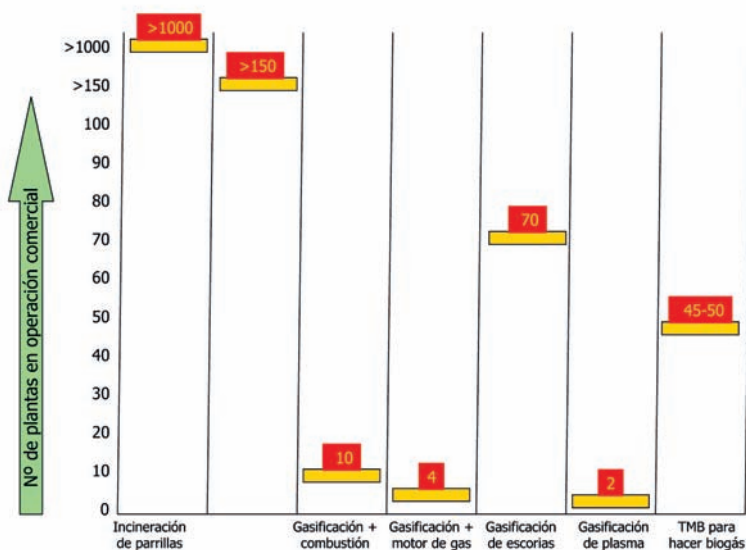


Figura 3.10. Plantas en operación comercial. (Fuente: Juniper, 2007).

De las otras tecnologías no convencionales, es la gasificación la que está comenzando a aplicarse a los R.S.U. pero requiere unas especiales condiciones tanto para el residuo entrante como para el tratamiento posterior del syngás, que reducen su aplicabilidad, siendo necesario analizar en cada caso el coste – beneficio comparado con las soluciones convencionales.

4. Aspectos ambientales y para la salud humana de los tratamientos térmicos de los R.S.U.

El tratamiento térmico de un producto tan heterogéneo como los R.S.U. trae aparejada la aparición de múltiples productos que se generan como consecuencia de la descomposición térmica y de las posibles reacciones posteriores que se puedan realizar entre ellos.

Estos productos, algunos de ellos peligrosos, pueden contaminar tanto el aire como el agua y el suelo.

Por ello, la U.E. ya emitió guías y consideraciones (ver Fig. 3.11) respecto al cuidado con estos procesos térmicos, pero fue con la Directiva 369/89/CEE cuando fijó expresa y concretamente los valores de emisiones a la atmósfera y al agua procedentes de los procesos de incineración, gasificación, pirólisis y plasma aplicados a los R.S.U.

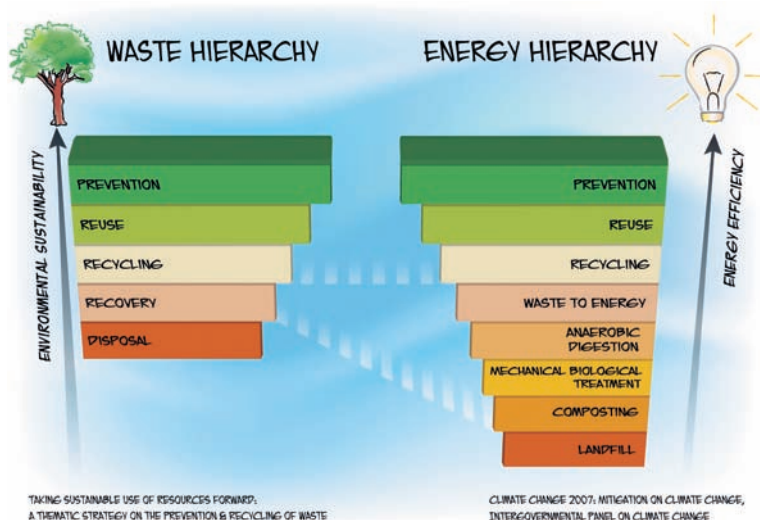


Figura 3.11. Consideraciones ambientales respecto a procesos térmicos relacionados con el tratamiento de R.S.U.

Posteriormente, con la Directiva 2000/76/CE (ver Tabla 3.2), traspuesta al Derecho Español por el Real Decreto 653/2003 de 30 de mayo, de nuevo se establecen nuevos y mucho más reducidos valores admisibles de emisión de contaminantes, tanto a la atmósfera como al



agua, procedentes de las actividades de incineración y co-incineración de residuos, con el fin de impedir o limitar los riesgos para la salud humana y los efectos negativos sobre el medio ambiente derivados de estas actividades.

TABLA 3.2. Comparación de emisiones procedentes de incineración de R.S.U. y otras fuentes. Límites de emisiones en valores diarios.

	NO _x t/año	SO _x t/año	CO t/año	PARTÍCULAS t/año	HCl t/año	COV t/año	DIOXINAS Y FURANOS
1. Según directiva europea 2000/76/CE	200 g/Nm ³ 2.316 t/año	50 mg/Nm ³ 579 t/año	50 mg/Nm ³ 579 t/año	10 mg/Nm ³ 115,8 t/año	10 mg/Nm ³ 115,8 t/año	10 mg/Nm ³ 115,8 t/año	0,1 ng/Nm ³ ITQ 1,158 g/año ITQ
2. Emisiones reales incineradoras	130 mg/Nm ³ 1.505 t/año	5 mg/Nm ³ 57,9 t/año	15 mg/Nm ³ 173,7 t/año	4 mg/Nm ³ 46,3 t/año	5 mg/Nm ³ 57,9 t/año	1,9 mg/Nm ³ 22 t/año	0,05 ng/Nm ³ ITQ 0,579 g/año ITQ
3. Según valores reales en España año 2006 MAYMRM	1.537.215 t/año	1.173.972 t/año	3.053.298 t/año	248.805 t/año	No hay datos	2.195.807 t/año	158 g/año ITQ

Con los valores límite exigidos, resulta que estos procesos térmicos son los más estricta y rigurosamente controlados dentro de la variedad de procesos térmicos que hay en la industria (cementeras, plantas térmicas, altos hornos de hierro, aluminio, cobre, etc.).

La razón de esta exigencia diferencial parece ser que se encuentra en que sirva para eliminar o reducir el rechazo social que las incineradoras de R.S.U. levantan entre la población, poco informada, ya que se ha demostrado que las modernas plantas incineradoras de R.S.U., dotadas con las mejores técnicas de combustión y limpieza de gases, cumplen con creces y holgura los estrictos límites exigidos y su contribución a las concentraciones locales de contaminantes es muy pequeña. Según estudios realizados por entidades privadas independientes y Organismos Públicos, por ejemplo el Informe de la Agencia de Protección de la Salud 2009 de Gran Bretaña emitido en febrero de 2010, concluye que «las modernas y bien gestionadas Plantas Incineradoras de R.S.U. contribuyen de forma muy pequeña a la concentración local de contaminantes en aire y, aunque es posible que tales pequeños incrementos puedan tener un impacto sobre la salud, éstos son muy pequeños y no detectables, incluso para las personas que han vivido mucho tiempo en las cercanías de una Planta Incineradora». Dicho informe también indica que, debido a los estudios ya realizados sobre el tema, «no se recomienda realizar nuevos estudios sobre la salud pública alrededor de las modernas y bien gestionadas Plantas Incineradoras de R.S.U.».

Ya se indicó que la característica de la combustión era la oxidación completa de los elementos combustibles de los residuos (principalmente carbono e hidrógeno), utilizando para ello aire en exceso (por encima del estequiométrico). Pues bien, el oxígeno y, por tanto, el aire estequiométrico, se inyecta al horno con el aire primario, aproximadamente por debajo de la parrilla, y el exceso de aire que garantiza una buena combustión, se introduce por encima de la parrilla, denominándose *aire secundario*. Este aire debe producir una fuerte turbulencia de toda la masa de gases generados durante la combustión, de tal manera que no existan zonas frías en las que caiga la temperatura y no se produzca una buena combustión que dé lugar a CO y otros compuestos, como, por ejemplo, dioxinas y furanos.

Para lograr una buena combustión se debe diseñar el horno y su cámara superior de postcombustión para que el tiempo de permanencia de los gases de combustión, después de la última entrada de aire secundario, sea superior a 2 segundos con una temperatura mínima de 850 °C.

En los buenos diseños este tiempo se asegura entre 4 - 6 segundos y, para ello, se diseña el volumen de esta cámara insuficientemente grande entre 60.000 y 200.000 kcal/m³/h dependiendo de la velocidad que se le impriman a los gases hacia la caldera (12 - 16 m/s).

Dentro de la cámara de postcombustión se generan temperaturas que oscilan alrededor de los 1.000 °C, sobre todo si se queman residuos de alto poder calorífico. Esto obliga a mejorar el aislamiento de las paredes del horno y, en ciertos casos, a refrigerarlos artificialmente con objeto de evitar pegajosidades e incrustaciones producidas principalmente por compuestos de sodio y potasio que vienen con los R.S.U.

Sin embargo, hay que cuidar con esmero esta acción para evitar que se produzcan puntos fríos y alterar la calidad de la combustión.

El control del oxígeno en exceso también es importante, pues, dado que el oxígeno utilizado proviene del aire, y éste está formado por 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno aproximadamente, al introducir oxígeno en exceso introducimos tres veces más de nitrógeno, con lo cual se corre el riesgo de enfriar la combustión y aumentar la cantidad de CO. Por lo tanto, la cantidad de oxígeno en los gases de escape suele estar entre el 6 y el 9%, aunque el valor estándar de control es el 11%.





El control de la combustión es absolutamente importante y, de hecho, la normativa aplicable (Directiva 2000/76/CE) exige un **control continuo** de los siguientes parámetros:

CONTAMINANTES	PARÁMETROS DE PROCESO
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	Temperatura cerca de la pared de la cámara
Monóxido de carbono (CO)	Concentración de oxígeno
Partículas totales	Presión
Acido Clorhídrico (HCl)	Temperatura*
Oxido de azufre (SO_2)	Vapor de agua*
Carbono orgánico total (COT)	

* en los gases de escape

De forma discontinua, cuatro veces al año se miden los metales pesados y las dioxinas y furanos contenidos en los gases de escape a la atmósfera.

Algunas de estas mediciones puede ser modificada por la autoridad ambiental competente en función de alguna razón especial justificada.

Actualmente están apareciendo sistemas automáticos de control de la combustión a base de cámaras de infrarrojos que detectan la distribución espacial de la temperatura sobre la parrilla y, mediante *software inteligentes*, se adaptan rápidamente los parámetros de combustión para estabilizar la carga térmica y reducir las oscilaciones en la generación de vapor incrementando la eficiencia eléctrica de la planta.

Otras mejoras posibles se logran añadiendo aire enriquecido con oxígeno que, a la vez que reduce la cantidad de gases, mejora el aprovechamiento entálpico y, por tanto, reduce las dimensiones de la instalación (inversión), aunque exige realizar recirculación de gases para evitar elevaciones de temperatura en el horno no deseadas. Esta solución puede ser operativa cuando se tratan residuos de poco poder calorífico. En los casos normales, que son la mayoría, no es recomendable ni necesario utilizar aire enriquecido y basta el aire natural más o menos caliente.

Los gases de combustión, una vez generados, pasan a la caldera de recuperación donde ceden su calor al agua que cambia del estado

líquido de entrada a vapor recalentado a la salida, con destino a la turbina, donde se expande convirtiendo su energía térmica en energía mecánica que mueve el alternador y genera la energía eléctrica bruta.

Los gases de escape deben limpiarse de polvo y otros contaminantes (ver Fig. 3.12) para cumplir los estrictos límites de emisión a la atmósfera que especifica la Directiva 2000/76/CE en su Anexo V, traspuesta al derecho español por el Real Decreto 653/2003 de 30 de mayo sobre incineración de residuos.

PROBLEMAS	– Polvo	SOLUCIONES	– Precipitadores electrostáticos – Filtros de mangas
	– Gases Ácidos CIH - FH - SQ		– Dos etapas de lavado húmedo – Absorbedor semihúmedo – Absorbedor seco
	– Óxidos de nitrógeno		– Sistemas de NO _x – Eliminación Selectiva Catalítica (SCR)
	– Dioxinas y furanos		– Absorción por Carbón Activo – Eliminación Catalítica – Absorción en filtro de mangas
	– Residuos sólidos escorias y cenizas volantes		– Lavado de escorias – Tratamiento térmico - Vitricación – Neutralización química – Solidificación - encapsulado
	– Residuos líquidos		– Precipitación multietapa - Fluoculación – Precipitación - Intercambio iónico – Filtros de Carbón Activo – Evaporación y cristalización – Producción de sales

Figura 3.12. Incineración de R.S.U.

Los sistemas de limpieza de los gases, antes de ser emitidos a la atmósfera, se han especializado en función del tipo de contaminante a reducir.

Así, el **polvo** o partículas sólidas se eliminan mediante procesos conocidos como *filtros electrostáticos* y *filtros de mangas* que presentan una gran eficacia y continuidad.

Los **gases ácidos**, como clorhídrico, fluorhídrico y óxidos de azufre, se neutralizan mediante bases alcalinas, como óxido/hidróxido de cal o bicarbonato sódico.





Los **óxidos de nitrógeno** se eliminan haciéndolos reaccionar con urea o amoníaco, utilizando sistemas *catalíticos* o *no catalíticos*.

Los **metales pesados** y las **dioxinas y furanos** se eliminan añadiendo a la corriente de gases *carbón activo* que adsorbe dichos productos dentro de los múltiples *poros* que tiene el carbón activo y, posteriormente, las partículas de carbón se separan en los *filtros de mangas*. Además, los sistemas catalíticos también destruyen las dioxinas y furanos, con lo cual estos productos están sometidos a un doble proceso de limpieza: por una parte son adsorbidos por el carbón activo y, por otra, son *destruidos* al pasar los gases a través del catalizador, como última fase de limpieza antes de ser emitidos a la atmósfera a través de la chimenea a gran velocidad (12 - 20 m/s) con lo cual se produce una gran dispersión, reduciéndose la inmisión de forma muy importante.

Quedan los productos sólidos, *escoria* del fondo del horno y *cenizas volantes* producidas durante la combustión, unidos a los productos estables procedentes de la neutralización de los gases ácidos y el carbón activo que ha recogido los metales pesados y las dioxinas.

Las *escorias* son inertes y con granulometría variable dependiendo de los materiales que entren al horno: piedras, vidrios, ladrillos, porcelanas, etc., que no sufren modificación alguna durante la combustión. Por ello, suelen ser utilizados como elementos drenantes en obras públicas (subbase de carretera) o utilizados como materia prima en cementeras, ya que están formados, en gran medida, por óxidos de sílice, calcio, magnesio, etc., que forman la base del clinker del cemento.

Quedan finalmente las *cenizas volantes* que están consideradas como productos peligrosos por la normativa actual (aunque a veces no lo sean realmente) y que se procesan como tales, normalmente enviándolas a *vertederos de productos peligrosos en big-bags* o mezclados con cemento formando un mortero que, después de fraguar, solidifica.

Las dioxinas y furanos no se disuelven en agua y, por tanto, no pasan a la corriente de agua si la lluvia cae sobre un mortero solidificado.

La cantidad de *cenizas volantes* está entre un 2,5 y un 4,5% del peso total del residuo incinerado. Ya existen procesos de *vitrificación* a muy

alta temperatura que tratan estas cenizas mediante fusión y cristalización inertizando totalmente el producto y eliminando su peligrosidad.

En cuanto a los residuos líquidos que pudieran contaminar el agua, depende de si se utilizan o no sistemas húmedos de limpieza de gases.

En España, al no ser excedentarios de agua, solamente se utilizan sistemas secos o semisecos para la limpieza de gases y por ello estas plantas incineradoras no generan residuos líquidos.

En conclusión, la combustión del residuo y la posterior limpieza de los residuos que pueda generar, garantizan una gran reducción del peso (75 a 80%) y del volumen (90/95%) de los residuos tratados y, por lo tanto, actúan en el sentido de reducir la necesidad de vertedero que es el gran problema de muchas de las grandes ciudades.

Por otra parte, la combustión de la fracción orgánica convierte todo su carbono en dióxido de carbono (CO_2), evitando la formación de metano, 25 veces más activo respecto al efecto invernadero y contribuyendo eficazmente en la lucha contra el cambio climático.

El porcentaje de *fracción biodegradable* en los R.S.U. oscila entre un 55% y un 65% del peso total y el CO_2 que se genera en su combustión se considera neutro respecto al efecto invernadero.

Solamente la fracción combustible que procede de materiales de origen fósil (plásticos en general) genera un CO_2 contabilizable como gas de efecto invernadero, pero su cantidad es pequeña (8 - 11%) del peso de los R.S.U. y, por tanto, en el cómputo total de la combustión de los R.S.U. reduce la emisión real de CO_2 equivalente (con efecto invernadero) respecto a otras soluciones de tratamiento de R.S.U. (vertederos, tratamientos mecánicos biológicos, etc.). Esta reducción es más evidente si se tiene en cuenta la generación de energía eléctrica que sustituye a los mismos kWh que deberían haberse generado por el *mix energético nacional*, formado en gran parte por combustibles fósiles, así como por el ahorro energético que se produce al reciclar materiales que se obtienen después de la combustión, como, por ejemplo, los materiales férricos.

En la Fig. 3.13. se indica la cantidad de CO_2 que se emite por tonelada de residuo según el tipo de proceso. Como se puede observar, la





complementariedad de procesos que tratan diferentes fracciones de R.S.U. es la que reduce en mayor cantidad el CO₂ emitido.

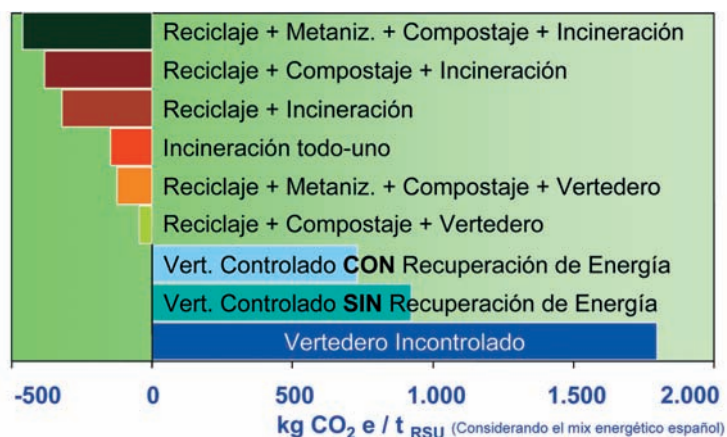


Figura 3.13. Emisiones de CO₂ según el tipo de tratamiento.

5. Aspectos energéticos de los tratamientos térmicos de los R.S.U.

Las otras razones por las que se han impuesto los procesos térmicos para el tratamiento de los residuos son:

- La importante eliminación tanto en peso como en volumen de los residuos que, por tanto, reduce en gran medida la necesidad de vertedero, a la vez que reduce los efectos medioambientales del mismo: olores, volados, insectos, emisiones de gases de efecto invernadero, posible contaminación de aguas y suelos y, sobre todo, ocupación de terrenos y desaparición de recursos, realizándose todo ello de forma continua y segura tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente.
- La amplia y eficiente recuperación de su energía química transformada en energía térmica y utilizada como tal o transformada en energía eléctrica.
- La separación de materiales, generalmente metales, que vienen con los R.S.U. y que pueden ser reciclados con el ahorro de recursos correspondiente.

Como, además, se cumple el segundo axioma de que todos los residuos contienen energía, la recuperación es muy interesante.

Generalmente, la recuperación de energía se realiza en forma de calor y éste puede utilizarse de forma directa, convertido en energía eléctrica o de forma mixta calor - electricidad (cogeneración).



Foto 3.2. Plantas incineradoras.

La recuperación de calor se realiza normalmente a través de vapor y éste se transforma en energía eléctrica en los turbogeneradores formados por turbina y alternador.

La cantidad de energía recuperada (rendimiento energético) depende de varios parámetros, entre los que figuran:

- Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) de los residuos incinerados.
- Tipo de tecnología y proceso utilizado.
- Dimensionamiento de la caldera y selección de las condiciones de vapor.
- Condiciones climáticas donde se instala la planta.



Guía de valorización energética de residuos

- Posibilidad de utilizar agua o aire de condensación.
- Temperatura de salida de los gases por la chimenea.
- Posibilidad o no de utilizar el calor residual como agua caliente sanitaria y calefacción en viviendas próximas.

Los valores usuales del rendimiento eléctrico son:

- Tecnología de combustión en parrilla o lecho fluidizado: 20/30%.
- Tecnología de cogeneración en parrilla o lecho fluidizado: 45/55%.
- Tecnología de recuperación (solamente calor): 70/75%.

La gran diferencia de rendimiento entre utilizar calor o convertirlo en electricidad se debe al *calor latente de condensación* que se pierde a la salida de la turbina, ya que el agua debe cambiar de estado (vapor a líquido) para ser introducida de nuevo a la caldera.

Si comparamos el rendimiento eléctrico entre una planta incineradora de R.S.U. y una planta térmica de carbón, también se observa que el rendimiento energético de esta última es del orden del 35 - 37% y, sin embargo, el diseño de la caldera es similar.

La diferencia viene provocada por las características del combustible utilizado. En la incineradora de R.S.U., el combustible aporta algunos elementos, como cloro, bromo o azufre, que, al quemarse, se convierten en ácidos corrosivos, como el ácido clorhídrico o el ácido sulfúrico, que atacan fuertemente al hierro de los tubos de la caldera cuando la temperatura del vapor se acerca a los valores que utilizan las centrales térmicas de carbón, inutilizando rápidamente un equipo tan costoso como la caldera e impidiendo seguir incinerando.

Por lo tanto, es la característica material del residuo la que condiciona el rendimiento eléctrico y no la tecnología utilizada.

Así, un R.S.U. cuyo Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) sea del orden de 2.600 kcal/kg puede generar entre 600 y 900 kWh eléctricos por tonelada incinerada, que es una cantidad apreciable.



En concreto en España, en 2009 se incineraron 2.100.000 toneladas de RSU y se vendieron 1.600 x 10⁶ kWh eléctricos, lo cual implica que cada tonelada incinerada generó 762 kWh de venta, a las que hay que sumar el autoconsumo de la propia planta, resultando una generación bruta del orden de 860 kWh/t.

En España en 2009 la cantidad incinerada fue del orden del 8% de los RSU generados que ascendió a 26,5 millones de toneladas.

La media incinerada de los 27 países de la Unión Europea fue del orden del 21%. (ver Tablas 3.3 y 3.4). Si España se acercara a este porcentaje, se podrían generar 4.800 GWhe y solamente se incinerarían 6 Mt/año de R.S.U. Esta cantidad es equivalente a la media europea, quedando la mitad de los R.S.U. generados en España sin ningún tipo de tratamiento debido, en parte, a la difícil orografía y a la gran cantidad de municipios.

TABLA 3.3. Instalaciones de valorización energética en Europa (estimación CEWEP).

WtE Capacity projection for the whole of Europe, (ktonnes) estimate November 2009 (Treatment of MSW and comparable waste including RDF incineration.)							
Country	Actual 2008	additional 2007-2008	Cum 2008	additional 2009-11	cum 2011	additional 2012-16	cum 2016
AT	1460	250	1710	800	2510	550	3060
BE	2500	18	2518	880	3398	100	3498
DK	3298	80	3378		3378	300	3678
NL	5500	900	6400	640	7040		7040
FR	12300		12300		12300		12300
DE	17800	2900	20700	1400	22100		22100
SE	4100	500	4600	400	5000	600	5600
Subtotal I	46958	4648	51606	4120	55726	1550	57276
LU	126		126		126		126
IE	0		0	200	200	940	1140
IT	5300	650	5950	1800	7750	2200	9950
PT	1067		1067		1067	890	1957
ES	2126		2126	964	3090	1960	4550
GB	4400	500	4900	995	5895	3525	9420
FI	50	150	200	100	300	710	1010
CZ	394		394		394	400	794
Subtotal II	13463	1300	14763	3559	18322	10625	28947
GR	0		0	400	400	1500	1900
HU	394		394		394	100	494
PL	38		38		38	2000	2038
SI	6		6		6		6
SK	194		194		194		194
BG	0		0		0	200	200
EE	0		0		0		0
CY	0		0		0	300	300
LV	5		5		5		5
LT	0		0		0	330	330
MT	0		0		0		0
RO	0		0		0	300	300
Subtotal III	637	0	637	400	1037	4730	5767
Total EU 27	61058	5948	67006	8079	75085	16995	91990
CH	3588		3588		3588		3588
NO	947	280	1227	624	1851	150	2001
HR			0		0	400	400
Grand Total	65593	6228	71821	8793	80524	17455	97979

Development of the number of WtE plants in Europe					
Country	No of plants end 2008	additional plants 2009-11	2012-16	end 2016	Total plants
AT	9	2	4		15
BE	16	3	0		19
DK	29	0	1		30
NL	11	2	0		13
FR	130	0	0		130
DE	73	8	0		81
SE	32	2	3		37
Subtotal I	300	17	8		325
LU	1	0	0		1
IE	0	1	3		4
IT	53	3	11		67
PT	3	0	3		6
ES	10	1	7		18
GB	19	2	17		38
FI	2	1	3		6
CZ	4	0	3		7
Subtotal II	92	8	47		146
GR	0	1	4		5
HU	1	0	1		2
PL	1	0	12		13
SI	0	0	0		0
SK	1	0	0		1
BG	0	0	1		1
EE	0	0	0		0
CY	0	0	1		1
LV	0	0	0		0
LT	0	0	3		3
MT	0	0	0		0
RO	0	0	1		1
Subtotal III	3	1	23		27
Total EU 27	395	26	78		499
CH	28	0	0		28
NO	20	3	3		26
HR	0	0	1		1
Grand Total	443	29	82		554



TABLA 3.4. Resumen del desarrollo real y esperado de la capacidad de las plantas incineradoras de R.S.U. con recuperación de energía.

	FINAL 2006	FINAL 2008	FINAL 2011	FINAL 2016
Capacidad total de tratamientos térmicos (Mt/año)	65,6	71,8	80,5	98,0
Número de plantas	420	443	472	554
Capacidad anual de incremento (%)		4,7% 2006-2008	4,0% 2008-2011	4,3% 2011-2016

La cantidad de 6 Mt tratadas térmicamente, permitiría a España cumplir los objetivos fijados en la Directiva de Vertederos, Real Decreto Español 1481/2001 de reducción de fracción biodegradable a enviar a vertedero que, en 2016, debe ser del 35% de los 11.934.000 t/año de fracción biodegradable que envió España a vertedero en el año 1995, es decir, 4.177.000 t/año. Por lo tanto, hay que reducir 7.757.000 t de fracción biodegradable.

El porcentaje medio de fracción biodegradable en los R.S.U. que se envían a incineración es del orden del 65% y, por tanto, al incinerar unos 4 millones más de R.S.U. se reducirían 3,9 Mt (0,65 x 6) de fracción biodegradable, es decir, el 50% de lo que es obligatorio reducir. El resto se reduciría mediante las instalaciones de compostaje y biometanización (digestión anaeróbica) junto con la reducción de la generación de residuos prevista.

Las características principales de la recuperación energética de los R.S.U. son:

- Es renovable en un alto porcentaje ($\approx 65\%$ del peso).
- Es gestionable con una disponibilidad superior al 85%.
- Su generación es constante y distribuida, muy cercana a los puntos de consumo, ahorrándose pérdidas de transporte.
- Facilita el cumplimiento de las Directivas Europeas referidas a residuos, energía y disminución de los G.E.I.
- Las instalaciones son robustas y de larga vida ($>$ de 25 años).
- Ambientalmente es muy fiable y comprobable, con emisiones de aire y agua muy por debajo de los estrictos límites establecidos.



- Sustituye a combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica.

En la Fig. 3.14 se muestra un esquema general de una planta incineradora de R.S.U. con tecnología de parrilla, tratamiento de gases y generación de Energía Eléctrica.

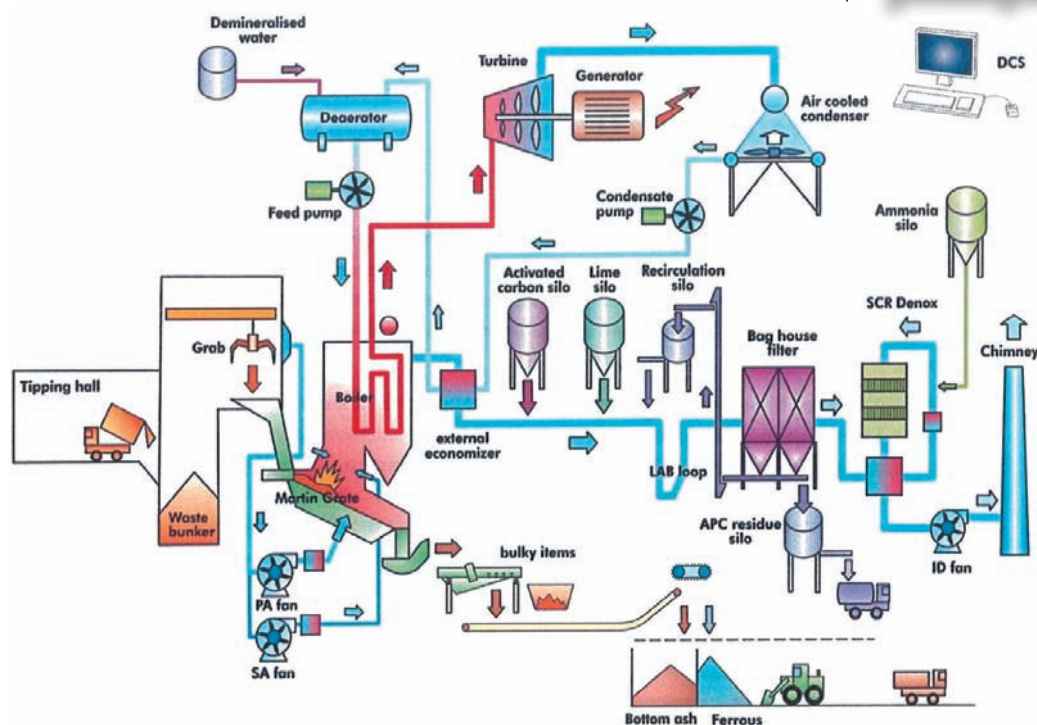


Figura 3.14. Esquema general de una planta incineradora.

6. Conclusiones

La composición heterogénea de los R.S.U. hace imposible aplicarle un proceso determinado que logre un máximo aprovechamiento de forma unitaria.

Se ha demostrado que la mejor manera es la aplicación específica de procesos a fracciones concretas, de tal manera que, en conjunto, se logre la mejor reutilización de **materiales**, la mejor recuperación de **energía**, la mayor **reducción** en peso y volumen a enviar a vertedero y la **minimización** de los impactos negativos de los R.S.U. tanto sobre el medio ambiente como sobre la salud de las personas.

Las soluciones térmicas cumplen las tres últimas condiciones en grado muy apreciable y participan en la primera como procesos recuperadores de materiales.



Las sucesivas reglamentaciones aplicadas a los tratamientos térmicos de los R.S.U. han obligado a desarrollos tecnológicos muy exigentes tanto en el cuidado del medio ambiente y la salud de las personas, como en la mejora de la eficiencia energética conseguida, que se han demostrado de forma real a través de las experiencias industriales existentes.

Existen diversos desarrollos tecnológicos, pero solamente algunos han demostrado su fiabilidad y flexibilidad para tratar un producto tan heterogéneo y continuo como los R.S.U.

Estos procesos disponen de múltiples referencias, tanto en el tratamiento de poderes caloríficos diversos, como en cantidades (tonelada/hora) y con análisis coste/beneficio no muy diferente a otros tipos de procesos (plantas MTB o de biometanización).

Las emisiones a la atmósfera son mínimas y de control continuo, por lo cual la información al público de estas características favorables debería ir reduciendo el inicial rechazo social y permitir decisiones políticas que permitan la instalación de este tipo de plantas en aquellos lugares en los que la gran cantidad de R.S.U. que generan hagan peligrar el cumplimiento de las normativas, a la vez que reduzcan rápidamente el volumen a vertido disponible en cada lugar.

Un vertedero de cola es siempre imprescindible en cada ciudad o pueblo para resolver situaciones de avería o emergencia y su vida útil se prolonga sensiblemente si se instalan plantas térmicas que reduzcan el peso y el volumen, a la vez que se recuperan materiales, energía y se reducen los impactos ambientales.

4

TRATAMIENTO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS URBANOS: LA EXPERIENCIA DEL CENTRO DE TRATAMIENTO INTEGRAL «LAS LOMAS» EN VALDEMINGÓMEZ



1. Introducción

Uno de los problemas más graves a que deben enfrentarse los países desarrollados es el del tratamiento de los residuos que generan.

Se trata de un problema que, por su naturaleza y envergadura, no puede resolverse sólo con la actuación de las Administraciones Públicas, sino que requiere la máxima colaboración ciudadana.

En este sentido, se va desarrollando progresivamente una cierta conciencia social, aunque, hasta fechas todavía recientes, el ciudadano se limitaba a depositar su basura en la bolsa correspondiente sin preocuparse en absoluto por cuál sería su destino posterior.

Las tendencias actuales en el tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU) proponen, en primer término, la reducción y separación en origen de los residuos. En segundo lugar, se trata de recuperar todos los materiales valorizables que existen en los residuos generados para, finalmente, eliminar de forma respetuosa con el medio ambiente el resto no aprovechable.

En este contexto, el Ayuntamiento de Madrid desarrolla una ambiciosa política de tratamiento integral de los RSU en la que se incluye el Centro de Tratamiento Integral de Residuos Sólidos Urbanos «Las Lomas», construido y explotado por la empresa Tirmadrid.

La andadura del Centro de Tratamiento «Las Lomas» comenzó cuando, en 1989, el Ayuntamiento de Madrid, dentro de su política general de tratamiento de residuos, convocó un concurso público para la adjudicación de la construcción y explotación del Centro.



Guía de valorización energética de residuos

Por unanimidad de todos los Grupos Políticos Municipales (PP, CDS, PSOE e IU), el concurso fue adjudicado a Dragados y Construcciones, constituyéndose posteriormente la Sociedad Anónima Tirmadrid, quien ofertó un procedimiento de gestión integrado por dos fases:

- De recuperación de materiales para su reciclaje y de elaboración de compost a partir de la materia orgánica contenida en los Residuos Sólidos Urbanos.
- De valorización energética de los materiales combustibles no recuperables, mediante su incineración, para producir energía eléctrica.



Foto 4.1. Vista general del Centro «Las Lomas».

Transcurridos los periodos de prueba previstos, el Centro, que trata directamente más de un tercio del total de los RSU generados en Madrid, inició su funcionamiento normal en mayo de 1997. Desde entonces, ha mantenido en todo momento un excelente nivel de funcionamiento, tanto en lo que se refiere a sus actividades de recuperación, compostaje y valorización energética, como a la calidad medioambiental de su actividad.

En 1998 se realizaron importantes obras de remodelación y mejora medioambiental en la instalación de compostaje del Centro. Estas

reformas supusieron una inversión superior a los 12 millones de euros, de los que un 80% provinieron de los Fondos de Cohesión de la Unión Europea, siendo el 20% restante sufragado por el Ayuntamiento de Madrid.

Igualmente, en 1999, entró en funcionamiento el vertedero de seguridad construido en terrenos anexos al propio Centro y cuya finalidad es albergar las cenizas generadas por la incineración. De este modo, se garantiza, de forma autónoma, su adecuado tratamiento.

Por último, en el año 2005 se acometieron las inversiones necesarias para adaptar la instalación al cumplimiento de los nuevos límites de emisión fijados por el R.D. 653/03, llevándose a cabo la instalación y puesta en marcha de los Sistemas de Reducción Catalítica de Óxidos de Nitrógeno.



2. Descripción del Centro de Tratamiento Integral de RSU «Las Lomas»

2.1. Primera fase: reutilizar y reciclar. Planta de reciclaje y compostaje

El proceso, que se presenta en la Fig. 4.1, se inicia con la llegada de los camiones que transportan las 1.200 toneladas de RSU que se tratan diariamente en el Centro.

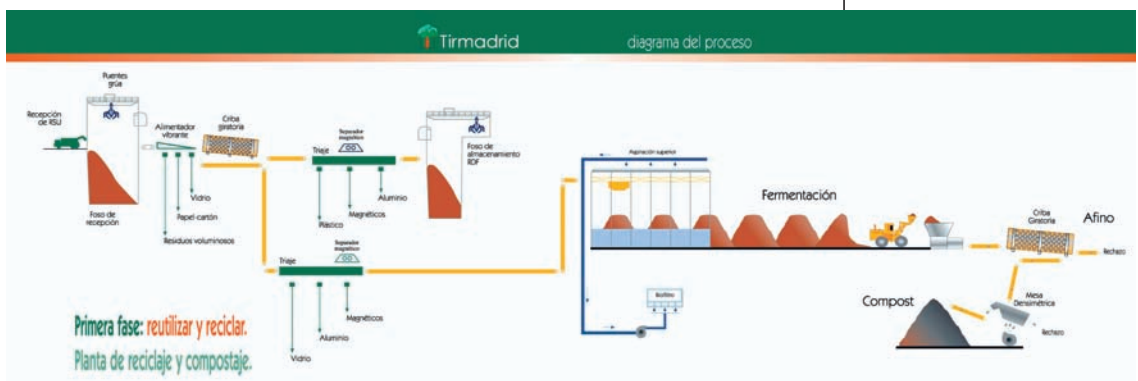


Figura 4.1. Esquema de la Planta de Reciclaje y Compostaje.

Estos vehículos son pesados antes de verter su contenido en un foso sometido a depresión para evitar el escape de polvo y olores, y prepa-



rado para almacenar residuos durante un periodo de dos días. Unos puentes grúa van depositando los residuos en cuatro líneas de tratamiento, sobre unos alimentadores que transportan el residuo a baja velocidad, permitiendo a los operarios retirar los objetos voluminosos, los envases de cartón y el vidrio.

Posteriormente, se realiza un cribado, separándose los residuos en dos categorías en función de su tamaño, mayor y menor de diez centímetros.

Los residuos de tamaño inferior a diez centímetros se vierten en unas cintas y, tras retirar los metales férricos por medio de un separador electromagnético y los metales no magnéticos y el vidrio por medio de una selección manual, se transporta el resto (en su mayor parte materia orgánica) hasta unos parques de fermentación aerobia controlada, donde la materia orgánica es volteada periódicamente para su oxigenación y correcta fermentación.

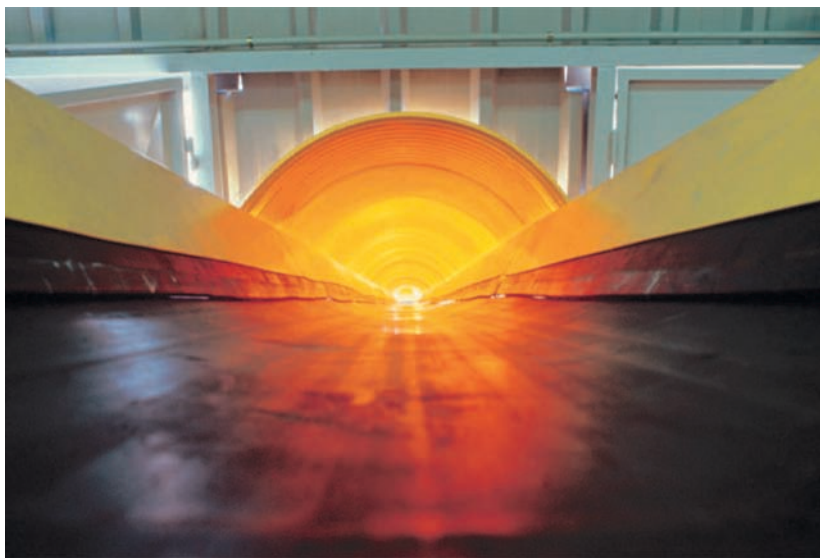


Foto 4.2. Cinta de triaje.

Los parques de fermentación están cubiertos en la zona correspondiente a las tres primeras semanas del proceso. El aire de este área es extraído por medio de unos potentes ventiladores que lo conducen hasta unos biofiltros que eliminan los malos olores. De igual forma, las balsas en las que se recoge el lixiviado procedente de la fermentación de la materia orgánica se encuentran cubiertas, siendo el aire de su interior tratado en los correspondientes biofiltros.

Al cabo de ocho a diez semanas la materia orgánica se ha convertido en compost. Entonces, en dos instalaciones de afino, se apartan, mediante cribado y separación densimétrica, los restos de vidrio y otros elementos inertes, obteniéndose, por un lado, un rechazo que se llevará a vertedero y, por otro, el compost perfectamente depurado y ya utilizable como abono, que es almacenado hasta su distribución.

De la fracción de elementos de tamaño superior a 10 centímetros se separan manualmente los productos que son susceptibles de recuperación (plástico, envases de aluminio, etc.). Además, mediante separadores electromagnéticos se obtienen todos los materiales férricos. Posteriormente, todos los productos recuperados son adecuadamente prensados, embalados y transportados, para su reutilización, hasta los diversos recicladores. Tras este proceso de selección queda un rechazo combustible no reciclable, que no contiene ya ningún material aprovechable y que se denomina RDF (*Refuse Derived Fuel*). Este remanente servirá como combustible en la Planta de Recuperación Energética.



2.2. Segunda fase: recuperar. Planta de Recuperación Energética

La Planta de Recuperación Energética, cuyo esquema se presenta en la Fig. 4.2, dispone de tres líneas de combustión constituidas, en su primera etapa, por un horno de lecho fluidizado de arena.

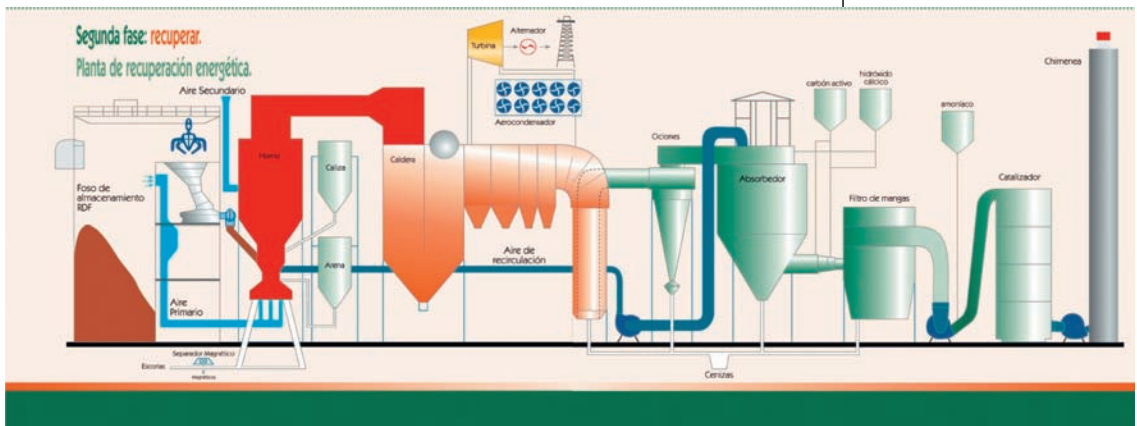


Figura 4.2. Esquema de la Planta de Recuperación Energética.



La alimentación a los hornos se realiza mediante dos puentes-grúa que introducen en cada horno el rechazo combustible no reciclable procedente, en su mayor parte, de la Planta de Reciclaje de este Centro y, en menor cantidad, de las Plantas de Reciclaje de los otros Centros de Tratamiento ubicados también en Valdemingómez.

Mediante la inyección de aire primario en el horno, se consigue el movimiento de la arena y, al envolver ésta totalmente al combustible, se produce una combustión de alta eficiencia.

Del fondo del lecho se extraen las escorias mezcladas con arena, la cual se criba y es retomada al horno.

Una de las ventajas de este tipo de horno es que se agrega caliza al lecho fluidizado, con lo que se logra una primera neutralización de los gases ácidos. Otra ventaja importante es que, al ser la combustión altamente eficiente, el porcentaje de inquemados en las escorias se sitúa por debajo del 0,1%.

En la cámara de postcombustión del horno se produce la inyección de aire secundario. A partir de la última inyección de aire, el gas se mantiene a una temperatura media de 900 °C con lo que se cumple la legislación, que requiere que los gases estén en esa zona a una temperatura superior a 850 °C con el objeto de asegurar la destrucción de dioxinas y furanos.

Los gases, tras pasar por la caldera, sufren un completo proceso de filtrado. En primer lugar, atraviesan unos ciclones en los que se depositan las cenizas más gruesas.

A continuación, los gases entran en un absorbedor en el que, mediante una ducha de lechada de cal, se completa su neutralización.

Tras ello, los gases se someten a dos inyecciones de carbón activo para la eliminación de dioxinas y furanos, antes de pasar a un filtro de mangas en el que se depositan las partículas más finas.



Foto 4.3. Sistemas de reducción catalítica.

Posteriormente, los gases se introducen en un sistema de reducción catalítica para la eliminación de los óxidos de nitrógeno, siendo finalmente enviados a la chimenea mediante un ventilador de tiro inducido una vez concluida su depuración.

En cada línea, los gases del horno pasan a la caldera de recuperación de calor, donde se producen 41 t/h de vapor a 47 bar y 425 °C.



Foto 4.4. Turbogruppo.

Este vapor se conduce a un grupo turbogenerador común a las tres líneas, que tiene una potencia instalada de 29 MW. Tras deducir los consumos internos, la producción exportada se sitúa en unos 22 MW, suficiente para abastecer de energía a una ciudad de unos 50.000 habitantes, incluyendo consumos domésticos, industriales y municipales.

3. El control medioambiental del Centro

Durante el diseño del Centro se dedicó especial atención a la eliminación de los potenciales impactos ambientales producidos por su actividad.

La instalación se concibió para cumplir las exigencias medioambientales de la Unión Europea, cuando éstas aún no habían entra-

do en vigor en España. Posteriormente, cuando la normativa de emisiones ha sido modificada, la instalación se ha adaptado para conseguir el cumplimiento de los nuevos límites de emisiones a la atmósfera. A tal efecto se dispone de los equipos necesarios para garantizar los niveles de emisión, así como de los instrumentos y automatismos precisos para asegurar el más estricto control y supervisión de los mismos.

De igual forma, el diseño de la instalación cumple los requisitos del documento BREF de incineración de residuos publicado por la Comisión Europea, y puede considerarse, por lo tanto, que se han adoptado las mejores tecnologías disponibles para el diseño, la construcción y la explotación del Centro.

3.1. Emisiones a la atmósfera

Con objeto de poder garantizar el cumplimiento de los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera y el de las condiciones de combustión, se dispone de un sofisticado sistema de control que se basa en:

- **Control de las condiciones de combustión.** Los gases deben mantenerse, después de la última inyección de aire, a una temperatura superior a 850 °C. Para realizar este control, cada línea de recuperación energética dispone de tres termopares situados en la cámara de postcombustión.
- **Análisis periódicos.** Los análisis periódicos se llevan a cabo por un Organismo de Control Autorizado que analiza los siguientes parámetros:
 - Ácido fluorhídrico (HF).
 - Metales pesados: Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Talio (Tl), Vanadio (V), Antimonio (Sb) y Cobalto (Co).
 - Dioxinas y furanos (PCDD/F).
- **Análisis en continuo.** Cada línea de incineración dispone de equipos aprobados por la autoridad competente para la medición en continuo de los siguientes parámetros:





Guía de valorización energética de residuos

- Ácido clorhídrico (HCl).
- Monóxido de Carbono (CO).
- Partículas.
- Compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Dióxido de azufre (SO₂).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).

El completo sistema de filtrado de gases del que dispone la instalación permite el cumplimiento de la normativa en vigor. En la actualidad, esta normativa se recoge en el R.D. 653/03, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.

En la Fig. 4.3 se presentan los valores de emisión de la instalación en el año 2009 junto con los valores límites que deben cumplirse.

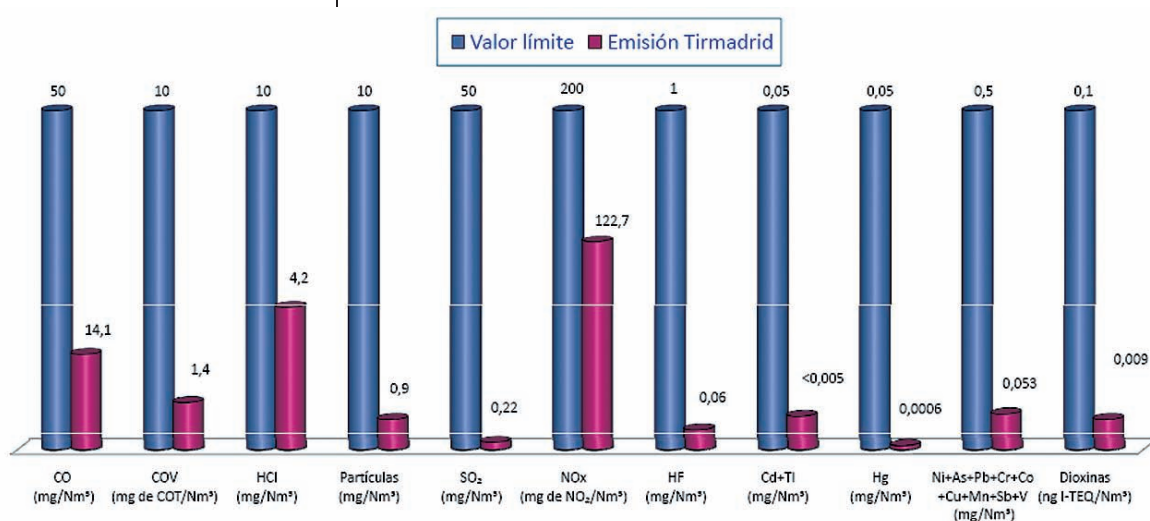


Figura 4.3. Medias diarias de emisiones durante el año 2009.

3.2. Residuos sólidos

Las escorias que se extraen del horno son un residuo inerte y se depositan en el Vertedero «La Salmedina».

Las cenizas obtenidas en el proceso de limpieza de gases se depositan en el vertedero de seguridad anexo al Centro, construido a tal efecto.

Este vertedero de seguridad para cenizas de incineración está dotado de una triple capa de impermeabilización, con lo que se garantiza el cumplimiento de la normativa sobre vertederos.

4. Datos de producción del Centro

En los últimos diez años se han recibido en el Centro las siguientes cantidades de residuos:

- 4.390.950 toneladas de RSU procedentes de la recogida domiciliar para su tratamiento integral.
- 1.144.313 toneladas de RDF (*Refuse Derived Fuel*) procedentes de otros Centros de Tratamiento para su valorización energética.

Tras el tratamiento de las 4.390.950 toneladas de RSU, se han obtenido los siguientes materiales:

- 103.213 toneladas de materiales férricos.
- 11.193 toneladas de plástico.
- 103.441 toneladas de papel y cartón.
- 2.714 toneladas de aluminio.
- 1.062 toneladas de vidrio.
- 395.082 toneladas de compost.

Además, se han producido 1.830.942 toneladas de RDF que se han valorizado energéticamente junto con el RDF procedente de otros Centros de Tratamiento indicado anteriormente.

En total, en estos diez años, se ha evitado el depósito en vertedero de casi tres millones de toneladas de RDF y se han generado a partir de ellas 2.250.663 MWh de energía eléctrica, lo que sitúa al Centro «Las Lomas» en un lugar destacado en el ámbito de producción de energía a partir de la valorización energética de residuos en la Comunidad de Madrid.

Según los datos publicados por la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, en el año 2008 la contribución a la producción





energética a partir de residuos de las distintas instalaciones ubicadas en la Comunidad fue la siguiente:

PLANTAS	ENERGÍA PRODUCIDA (MWh)
Metanización de residuos	
Pinto (incluye vertedero)	74.031
Digestión anaeróbica de lodos	
Viveros	4.980
China	7.032
Butarque	10.229
Sur	19.061
Suroriental	1.312
Valdebebas	589
Rejas	1.404
La Gavia	3.224
EDAR Arroyo del Soto	5.473
Depuradora Arroyo Culebro	1.458
Incineración de residuos sólidos urbanos	
Las Lomas	224.660
Vertido de residuos sólidos urbanos	
Valdemingómez	82.034
Alcalá de Henares	10.266
Nueva Rendija	9.636
Colmenar Viejo	32.969
TOTAL	488.358

El Centro «Las Lomas» representa, por tanto, más del 45% de la energía producida por este tipo de fuentes en la Comunidad de Madrid, con lo que este Centro realiza una importante contribución para alcanzar los objetivos del Plan Energético de la Comunidad de Madrid 2004-2012.

Además, contribuye de forma importante a la lucha contra el cambio climático al ser un sustituto eficaz de otras fuentes de energía no renovables.

Por otra parte, mediante esta tecnología de tratamiento de residuos, se recuperan todos los materiales aprovechables y se logra una importante reducción del volumen de residuos que se depositan en vertedero, con lo que se da una solución integral al tratamiento de los Re-

siduos Sólidos Urbanos y se obtiene una clara mejora medioambiental en nuestro entorno.

5. Bibliografía

- Balance Energético de la Comunidad de Madrid (2008). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.



5

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA ESPAÑOLA



1. ¿Qué es la valorización energética?

La valorización energética consiste en la **sustitución parcial de los combustibles fósiles tradicionales del sector (fundamentalmente coque de petróleo) por combustibles derivados de residuos.**

Según señala el artículo 3 de la Ley 10/1998, de 21 de abril de residuos, la valorización es *«todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente».*

Estamos, por tanto, hablando de un término pluridisciplinar y complejo en el que entran en juego diversas áreas: cambio climático, gestión de residuos, calidad del aire, protección de la salud, preservación de recursos, política energética, etc. A todos estos temas se hará referencia a lo largo de este capítulo.

Así, la valorización energética de residuos en el horno de cemento es una operación con todas las garantías para la seguridad y salud que se inició hace más de 25 años en los países más avanzados de Europa en cuanto a protección ambiental y que, desde entonces, se viene realizando con éxito en la práctica totalidad de los países de la U.E., Estados Unidos y Japón.

En el sector cementero, el proceso de sinterización del clinker a altas temperaturas requiere una gran cantidad de combustibles y aporta la posibilidad de valorizar ciertos residuos orgánicos utilizándolos como sustitutos de los combustibles fósiles tradicionales (coque de petróleo, carbón o fuel oil). Es decir, **parte de la energía consumida para estos procesos industriales puede obtenerse a partir de combustibles derivados de residuos.**



La también denominada co-incineración (sustitución de combustibles fósiles por residuos) supone un tratamiento adecuado de los residuos, aprovechando al máximo su energía y minerales sin generar impactos añadidos sobre el entorno y ahorrando emisiones de gases de efecto invernadero.



Foto 5.1. Llama horno de clinker.

2. Beneficios de la valorización energética

La valorización de residuos en la industria cementera aporta beneficios desde la triple dimensión de la sostenibilidad (ambientales, económicos y sociales):

1. **Reduce las emisiones globales de gases de efecto invernadero.** El sector cementero español utilizó en el año 2008 unas 309.000 toneladas de combustibles recuperados que, en términos energéticos, supusieron el 6,9% del consumo térmico de los hornos de clinker. El ahorro energético alcanzado fue de unas 172.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep), que representa el consumo energético anual de 240.000 hogares. A esto habría que añadir:
 - Las emisiones evitadas que se hubieran producido al tratar los residuos fuera de las cementeras (incineración) o al fermentar en vertederos.
 - Las emisiones que se hubieran generado por el transporte marítimo desde los lugares lejanos de exportación de combustibles fósiles.

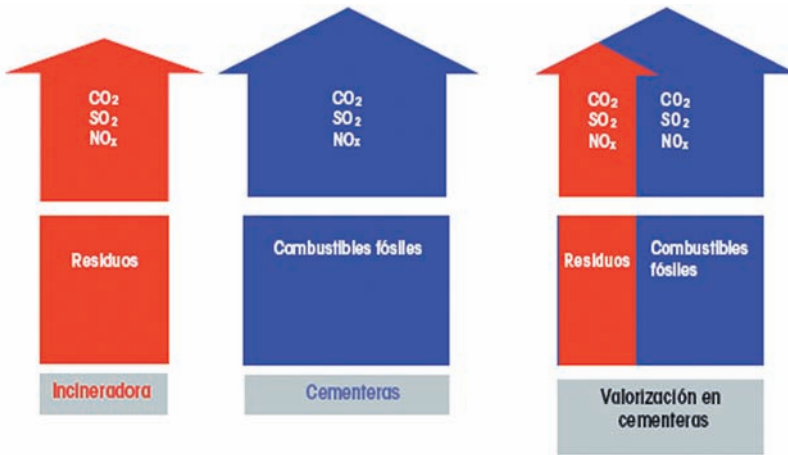


Figura 5.1. Reducción de las emisiones globales gracias a la valorización en cementeras. (Fuente: Elaboración propia. Fundación CEMA).

2. Permite el **ahorro de materias primas** necesarias para la fabricación de clinker.
3. **Disminuye el consumo de combustibles fósiles.**
4. **Mejora la competitividad de la industria cementera** y reduce los costes de fabricación al existir un ahorro en la obtención de materias primas y de combustibles.
5. Supone una **garantía de tratamiento adecuado**, ya que la combustión se realiza en condiciones de alta temperatura y altos tiempos de residencia, lo que garantiza la destrucción efectiva de los compuestos orgánicos existentes en el residuo, incluidos los más complejos.
6. **No se genera ningún residuo** al final del proceso de valorización que requiera un tratamiento posterior, ni siquiera escorias y cenizas, ya que éstas se incorporan al clinker de forma permanente e irreversible, manteniendo las garantías ambientales del producto.
7. **Evita el depósito de residuos en vertedero** y sus consecuencias adversas asociadas.
8. Facilita a la sociedad una herramienta complementaria para la gestión de sus residuos, y **reduce las inversiones necesarias** al aprovechar instalaciones ya existentes (plantas cementeras).



3. Situación actual de la valorización en Europa y en España

Según el estudio «Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España» elaborado por el **Institut Cerdà** para la Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente (FUNDACIÓN CEMA), de las **38 fábricas integrales de cemento existentes en nuestro país, 28 están autorizadas a valorizar residuos energéticamente**.

En España, la sustitución de combustibles fósiles por residuos, aunque va aumentando cada año, resulta todavía escasa en comparación con otros países de nuestro entorno donde los sistemas de gestión de los residuos llevan décadas orientadas a prevenir el vertido y aprovechar la capacidad de tratamiento de las fábricas de cemento.

En el gráfico de la Fig. 5.2 se puede observar el aporte calorífico de las cementeras de nuestro país en función del combustible utilizado.

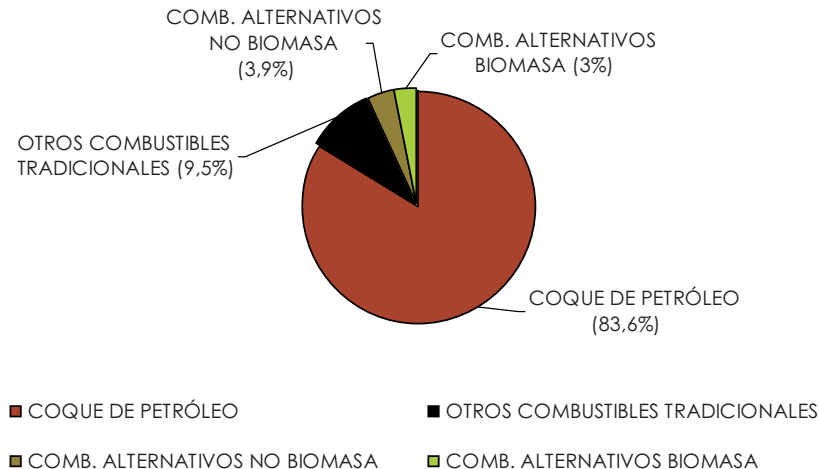


Figura 5.2. Aporte calorífico por tipos de combustibles en 2008 (kilotermias).
(Fuente: Oficemen).

En dicho gráfico, en verde claro se puede apreciar la energía térmica procedente de fuentes que, de acuerdo con la terminología adoptada en Europa, se consideran renovables (aquellos residuos total o parcialmente de biomasa se consideran neutros en cuanto a sus emisiones de CO_2).



Distintos países de Europa han potenciado esta manera de recuperación de energía. Son precisamente aquellos países con los mayores estándares de protección ambiental y con las sociedades más concienciadas donde este porcentaje de sustitución es más elevado (Holanda, Suiza, Austria, Alemania, etc). Resulta paradigmático el caso de Alemania, puesto que, durante el gobierno en coalición del partido socialista con el partido verde, se incrementó de manera notable la valorización de residuos en plantas cementeras asociado a un plan de cierre de vertederos (en Alemania, y según EUROSTAT, sólo un 1% de sus residuos van a vertedero frente al 60% de nuestro país).

La media de sustitución de la U.E. se sitúa en un 20% (más del doble de la media española, 6,9%) y todavía muy lejos de los países anteriormente citados, con medias superiores al 30%. En la Fig. 5.3 se aprecian de forma nítida esas diferencias.

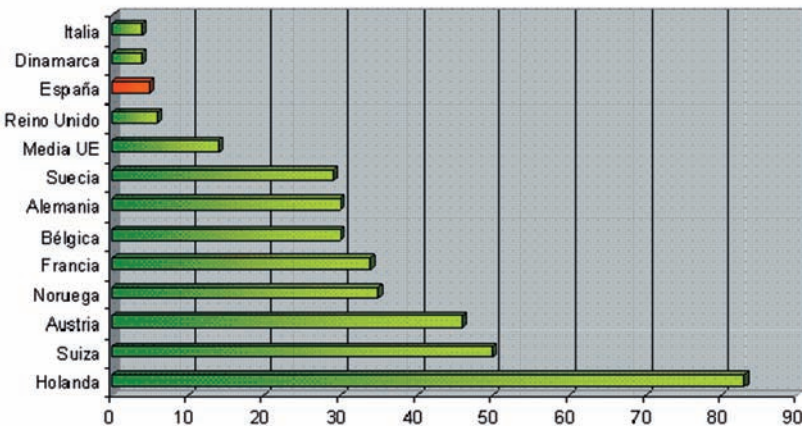


Figura 5.3. Consumo porcentual de combustibles alternativos en la industria cementera de varios países europeos. (Fuente: Fundación Cema).

Nota: Reino Unido tiene una política nacional de envío de residuos hacia plantas incineradoras y Dinamarca desvía parte de sus residuos a hornos de clinker en Alemania.

Los tipos de residuos utilizados como combustibles durante los últimos diez años se reflejan en la Fig. 5.4 en la que se puede observar una reducción en volumen en 2008 (que no en porcentaje), motivada por el descenso de la producción de cemento por la crisis económica.

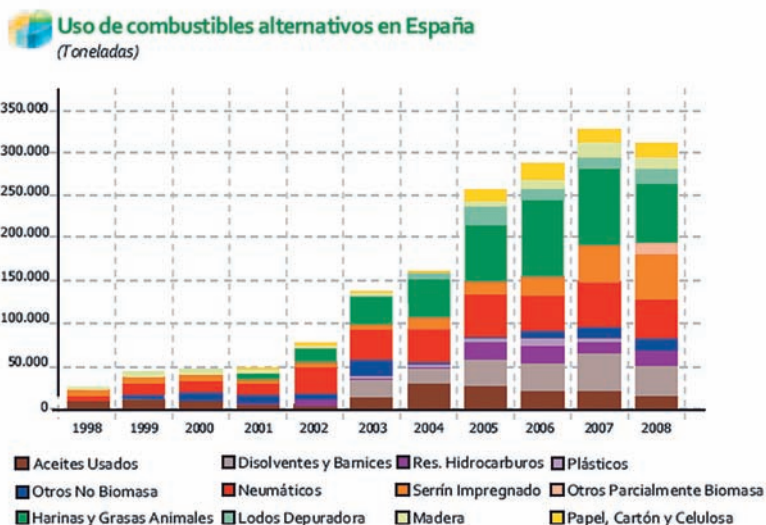


Figura 5.4. Evolución del uso de combustibles alternativos en España.
(Fuente: Anuario 2008 de OFICEMEN).

Como se ve en el gráfico, a pesar del elevado crecimiento experimentado en los últimos años, los volúmenes absolutos utilizados aún son pequeños en comparación con los países europeos más avanzados en protección ambiental.

Sin embargo, en los últimos años la valorización de residuos en hornos de cemento se ha visto impulsada en España por los siguientes motivos:

1. La colaboración estrecha con los trabajadores del sector, materializada en el «Acuerdo para la Valorización Energética en la Industria Española del Cemento». Este Acuerdo, firmado en el año 2004 entre la patronal cementera, OFICEMEN y los dos sindicatos mayoritarios del sector (MCA-UGT y FECOMA-CCOO), tiene como objetivo avanzar de manera conjunta en el desarrollo sostenible en el sector cementero español.
2. La finalización en el año 2008 del proceso de otorgamiento de las Autorizaciones Ambientales Integradas a todas las fábricas de cemento de nuestro país, con el apoyo general de las distintas Administraciones a la valorización energética de diferentes tipos de residuos.
3. El apoyo recibido de los Ministerios de Medio Ambiente e Industria al reconocer el uso de residuos de biomasa y combustibles

alternativos como la herramienta principal y necesaria de reducción de emisiones de efecto invernadero (CO_2) por parte del sector.

4. La existencia de una mayor información ciudadana en los municipios donde se lleva a cabo esta actividad, gracias a una política de transparencia y comunicación de las empresas y a las jornadas de difusión de la Fundación CEMA.

4. Residuos y subproductos utilizados en la valorización energética

Los residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente son aquellos que tienen en su composición **materia orgánica** (compuesta básicamente por carbono e hidrógeno) que, cuando se oxida con el oxígeno de la atmósfera, aporta el calor de combustión.

Según el estudio citado anteriormente elaborado por el Institut Cerdà «Reciclado y Valorización de Residuos en la Industria Cementera en España», existen hoy en día 76 tipos de residuos autorizados a ser valorizados energéticamente, considerando cuatro dígitos de la Lista Europea de Residuos (LER).

Se pueden agrupar los residuos autorizados para utilizarse como combustibles alternativos en las siguientes categorías en función de que su composición sea totalmente biomasa, parcialmente biomasa o tenga un origen fósil (se recuerda que la utilización de combustibles con biomasa se considera neutra en cuanto a sus emisiones de CO_2).

Residuos de biomasa

- Biomasa forestal y restos vegetales procesados por la industria alimentaria.
- Residuos de industrias cárnicas que incluyen harinas cárnicas y grasas animales.
- Lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.
- Otros residuos de biomasa que incluyen residuos de envases y residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.





Residuos con contenido parcial de biomasa

- Lodos de papelera que proceden del procesado de la pasta de papel y contienen celulosa y plástico.
- Combustible preparado a partir del rechazo de plantas de tratamiento de residuos municipales (CDR).
- Neumáticos fuera de uso.
- Residuos de fragmentación de vehículos fuera de uso.

Residuos de origen fósil

- Residuos de hidrocarburos.
- Aceites minerales usados.
- Plásticos.
- Disolventes, pinturas, barnices y otros residuos líquidos.
- Otros.

Actualmente, son los lodos de depuradora, las harinas cárnicas y los neumáticos fuera de uso los combustibles derivados de residuos más comúnmente empleados en las fábricas de cemento de nuestro país. No obstante, y de cara al futuro, según un estudio llevado a cabo por el Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos (ISR) que lleva por título *«Sustitución de combustibles fósiles en el sector cementero. Oportunidad para reducir el vertido de residuos»*, se estima que la potencial generación de combustibles derivados de residuos a partir de residuos urbanos (fundamentalmente de los rechazos de las plantas actuales de tratamiento que hoy se destinan a vertedero) es del orden de **1.213.000 toneladas anuales**.

4.1. Limitaciones en el uso de residuos como combustibles alternativos

La utilización de residuos como combustible no debe suponer un perjuicio en el comportamiento ambiental de la instalación, no debe dificultar la operación de fabricación ni tampoco debe afectar a la

calidad del cemento. Por ello, aunque existe una amplia variedad de residuos que pueden aprovecharse en los hornos del clinker, no todos son utilizables y antes de cada prueba o proyecto se realiza una cuidadosa selección.

Las limitaciones en cuanto a los tipos de residuos derivan de garantizar los tres condicionantes mencionados anteriormente y dependen de cada instalación concreta. Algunas limitaciones serían las siguientes:

- El contenido en **cloro** en el cemento está limitado al 0,1% en peso, por lo que debe limitarse su presencia en los combustibles. Además, el cloro puede formar sales que causan pegaduras y atascos en los ciclones.
- La posible fijación de ciertas sales en el clinker puede ser objeto también de limitación en el caso de residuos con contenido en **fósforo**.
- Se limita de manera estricta el contenido de los metales más volátiles (Hg, Tl) en la composición de los combustibles derivados de residuos.
- Aunque no hay limitaciones tecnológicas que lo justifiquen, las empresas cementeras no utilizan residuos orgánicos de origen **sanitario u hospitalario**.
- Tampoco pueden tratarse residuos **radiactivos**.

5. Características del proceso de combustión de residuos en el horno clinker

5.1. Fabricación de cemento. Energía y medio ambiente

De manera muy resumida, se puede decir que la fabricación de cemento es una actividad industrial de procesamiento de minerales que se divide en tres etapas básicas:

1. **Obtención, preparación y molienda de materias primas** (caliza, marga, arcilla, pizarra, etc.) que aportan carbonato cálcico, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro. 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 1.450 °C para ser enfriado bruscamente y obtener un producto intermedio denominado **clinker**.
3. **Molienda del clinker con otros componentes:** yeso (regulador del 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 clinker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda y vía húmeda. En nuestro país es mayoritario el proceso de fabricación en vía seca.



Foto 5.2. Fábrica de El Alto (Morata de Tajuña, Comunidad de Madrid). Grupo Portland Valderrivas.

Los costes energéticos del combustible y de la energía eléctrica suponen actualmente en torno al 35% de los costes finales de fabricación, por lo que la reducción del consumo de energía y la diversificación de las fuentes energéticas son factores claves para la competitividad de las empresas cementeras.

Teniendo en cuenta que el sector cementero español está a la cabeza a nivel mundial en eficiencia energética (4 puntos por encima de la media europea y únicamente superado por Japón y Corea), la sustitución de combustibles fósiles por combustibles derivados de residuos se configura como la principal herramienta del sector para disminuir sus emisiones de gases de efecto invernadero y, por ende, mantener su competitividad a nivel internacional.

5.2. La combustión

Para obtener el clinker es necesario calentar las materias primas en grandes hornos rotatorios hasta su fusión parcial. El calor necesario

para ello se obtiene de la combustión en una gran llama principal y, a veces, en una secundaria. Este proceso requiere una gran cantidad de combustible y aporta la posibilidad de valorizar ciertos residuos orgánicos utilizándolos como combustibles alternativos en sustitución de los tradicionales.

La combustión en el horno clinker tiene lugar en una o dos zonas en función de la tecnología empleada:

- **Quemador principal:** presente en todos los hornos y situado en la parte más baja del horno rotatorio. La llama alcanza una temperatura cercana a los 2.000°C . Los gases de combustión se mantienen a más de 1.200°C durante un tiempo superior a 5 segundos en atmósfera oxidante.
- **Zona de calcinación:** es la zona del horno en que se produce la descarbonatación de la caliza (calcinación) donde la combustión se realiza a temperaturas cercanas a los 1.200°C , manteniéndose una temperatura superior a 850°C durante unos 3 segundos.
- **Hornos con precalcinador (quemador secundario):** los hornos más modernos disponen de una cámara de combustión en la zona inferior de la torre de ciclones (precalcinador) donde se realiza la combustión con aporte de aire caliente proveniente del enfriador de clinker. Algunos hornos disponen de precalcinador sin aporte de aire terciario, por lo que la combustión se realiza con el exceso de oxígeno proveniente del quemador principal.

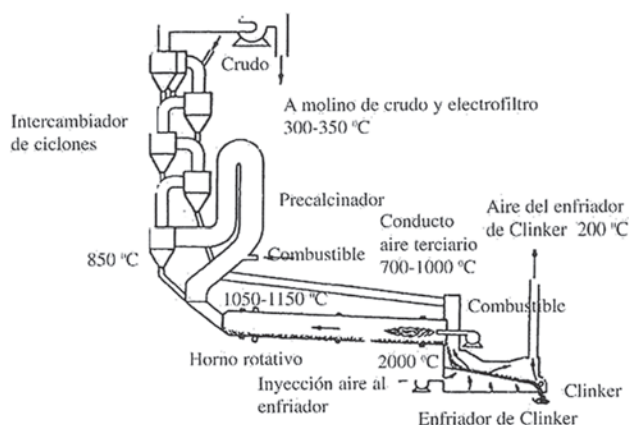


Figura 5.5. Esquema de horno con precalcinador.



- **Hornos sin precalcinador:** en hornos vía seca que no disponen de precalcinador o en hornos vía semiseca o semihúmeda, la combustión puede realizarse en la primera zona del horno rotatorio. Este sistema está especialmente indicado para combustibles densos y alimentados en tamaños relativamente grandes (por ejemplo, neumáticos enteros o troceados).
- **Hornos vía húmeda:** en hornos vía húmeda o en hornos largos, la alimentación de combustibles alternativos puede realizarse en una zona adecuada del horno rotatorio (sistema patentado «Mild Kiln»). La apertura realizada en el horno rotatorio y el sistema de compuesto permite que se pueda alimentar combustible en cada rotación del horno.

Con las condiciones de combustión descritas, los compuestos orgánicos contenidos en el residuo son destruidos, dando como resultado la formación de CO_2 y H_2O . Además, en la combustión de los residuos se generan otros gases y cenizas cuya composición dependerá de la composición original del residuo.

5.3. Características diferenciadoras de las fábricas de cemento frente a otras instalaciones

La valorización energética de residuos o subproductos en las fábricas cementeras se realiza bajo unas condiciones y con unas características que las sitúan como la opción más idónea frente a otras instalaciones como incineradoras, centrales térmicas o de biomasa, etc.

El funcionamiento de un horno de cemento difiere por completo del de una planta incineradora. Mientras que en una incineradora el 100% del material de entrada son residuos, generándose escorias y cenizas volantes durante su combustión; en el horno de clinker la mayor parte del material presente es cal con un gran poder de limpieza y filtración. Una planta cementera no genera escorias ni cenizas, siendo el único producto obtenido el clinker.

Tabla 5.1. Diferencias de funcionamiento Horno de Cemento vs Planta Incineradora. (Fuente: Fundación Cema).

INSTALACIÓN	ENTRADAS	SALIDAS
HORNO DE CEMENTO	92% materias primas 6,4% combustible fósil 1,6% residuos	100% clinker
PLANTA INCINERADORA	100% residuos	Cenizas volantes 30% escorias

Tabla 5.2. Condiciones típicas en un horno de cemento y en una planta incineradora. (Fuente: Fundación Cema).

PARÁMETRO	HORNO DE CEMENTO	INCINERADOR
Temperatura máxima del gas	> 2.200 °C	≤ 1.480 °C
Temperatura máxima del sólido	1.420 - 1.480 °C	≤ 750 °C
Tiempo residencia gas a > 1.100 °C	6 - 10 segundos	0 - 3 segundos
Tipo de flujo	En contracorriente	En paralelo

Con las condiciones de combustión descritas, los compuestos orgánicos contenidos en el residuo son destruidos, dando como resultado la formación de CO_2 y H_2O . Además, en la combustión de los residuos se pueden generar otros gases y cenizas cuya composición dependerá de la composición original del residuo. La energía liberada se aprovechará en el proceso de fabricación del clinker.

5.3.1. Destrucción de compuestos orgánicos

La combustión de residuos en el horno clinker destruye la materia orgánica contenida en los mismos gracias a tres factores:

- **Altas temperaturas:** 2.000 °C en el quemador principal y 1.100 °C en el quemador secundario (precalcinador).
- **Largo tiempo de residencia:** los gases permanecen a muy alta temperatura, entre 3 y 10 segundos.
- **Atmósfera oxidante:** la combustión se realiza con exceso de aire, por lo que la materia orgánica reacciona con el oxígeno completamente, formando CO_2 y H_2O .

Estas condiciones de combustión aportan gran capacidad de destrucción de estos compuestos (los coeficientes de destrucción llegan al 99,99%) lo que anula la peligrosidad del residuo.

5.3.2. Gases de combustión y cenizas

Durante la combustión de los residuos se producen gases que son arrastrados por la corriente hacia los intercambiadores de calor en los que se produce un contacto directo con la materia prima (crudo).





Este fenómeno actúa como un mecanismo de depuración de gases debido a que:

- Las características alcalinas de la materia prima permiten la captación de los compuestos halógenos (cloro y flúor) y del azufre, formando sales y sulfatos alcalinos inocuos que se incorporan al clinker.
- Los metales pesados que pudieran estar presentes en el residuo y que no se han volatilizado en la llama, condensan en las partes frías del sistema del horno, incorporándose al clinker.
- Las cenizas se funden con el resto de materias primas y pasan a formar parte del propio clinker, contribuyendo a la formación del mismo.

Estas características específicas de los hornos clinker evitan que se produzcan ciertos impactos que preocupan en otras instalaciones, como son las emisiones de compuestos orgánicos o metales pesados, o la generación de cenizas, escorias o aguas residuales.

5.3.3. Gases

El tipo de gas que se desprende durante la combustión del residuo dependerá de la composición del mismo. En el caso de que el residuo contenga cloro o azufre, la combustión generará gases ácidos, como el cloruro de hidrógeno y el óxido de azufre. Estos gases son neutralizados y absorbidos por la materia prima de naturaleza alcalina ($\text{cal} + \text{Na} + \text{K}$) y las sales inorgánicas formadas se incorporan al clinker.

5.3.4. Cenizas

En su composición se deben diferenciar:

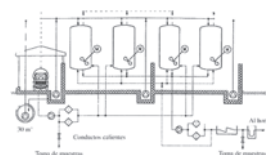
- Los minerales que contribuyen a formar los compuestos del clinker y que se incorporarán como parte de materia prima en las reacciones del horno, dando lugar a una valorización material de esta parte de las cenizas, como, por ejemplo, los neumáticos usados que, además de energía, aportan hierro a la composición del clinker.
- Otros minerales, incluidos los metales pesados, que serán mayoritariamente retenidos en el clinker. La retención alcanza cifras muy

próximas al 100%, lo que garantiza que los metales emitidos a la atmósfera respetan rigurosamente los límites de emisión más estrictos.

Las cenizas de los residuos se incorporan al clinker de forma permanente, parte como constituyentes de los compuestos activos del clinker y parte atrapadas en la estructura mineralógica del mismo. En cualquier caso, se ha demostrado científicamente que las cualidades de compatibilidad ambiental del cemento no se ven alteradas por la utilización de residuos orgánicos como combustibles alternativos en el horno de clinker.

6. La gestión de residuos en la empresa para su valorización

La manipulación y procesamiento de los residuos que se van a utilizar como combustibles alternativos se puede dividir en cuatro fases (ver Fig. 5.6).



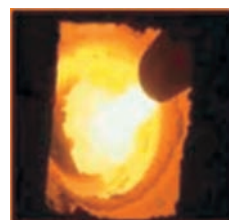
Preparación



Recepción



Almacenamiento



Alimentación

Figura 5.6. Fases en la utilización de combustibles alternativos.
(Fuente: Fundación Cema).

6.1. Preparación de los combustibles alternativos

Los residuos deben acondicionarse para su utilización, lo que suele realizarse en plantas específicas que, en algunos casos, están situadas en el entorno inmediato de la fábrica. En todo caso, se está haciendo referencia a residuos ya tratados procedentes de gestores autorizados. La preparación será distinta dependiendo en que estado (sólido, líquido o gaseoso) se encuentre el residuo. Aunque existen ejemplos de utilización de gases residuales como combustible, la práctica totalidad de los combustibles alternativos empleados son sólidos o líquidos:





1. **Combustibles sólidos:** los combustibles sólidos, como neumáticos, madera, plásticos, etc., se someten a tratamientos que incluyen la adecuación del tamaño mediante trituración o corte para adaptar el residuo a las instalaciones de almacenamiento, manipulación y combustión de la fábrica de cemento.
2. **Combustibles líquidos:** los combustibles líquidos, como lubricantes y disolventes, pueden, en su mayoría, alimentar al horno en su composición original, aunque normalmente se les somete a procesos de mezcla y homogeneización en plantas específicamente diseñadas (plantas de *blending*) con el fin de optimizar la combustión en el horno, tanto desde un punto de vista de operación del mismo como de su comportamiento ambiental.

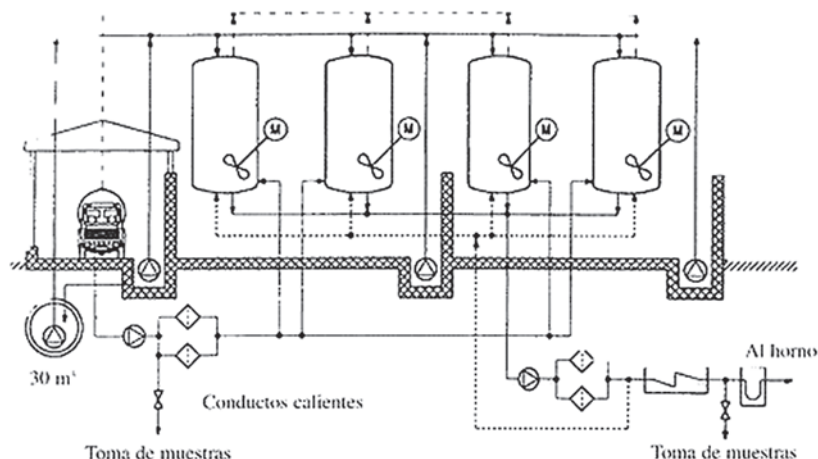


Figura 5.7. Planta de preparación de combustibles líquidos *blending*.
(Fuente: Fundación Cema).

Las plantas de *blending* son normalmente operadas por empresas especializadas en gestión de residuos que envían a la fábrica de cemento el residuo líquido preparado con las especificaciones concretas correspondientes a cada horno.

6.2. Recepción

Cada cargamento que entra en la fábrica se somete a un control e inspección que incluye desde el pesaje y observación visual, hasta la analítica completa para determinados residuos peligrosos. Se

toman las precauciones necesarias para asegurar que el residuo es uno de los autorizados y que no ha sido contaminado con residuos no autorizados. Para ello, se realizan las comprobaciones oportunas.

6.3. Almacenamiento

El residuo se descarga en la fábrica para su almacenamiento temporal, con una capacidad suficiente para asegurar varios días de utilización, regulando así el flujo de residuos al horno. El tipo de almacenamiento y los sistemas de carga y descarga se diseñan de forma que garanticen la seguridad.

Los residuos líquidos se almacenan en **depósitos estancos** dotados de sus correspondientes cubetos de protección contra posibles pérdidas o derrames. Adicionalmente, y dependiendo de la naturaleza del residuo, se pueden requerir otras medidas de seguridad exigidas por la normativa vigente (por ejemplo, seguridad contra incendios en instalaciones industriales).

Los residuos sólidos se almacenan en **acopios, naves o tolvas** con sistema de protección contra el viento y otro de protección del suelo y las aguas adecuado a las condiciones del residuo.

6.4. Alimentación en el horno

Desde el almacenamiento los residuos se transportan hasta el punto de entrada al horno (quemador principal o zona de calcinación). Ambas cámaras de combustión se diseñan específicamente para que la combustión se realice en las condiciones de temperatura, turbulencia y exceso de oxígeno más favorables.

¿Cómo se realiza la alimentación según el material utilizado?

Los residuos líquidos pueden alimentarse a uno u otro punto de entrada y se inyectan mediante bombas hidráulicas en tuberías a presión. Si el residuo es muy estable, se recomienda su alimentación al quemador principal.

Los residuos sólidos suelen alimentarse por medios mecánicos o neumáticos. Dependiendo de su granulometría entran al horno de diferentes maneras:





- Cuando se trata de materiales gruesos, como neumáticos, balas de plástico, etc., la entrada al horno se realiza por gravedad a través de un sistema de compuertas o clapetas que reduce la entrada de aire falso.
- En el caso de residuos sólidos de pequeña granulometría, como el caucho triturado, plástico troceado, etc., la alimentación puede realizarse a través de tuberías en las que el residuo es arrastrado por aire.

7. Garantías legales y sobre seguridad y salud asociadas al proceso de valorización de residuos

La utilización de residuos como combustible alternativo se realiza respondiendo a las siguientes condiciones:

- Respeto escrupuloso a la legislación medioambiental vigente.
- Mantener la seguridad de los trabajadores y de las personas en el entorno de la fábrica.
- Ser compatible con la calidad exigida al cemento y con la operación de la instalación.

Las operaciones de valorización de residuos se realizan bajo un riguroso control. Además de las reglas básicas que posibilitan una valorización adecuada, la legislación comunitaria, estatal y de las distintas comunidades autónomas establecen unos requisitos muy estrictos de actuación y de control que las cementeras deben cumplir. En este sentido, conviene recordar que en muchos aspectos la legislación de la Unión Europea es la más restrictiva del mundo, y que una fábrica de cemento es una instalación sometida a exhaustivos controles ambientales por parte de las distintas autoridades ambientales competentes.

Adicionalmente a esto, existe una abrumadora evidencia científica que no hace sino aumentar las garantías hacia todas las partes interesadas (administración, trabajadores, vecinos, grupos ecologistas, etc.) sobre este proceso de sustitución de combustibles.

7.1. Marco legal

La legislación comunitaria que puede afectar a la valorización de residuos en instalaciones de producción de cemento, se puede agrupar en dos tipologías normativas:



- La legislación de residuos:
 - Directiva 2008/98/CE sobre residuos.
- La legislación relativa a la regulación de actividades industriales:
 - Directiva 1996/61/CE sobre prevención y control integrados de la contaminación.
 - Directiva 2000/76/CE sobre incineración de residuos.

La legislación sobre residuos señala la jerarquía que se debe seguir en la gestión de los residuos, donde la valorización energética se sitúa por detrás de la reutilización y el reciclado, y siempre por delante de la opción de la eliminación de residuos en vertedero (ver Fig. 5.8).



Figura 5.8. Jerarquía de gestión de los residuos. (Fuente: Artículo 4 Directiva 2008/98/CE de residuos).

Por otra parte, y según lo establecido en el Real Decreto 653/2003 sobre incineración de residuos, que traspone la Directiva 2000/76, la actividad de valorización energética de residuos en los hornos de cemento es una operación de co-incineración. El Real Decreto define una instalación de co-incineración como:



"... toda instalación fija o móvil cuya finalidad principal sea la generación de energía o la fabricación de productos materiales y que...

...o bien utilice residuos como combustible habitual o complementario, o bien los residuos reciban tratamiento para su eliminación".

El horno de clinker es una instalación de co-incineración, ya que tiene como finalidad la fabricación de productos materiales (clinker) y utiliza residuos como combustible en sustitución de los convencionales.

En este Real Decreto se establecen:

- Las condiciones de entrega y recepción de los residuos.
- Las condiciones de diseño, equipamiento y explotación de la instalación.
- Las operaciones de control y seguimiento que deben realizar las instalaciones sobre las emisiones atmosféricas que generan, así como su registro, tratamiento y presentación de acuerdo con los procedimientos que establezcan al efecto las autoridades competentes.
- Los valores límite de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones en las que se co-incineren residuos.

Autorización ambiental integrada

El Real Decreto 653/2003 establece que las instalaciones, previamente a la realización de actividades de incineración o co-incineración de residuos, deben contar con el permiso de la autoridad ambiental que, en el caso de las instalaciones cementeras, estará incluido en la autorización ambiental integrada (Ley 16/2002 de prevención y control integrados de la contaminación).

¿Qué incluye la autorización ambiental integrada?

En la autorización concedida para la actividad de co-incineración se incluyen:

- Los tipos de residuos que pueden tratarse y la cantidad autorizada.

- La capacidad total de tratamiento de residuos en la instalación.
- Los procedimientos de muestreo y medición para mediciones periódicas de contaminantes a la atmósfera y las aguas.
- Los flujos mínimos y máximos de masa de los residuos, sus valores caloríficos mínimos y máximos y su contenido máximo de sustancias contaminantes (PCB, PCP, cloro, flúor, azufre y metales pesados) cuando se trata de residuos peligrosos.

Condiciones de combustión

Además de establecer la obligatoriedad de la autorización ambiental, especifica las condiciones para la destrucción térmica de los residuos orgánicos, principalmente:

- Temperatura y tiempo de residencia.
- Condiciones de alimentación al horno.

Temperatura y tiempo de residencia

Establece cuáles son las condiciones de temperatura y tiempo de residencia en los procesos de co-incineración, los cuales deben ser superiores a 850 °C durante al menos dos segundos, y superiores a 1.100 °C durante al menos dos segundos cuando se quemen residuos peligrosos que contengan más de 1% de sustancias orgánicas cloradas.

Condiciones de alimentación

Cuando las condiciones de temperatura y tiempo de residencia exigida por la normativa no se cumplan, los residuos no podrán alimentar al horno, por lo que los hornos de clinker deberán contar con sistemas automáticos que impidan la alimentación de los residuos en los siguientes casos:

- En la puesta en marcha del horno hasta alcanzar las condiciones de tiempo y residencia descritas.
- Cuando no se mantengan las temperaturas y tiempos citados por inestabilidad del proceso.





7.2. Estudios científicos sobre seguridad y salud relacionados con el uso de residuos como combustibles

A continuación se detallan algunos estudios en los que diversas instituciones de la comunidad científica nacional e internacional demuestran que el uso de combustibles derivados de residuos no supone modificación de las emisiones de las fábricas de cemento ni suponen ningún riesgo adicional para la seguridad y salud de las personas:

1. El **documento de referencia europeo sobre Prevención y Control Integrados de la Contaminación** (BREF, Mejores Técnicas Disponibles en la Industria del Cemento) publicado en su segunda revisión, en el que se describen las garantías presentadas por los hornos de cemento para la combustión de residuos, y se incluye el uso de residuos entre las técnicas para disminuir el consumo de recursos naturales.
2. Los documentos y estudios realizados en el marco del **Convenio de Naciones Unidas sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes** concluyen que el uso de residuos como combustibles alternativos en unas condiciones determinadas (y recogidas por la normativa europea) no suponen un incremento en las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes, en concreto, de dioxinas y furanos.
3. La declaración del **Comité Consultivo sobre Efectos Médicos de Contaminantes para la Salud (COMEAP) del Reino Unido** sobre el uso de residuos como combustibles alternativos en fábricas de cemento sometidas a ciertos condicionantes (básicamente los establecidos por la normativa europea) concluye que *«no presentan probabilidad de causar un incremento de riesgo para la salud»*.
4. El estudio sobre emisiones de dioxinas durante la combustión de neumáticos en la industria cementera de EE.UU., que puede consultarse en la página web de la **Agencia de Protección Ambiental Americana-EPA**, constata que no se produce un incremento de las emisiones de dioxinas en los hornos que emplean neumáticos, junto con el Estudio realizado por el CSIC sobre emisiones de dioxinas-furanos en tres hornos en España durante el uso de neumáticos usados y harinas animales, que concluye que *«Los resultados no suponen impacto añadido en el entorno»*.



5. La **Agencia Francesa de Medio Ambiente** realizó una comprobación de más de 60 mediciones previamente a decidir que en Francia las harinas animales se destinarían prioritariamente a los hornos de cemento como parte de la solución a la crisis de las vacas locas (se realizaron 40 mediciones en hornos que usaban harinas animales, comparándolas con las mediciones de 22 hornos que sólo usaban combustible fósil). Del análisis de estas 60 mediciones no se observó un incremento en el nivel de emisión.
6. Estudio del **Instituto Canadiense de Toxicología CANTOX**, publicado en septiembre de 2006, concluyó que *«Las emisiones disponibles, las concentraciones a nivel del suelo y los datos de evaluación de salud no predicen impactos adversos para la salud del uso de combustibles alternativos en hornos de cemento»...* *«Sin embargo es aconsejable llevar a cabo una evaluación específica de cada instalación antes de usar combustibles alternativos porque los impactos de los hornos de cemento son diferentes según la instalación concreta».*
7. **Estudio de la Universidad de Alicante** sobre valorización energética de lodos de depuradora y neumáticos fuera de uso en Valencia. En dicho estudio se evaluaron las emisiones de gases ácidos, metales pesados y compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos (dioxinas), en pruebas industriales con lodos de depuradora y neumáticos fuera de uso. Los investigadores no hallaron una relación entre las emisiones y el tipo de combustible, y los valores cumplían la legislación española (Conesa, J.A., Mateos, F., Gálvez, A., Martín-Gullón, I., Font, R., 2006. *Emissions from cement kilns stack feeding alternative fuels*. Proceedings of DIOXIN 2006, Oslo).
8. El **Instituto Noruego de Investigación SINTEF** ha llevado a cabo una recopilación y análisis de estudios de emisiones de hornos de cemento que abarcan más de 2.000 medidas de dioxinas y furanos y otros compuestos orgánicos persistentes en hornos de cemento de los cinco continentes operados en condiciones tanto normales como extremas, y usando combustibles tradicionales y alternativos, incluyendo peligrosos. Se presenta un conjunto de estudios de emisión y se muestra que la combustión de residuos peligrosos en hornos de cemento no tiene un efecto significativo en la formación y emisión de dioxinas y furanos. Como conclusión más amplia establece que el uso de residuos como combustibles o como materias primas alternativas alimentados al quemador principal, precalcinador o al



precalentador no influyen en los niveles de emisión de contaminantes orgánicos persistentes (POPs) («*Formation and release of POPs in the cement industry*» SINTEF. Enero 2006. Karstensen, K. «Formation, release and control of dioxins in cement kilns». Chemosphere 2007).

9. "Cost-benefit analysis of using sewage sludge as alternative fuel in a cement plant" (M. Shuhmacher, M Nadal, J. L. Domingo. Mayo 2009). Este estudio, elaborado por la **Universidad Rovira i Virgili de Tarragona** y publicado por la revista *Environmental Science and Pollution Research*, ha evaluado el riesgo derivado del uso de lodos de depuradora como combustible alternativo en una fábrica concreta, analizando las posibles variaciones de las emisiones del horno en comparación con el uso de los combustibles fósiles habituales, concluyendo que no existe un incremento de riesgo (las emisiones medidas incluso eran ligeramente menores) y que el ahorro de emisiones de CO₂ es equivalente a 144.000 t/año.
10. Finalmente, la evaluación de las emisiones de dioxinas del sector cementero español, un trabajo realizado en el marco de un **Convenio con el Ministerio de Medio Ambiente y el CIEMAT**, en el que se concluye que:
 - "Los valores de emisión de dioxinas y furanos se encuentran muy por debajo de los límites de emisión exigidos por la legislación".
 - "Las emisiones de dioxinas y furanos no se ven afectadas por las sustituciones de combustibles fósiles por residuos, presentando rangos de emisión dentro de los márgenes en que se encuentran las emisiones de un horno convencional".

8. Conclusiones

Según datos de la Agencia Estadística de la Unión Europea, EUROSTAT, del año 2009, España envía un 60% de sus residuos a vertedero, mientras que en países como Alemania, Suecia, Dinamarca, Holanda o Bélgica, el porcentaje de envío de residuos a vertedero está por debajo del 5%.

Por tanto, es un hecho que, mientras los países más avanzados en materia de medio ambiente a nivel mundial aprovechan al máximo los recursos contenidos en los residuos mediante la aplicación estricta de la jerarquía de gestión de residuos de la Unión Europea: Reducir, Reutilizar, Reciclar, Valorizar y, finalmente, Eliminar en vertedero, en

nuestro país todavía se utiliza el vertedero como «sistema de gestión» prioritario para eliminar residuos. Dicho de manera gráfica, **estamos enviando energía a los vertederos**.

Esta situación es especialmente crítica en el momento de crisis actual, ya que **España** es uno de los países más deficitarios en energía de la Unión Europea, con más de un **78% de dependencia energética del exterior**. Así, en **el año 2008, más de la mitad del déficit comercial (94.000 millones de euros) se originó por las importaciones de productos energéticos**.

Adicionalmente, los **vertederos son causantes del 3% de las emisiones de gases de efecto invernadero** de nuestro país, agravando el mayor problema medioambiental al que nos enfrentamos a nivel mundial, el cambio climático.

Como se ha expuesto, 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 clinker se sitúa entre 3.000 y 5.500 MJ/t de clinker, siendo los costes energéticos del combustible y de la energía eléctrica alrededor del 35% de los costes de fabricación del sector cementero.

En este sentido, la **valorización energética** es una actividad que permite, por una parte, **dotar a la sociedad de una herramienta complementaria para gestionar aquellos residuos que no se pueden reutilizar ni reciclar**, a la vez que permite al sector cementero español mantener su actividad y competir en igualdad de condiciones con el resto de países europeos. Todo ello disminuyendo de manera muy significativa las emisiones de gases de efecto invernadero (se recuerda que las emisiones de residuos total o parcialmente de biomasa son neutras en cuanto a sus emisiones de CO₂).

Se puede concluir, basándose en todo lo expuesto, que **la valorización de residuos en cementeras es un ejemplo claro de win win (expresión anglosajona, ganar ganar) con ventajas ambientales, económicas y sociales**, puesto que:

- Reduce el consumo de fuentes energéticas no renovables.
- Reduce la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.





Guía de valorización energética de residuos

- Reduce la cantidad de residuos depositados en los vertederos.
- Aumenta la recuperación de la energía contenida en los residuos.
- Aprovecha los más de 25 años de experiencia en los países Europeos con los mayores estándares de protección ambiental.
- Es un tratamiento eficaz con todas las garantías de seguridad y salud.
- Mejora la competitividad de la industria cementera, reduciendo el coste energético directo.
- Facilita a la sociedad una herramienta complementaria para la gestión de sus residuos.

6

LA EXPERIENCIA DE LA PLANTA DE BIOMETANIZACIÓN DE PINTO



1. Introducción

Se habla mucho de los residuos como problema y se desarrollan, en la mayoría de las ocasiones, los procedimientos, métodos, normas, sistemas y tecnologías para el tratamiento de los mismos, sin plantear nunca las grandes preguntas fundamentales ¿Qué es un residuo? ¿Qué diferencia hay entre residuo y subproducto?

No es objeto de este texto dar una respuesta exhaustiva a estas cuestiones, pero, sin embargo, es oportuno, a nuestro juicio, dedicar algo de atención a los conceptos antes de desarrollar con más detalle la experiencia de Gedesma en el tratamiento y valorización de residuos, especialmente en la Planta de Biometanización y Compostaje de la fracción Biodegradable de los Residuos Sólidos Urbanos situada en el término municipal de Pinto.

El Diccionario de la real Academia de la lengua define residuos como *1. m. Parte o porción que queda de un todo. 2. m. Aquello que resulta de la descomposición o destrucción de algo. 3. m. Material que queda como inservible después de haber realizado un trabajo u operación. U. m. en pl.*

Residuo es, a nuestros efectos, cualquier material o producto que, adquirido por un individuo, deja de tener utilidad para él y del que desea deshacerse, sin que en esta operación obtenga rendimiento económico.

La definición de subproducto es *1. m. En cualquier operación, producto que en ella se obtiene además del principal. Suele ser de menor valor que éste.*



Es decir, en el caso de que el material o producto innecesario le reporte un ingreso, se considera subproducto, dado que no procede de su actividad económica habitual.

El ciudadano desea perder la propiedad sobre estos materiales o productos, puesto que no aportan nada de interés para él. Desea que los residuos desaparezcan de su entorno más cercano.

Éste es el origen del problema. El ciudadano adquiere en el mercado los productos y bienes que desea y, tras haber satisfecho sus necesidades (básicas o superfluas), se deshace de todo o parte de ellos sin pretender obtener, en esta operación, ingreso alguno, y estando dispuesto a pagar por el servicio.

Los residuos, que para cada ciudadano individual no tienen valor, en cantidades grandes y con las instalaciones adecuadas, pueden aportar productos (en el sentido amplio de la palabra) a la sociedad y a la industria.

Es desde este punto de vista desde el que se establecen las prioridades de las actuaciones en materia de residuos: reducir, reutilizar, reciclar, valorizar y verter.

Tanto reducir como reutilizar pueden llevarse a cabo por los agentes comerciales y los ciudadanos a nivel individual, planteando un sistema de comercialización y compra guiado por los principios de sostenibilidad medioambiental. Corresponde a los gestores públicos potenciar el reciclado, para lo que se desarrolló en España la Ley 11/1997 de Envases y Residuos de Envases, con el fin de separar, desde el origen de la generación de residuos, los envases del resto de los residuos domiciliarios. El siguiente paso, derivado del primero, es el correspondiente al tratamiento del resto de los residuos urbanos.

Éstos están constituidos por aquellos materiales de los que se deshace el ciudadano y que no ha separado voluntariamente en los contenedores de papel y cartón, vidrio o envases, por lo que existen discrepancias en la distribución de los flujos entre los productos puestos en el mercado y los residuos recogidos.

Por esto, instalaciones de tratamiento de residuos deben plantearse con posibilidades de separación y acondicionamiento de las

cargas, con el fin de permitir un correcto tratamiento de cada fracción.

Se pretende dar una idea lo más concreta posible de las actividades que, en relación con el tratamiento de los residuos, se llevan a cabo en la Planta de Biometanización y Compostaje de Residuos Sólidos Urbanos de Pinto, propiedad de Gedesma, instalación que se puso en marcha a mediados de año 2003 y que está siendo permanentemente modificada para conseguir los resultados más óptimos en la clasificación y valorización de residuos.

2. Generalidades

La Planta de Biometanización y Compostaje de Pinto recibe los residuos del contenedor de orgánicos y restos de los municipios de la zona sur de la Comunidad de Madrid. Fue inaugurada en el año 2003 y constituyó la primera gran infraestructura para el tratamiento y recuperación de la materia orgánica que se puso en marcha en la región. Tiene una capacidad nominal de tratamiento de 140.000 toneladas anuales y produce fundamentalmente energía eléctrica (del orden de 117.730 MWh anuales), compost (del orden de 19.500 toneladas anuales) y materiales reciclables (del orden de 8.500 toneladas anuales).

La cercanía con el Vertedero Sanitariamente Controlado de Pinto permite extraer el biogás de las celdas selladas del mismo y su aprovechamiento en la Planta junto con el producido en el proceso de biometanización.

La construcción de la Planta necesitó una inversión del orden de 45.500.000 €, de los cuales un 80% fueron cofinanciados por la Unión Europea a través de los Fondos de Cohesión, que contribuyen a reducir las disparidades sociales y económicas entre los ciudadanos de la Unión.

Desde su puesta en marcha, se han acometido diferentes mejoras en sus procesos productivos, como han sido la instalación de un desareador en el proceso húmedo de la fracción orgánica (con una inversión de 317.100 €, de los que el 80% fueron cofinanciados por la Unión Europea a través de los Fondos de Cohesión) o la automatización de la separación de envases de la fracción seca (con una inversión superior a los 2.500.000 €, de los que el 50% fueron cofinanciados por la Unión Europea de través de los Fondos FEDER).





Foto 6.1. Vista aérea de la Planta de Biometanización y Compostaje de Pinto.

Por otra parte, y con el fin de mejorar la eficiencia energética de la instalación, también se ha llevado a cabo un proyecto de recuperación del calor residual de los gases de escape de los motores de combustión mediante un ciclo combinado compuesto de caldera, economizador y turbina de vapor (con una inversión de 2.400.000 €, de los que el 80% fueron cofinanciados por la Unión Europea a través de los Fondos de Cohesión). En la chimenea de este conjunto se ha instalado un Sistema Automático de Medida que permite controlar de forma continua la emisión de gases a la atmósfera (con una inversión de 150.000 €, de los que el 80% fueron cofinanciados por la Unión Europea a través de los Fondos de Cohesión).

Además, como consecuencia de la política de utilización de energías renovables en las instalaciones de tratamiento de residuos de la Comunidad de Madrid, Gedesma ha llevado a cabo, en dos fases, la instalación de paneles fotovoltaicos en las cubiertas de la Planta. En total, la potencia instalada es de 590 kWp, correspondiendo 100 kWp a la primera fase y 490 kWp a la segunda (la inversión conjunta ha sido de 3.900.000 €, de los que el 50% fueron cofinanciados por la Unión Europea de través de los Fondos FEDER).

3. Proceso de tratamiento de residuos

La instalación de tratamiento de residuos está constituida por cuatro entidades productivas que, partiendo del residuo recogido tal y como es depositado en los contenedores, permiten alcanzar los objetivos previstos. Estas cuatro entidades productivas, desarrolladas tras la fase de alimentación y acondicionamiento, que, de forma preliminar, permite dividir los flujos en fracciones manipulables, retirando los objetos voluminosos o «monstruos» que acompañan al residuo de entrada, son, en su orden lógico de cabecera a cola de proceso, las siguientes:

- **Tratamiento de la materia seca**, definida ésta como el conjunto de aquellos materiales que no son directamente biodegradables.
- **Tratamiento de la materia húmeda**, definida ésta como el conjunto de aquellos materiales que son biodegradables.
- **Biodigestión y producción eléctrica**, que constituye el resultado de las operaciones de tratamiento y digestión anaerobia de la materia húmeda, incluyendo la generación de energía a partir del biogás extraído del Vertedero Sanitariamente Controlado anejo.
- **Compostaje**, que es la operación de cierre del ciclo de la materia húmeda, con la utilización del digestato obtenido de la biodigestión y residuos vegetales procedentes de las operaciones de poda y jardinería.

De este modo, el conjunto de materiales depositados como residuo por el ciudadano, tras los procesos de separación y tratamiento, se transforman en productos valorizables que pueden ser puestos en el mercado.

3.1. Alimentación y acondicionamiento de la carga

La instalación recibe los residuos recogidos de los contenedores a pie de calle que son transportados, bien directamente por los camiones recolectores municipales, bien mediante la utilización de las estaciones y camiones de transferencia de la Comunidad de Madrid, en los fosos de entrada. Con el concurso de dos puentes-grúa dotados de pulpo se alimentan las dos líneas de las que está dotada la instalación, que transportan el residuo hasta la cabina de clasificación o





triado en la que, de forma manual, se procede a la retirada de aquellos materiales que, por su volumen excesivo, provocarían problemas aguas abajo en el proceso, el cual desde la alimentación se convierte en un proceso continuo.

La clasificación de materiales voluminosos se realiza no sólo con criterios de estabilidad del proceso productivo posterior, sino también con criterios de objetivo final de la instalación, separando por fracciones los productos que, independientemente de su volumen, tienen un valor objetivo en el mercado (cartón, plásticos por tipos, metales) y que son depositados por gravedad en ubicaciones preparadas al efecto. Es particular la separación de cartón, puesto que es directamente enviado a una prensa que permite la preparación del cartón para expediciones.

La segunda de las fases del acondicionamiento de la carga es la separación volumétrica o granulométrica que, con la utilización de una criba rotativa por línea, dotada de cuchillas o «pinchos» para realizar un desgarrar de las bolsas que contienen la basura, discrimina los elementos de diámetro menor de 80 mm de los de diámetro mayor de 80 mm. Esta granulometría de 80 mm ha sido seleccionada tras un estudio experimental, que permite confirmar que la mayor parte de los materiales biodegradables deseados para el proceso de biodigestión tienen una dimensión inferior a 80 mm.



Foto 6.2. Cribas rotativas.

En consecuencia, tras la retirada de materiales voluminosos y la separación en fracciones de granulometría mayor y menor de 80 mm, el residuo de entrada se convierte en dos fracciones identificables que se denominan materia seca (granulometría mayor de 80 mm) y materia húmeda (granulometría menor de 80 mm).

3.2. Tratamiento de la materia seca

Los gruesos obtenidos de la separación granulométrica anterior, de dimensiones superiores a 80 mm, exentos de «monstruos», están mayoritariamente constituidos por elementos celulósicos, poliméricos o metálicos, acompañados de algunos de características indeterminadas, que se corresponden con las infinitas posibilidades de materiales con los que se fabrican productos para el consumo.

Dado que el objeto de esta fase del proceso es clasificar el máximo posible de elementos, es necesario potenciar el desgrano de los productos contenidos en las bolsas, para lo que se ha dotado a cada línea de un equipo abridor de bolsas, que garantiza la apertura y el desgrano de más del 97% de ellas. Este elemento es fundamental para permitir el funcionamiento del equipo que les sigue aguas abajo.

El separador geométrico, o separador balístico, permite discriminar los elementos por su geometría, presentando en flujos separados los elementos planos de los que tienen volumen, que se denominan rodantes. De este modo, se eliminan de uno de los flujos los materiales que tienen volumen (por ejemplo, botellas o botes) de los que son planos (por ejemplo, papel o las propias bolsas utilizadas para tirar la basura).

El flujo de materiales que denominamos rodantes, mayoritariamente envases, se entregan, con el concurso de cintas transportadoras, previo paso por una mesa vibratoria y un aspirador de livianos, a un sistema de clasificación automática compuesto por cuatro separadores ópticos en cascada que permiten clasificar, de forma independiente, los celulósicos, cartonajes compuestos (conocidos como cartonajes de bebidas o briks) y cartón, y los polímeros, Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Tereftalato de Polietileno (PET) y Polipropileno (PP).



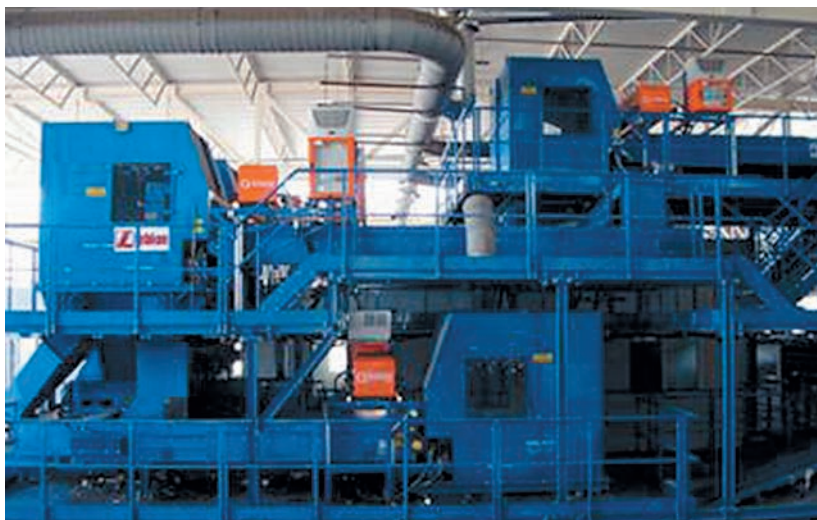


Foto 6.3. Separación automática.

El resto de productos no clasificados, procedentes del flujo de rodantes tras el paso por una cabina de clasificación donde se realiza un control de calidad, se someten a la acción de un electroimán con *overband* que retira los materiales ferromagnéticos (latas de bebidas y conservas) y separando posteriormente los elementos metálicos no ferromagnéticos (latas de bebidas y conservas de aluminio).

El flujo de materiales denominados planos, se separan manualmente mediante cintas transportadoras en la cabina de clasificación principal, donde se separan elementos celulósicos (cartón por un lado, cartónaje compuesto por otro), poliméricos (Polietileno de Alta Densidad, PEAD; Polietileno de Baja Densidad, PEBD; Tereftalato de Polietileno, PET), entregando el resto a la separación de metales antes descrita.

El conjunto de materiales no clasificados procedentes tanto del flujo de rodantes como del flujo de planos, se denomina rechazo de proceso y se prepara para entregarse al Vertedero de cola de la instalación.

3.3. Tratamiento de la materia húmeda

Los materiales separados, de diámetro menor a 80 mm, tras el paso del flujo de vena de residuo por las cribas rotativas granulométricas, son transportados, con el concurso de cintas transportadoras, a equipos de separación de metales, constituidos secuencialmente por electroimanes dotados de *overband* para la separación de materiales ferromagnéticos y corrientes inducidas o parásitas de Foucault para la retirada de elementos metálicos no ferromagnéticos (prácticamente en exclusiva aluminio).



Foto 6.4. Separación de metales.

Una vez retirados los elementos metálicos, el resto de residuos son transportados a la zona de mezclado y adecuación de la materia orgánica, con lo que se inicia el proceso de hidrólisis del residuo húmedo. La tecnología de biometanización adoptada en la Planta es en vía húmeda. Con el fin de optimizar el proceso se dispone de un foso pulmón para mantener la alimentación a esta fase de forma homogénea.

El residuo de diámetro menor de 80 mm exento de metales es introducido en púlpers (dos unidades) donde se mezcla con agua para proceder al desfibrado y desagregado. Una vez conseguida la dilución en la que se encuentran, además del agua y la materia orgánica, algunos componentes no orgánicos (pequeños plásticos, papeles y áridos), se hace pasar por una criba de doble malla para la retirada de los materiales impropios no áridos y por un sistema de desarenado que permite decantar los materiales inertes. El coloide se deposita en una balsa de maceración en la que se homogeneiza el material durante un período de 24 horas, con el fin de mejorar los procesos hidrolíticos que se llevan a cabo posteriormente.



Foto 6.5. Púlpers.

3.4. Biodigestión y producción eléctrica

Una vez realizada la operación de homogenización en las balsas de hidrólisis, el coloide se envía a los tanques de digestión de 6.500 metros cúbicos cada uno, donde se desarrolla la fermentación anaerobia de los compuestos biodegradables, extrayendo, en los 21 días de residencia, la práctica totalidad de los compuestos orgánicos volátiles de la materia orgánica. La agitación de la masa para permitir el proceso de biodigestión, se realiza mediante el concurso de parte del biogás generado que se introduce, a presión, por la zona superior y se conduce por una tubería vertical interior provocando una agitación que permite mantener activa la totalidad de la masa.

Con los dos digestores de los que se dispone es posible tratar hasta 73.000 toneladas anuales de residuo orgánico en entrada, obteniéndose, en los 21 días de residencia, una media de 80 metros cúbicos de biogás por tonelada de materia orgánica en cabecera del proceso.



Foto 6.6. Digestores.

El sustrato sólido, denominado digestato, va decantando en la zona inferior de los digestores y se extrae por medio de bombas de semisólidos, transportándose a un depósito intermedio que regula las actuaciones posteriores sobre este producto.

Este biogás obtenido sintéticamente se transporta al área de generación eléctrica tras los procesos de filtración y enfriamiento necesarios, existiendo un gasómetro para la regulación de las entradas, dado que la Planta, además, realiza las actividades de desgasificación del vertedero sanitariamente controlado anejo, del que se extrae biogás «natural» desde los pozos preparados al efecto con redes de aspiración desde las soplantes de la planta tras su paso por las estaciones de regulación y medida.

Un vertedero en desgasificación se comporta como un campo de gas en el que se van analizando las características del biogás extraído en cada zona para determinar cuál es la mezcla más adecuada para la apropiada explotación de los equipos de producción eléctrica.

La generación de energía se realiza quemando esta mezcla en motores de cogeneración. La Planta dispone de 11 unidades de 1.413 kWe



cada una, pudiendo generar 117,73 GWh/año de energía eléctrica que se utiliza tanto para la alimentación de la instalación como para su entrega a la red.



Foto 6.7. Sala de motores.

Tras algunos años de funcionamiento de la instalación, se realizó el estudio de temperaturas y caudales de los humos de escape cuyo resultado ha sido la incorporación de un sistema de aprovechamiento del calor residual de los gases de escape mediante una caldera y una turbina de vapor de 1.019 kWe de potencia, que permite producir hasta 7 GWh/año adicionales. De este modo, se consigue mejorar el rendimiento energético de la instalación de generación eléctrica a partir de biogás.



Foto 6.8. Vista general.

3.5. Compostaje

El digestato, sustrato sólido obtenido de los digestores tras la retirada de los compuestos orgánicos volátiles que contiene la materia orgánica y que se extrae hasta un depósito intermedio, contiene, aproxima-





damente, un 90% de agua. Para poder realizar de forma adecuada un proceso de fermentación aerobia, es necesario reducir el porcentaje de humedad.

Para ello, se transporta mediante tuberías hasta una batería de dos centrífugas que rebajan el porcentaje de humedad hasta el 75%.

El proceso de compostaje, que comienza con una fermentación aerobia en túneles, necesita que la masa sea esponjosa, es decir, que al introducir aire en el reactor no se generen canales preferenciales de aireación, lo que provocaría secados excesivos en algunas zonas y podredumbre en otras, haciendo la inhibición del proceso biológico. Para ello, es necesario introducir en el proceso un material que permita que el digestato se esponje, material que se denomina estructurante.

Este estructurante, teniendo en cuenta los objetivos de la planta (el tratamiento de residuos) y del proceso (obtención de sustrato vegetal o compost), se selecciona con los mejores criterios de utilidad, determinándose que es muy adecuado el residuo vegetal procedente de las operaciones de poda y jardinería, desfibrado, lo que, además de esponjar la masa de digestato, permite la incorporación de nutrientes al producto final.

Por lo tanto, se añade al digestato el resto de poda desfibrada como estructurante y la mezcla se introduce en los túneles de fermentación forzada. El proceso, que tiene una duración de 14 días, estabiliza la materia orgánica, y en los doce túneles de fermentación de los que está dotada la Planta, se controlan permanentemente los parámetros físico-químicos de la mezcla.

Una vez transcurrido el período de dos semanas y alcanzados los parámetros deseados, se extrae el material de los túneles y se almacena para su maduración como paso previo a las operaciones de afino que permiten obtener un producto con la textura y la granulometría adecuada para su utilización como enmienda vegetal del terreno. El afino es un proceso que somete al producto a sucesivos cribados granulométricos y a una separación densimétrica.



Foto 6.9. Área de afino.



El material retirado en los cribados, de granulometría alta, se recircula como estructurante para procesos de fermentación posteriores.

4. Calidad y medio ambiente

La Planta de Biometanización y Compostaje de Residuos Sólidos Urbanos de Pinto dispone de Autorización Ambiental Integrada y, en consecuencia, está sometida a rigurosos controles que aseguran los mínimos efectos de su actividad sobre el entorno.

4.1. Depuración de aguas

Las aguas residuales se tratan en una planta con capacidad para 45.000 metros cúbicos anuales. Se someten, en primer lugar, a un proceso biológico de nitrificación-desnitrificación con ultrafiltración y, a continuación, a un tratamiento terciario de ósmosis inversa. El agua así depurada se reutiliza en el proceso, alcanzando el objetivo de vertido cero.

4.2. Control atmosférico

Para asegurar que los gases de combustión que se emiten a la atmósfera no superan los límites establecidos en su Autorización Ambiental



Guía de valorización energética de residuos

Integrada, la Planta cuenta con un Sistema Automático de Medida en continuo que transmite los datos de emisiones a la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio. Además, periódicamente se realizan medidas de inmisiones, ruidos, olores y composición de los gases extraídos del vertedero, entre otros.

Por otra parte, la nave de proceso y los túneles de compostaje disponen de sistemas de extracción del aire con depuración posterior en biofiltros, con el fin de tratar los olores.

4.3. Laboratorio

La planta dispone de un laboratorio equipado para la realización de los análisis tanto de los residuos de entrada como de los productos obtenidos, así como para el control de los parámetros de los procesos.



Foto 6.10. Laboratorio.

4.4. Educación ambiental y visitas

Se ubica dentro de las instalaciones de la Planta un aula de 800 metros cuadrados con diversos recursos que permiten dar una visión del

tratamiento integral de los residuos que se llevan a cabo en la Comunidad de Madrid, recibiendo más de 10.000 visitantes, escolares y universitarios, cada año.

Este aula forma parte de la oferta educativa de la Red de Centros de Información Ambiental de la Comunidad de Madrid, de la que forman parte además otras instalaciones de tratamiento de residuos (Vertedero Sanitariamente Controlado de Alcalá de Henares, Vertedero Sanitariamente Controlado de Colmenar Viejo, Estación de Transferencia y Punto Limpio de Collado Villalba, propiedades de la Comunidad de Madrid; y Planta de Compostaje de Villanueva de la Cañada, Planta de Clasificación de Envases de Pinto, Complejo de Tratamiento Integral de Residuos de Construcción y Demolición de Navalcarnero, Centro de Clasificación y Transferencia de Residuos de Construcción y Demolición de Moralzarzal, propiedades de Ledesma; además de la planta de Tratamiento de Electrodomésticos de Línea Blanca de Vicálvaro, de iniciativa privada).



Foto 6.11. Aula de educación ambiental.

5. Conclusiones

La Planta de Biometanización y Compostaje de Residuos Sólidos Urbanos de Pinto es una instalación en permanente mejora.



Guía de valorización energética de residuos

Gedesma, como empresa pública, está permanentemente en contacto con las necesidades de tratamiento de residuos, cumpliendo con los objetivos establecidos por la Legislación vigente, pero intentando aplicar las mejores técnicas disponibles para la minimización de las cantidades de residuos destinadas a depósito definitivo.

La biometanización no es, ni mucho menos, la única de las soluciones para los residuos. Es, sin embargo, la experiencia que podemos compartir, que, como se ha expuesto, recicla materiales para nuevos ciclos productivos y valoriza los gases combustibles que se producen por la biodegradación de la materia orgánica.

La Planta se puede visitar y están todos invitados a venir a verla.