José Coca Prados

Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos [**RSU**] en una **economía circular y sostenible**

Editorial Universidad de Huelva
EUHU

Operar en forma sostenible será crucial
no solo para el éxito en el siglo XXI
sino también para la supervivencia.

Niall Fitzgerald, 1998

Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos [**RSU**] en una **economía circular y sostenible**

José Coca Prados

Prof. Emérito de Ingeniería Química, Univ. de Oviedo
Prof. del Máster de Tecnología Ambiental, Univ. de Huelva

Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos [**RSU**] en una **economía circular y sostenible**

José Coca Prados

Editorial Universidad de Huelva
EUHU

EUHU

Colección
Alonso Barba
24

Primera edición: junio 2025

© Editorial Universidad de Huelva

© José Coca Prados

I.S.B.N. (Papel): 978-84-17288-92-1
EI.S.B.N. (PDF): 978-84-17288-93-8

Depósito legal: H 278-2025

Diseño, maquetación y ebook: Art&maña Publicitaria

Papel
Offset industrial ahuesado de 90 g/m².
Impreso en papel de bosque certificado.

Encuadernación
Rústica, encolado PUR.

Printed in Spain. Impreso en España.

Para citar esta publicación, use la siguiente referencia:
Coca Prados, José. *Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos [RSU] en una economía sostenible y circular*. Editorial Universidad de Huelva, 2025.

La presente publicación ha sido financiada por la Cátedra Atlantic Copper. Universidad de Huelva.

Editorial Universidad de Huelva es miembro de la Unión de Editoriales Universitarias Españolas UNE.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons **BY-NC-SA** Atribución-NoComercial-CompartirIgual.

Editorial Universidad de Huelva
Campus de El Carmen . Edif. Marie Curie
Avda. Tres de Marzo, s/n – 21071 Huelva
t. 959 21 93 27. publicaciones@editorial.uhu.es
www.uhu.es/editorial

Libro bajo licencia Creative Commons

Cita el libro

Comparte por redes sociales

Navegación por marcadores e hipervínculos

Prólogo 13

01 DESARROLLO SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR 17

1.1. Introducción 19
1.2. Desarrollo sostenible 20
1.3. Economía lineal y circular 23
1.4. Energía y cambio climático 26
1.5. Fuentes de contaminación 28
1.6. Fuentes y consumo de energía 30
1.6.1. La biomasa como fuente energética 31
1.6.2. Los RSU como fuente energética 33
1.7. Sociedad, industria y desarrollo sostenible 34
1.8. Bibliografía 36

02 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) 37

2.1. Introducción 39
2.2. Generación de RSU en España en el contexto de la UE 42
2.3. Lodos de depuradora 46
2.3.1. Métodos más empleados en el tratamiento de lodos 48
2.4. Generación de RSU en Andalucía y Huelva 50
2.5. Consumo de energía y generación de GEI en la gestión de RSU 56
2.6. Bibliografía 56

03 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RSU 59

3.1. Introducción 61
3.2. Pretratamiento de los RSU 63
3.3. Tratamiento biológico 65
3.3.1. Combustibles sólidos recuperados (CSR) y derivados de residuos (CDR) 68
3.4. Valorización energética de los RSU 70
3.4.1. Incineración 70
3.4.2. Pirólisis 72
3.4.3. Gasificación 74
3.4.4. Plasma térmico 78
3.5. Bibliografía 81

04 VALORIZACIÓN TÉRMICA DE RSU MEDIANTE INCINERACIÓN *(WtE)* 83

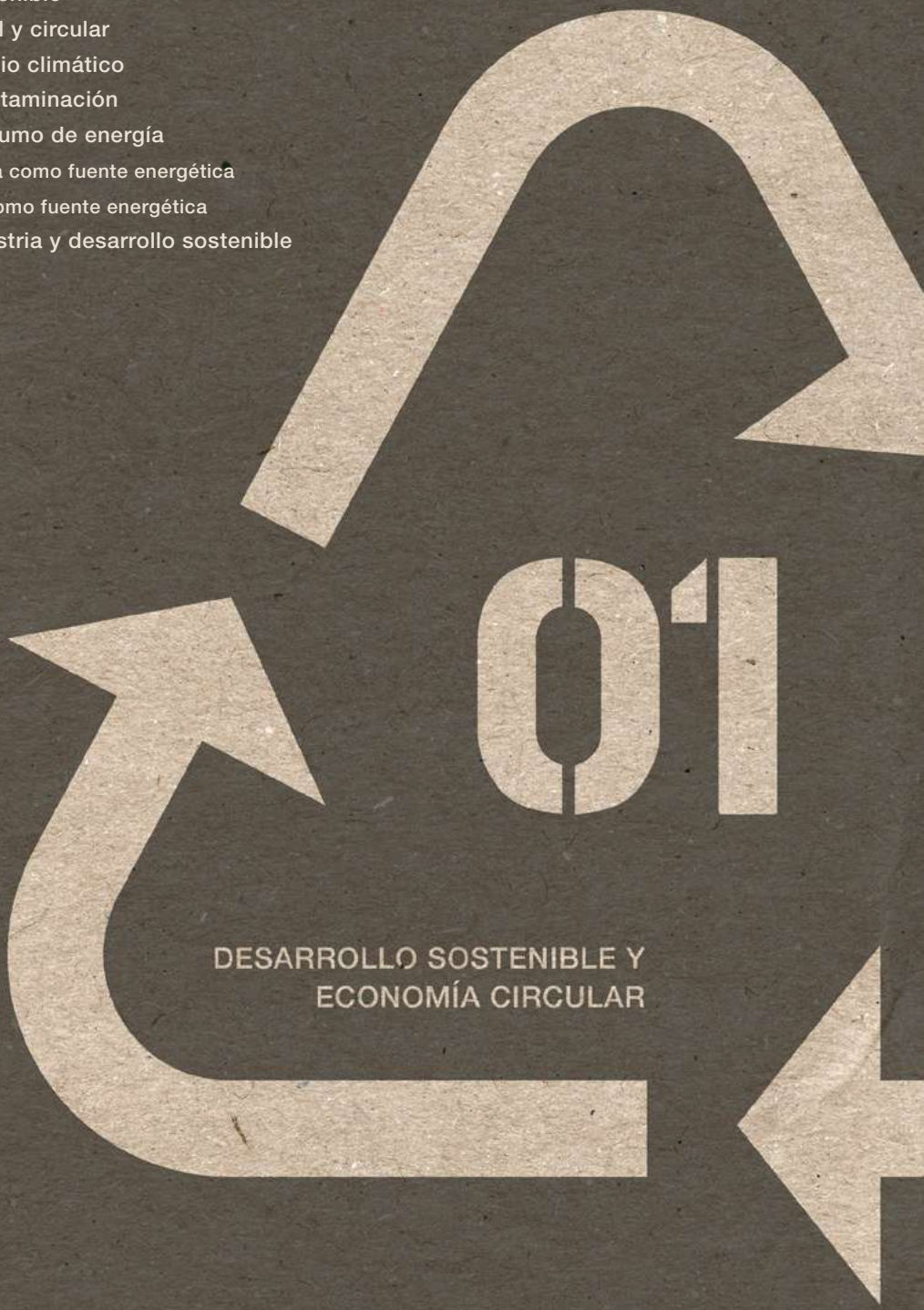
4.1. Introducción 85
4.2. Energía a partir de la incineración de RSU 85
4.3. Elementos de una incineradora 87
4.4. Etapas en el diseño de incineradoras 92
4.5. Tratamiento de efluentes 93
4.5.1. Separación de partículas 94
4.5.2. Separación de gases ácidos 97
4.5.3. Separación de óxidos de nitrógeno (NO_x) 100
4.5.4. Separación de metales 103
4.5.5. Productos de combustión incompleta 104
4.6. Escorias y cenizas volantes 105
4.6.1. Tratamientos de escorias 107
4.6.2. Tratamiento de cenizas volantes 109
4.6.3. Aplicaciones de las escorias 110
4.6.4. Aplicaciones de las cenizas volantes 111
4.7. Bibliografía 112

05 FACTORES ECONÓMICOS Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA 113

5.1. Introducción 115
5.2. Factores económicos en la *WtE* 117
5.2.1. Costes del procesado de RSU 119
5.2.2. Costes de la incineración y otros procedimientos de eliminación de RSU 121
5.2.3. Optimización de la recogida selectiva 126
5.3. Eficacia energética: Factor R1 126
5.4. Análisis del ciclo de vida (LCA) y de las tres R's 128
5.4.1. Reciclaje de plásticos 128
5.5. Futuro de la *WtE* 130
5.6. Localización de una planta de *WtE* 133
5.7. Bibliografía 134

06 SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES 135

1.1. Introducción
1.2. Desarrollo sostenible
1.3. Economía lineal y circular
1.4. Energía y cambio climático
1.5. Fuentes de contaminación
1.6. Fuentes y consumo de energía
1.6.1. La biomasa como fuente energética
1.6.2. Los RSU como fuente energética
1.7. Sociedad, industria y desarrollo sostenible
1.8. Bibliografía



01

DESARROLLO SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR

Prólogo

Durante muchos años se ha considerado a la industria como un elemento perturbador e incompatible con un medio ambiente saludable. Sin embargo, los ciudadanos siempre han tratado de beneficiarse de los productos industriales que se fabrican y que tanto han contribuido, a lo largo del siglo XX y lo transcurrido del XXI, al progreso y bienestar de la humanidad. Las sociedades industriales modernas, con economías de libre mercado, han sido siempre el foco de atracción de los países menos desarrollados, lo que ha originado permanentes flujos migratorios. Estos movimientos migratorios, junto a los desplazamientos de la población rural a las grandes urbes, han dado lugar a grandes concentraciones humanas.

Las sociedades urbanas son consumidoras de ingentes cantidades de productos industriales, agrícolas y ganaderos, generando cantidades, en constante aumento, de residuos sólidos urbanos (RSU), que han de eliminarse mediante técnicas apropiadas con el menor impacto ambiental. Hasta hace no muchos años el método más utilizado para eliminar los RSU era el vertedero, en alguna de sus variantes, y sigue siendo el método principal en los países pobres y con escaso desarrollo. Sin embargo, el vertedero es una fuente de infecciones, malos olores, en el que se generan gases de efecto invernadero, se producen lixiviados que contaminan las aguas subterráneas y a la vez inutilizan grandes extensiones de terreno disponible, destruyéndose áreas forestales y valles de una gran diversidad en flora y fauna. Los vertederos se han prohibido ya en muchos países de la Unión Europea desde el año 1999, y se aceptan temporalmente algunas de sus variantes en países del sur de Europa, que no han implementado técnicas de valorización de RSU, pero que en un próximo futuro tendrán que ser cancelados o bien los países que los mantengan tendrán que resignarse a formar parte de los países subdesarrollados.

El presente trabajo tiene un carácter científico/técnico, con el propósito de servir para la divulgación y formación en el desarrollo sostenible, la economía circular y en las técnicas

modernas de tratamiento de RSU. Hasta hace solo unas décadas los procesos térmicos de tratamiento de RSU han estado socialmente cargados de prejuicios derivados, con una visión "simplista" y errónea, del estado de estas técnicas hace más de medio siglo. Hoy en día puede afirmarse que los procesos de valorización térmica de residuos son la solución para la destrucción de RSU y residuos industriales que no pueden reciclarse. Son procesos limpios muy controlados, respetuosos con el medio ambiente, y no son una fuente de contaminantes gaseosos, que pudieron generar las primitivas instalaciones. Los estudios realizados en las últimas décadas han demostrado que los efectos potenciales para la salud de los que trabajan en una planta de incineración o viven cerca de la misma son mínimos e incluso no detectables.

Este trabajo se ha dividido en cinco capítulos en los que se incluyen conceptos básicos, aspectos prácticos y las nuevas tecnologías para el tratamiento de los RSU. En algunos de ellos pueden reiterarse conceptos o términos ya expuestos en capítulos previos, con el fin de que el lector pueda realizar su lectura de forma independiente. El contenido de los capítulos es el siguiente:

Capítulo 1. *Desarrollo sostenible y economía circular.* Se indican los conceptos básicos del desarrollo sostenible y economía circular, así como las fuentes de energía y tipos de contaminación que contribuyen al cambio climático. Se comentan algunos aspectos de la interacción sociedad-industria-desarrollo sostenible, que son vitales para un desarrollo industrial aceptable.

Capítulo 2. *Residuos sólidos urbanos (RSU).* Se trata de la generación de RSU en España, comparativamente a los generados en la UE, incluidos los lodos de depuradora. Se presta especial atención a los RSU que se generan en Andalucía, y en Huelva en particular.

Capítulo 3. *Sistemas de tratamiento de RSU.* Se incluyen los métodos de pretratamiento de RSU con el fin de acondicionarlos para su eliminación en vertedero, o bien obtener combustibles sólidos que pueden emplearse en diversas industrias. Se hace una introducción a los distintos métodos de valorización energética y sus posibles aplicaciones.

Capítulo 4. *Valorización térmica de RSU mediante incineración (Waste to Energy, WtE).* En ese capítulo se estudia con mayor detalle, pero de forma asequible para el lector con cierta formación técnica, los elementos de que consta una incineradora, las etapas en su diseño y el tratamiento de efluentes. Se hace una breve descripción de los residuos sólidos que se generan en la incineración (escorias y cenizas volantes), así como sus posibles aplicaciones.

Capítulo 5. *Factores económicos y localización de la planta.* En este último capítulo se indican algunos costes estimados de la incineración y otros métodos de eliminación de RSU. Se menciona el importante factor de eficacia energética R1 y se trata brevemente en qué consiste el análisis del ciclo de vida (LCA), el futuro de la *WtE* y los factores a tener en cuenta en la localización de una planta.

El objetivo primordial de este libro es que pueda servir de introducción a estudiantes universitarios de diversas disciplinas y particularmente a aquéllos que cursan en la Universidad de Huelva el Máster de Tecnología Ambiental. Además, para concienciar a los profesionales de la industria, a los gestores de la administración y a los legisladores, que existen tratamientos de los RSU más respetuosos con el medio ambiente que los obsoletos vertederos. Con el fin de potenciar el camino hacia una economía circular y sostenible en Europa, han de tenerse en cuenta los factores que aquí se exponen, para formar a los ciudadanos en estos temas, y evitar así que pueda llegarse a una insostenibilidad socioeconómica.

El autor desea agradecer al Dr. Miguel Ángel Suárez por su fructífera colaboración, al Prof. José Manuel Benito (Universidad de Burgos) por su colaboración en la elaboración de este libro, al Prof. Sebastián Francisco López Baldovín (Universidad de Huelva) por su apoyo en la edición del mismo, y al Dr. José Benito de la Morena por facilitar información sobre residuos generados en Huelva a través de las empresas: DITECSA, España e Hijos, RECILEC y Planta de VILLARRASA.

El autor

RESUMEN/ SUMMARY

Resumen

El propósito de este trabajo es el estudio del potencial de valorización de los residuos sólidos urbanos (RSU) como fuente energética en plantas de incineración. Se considera el aprovechamiento de los RSU en el contexto de un desarrollo sostenible y de economía circular. Además de los métodos de pretratamiento de los RSU, se describen brevemente las tecnologías de pirólisis, gasificación y plasma térmico, dedicándose un capítulo más extenso a la incineración, como técnica más empleada en la práctica. Se indican los métodos para el tratamiento de los efluentes procedentes de la incineración: partículas, gases y residuos sólidos (escorias y cenizas), así como las posibles aplicaciones de estos últimos. Se tratan brevemente los aspectos económicos en el tratamiento de RSU, así como los factores a tener en cuenta en la localización de una planta de incineración.

Summary

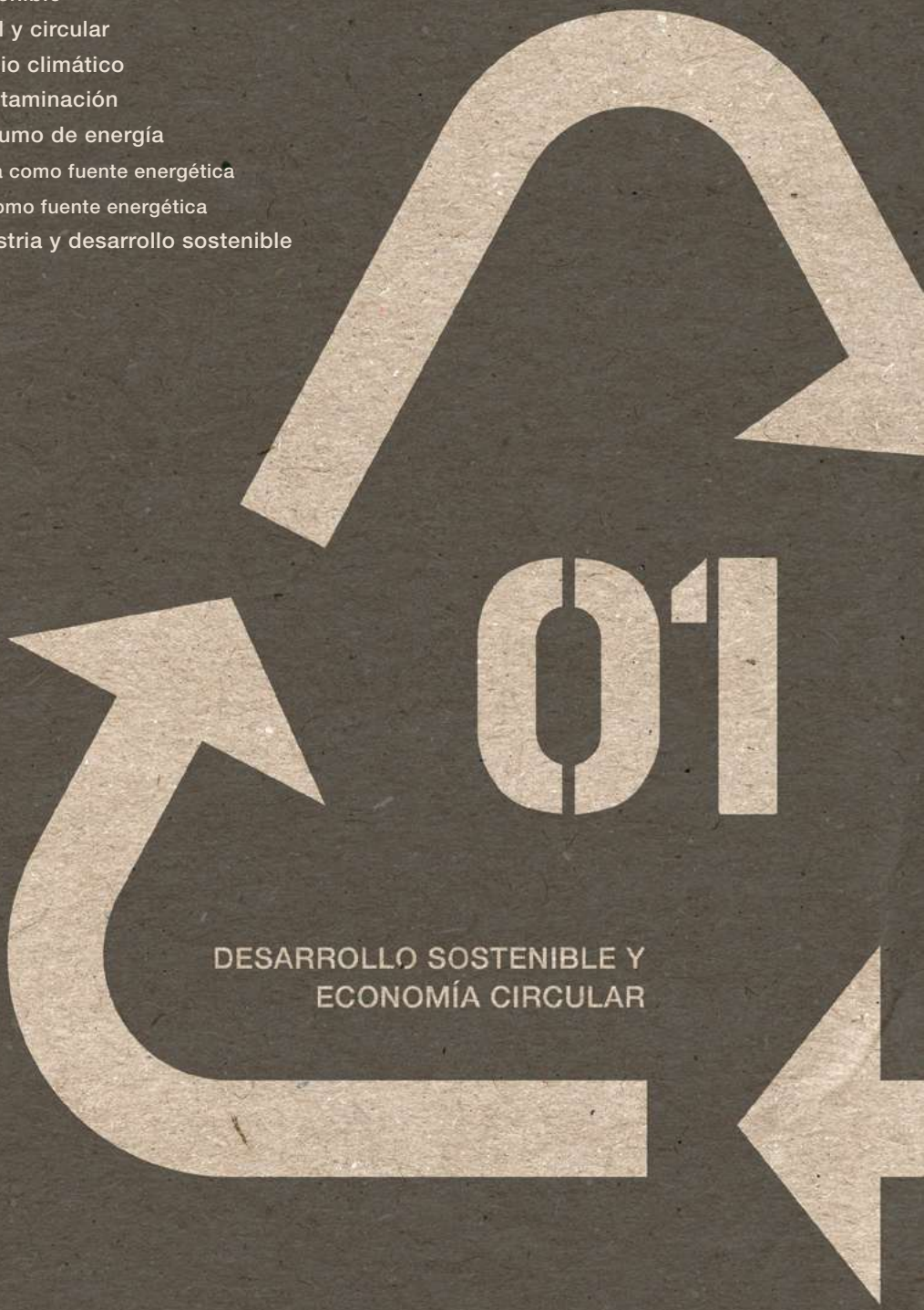
The purpose of this work is to study the potential for the valorization of municipal solid waste (MSW) as an energy source in incineration plants. The thermal valorization of MSW is considered in the context of sustainable development and circular economy. In addition to the MSW pretreatment methods, pyrolysis, gasification and thermal plasma technologies are briefly described, including a more detailed chapter on incineration, as the technique most used in practice. Methods for the treatment of effluents from incineration are described: particles, gases and solid wastes (slag and ash), as well as the possible applications of the latter. Economic considerations in the treatment of MSW are briefly discussed, as well as factors that should be taken into account when locating an incineration plant.

CAPÍTULO

01

DESARROLLO SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR

1.1. Introducción
1.2. Desarrollo sostenible
1.3. Economía lineal y circular
1.4. Energía y cambio climático
1.5. Fuentes de contaminación
1.6. Fuentes y consumo de energía
1.6.1. La biomasa como fuente energética
1.6.2. Los RSU como fuente energética
1.7. Sociedad, industria y desarrollo sostenible
1.8. Bibliografía



01

DESARROLLO SOSTENIBLE Y ECONOMÍA CIRCULAR

1.1. Introducción

A medida que aumenta la población del mundo es necesario disponer de mayores recursos materiales, con el consiguiente impacto sobre los recursos limitados del planeta como son los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), metales, bosques, etc., lo que puede conducir en algunos casos a su agotamiento. El proceso de agotar los recursos está en contra de la naturaleza y ha de existir un equilibrio entre oferta y demanda de los mismos. Si se extraen las materias primas y se destruyen después de usarlas, mientras la población sigue aumentando, se rompe el equilibrio. Más aún, el aumento de la población, la creciente urbanización, a veces invadiendo zonas forestales, y el aumento del nivel de vida tiene como consecuencia un aumento de la generación de residuos, entre los que se encuentran los *residuos sólidos urbanos* (RSU), si no se gestionan adecuadamente. Una gestión inadecuada de los residuos tiene un potencial impacto sobre la salud y el entorno, dando lugar a la contaminación del suelo y del agua, afectando a la calidad del aire y a una degradación de los hábitats y ecosistemas naturales [1].

La composición de los RSU es muy heterogénea: restos de comida, papel, plásticos, madera, metales, residuos de jardinería y construcción, etc., y depende del estilo de vida, nivel económico e incluso de la estación del año en el país o región que se considera. En los países de menor desarrollo y en otros en que por dificultades económicas, inercia en la toma de decisiones, o bien la oposición de determinados grupos a otras opciones, se ha optado por la solución de eliminar estos RSU en vertederos controlados o escombreras. Sin embargo, se sabe desde hace tiempo a partir de estudios científico-técnicos sobre los RSU que existen alternativas para los mismos, recuperando productos útiles y en función de su contenido calorífico realizar su valorización energética, obteniendo biogás mediante

una conversión biológica (digestión anaerobia), o bien energía eléctrica y calorífica a través de procesos como la incineración, y en menor grado con la pirólisis, gasificación y plasma térmico.

Hasta no hace muchos años, en la mayor parte de los países, el vertedero era la forma más común de eliminar los RSU. Sin embargo, debido a la saturación de los mismos, las dificultades de conseguir licencias para abrir nuevos vertederos (básicamente prohibidos en toda la UE desde 2020), los problemas que presentan de contaminación, peligros para la salud, olores y la generación de *gases de efecto invernadero* (GEI), como el metano (CH_4), han llevado a considerar otras opciones tecnológicas menos nocivas para el medio ambiente. En los países pertenecientes a la OCDE han disminuido los RSU eliminados por vertedero desde un 63% (en 1995) a un 41% (entre 2000-2022) [1]. En algunos países de la UE como Alemania, Bélgica, Dinamarca o Suecia prácticamente no existen vertederos, mientras que en España el depósito en vertedero alcanza el 60% de los RSU y en regiones como Andalucía puede superar el 85%. La *valorización energética* (*WtE*, *Waste to Energy*) mediante la incineración de todos los residuos no reciclables es la técnica más empleada en la práctica. Los RSU están formados en más de un 60% de restos de alimentos, residuos agrícolas y de jardinería, papel y cartón. Así pues, el combustible puede considerarse como una biomasa renovable, si el tratamiento térmico se realiza en condiciones adecuadas. Es por lo que la *WtE* se emplea para transformar los RSU en electricidad y/o calor en las plantas que funcionan en el mundo: unas 100 en Estados Unidos, más de 500 en Europa y unas 1600 en Asia. En países como Suecia entre el 20-25% de la calefacción urbana se obtiene a partir de la incineración de los RSU, generándose una energía equivalente a 1500 millones de litros de petróleo.

1.2. Desarrollo sostenible

El concepto de *desarrollo sostenible* ha sido objeto de diversas interpretaciones, pero básicamente consiste en mantener un sistema o proceso a lo largo del tiempo, de forma que éste sea viable desde el punto de vista económico, ecológico y social y que contribuya a un desarrollo armónico de la humanidad. Algunas de las definiciones e interpretaciones más conocidas se indican en el cuadro adjunto.

La variación de la población, consumo de recursos y energía aumenta drásticamente a lo largo de una generación (20-30 años), según se indica en la Tabla 1.1.

Concepto de desarrollo sostenible

"No heredamos la tierra de nuestros padres, la tomamos prestada de nuestros hijos".

Antoine de Saint-Exupéry **(1900-1944)**

Desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones.

Informe Dra. Gro Harlem Brundtland **(1987)** [2]

El desarrollo sostenible es según el informe de la FAO **(1995)**

- **Técnicamente adecuado**
  Ecológicamente no degradante
- **Económicamente viable**
  Socialmente favorable

TABLA 01-1 Variación de la población y consumo de recursos y energía durante la presente generación [2].

POBLACIÓN x 4
RECURSOS x 8
ENERGÍA x 10

Resulta evidente que el modo de vida en los países desarrollados no es sostenible y no podrá mantenerse en el futuro, de modo que las generaciones venideras tendrán que adaptarse a restricciones muy severas.

Prácticamente, todas las actividades que el hombre realiza en el planeta Tierra tienen implicaciones sobre el mismo. Los procesos agrícolas e industriales y el consumo de los productos generados dan lugar a RSU, residuos agrícolas e industriales, que han de ser tratados siguiendo los tres principios de la sostenibilidad: *medioambientales, económicos y sociales*.

Como ya se señala en el informe Brundtland [2], muchos de los países industrializados tienen problemas de contaminación del aire y del agua, agotamiento de las aguas subterráneas y la proliferación de residuos sólidos (RS), entre los que se encuentran los RSU, los residuos industriales y los residuos peligrosos. Desde el punto de vista energético las fuentes primarias de energía han estado basadas en combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Además, existen las fuentes de energías renovables (hidráulica, geotérmica, biomasa, eólica, solar, etc.) que, junto con la energía nuclear, han tenido un incremento muy notable en las últimas décadas. En algunos países desarrollados se ha llegado a cifras en que la producción de energía a partir de fuentes renovables es equivalente a la obtenida a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, a pesar del "*mix energético*" que se emplea actualmente, la continua dependencia de combustibles fósiles en la producción de electricidad, en automoción, y calefacciones domésticas, contribuye a problemas ya conocidos:

Efectos del cambio climático debido al efecto invernadero causado por los gases que se emiten a la atmósfera, principalmente el CO_2 y CH_4 procedente de los vertederos de RSU.

Aumento de la contaminación del aire en zonas urbanas.

Acidificación del medio ambiente, con notables perjuicios para la vegetación y aguas superficiales.

Además del cambo climático en las capas altas de la atmósfera, producido por emisiones de *gases de efecto invernadero* (GEI's), han de tenerse presentes aquellos compuestos químicos, como los hidrocarburos clorados y fluorados, que provocan daños en la capa de ozono de la estratosfera, debido a reacciones fotoquímicas, en las que se consume ozono.

La industria consume entre el 40-60% de la energía que se genera en los países desarrollados, por lo que se han puesto en práctica técnicas de combustión más eficaces mediante

las que han disminuido emisiones de gases como dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), que han permitido reducir la contaminación ambiental y los peligros para la salud.

La gestión de residuos sólidos (RS) tanto a nivel industrial como urbano se encuentra aún con múltiples problemas. A pesar del aumento en la reutilización y reciclaje de los residuos generados, es aún demasiado frecuente eliminar los residuos no reciclables (*fracción resto*) mediante vertederos, que como se ha indicado son una fuente de CH_4, con un efecto invernadero entre 23-28 veces mayor que el del CO_2. Además, la lluvia que penetra en el vertedero produce lixiviados tóxicos, que han de ser tratados adecuadamente, y que en ocasiones contaminan las aguas subterráneas. Los vertederos son además la causa de numerosos problemas sanitarios en las poblaciones cercanas, que a menudo viven en construcciones casi inhabitables e incluso en chabolas.

Todos estos factores han de tomarse en consideración para la implementación de las estrategias del desarrollo sostenible.

1.3. Economía lineal y circular

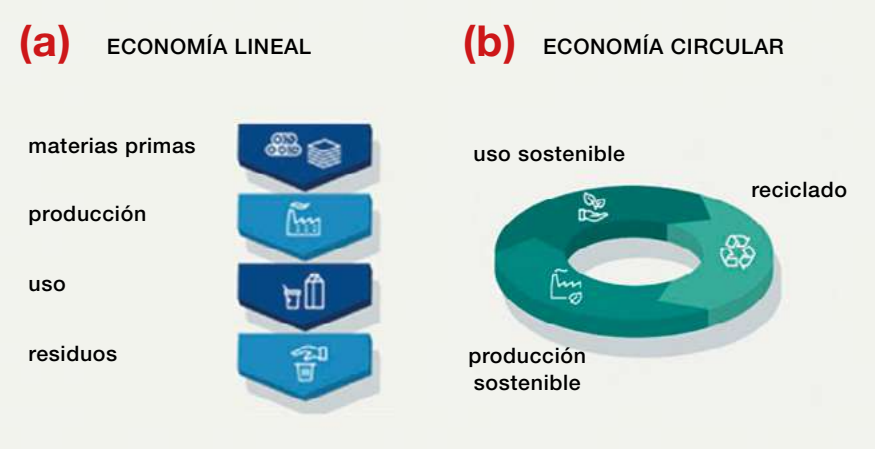
La sociedad actual ha seguido durante mucho tiempo el principio de *"usar y tirar"*, o de la *economía lineal*, según se indica en la Fig. 1.1 (a).

En la *economía lineal* (concepto introducido en la primera década de los años 2000), los productos se fabrican a partir de materias primas renovables o no, se utilizan o consumen, y finalmente los residuos se eliminan, generalmente en vertederos. Sin embargo, cuando estos residuos han crecido exponencialmente en el último siglo, los vertederos se han convertido en un grave problema debido al uso del suelo que queda inservible para otros fines, la generación de CH_4 (1 Mt), lixiviados (que han de tratarse adecuadamente) y ser un foco de roedores e insectos, con consecuencias imprevisibles para la salud.

En la *economía circular* se trata de minimizar el uso de los recursos, emisiones y el despilfarro de energía tratando de operar en ciclos de materiales y energéticos, Fig. 1.1 (b). El modelo de descarga cero implica poner en práctica las tres R's, es decir: *"reducir, reutilizar y reciclar"*. Esto implica que el modelo de extracción, fabricación, uso y eliminación, mediante incineración o vertederos, ha de sustituirse por sistemas que permitan recuperar materiales y reciclarlos en circuito cerrado. Las materias primas deberían utilizarse como reservas. Se estima que el 62% de los GEI que se generan durante la extracción y procesado de las materias primas, empleando estrategias de la economía circular, se podrían disminuir e incluso eliminar

dichas emisiones. En la actualidad solo un 9% de la economía mundial se puede considerar que opera en condiciones de economía circular. De los 92.8 Gt (1 Gt = 1000 millones de toneladas) de materiales que se procesan, únicamente un 9% se reutilizan [4, 5].

FIGURA 01-1 Esquemas de uso de los recursos en la una sociedad de: (a) economía lineal y (b) economía circular o sostenible [3].



La Comisión de la UE ha reiterado la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con el fin de proteger el medio ambiente natural, disminuir la degradación del suelo y evitar la pérdida de biodiversidad [6]. De acuerdo con la política de economía circular de la UE, la aplicación de la misma crearía del orden de 700 000 puestos de trabajo. Uno de los componentes del llamado *"European Green Deal"* para conseguir una economía circular hace referencia a la agricultura, la acuicultura y la producción sostenible de alimentos. Para ello han de realizarse cambios para minimizar el transporte, almacenamiento, embalaje de los productos y la generación de residuos.

Otro aspecto a considerar es el empleo de plásticos en el empaquetado de alimentos y de otros productos. A pesar de que los plásticos que van a un vertedero pueden tardar 400 años en degradarse, su utilización ha aumentado en un 4% anual desde el año 2000. Solo un 12% de los plásticos de desecho se incineran, un 9% se recicla y el resto se elimina en vertederos o se abandonan en el entorno, particularmente marino, si bien se ha conseguido su disminu-

ción en los últimos años. La tendencia es utilizar plásticos biodegradables y reciclables en los productos de mercado [6].

El modelo de descarga cero sería el modelo ideal, pero la simple reducción de la descarga ya contribuiría a una menor contaminación ambiental. Así, productos que están diseñados para un solo uso son ejemplos de un consumo innecesario. Determinados productos cuando se hacen obsoletos deberían retornarse al fabricante para su desmonte y reciclado. Por ejemplo, automóviles, equipos eléctricos y ordenadores son productos en que no sería aceptable que fuesen a un vertedero o a incineración. Sin una economía circular es difícil llegar al modelo de desarrollo sostenible.

Una vez se utiliza un producto hay tres opciones:

- Reutilizar el producto para el mismo fin o diferente del que fue fabricado.
- Utilizar el material para la producción de energía.
- Reciclarlo al proceso de fabricación. En la mayor parte de los productos que se utilizan, la obtención de los mismos a partir de materias primas da lugar a mayores emisiones de GEI que si se utilizasen materiales reciclados, (*p.ej.* por cada kg de plástico que se recicla, se emite 1 kg menos de CO_2 que si se partiese de materias primas).

Algunas formas de hacer más eficaz un producto desde su origen son:

- Reducir las materias primas en su fabricación, sin alterar sus posibilidades de uso.
- Aumentar su vida útil. Si se extiende la vida útil de un producto, es necesaria una menor cantidad del mismo para satisfacer la demanda.
- Eliminar la necesidad del mismo o bien utilizar materiales basados en biomasa. Así, *p.ej.* el empleo de materiales de bambú o de fibras orgánicas pueden a veces reemplazar a materiales metálicos, utilizados masivamente en el sector de la construcción.

Los residuos sólidos o algunos de sus componentes pueden ser útiles como materias primas para la industria, como combustible para la obtención de energía o bien como materiales para relleno del terreno. Se pueden clasificar de acuerdo con su actividad o el sector productivo que los genera.

Según su *actividad*, los residuos pueden ser:

- Residuos inertes: no tienen actividad físico-química o biológica.
- Residuos activos: pueden contaminar química o biológicamente el medio donde se depositan, reaccionar entre sí o con los componentes naturales de ese medio.
- Residuos radioactivos: generan actividad física debido a sus radiaciones ionizantes.

Según el *sector productivo* que los origina:

- Primario: residuos agropecuarios, forestales y de actividades extractivas mineras.
- Secundario: residuos inertes de algunos procesos industriales o de la construcción; residuos tóxicos y peligrosos de actividades industriales, y residuos radiactivos procedentes de instalaciones radiactivas o centrales nucleares.
- Terciario: residuos sólidos urbanos (RSU) procedentes del consumo doméstico, actividades comerciales, etc., y residuos sanitarios procedentes de actividades hospitalarias o biológicas.

1.4. Energía y cambio climático

El aumento de las necesidades energéticas debido al aumento de la población en zonas urbanas ha llevado a un replanteamiento de las fuentes de energía, con el fin de que su impacto sea menor sobre el medio ambiente. El uso de combustibles fósiles para la producción de energía ha conducido a la disminución de unos recursos valiosos y sus efluentes han tenido graves efectos sobre el calentamiento global y la disminución de la capa de ozono, que son la causa del cambio climático. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) ha establecido que para limitar el aumento del calentamiento global a 1.5 ˚C respecto a la era preindustrial, sería necesario disminuir las emisiones de CO_2 en un 45% en el periodo 2010-2030, y que debería alcanzarse un valor neto de cero en el año 2050 [7].

De acuerdo con lo expuesto, es necesario en todos los procesos de generación de energía hacer un estudio detallado, empleando herramientas como el *análisis del ciclo de vida* (LCA,

Los indicadores medioambientales empleados en el LCA son los siguientes:

Calentamiento global

Los gases causantes del calentamiento global dan lugar a un incremento de la absorción de la radiación emitida por la tierra. Las emisiones más importantes son: CO_2, CH_4 y NO, y se expresan como equivalentes en CO_2.

Acidificación

La lluvia ácida sobre el suelo y el agua tiene efectos perjudiciales sobre la flora y la fauna. Entre las emisiones que la causan están el SO_2 y NO_x que se generan en los procesos de combustión.

Oxidación fotoquímica

Se produce una cierta niebla por la reacción de óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) bajo la influencia de la luz UV. Entre las emisiones que la provocan están la fabricación de materiales plásticos para embalaje y la combustión de gas natural.

Nitrificación

El vertido de nutrientes al agua da lugar a un aumento de biomasa, un crecimiento elevado de algas que reduce el oxígeno y afecta a algunas especies, como los peces. Entre los vertidos que las provocan están los lixiviados de fertilizantes, los fosfatos en detergentes y los materiales biodegradables.

Residuos sólidos

Es el conjunto de fuentes de residuos sólidos en el ciclo de vida del producto. Las principales fuentes son los residuos de minería, residuos de la combustión de combustibles sólidos y de materiales de embalaje.

Energía

Corresponde a la cantidad total de combustibles que se extraen, teniendo en cuenta la eficacia en la producción de electricidad y generación de calor. El indicador de energía está relacionado con los otros factores y puede dar una idea de la eficacia en general.

Life-cycle assessment) en el que se estudie el proceso en su conjunto, desde el equipo empleado hasta el tipo de energía producida.

Si se realiza un LCA a la valorización energética (*WtE*) de RSU se observa que tiene indudables beneficios sobre el clima, ya que permite reemplazar las calderas que operan con combustibles fósiles para la producción de vapor de agua, con fines industriales o de calefacción. Algunas plantas europeas de *WtE* se orientan a la producción de hidrógeno, lo que permitiría la descarbonización del transporte público, principalmente autobuses y vehículos de recogida de basuras.

La mitad de la energía que se produce a partir de residuos tiene un origen biológico y puede considerarse como biomasa reciclable. Algunas instalaciones de *WtE* están considerando la captura, utilización y almacenamiento del CO_2 producido, si bien por el momento tiene un coste elevado.

1.5. Fuentes de contaminación

Toda actividad humana da lugar a distintos tipos de emisiones que tienen un efecto degradante sobre las reservas materiales y energéticas que existen en la Tierra. Tradicionalmente, la contaminación se ha abordado según el medio que resulta más afectado, y así se consideran tres tipos: *aire, agua y suelo*. Sin embargo, los tres tipos de contaminación están relacionados y con frecuencia el tratamiento de efluentes gaseosos o líquidos da lugar a la generación de sólidos, que se depositan en los suelos.

CONTAMINACIÓN DEL AIRE. La mayor parte de los contaminantes del aire proceden del transporte, plantas de producción de energía, procesos industriales y otras fuentes. Los principales contaminantes son:

- Óxidos de azufre. Se producen en la combustión del carbón y derivados del petróleo.
- Óxidos de nitrógeno. Se generan en procesos de combustión a elevadas temperaturas.
- Hidrocarburos. Se generan en la combustión incompleta de compuestos orgánicos.
- Partículas. El transporte, la combustión de carbón, los altos hornos generan partículas que se dispersan en la atmósfera.
- Monóxido de carbono. Se encuentra fundamentalmente en los humos de escape de los automóviles.

- Metales. En determinados efluentes se pueden producir emisiones de metales en forma de partículas menores de 10 µm.
- Fluoruros. Se producen en la fusión de minerales y en la fabricación de cerámica y del aluminio.

CONTAMINACIÓN DEL AGUA. Las principales fuentes de contaminación del agua son los efluentes industriales, los efluentes urbanos y los procedentes de la agricultura. Los principales contaminantes son:

- Materia orgánica. Suele estar constituida por productos químicos orgánicos, pesticidas y detergentes.
- Productos químicos inorgánicos. Corresponden a sales metálicas, ácidos, productos derivados de la minería, agricultura (nitratos y fosfatos) y extracción de petróleo.
- Contaminación térmica. Suele derivarse de la necesidad de enfriar el agua que se emplea en los circuitos de refrigeración de las centrales térmicas y nucleares.
- Vertido de materia orgánica. Proceden de las industrias alimentarias y de la producción de celulosa y papel.

CONTAMINACIÓN DEL SUELO. Corresponde a los residuos sólidos procedentes de la industria y de zonas rurales o urbanas que se vierten al medio ambiente. Algunos de los más importantes son:

- Residuos industriales. Se incluyen entre los mismos las escorias y cenizas volantes que se producen en las centrales térmicas de carbón.
- Residuos urbanos. Corresponden a una mezcla heterogénea de materia orgánica, plásticos, metales y papel.
- Lodos del tratamiento de aguas. Se producen en las depuradoras como residuo de los diversos procesos de tratamiento.
- Residuos agrícolas. Se considera que los residuos agrícolas son del orden de tres veces el consumo de alimentos de origen agrícola.
- Celulosa y papel. Los sólidos que se generan están en forma de lodos, entre 10 y 80 kg de sólidos/t de papel. En muchas plantas se recuperan diversos productos químicos y en parte se incineran.

- Residuos químicos. La industria química produce algunos residuos sólidos que son tóxicos. En buena parte se destruyen por incineración o se recuperan y se emplean en otro tipo de industrias.
- Residuos electrónicos. Son una mezcla compleja de componentes procedentes del desguace de electrodomésticos, equipos informáticos, de iluminación y audiovisuales.
- Residuos peligrosos. Son aquellos que tienen un riesgo tanto para la salud como para el medio ambiente debido a sus características reactivas, explosivas, inflamables, infecciosas o radioactivas.

Cada tipo de residuos tiene unas características especiales y deben tratarse de forma adecuada para evitar los daños al medio ambiente y a la salud. Los residuos peligrosos requieren un tratamiento específico y han de evaluarse sus propiedades como inflamabilidad, corrosión, reactividad y toxicidad empleando métodos estandarizados, como *p.ej.* las normas ASTM.

1.6. Fuentes y consumo de energía

Hace más de 200 millones de años, enormes masas vegetales junto con los animales existentes quedaron sepultados por cataclismos de la Tierra, transformándose a través de procesos muy lentos en combustibles fósiles, que han sido la fuente de energía en el mundo desde la revolución industrial. Desde 1950 los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) han permitido el crecimiento de la economía mundial, pero al mismo tiempo han sido la fuente principal de contaminación y degradación ambiental. El carbón es el combustible fósil más importante y del orden del 65% de las reservas encontradas y el 85% de las estimadas se encuentran en los Estados Unidos, Rusia y China. Con el presente nivel de consumo y con las reservas identificadas, el carbón podría durar unos 200 años, y si su consumo aumentase un 2% al año, unos 65 años. Al presente ritmo de consumo de petróleo es posible que las reservas se agoten en 40-80 años, hacia el año 2059, es decir 200 años después de que se perforase el primer pozo de petróleo. En el caso del gas natural, y al ritmo actual de consumo, las reservas podrían durar entre 40-80 años y si se consideran las reservas no convencionales, cuyo coste de explotación es más elevado, podrían durar unos 100 años.

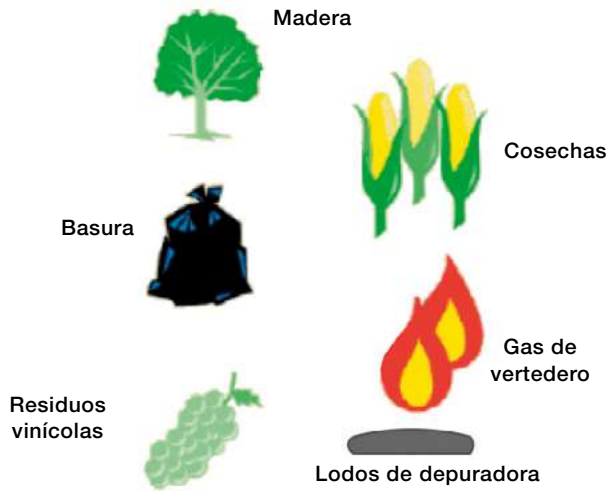
Como consecuencia de las reservas limitadas de combustibles fósiles y el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) que provoca su combustión, hay un gran desarrollo de las energías renovables, particularmente la eólica y la solar, y se contempla la biomasa, en su

concepto más amplio (residuos agrícolas, forestales y ganaderos, madera, papel, residuos alimentarios, y lodos de plantas depuradoras), como fuente energética.

1.6.1. La biomasa como fuente energética

Se conoce como biomasa la materia orgánica de origen reciente (animal y vegetal) resultante del proceso de conversión fotosintética. La energía de la biomasa corresponde a la materia vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, así como a los residuos industriales, humanos o de animales. La biomasa fue en otras épocas el principal recurso energético en las actividades humanas, pero fue desplazada por los combustibles fósiles que resultan más cómodos y menos costosos. Alrededor del 90% del consumo mundial de energía procede del petróleo, gas natural o carbón. Una característica que diferencia a la biomasa de otros recursos energéticos es el hecho de que es una fuente renovable de energía. Algunos tipos de biomasa se indican en la Fig. 1.2.

FIGURA 01-2 Tipos de biomasa



El valor energético de la biomasa vegetal procede de la energía solar a través del proceso de fotosíntesis:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{luz} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

La luz solar, con la influencia de la clorofila, provoca la descomposición del agua (fotolisis) y el hidrógeno producido reduce a la molécula de CO_2. La energía química que se almacena en plantas y animales, o en los residuos que producen, recibe el nombre de *bioenergía.* Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía, a menudo en la forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de las plantas. Se estima que la biomasa puede proporcionar cerca del 25% de las necesidades de la energía global. Además, es una fuente de productos químicos, farmacéuticos y de aditivos alimentarios.

La biomasa como fuente para la producción de energía renovable puede clasificarse en:

- Biomasa natural. Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana.
- Biomasa residual seca. Procede de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales. También se produce este tipo de biomasa en procesos de las industrias agroalimentaria y de transformación de la madera. Se puede distinguir la biomasa de origen forestal y la de origen agrícola.
- Biomasa residual húmeda. Procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de los residuos ganaderos.
- Cultivos energéticos tanto forestales como agrícolas. Son aquellos cultivos realizados en terrenos pobres y que están dedicados a la producción de biomasa con fines no alimentarios, como es el caso de los cultivos agrícolas, *p.ej.* el sorgo dulce y la caña de azúcar.

La biomasa puede considerarse la tercera fuente de energía renovable, después de la hidráulica y eólica. Su crecimiento ha sido continuo en las últimas décadas y en 2012 la potencia instalada era de 76 GW, con una producción de electricidad de 270-529 TWh.

Aproximadamente, 1 kg de biomasa equivale a 3500 kcal y 1 L de gasolina proporciona 10 000 kcal. Es decir, se necesita del orden de 3 kg de biomasa para obtener la misma cantidad de energía que proporciona 1 L de gasolina, o lo que es lo mismo, cuando se desperdician 3 kg de biomasa se está desaprovechando el equivalente a 1 L de gasolina. El uso de biomasa como recurso energético, en vez de combustibles fósiles, tendría grandes ventajas medioambientales:

- Disminución de las emisiones de SO_2, CO y NO_x
- Disminución de las emisiones de partículas
- Emisiones neutras de CO_2 sin contribución al efecto invernadero
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema sobre el terreno
- Mejoras socioeconómicas en áreas rurales

1.6.2. Los RSU como fuente energética

La incineración de residuos con recuperación de energía (*WtE*) puede considerarse, si se realiza en determinadas condiciones, como una fuente renovable de "*energía limpia"*, ya que muchos de los residuos son de tipo orgánico, y en consecuencia se les puede considerar como *"renovables"*. Es por ello que en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (2015-2020) se recomendaba:

- Incrementar la valorización energética hasta en un 15% de los RSU generados en 2020 mediante incineración o coincineración.
- Limitar la valorización energética a los rechazos procedentes de instalaciones de tratamiento.
- Valorizar energéticamente parte de los rechazos producidos en las instalaciones de tratamiento mecánico-biológico, bien directamente o mediante la preparación de combustible derivado de residuos (CDR) que podrá ser usado en instalaciones de coincineración de residuos.
- Limitar, antes de 2020, al 35% el vertido del total de los residuos municipales generados (lo cual no se ha conseguido).

En el año 2022 se generaron 229.5 Mt de RSU en la UE. Un 23% se destinó a vertedero, un 31% a reciclaje y un 17% a compostaje. Entre los años 1995 y 2022 la cantidad de RSU destinados a vertedero disminuyó de un 61% a un 23%, y esa tendencia continúa. Entre el

año 1995 y 2022 la incineración aumentó de 29 Mt a 59 Mt RSU. La contribución de la incineración de residuos sólidos a la producción de energía en la UE fue de un 2.4%, muy inferior a la de otras fuentes: renovables (29.9%), nuclear (27.8%), carbón (16.4%), gas natural (13.6%) y petróleo (8.8%). Se considera que el reciclaje y la *WtE* no son métodos contrapuestos, sino complementarios, y de hecho los países con las tasas más elevadas de incineración son también los que los que más reciclan y hacen compostaje. Hay que tener en cuenta que no es posible alcanzar el reciclaje total, ya que supondría unos costes inasumibles. Así pues, las plantas de *WtE* además de producir energía, que puede comercializarse, son una tecnología muy eficaz para el tratamiento de residuos [8].

1.7. Sociedad, industria y desarrollo sostenible

La implementación del modelo de desarrollo sostenible requiere de la participación de la sociedad y para conseguirla es necesaria una buena comunicación y educación medioambiental. La industria trata de satisfacer las necesidades de la sociedad de determinados productos y la relación industria-sociedad produce innumerables beneficios: económicos, puestos de trabajo y medioambientales. La industria tiene que seguir las normativas del país donde desarrolla su actividad, con la tecnología disponible y constantemente tratando de mejorarla. Cuando se pertenece a un grupo de países integrados en una unidad superior, como la UE, todos los países han de aceptar las normativas emanadas del Parlamento Europeo, que van en la dirección de un desarrollo sostenible, del que muchas veces no es consciente la sociedad.

En el año 1992, en una reunión de la comisión económica de la UE, se indicó que era necesario considerar cinco aspectos que dificultan la transformación tecnológica para lograr un desarrollo sostenible [9]:

- IGNORANCIA. Hay un desconocimiento de los problemas medioambientales.
- FALTA DE INTERÉS. A veces se conocen los problemas medioambientales, pero a la sociedad no le preocupan.

- DEPENDENCIA DE LA TECNOLOGÍA. La sociedad cree que la tecnología resolverá todos los problemas medioambientales.
- DESARROLLO SOSTENIBLE. Es un aspecto del que la sociedad empieza a ser consciente de su necesidad.
- SOSTENIBILIDAD ABSOLUTA. Ocurrirá cuando se complete el círculo ecológico.

Una sociedad moderna, para mantener un cierto nivel de vida, ha de evolucionar en su base económica, que inicialmente ha sido agrícola y ganadera, consumiendo las materias primas, hacia una sociedad industrial, con el fin de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Pero la sociedad industrial requiere de grandes inversiones, y si el país no dispone de tecnología ni capital para afrontarlas, es necesario facilitar la inversión extranjera, en un entorno de buena relación sociedad-industria.

En ocasiones la sociedad adopta la postura contraria a cualquier avance tecnológico. Se posiciona en contra de la industria química, centrales nucleares, incineradoras de RSU, etc., a menudo contando con el apoyo interesado de algunos "activistas", que prefieren el caos, culpando a la industria de todos los problemas medioambientales, pero sin ofrecer alternativa alguna a las demandas de la sociedad. El creciente aumento de la población del mundo, que aspira a un mejor modo de vida, está provocando a su vez corrientes migratorias y problemas sociales, que no pueden ignorarse.

Las industrias modernas han de tener presente que el producto que fabrican ha de estar en consonancia con la utilización económica de materias primas y recursos energéticos. Esto puede conducir a un encarecimiento del producto, si no se dispone de la tecnología e infraestructuras necesarias; un ejemplo actual son los coches eléctricos. La fabricación de productos industriales, así como su uso, deben ser compatibles con el medio ambiente y no han de ser causa de riesgos para la salud, como ha sucedido con algunos juguetes y otros productos de importación. La industria ha de tener presente que el producto que se fabrica tiene un ciclo de vida y terminará siendo un residuo, por lo que ha de considerarse su reciclaje, biodegradabilidad o su destrucción de forma sostenible.

La industria del futuro se ha de ajustar a un modelo integrado: el ecosistema industrial. Y esto requiere que *"el sistema industrial no puede considerarse aislado del entorno, debe estar en relación con el mismo. Es un sistema en el que se trata de optimizar el círculo de materias*

primas desde el material virgen, hasta el componente o producto acabado y su eliminación final. Han de optimizarse factores como: recursos, energía y capital" [9]. Así pues, el uso eficiente de materiales, energía y capital son la clave para disminuir el impacto ambiental.

1.8. Bibliografía

1. | OCDE. *"Environment at a glance indicators. Circular economy-waste and materials"* Paris, (2024).

2. | Brundtland, G.H., *"Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future"* (1987).

3. | Resource recovery playbook.
www.Tomra.com

4. | Berg, C., *"Ist Nachhaltigkeit utopisch?"* Ed. Oekom, München (2020).

5. | PACE. *The circularity Gap report 2019.*

6. | Camilleri, M.A., *"European environment policy for the circular economy: Implications for business and industry stakeholders"* Sustainable Development, 28, 1804 (2020).

7. | *IPCC Special report: Global Warming of 1.5 °C.*
https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers

8. | "Municipal waste statistics", Eurostat (2024)
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics

9. | Graedel, T.E., Allenby, B. R., *"Industrial Ecology"*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1995).

CAPÍTULO

02

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

2.1. Introducción
2.2. Generación de RSU en España en el contexto de la UE
2.3. Lodos de depuradora
2.3.1. Métodos más empleados en el tratamiento de lodos
2.4. Generación de RSU en Andalucía y Huelva
2.5. Consumo de energía y generación de GEI en la gestión de RSU
2.6. Bibliografía

02

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

2.1. Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) se han generado desde la más remota antigüedad y han sido un problema en las diversas culturas. En la cultura minoica (3 000-10 000 a.C.) se apilaban los residuos y se cubrían periódicamente con capas de tierra. En la antigua Atenas cada casa era responsable de la recogida y transporte de los RSU, debían barrer las calles para eliminar todo tipo de residuos y depositarlos a una distancia de 2 km de los límites de la ciudad [1]. Algunos de los métodos empleados en la antigüedad aún se siguen practicando en regiones pobres del mundo, y la mayor parte de dichos residuos acaban en un vertedero abierto.

Las epidemias que se extendieron por Europa a lo largo de los siglos diezmaron su población (la peste negra del año 1350 causó cerca de 25 millones de muertos a lo largo de 5 años). Éstas se propagaron más fácilmente por la forma de eliminar los residuos domésticos, vertiéndolos a la vía pública, para que fueran arrastrados por el agua de lluvia. Ya Hipócrates (400 a.C.) e Ibn Sina (980-1037 d.C.) sugirieron la existencia de una relación entre basuras y enfermedades infecciosas [1]. Para evitar las epidemias originadas por los vertidos de residuos, en 1578 se promulgó en Inglaterra la primera ley por la que cada ciudadano debía limpiar las calles y los canales cercanos [2].

En los años de la revolución industrial (en torno a 1810) la población del mundo era de unos 1000 M de habitantes; sin embargo, actualmente se ha llegado a los 8200 M, y es necesario considerar otros métodos, distintos de los vertederos, aún muy utilizados, para dar solución a los problemas de los RSU. La eliminación de las basuras mediante vertederos no es un método que reúne condiciones higiénicas, ya que es una fuente de infección de aves, roedores, insectos y origen de microorganismos, que pueden actuar como transmisores de enfermedades. Los vertederos a cielo abierto o controlados son, además, el origen de los siguientes problemas:

- Causan contaminación de las aguas (subterráneas y marinas) y del aire (olores, gases emitidos, principalmente metano, CH_4, y dióxido de carbono, CO_2).
- Son lugares de concentración de aves, que pueden dar problemas al tráfico aéreo en las proximidades de aeropuertos.
- Fuegos provocados por los gases emitidos y riesgos de demolición.
- Erosión e inestabilidad del terreno donde se encuentra situado el vertedero.

En el año 1993 tuvo lugar una explosión (posiblemente debida al metano acumulado) en el vertedero de Ümraniye-Hekimbasi (Turquía), que debido a la pendiente del terreno desplazó los RSU acumulados, cayendo sobre 11 casas y causando 39 muertos. En mayo de 2016 se produjo en el municipio de Seseña (Toledo) un incendio de un vertedero ilegal de neumáticos, provocando la evacuación de 9000 personas. En febrero de 2020 se produjo un deslizamiento seguido de incendio en el vertedero de Zaldibar (Vizcaya), arrastrando a dos operarios, que fallecieron.

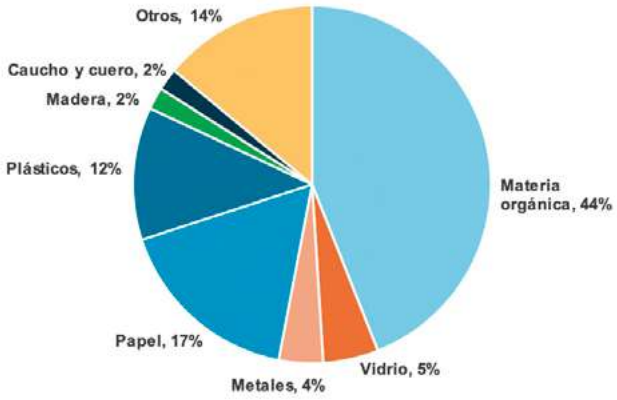
A medida que la sociedad se desplaza a zonas urbanas (actualmente un 56% de la población, según el World Bank [3]), la cantidad de RSU aumenta a un ritmo mayor que el de la urbanización. En 2023 el número de residentes urbanos era de 4 400 millones de habitantes, generándose una media de 0.74 kg RSU/persona/día (2010 Mt/año). En el año 2050, se estima que se alcanzarán las 3 400 Mt/año. Lógicamente, las estimaciones pueden variar grandemente con el nivel económico del país e incluso entre ciudades y distritos de un mismo país.

El impacto medioambiental de los RSU crece a medida que aumentan las cantidades de residuos que se generan. La degradación de la materia orgánica de los RSU es una fuente de metano, con un índice muy elevado como GEI. La industria del reciclaje se ha convertido en una industria global con mercados y redes de transporte. Así, la mayor parte de los residuos con destino al reciclaje en Buenos Aires se exportaban a China, al igual que ocurría con muchos residuos de equipos electrónicos de ciertos países. Desde 1918 China y otros países asiáticos han prohibido las importaciones de residuos de Europa (eléctricos, electrónicos, plásticos, cartón y textiles). En algunos casos, materiales de difícil reciclaje se envían a terceros países, en los que se calcula que más de 2 M de personas intentan recoger elementos valiosos, con los consiguientes impactos medioambientales y riesgos para su salud, particularmente por la elevada incidencia de infecciones respiratorias agudas.

La composición de los RSU es función de muchos factores: geográficos (localización, tipos de construcciones, fuente de energía empleada en los usos domésticos, etc.) y climáticos (en países fríos un componente principal de los RSU son las cenizas de combustibles

empleados en calefacción). En la Fig. 2.1 se indica una composición media de los RSU correspondiente a 105 países.

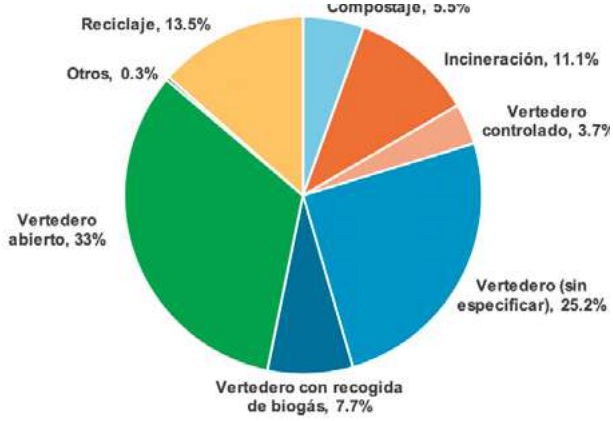
FIGURA 02-1 Composición global de RSU en el año 2023 [3].



Como puede observarse, la mayor proporción en los RSU corresponde a la materia orgánica, siendo los otros componentes: papel, metales, plásticos, vidrio y otros materiales.

Los métodos más empleados, en los países con mayores recursos económicos, para eliminar los RSU, son los vertederos controlados y los tratamientos térmicos (*WtE*), mientras que en los países pobres los RSU se vierten en espacios abiertos. En la Fig. 2.2. se indica el porcentaje de RSU eliminados por los diferentes métodos en el año 2023.

FIGURA 02-2 Métodos de eliminación de RSU en el año 2023 [3].



Dependiendo del desarrollo y conciencia social de los países, la recogida de los RSU puede hacerse de forma segregada o mezclados. Los contenedores de residuos segregados suelen ser *"húmedos"* (a veces se denominan *"fracción resto"*, e incluyen restos de comida y materia orgánica) y *"secos"* (elementos reciclables, como papel, vidrio y metales). Generalmente, los RSU secos son de más fácil reciclaje, mientras que si se recuperan de los RSU mezclados su tratamiento es más difícil.

Se estima que globalmente se reciclan unos 400 Mt de chatarra, lo que supone un importante valor económico y un ahorro de materias primas. La obtención de determinados productos a partir de materiales de reciclaje supone además un importante ahorro energético. Así, la producción de aluminio a partir de aluminio reciclado conlleva un ahorro de un 95% de la energía necesaria para obtenerlo a partir de materias primas minerales.

Una buena gestión de los RSU ha de basarse en generar menos residuos, mejorar la recogida de los mismos, aumentar el reciclaje, evitar las emisiones de metano en vertederos utilizando procedimientos de captación, y el empleo de la valorización energética de las fracciones de RSU no reciclables, para generar energía en forma de calor y/o electricidad. Las plantas *WtE* pueden contribuir grandemente a los principios de la economía circular, destruyendo las fracciones de RSU no reciclables, *p.ej.* por razones higiénicas, produciendo energía y utilizando las escorias con fines de construcción y como material de relleno en pavimentos y carreteras. Durante la pandemia del Covid-19 se generaron grandes cantidades de mascarillas usadas y otros utensilios sanitarios que no pueden reciclarse y que han de destruirse a elevadas temperaturas, para evitar la presencia de gérmenes.

2.2. Generación de RSU en España en el contexto de la UE

En el año 2018 (antes del Covid-19) en España se generaron 115.4 Mt de residuos: la mayor parte procedía de la industria (31.1%), la construcción (26.8%) y de los hogares (RSU, 17.1%). De la cantidad global de residuos, un 53.9% fue a parar a los 116 vertederos municipales existentes [4]

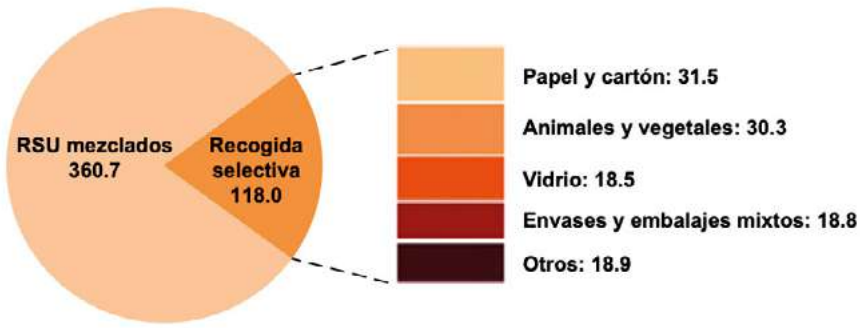
De acuerdo con los últimos datos publicados por el INE (Instituto Nacional de Estadística) [5], en el año 2021 se recogieron 22.7 Mt de residuos urbanos, que corresponden a 478.7 kg RSU/habitante. De estos, 17.1 Mt correspondieron a residuos mezclados y 5.6 Mt a residuos de recogida selectiva. En la Tabla 2.1 se indica la generación de RSU en las diferentes CCAA,

y en la Fig. 2.3 la composición de dichos residuos y la cantidad generada por habitante en 2021.

TABLA 02-1 RSU generados en las CCAA en España.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	RSU, Mt	COMUNIDAD AUTÓNOMA	RSU, Mt
Andalucía	4.618	Murcia	0.837
Cataluña	3.557	Islas Baleares	0.715
Comunidad Valenciana	2.681	Aragón	0.600
Comunidad de Madrid	2.641	Asturias	0.515
Canarias	1.196	Extremadura	0.478
Galicia	1.129	Cantabria	0.302
Castilla y León	1.079	Navarra	0.279
País Vasco	0.931	La Rioja	0.128
Castilla-La Mancha	0.908		

FIGURA 02-3 Tipos de RSU y cantidad generada (kg) por habitante en 2021 [5].



La principal legislación sobre residuos de la UE está contenida en la Directiva de residuos [6] y en las Propuestas de Economía Circular [7]. Entre los métodos que se mencionan para el tratamiento de RSU, se hará referencia únicamente a dos de ellos: la incineración y el vertedero. En el año 2023 se generaron en la UE un total de 2300 Mt de residuos, de los que corresponden a RSU del orden de un 10%. De los 247 Mt de RSU tratados, un 39% se destinó al reciclaje, un 23% a vertedero y 18% a compostaje [8]. Un 12% de los residuos se eliminaron mediante incineración simple o con recuperación de energía. En el periodo comprendido entre 1995 y 2023, el porcentaje de RSU enviados a vertedero disminuyó de un 64% a un 23%. Normalmente, los países con mayor capacidad de incineración tienen también los más altos porcentajes de reciclaje y compostaje. Dados los elevados costes del reciclaje en un gran número de materiales, se hace necesario mantener un equilibrio entre su reciclaje y valorización energética [8].

Los países europeos con mayores tasas de reciclaje han prescindido de los vertederos y eliminan los residuos no reciclables mediante incineración. Más del 80% de los residuos acaban en vertederos en Malta, Grecia y Chipre, frente al 60% de Rumanía, Eslovaquia y Bulgaria y más del 50% en España y Portugal.

La producción de energía a partir de residuos aumentó considerablemente en el periodo 2010-2023. Así, en 2023 (a partir de residuos industriales y RSU no reciclables) fue de 40.4 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo), siendo la contribución de los RSU del orden del 50% de esa cantidad. Por países, la mayor capacidad instalada para generación de energía a partir de residuos, en 2018, fue en Alemania (1023 MW), seguida por Gran Bretaña (773 MW), Francia (625 MW), Italia (396 MW) y Holanda (394 MW).

Otros países como Estonia, Letonia, Luxemburgo, Francia, Irlanda, Eslovaquia, Italia y Lituania envían un tercio o menos de sus residuos a vertederos y también usan incineración. Más del 40%, excepto en Estonia y Letonia, de los residuos domésticos de estos países se reciclan [9].

En España existen 11 plantas de incineración de RSU, Tabla 2.2, mientras que Francia cuenta con 126 y Alemania con 121, valorándose energéticamente del orden de un 35% de sus residuos. Las plantas de incineración en España trataron en 2022 unos 2.5 Mt (del orden de un 11 % de los RSU), produciéndose cerca de 2 millones de MWh de energía, cantidad equivalente para abastecer de electricidad a unas 500 000 viviendas [10].

Ha de señalarse que los vertederos emiten anualmente unas 11 Mt de CO_2 equivalente, que son unas 19 veces más que las plantas de valorización energética, requiriéndose para los mismos una mayor extensión de terreno, con riesgos de contaminación debido a los lixiviados que se producen y al biogás (CH_4) que se pierde a la atmósfera.

TABLA 02-2 Incineradoras en operación en España (datos de 2021).

INCINERADORA	Capacidad RSU, Mt/año	TIPO DE HORNO
Tircantabria (Cantabria)	0.117	Parrilla de rodillos
Trargisa (Gerona)	0.047	Parrilla móvil
TRM (Mataró)	0.164	Parrilla móvil
Tersa (Sant Adrià de Besòs)	0.360	Parrilla deslizante
Sirusa (Tarragona)	0.140	Parrilla de rodillos
Tirmadrid (Madrid)	0.300	Lecho fluidizado
Tirme (Islas Baleares)	0.732	Parrilla de rodillos
Sogama (La Coruña)	0.550	Lecho fluidizado
Remesa (Melilla)	0.045	Parrilla dentada
Zabalgardi (Vizcaya)	0.225	Parrilla deslizante
CMG1 (Guipúzcoa)	0.200	Parrilla deslizante
TOTAL	2.880	

El bajo porcentaje de RSU que se incineran en España implica un desaprovechamiento de recursos combustibles, que podrían utilizarse en la producción de energía. Las incineradoras modernas disponen de sistemas de depuración de gases y otros efluentes que las hacen completamente seguras desde el punto de vista sanitario y medioambiental, algo que no ocurre con los vertederos, incluso los que disponen de algún tipo de control. Más aún, si la valorización térmica de RSU cumple con el requisito de eficacia, la UE considera este tipo de instalaciones como plantas de reciclaje y la energía producida se considera procedente de biomasa/residuos orgánicos que son combustibles renovables.

2.3. Lodos de depuradora

Los lodos de depuradora constituyen el residuo más voluminoso originado en la depuración de aguas y su eliminación es uno de los mayores problemas medioambientales de la actualidad. La producción media de lodos en España se sitúa en unos 40-60 g/(habitante)(día) de materia estabilizada y deshidratada. En el año 2021 se produjeron en España 752 672 t/año de lodos en estaciones depuradoras.

La valorización térmica de lodos de plantas depuradoras de aguas residuales es el método de minimización de residuos, especialmente cuando los lodos no son aptos para su empleo en agricultura o para enviarlos a vertedero. Debido a su aceptable PCI (poder calorífico inferior) se han desarrollado tecnologías que mediante su incineración permiten la recuperación de calor, vapor de agua o energía eléctrica. Asimismo, con algunas tecnologías se pueden recuperar los nutrientes para la agricultura. Mediante procesos de calcinación se realiza la extracción de fosfatos y cenizas residuales a partir de los residuos de incineración de lodos y biomasa, que son materias primas secundarias capaces de sustituir hasta un 40% de los fosfatos procedentes de la minería. Las reservas naturales de fosfatos son escasas y el fósforo es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales concentran los contaminantes separados en el proceso de depuración, en forma de lodos, mediante sedimentación en decantadores. En plantas depuradoras con tratamientos biológicos se obtienen dos tipos de lodos:

- *Lodos primarios*: están formados por las partículas más gruesas que se depositan en el fondo de los decantadores primarios.
- *Lodos secundarios*: las partículas más finas y disueltas son metabolizadas por bacterias en presencia de oxígeno. Esta biomasa se deposita en el sedimentador secundario, donde una parte se recircula al reactor biológico y otra se purga, constituyendo ésta los lodos biológicos en exceso.

Los lodos primarios y secundarios se pueden mezclar para formar los denominados *lodos mixtos*.

En la Tabla 2.3 se recogen algunos datos típicos de la composición de los lodos crudos y digeridos. Estos datos han tenerse en cuenta al seleccionar el tratamiento de lodos, puesto que desde el punto de vista de la aplicación en agricultura es necesario conocer su contenido

de nitrógeno, fósforo y potasio. De la misma forma el pH y el contenido de ácidos orgánicos determina el control del proceso de la digestión anaerobia.

TABLA 02-3 Características típicas de lodos.

LODOS PRIMARIOS	LODOS PRIMARIOS CRUDOS	LODOS DIGERIDOS
Sólidos secos totales (ST), %	5.0	10.0
Sólidos volátiles (% de ST)	65.0	40.0
Grasas y aceites (solubles en éter, % de ST)	...	...
Proteínas (% de ST)	25.0	18.0
Nitrógeno (N, % de ST)	4.0	4.0
Fósforo (P_2O_5, % de ST)	2.0	2.5
Potasio (K_2O, % de ST)	0.4	1.0
Celulosa (% de ST)	10.0	10.0
Hierro (no como sulfuro)	2.5	4.0
Sílice (SiO_2, % de ST)	...	...
pH	6.0	7.0
Alcalinidad (mg/L como $CaCO_3$)	600	3000
Ácidos orgánicos (mg/L como AcH)	500	200
Poder calorífico (MJ/kg)	16.5	9

2.3.1. Métodos más empleados en el tratamiento de lodos

Según el II Plan Nacional de Lodos de Depuradoras, los tratamientos empleados en España que resultan de distintas combinaciones de procesos simples son los siguientes:

- Digestión anaerobia mesofílica con o sin aprovechamiento energético.
- Digestión anaerobia mesofílica con o sin aprovechamiento energético del metano, seguida de compostaje o secado térmico y en algún caso de posterior incineración.
- Deshidratación y compostaje.
- Deshidratación y secado térmico.
- Deshidratación, secado térmico y compostaje.
- Estabilización aerobia con o sin compostaje posterior.
- Estabilización química.
- Secado térmico e incineración.
- Secado térmico y coincineración en cementeras.

Los procesos de digestión aerobia y anaerobia son los siguientes:

DIGESTIÓN AEROBIA

Se produce la destrucción de la materia orgánica contenida en los lodos mediante la asimilación de oxígeno, lo que implica una importante reducción de volumen de lodos según las siguientes reacciones:

$$C_5H_7NO_2 + 5O_2 \longrightarrow 5CO_2 + NH_3 + otros$$
$$NH_3 + 2O_2 \longrightarrow HNO_3 + H_2O$$

Se aplica tanto a lodos secundarios como mixtos por su sencillez y bajo coste de instalación; sin embargo, para plantas grandes el coste de aireación de los tanques de digestión puede ser muy elevado.

DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es un proceso por el cual microorganismos específicos asimilan la materia orgánica, generándose otros microorganismos, junto con metano y dióxido de carbono, todo ello en ausencia de oxígeno disuelto, de acuerdo con las reacciones:

$$(C_6H_{12}O_6)_n \longrightarrow 3nCH_4 + 3nCO_2$$

$$\text{Materia orgánica} + H_2O \longrightarrow CH_4 + CO_2 + \text{Nueva masa} + NH_3 + H_2S + \text{Calor}$$

La digestión anaerobia tiene unos costes de instalación más elevados, pero menores costes de mantenimiento (no utiliza aireación). La reducción de volumen es similar en ambos casos, pero en el tratamiento aerobio los lodos tienen menor resistencia específica a la filtración, por lo que se deshidratan mejor. Teniendo en cuenta la posible utilización del biogás generado en los procesos anaeróbicos, ha de llegarse a un compromiso entre las dos opciones.

SECADO TÉRMICO

Consiste en el aporte necesario de energía en forma de calor para evaporar el agua libre y la ligada en el seno del lodo. Los principales objetivos del secado de lodos son:

- Eliminación del agua intersticial y en menor grado del agua combinada en el lodo.
- Aumentar el poder calorífico del lodo antes de su incineración.
- Reducir su volumen con vistas al almacenamiento o transporte.
- Higienización y mejora del lodo para su empleo en agricultura.

El mecanismo de secado consta de dos etapas:

1. Evaporación del agua superficial por encima de los 100 °C.
2. Secado profundo una vez que el agua ha difundido desde el seno de la micela del lodo hasta la superficie.

Se utilizan las dos etapas dependiendo de si la pasta del lodo ha de alcanzar un secado por encima del 50-70% o no. Un secado parcial (35% hasta un 45% máximo) permite alimentar el lodo a una incineradora. Se aplica un secado intenso, al menos de un 65%, para el almacenamiento de lodos o su empleo en agricultura (90%), o para llevarlos a una incineradora de RSU o a un horno de cemento. En el caso de una incineradora de RSU el secado óptimo es del 65%, que corresponde a la humedad de los residuos domésticos de materia orgánica.

Existen dos tipos de procedimientos para el secado térmico: *método directo*, en el cual los lodos están en contacto directo con vapor sobrecalentado, y el *método indirecto*, en el que la transmisión de calor se hace a través de un cambiador de calor.

Se puede obtener un secado del 90-95%, porcentajes imposibles de alcanzar por métodos mecánicos.

2.4. Generación de RSU en Andalucía y Huelva

De acuerdo con los datos publicados en el Informe de Medio Ambiente en Andalucía [11], correspondientes al año 2021, se produjeron 4.83 Mt de RSU, lo que corresponde a 570 kg/habitante [1.56 kg/(habitante)(día)].

En la Tabla 2.4 se indican las cantidades correspondientes a las distintas fracciones y los diversos métodos de tratamiento en el año 2017, y en la Tabla 2.5 se indican las fraccio-

nes recicladas/recuperadas en Andalucía, según el informe MITECO (Ministerio de Transición Ecológica) correspondiente al año 2021 [12].

TABLA 02-4 Tratamiento/eliminación de RSU en Andalucía (2017).

RESIDUOS Y SU TRATAMIENTO	t/año
Reciclado y recogida separada	386 538
Materiales recuperados en el TMB	135 538
Compostaje FORS	37 991
Compostaje en TMB	700 793
Incineración	0
Rechazos a vertedero	2 172 227
Directo a vertedero	588 749
TOTAL	4 021 836

TMB: Tratamiento mecánico biológico

FORS: Fracción orgánica de recogida separada

TABLA 02-5 Fracciones de RSU en la CA de Andalucía (2021).

RESIDUOS Y SU TRATAMIENTO	t/año
Papel/cartón	124 183
Vidrio	0
Residuos biodegradables (alimentos)	75 222
Residuos de jardinería	29 895
Envases mezclados	114 008
Envases de vidrio	109 883
TOTAL	453 191

Como puede observarse, en Andalucía prácticamente un 69% de los residuos se destinan aún a vertederos, cantidad excesivamente elevada, teniendo en cuenta que podrían ser una fuente de energía, con el consiguiente ahorro de combustibles fósiles y sus emisiones de CO_2. La mayor parte de los países miembros más recientes de la UE están en la misma situación que España. Sin embargo, la construcción de incineradoras (parcialmente financiadas por la UE) y el aumento del reciclaje hará que pronto alcancen el nivel de los países más avanzados en la UE en el tratamiento de los RSU.

La provincia de Huelva cuenta con 519 932 habitantes (año 2020) y se generaron 513 kg de RSU/habitante. De acuerdo con el mencionado informe, en Andalucía un 69.9% de dichos residuos se destinaron a plantas de recuperación y compostaje, un 10.5% al reciclaje y el 19.7% restante se eliminaron en vertederos. Las cifras difieren sensiblemente con las publicadas por el Ministerio de Transición Ecológica.

La provincia de Huelva dispone en la actualidad de dos plantas de tratamiento de residuos, Fig. 2.4, con los correspondientes vertederos de apoyo, y hay además 5 plantas de transferencia de residuos. Las plantas son: Andévalo en la región de El Andévalo y que presta sus servicios a la zona norte de la provincia, y Villarrasa en la región de El Condado, que da servicio a la zona sur [13].

PLANTA DE ANDÉVALO. Es una planta de recuperación y compostaje situada en el término municipal de Puebla de Guzmán, que dispone de vertedero para eliminar los residuos no revalorizables (fracción resto). En esta zona se encuentran un 62% de los municipios y el 17% de la población de la provincia (78 000 habitantes). Procesa 40 000 t/año de residuos, y el vertedero parece no estar a pleno funcionamiento.

PLANTA DE VILLARRASA. Está situada en el término municipal de Villarrasa. En 2018 trató 274 000 t de residuos, dando servicio a un 38% de los municipios y un 83% de la población (430 000 habitantes), que se incrementa considerablemente en verano. Dispone de vertedero para eliminar los residuos no recuperables (fracción resto), y podría estimarse que se destinan al vertedero unas 240 000 t/año.

FIGURA 02-4 Localización de plantas de tratamiento de RSU con vertederos de apoyo en la provincia de Huelva.

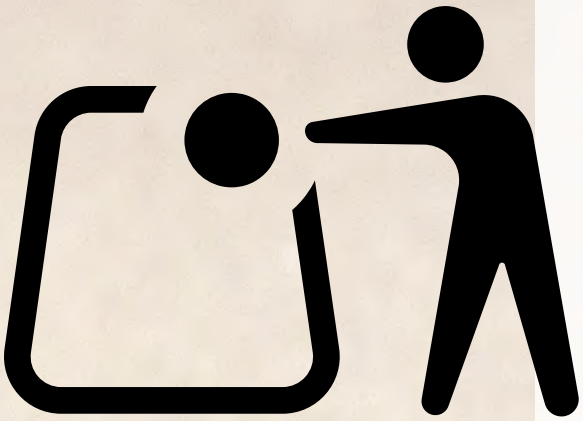
Las plantas mencionadas cuentan con Estaciones de Transferencia de Residuos no peligrosos (Almonte, El Campillo, Linares de la Sierra, La Redondela y La Alquería). En las plantas de transferencia y en los centros de tratamiento se reciben los residuos y se recuperan los materiales susceptibles de valoración. Los residuos orgánicos se destinan a compostaje y la fracción no recuperable o rechazo se elimina en un vertedero. Respecto a los residuos de recogida selectiva más importantes, las empresas de Sistemas Integrales de Gestión (S.I.G.) de residuos son los siguientes:

PAPEL Y CARTÓN

Los desechos de papel y cartón de embalaje constituyen un 13.6% de los RSU de Huelva y son gestionados por la S.I.G. Ecoembes. El reciclaje del papel supone un gran alivio para los vertederos y reduce el consumo de madera (conservación de bosques) que se utiliza en las fábricas de fibra de celulosa. Sin embargo, el proceso químico de tratamiento es complejo, empleándose técnicas de destintado, espesamiento y blanqueo, que tienen cierta complejidad cuando se utiliza papelote con restos orgánicos y a veces se obtiene un producto de calidad poco aceptable. En cualquier caso, se producen un 20% de pérdidas en el proceso, generándose un residuo que ha de eliminarse.

VIDRIO

El vidrio es uno de los materiales de la recogida selectiva de RSU más fácilmente reciclable. Representa el 5% de los RSU de Huelva y es gestionado por la S.I.G. Ecovidrio. Generalmente la industria del vidrio transforma el vidrio reciclado en un material granular, que se mezcla con arena, caliza, carbonato sódico y otros materiales empleados en la fabricación del vidrio, obteniéndose a 1500 ºC un vidrio fundido del cual pueden fabricarse nuevas botellas, jarros, etc. Un kilogramo de vidrio granulado reemplaza a 1.2 kg de materias primas, y disminuye las emisiones de CO_2 en un 5%, producidos en la descomposición térmica de los carbonatos. Es esencial la recogida selectiva del vidrio, ya que un 90% del mismo se recicla con facilidad, mientras que, si ha de separarse de RSU mezclados, no se llega al 40%. Actualmente se comienzan a reciclar los monitores de TVs y PCs, generalmente para emplearse con el mismo fin, pero se pueden emplear también en la industria cerámica.



PLÁSTICOS

La recogida selectiva de plásticos en Huelva representa un 9.5% de los RSU, que pueden clasificarse como correspondientes a envases (6.9%) y no envases (2.6%). El problema de la contaminación por plásticos es uno de los más graves que afectan a la humanidad, ya que muchos acaban en los océanos (sobre todo las bolsas de plástico) causando graves problemas a la vida marina. Los plásticos derivan fundamentalmente del petróleo, del que un 4% se utiliza en su fabricación. Los dos métodos más empleados en el reciclaje de plásticos son el mecánico y el químico. En el reciclaje mecánico los residuos de plástico se trituran para formar gránulos que después de un proceso de lavado y secado se someten a extrusión para obtener pellets u otros productos. El reciclaje químico queda prácticamente restringido al reciclaje de polímeros industriales. Sin embargo, la recuperación mecánica o química de plásticos procedentes de RSU no es viable económicamente en muchas ocasiones, según estudios de la compañía Bayer. Incluso los plásticos reciclados disminuyen su calidad en cada nuevo reciclo y en estos casos su destino final es la incineración con recuperación de energía, ya que su poder calorífico es incluso superior al de varios tipos de carbones y al gasóleo de calefacción. Se estima que si en 2025 se prohíben definitivamente los vertederos en la UE, se podría evitar que 60 Mt de plásticos fueran a vertederos. Se conseguiría reciclar del orden de 5 Mt y el resto, si se destina a plantas WtE, permitirían producir la energía equivalente al 34% de las importaciones de gas natural a Europa. Existen muchas empresas de plásticos que reciclan tereftalato de polietileno (PET) procedente de envases de refrescos y zumos de frutas, así como productos de fibra de poliéster. De estos materiales se obtienen toda una serie de productos, como sacos de dormir, colchonetas, respaldos de asientos, etc., e incluso prendas de vestir.

2.5. Consumo de energía y generación de GEI en la gestión de RSU

Los procesos de transporte, tratamiento y reciclaje de RSU implican consumos energéticos, costes y la producción de GEI, que han de tenerse en cuenta en un programa de gestión de estos residuos. Algunos de los procesos que han de considerarse son los siguientes:

- Recogida y transporte de RSU
- Pretratamiento de los RSU [clasificación, trituración, etc.]
- Descomposición en vertederos [generación de metano]
- Combustión de residuos [generación de CO_2]
- Tratamientos biológicos/mecánicos

Es evidente que la mejor forma de reducir el consumo de energía y la generación de GEI es reducir el consumo y por lo tanto la generación de residuos. Sin embargo, sustituyendo materias primas vírgenes por materiales reciclables se disminuye el consumo de energía, y por lo tanto la producción de GEI.

2.6. Bibliografía

1. | Jouhara, H., Czajczynska, D., Ghazal, H., Kryzynska, R, Anguilano, L., Reynolds, A.J., Spencer, N., *"Municipal waste management systems for domestic use"*, Energy 139, 485-506 (2017).

2. | Chandrappa, R., Das, D.B., *"Solid waste management: Principles and practice"* Springer-Verlag, Berlin (2012).

3. | World Bank Group, Washington DC (2023); Urban development, https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment

4. | INE. Instituto Nacional de Estadística. Cuentas medioambientales. Serie 2015-2021 (2023). https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177062&menu=ultiDatos&idp=1254735976603

5. | INE. Instituto Nacional de Estadística, *"Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos, Año 2021"* (2023).

6. | Directive 2008/98/EC on Waste (Waste Framework Directive)-Environment; European Commission, Bruselas, Bélgica (2008).

7. | EU Circular Economy Action Plan (2020) https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en

8. | EUROSAT Municipal waste statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#:~:text=48%20%25%20of%20municipal%20waste%20in,recycling%20and%20composting)%20in%202022

9. | STATISTICA: Installed capacity of municipal waste energy in Europe from 2010 to 2023, by country https://www.statista.com/statistics/1122082/europe-waste-to-energy-capacity-by-country/

10. | Aeversu. Asociación de Valorización Energética de Residuos Urbanos (2023). https://aeversu.org/la-conversion-de-residuos-en-energia-una-solucion-para-dar-calefaccion-a-hogares/

11. | IMA 2023. "*Informe de Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2023"*. Junta de Andalucía (2023).

12. | MITECO. Secretaría de Medio Ambiente. Memoria Anual de Generación y Gestión de residuos. Residuos de Competencia Municipal (2018).

13. | Pinto, F.J., "La gestión sostenible de los residuos domiciliarios en la provincia de Huelva". Jornadas Diputación de Huelva (Nov. 2020).

CAPÍTULO

03

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RSU

3.1. Introducción
3.2. Pretratamiento de los RSU
3.3. Tratamiento biológico
3.3.1. Combustibles sólidos recuperados (CSR) y derivados de residuos (CDR)
3.4. Valorización energética de los RSU
3.4.1. Incineración
3.4.2. Pirólisis
3.4.3. Gasificación
3.4.4. Plasma térmico
3.5. Bibliografía

03

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RSU

3.1. Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) corresponden a los residuos domésticos y comerciales y constituyen del orden de un 10% (13-15% en la UE) del conjunto de residuos sólidos que se generan, que incluyen, asimismo, los residuos procedentes de agricultura, explotaciones mineras, industriales, producción de energía, construcción y demolición. La eliminación de RSU ha sido siempre una preocupación de la sociedad por motivos de seguridad y ha de realizarse una gestión sostenible de los mismos.

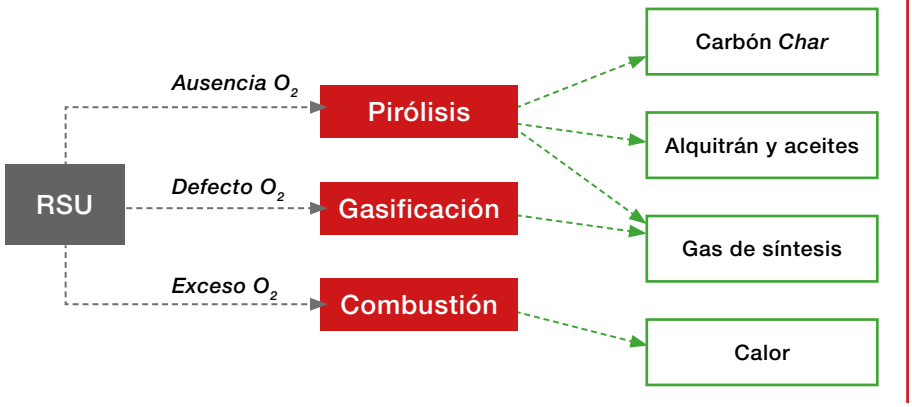
Siguiendo el concepto de la UE de jerarquía en la gestión de residuos sólidos (RS), la prioridad radica en evitar/prevenir su generación y la opción menos deseable es la eliminación en vertederos, con el fin de evitar las emisiones de metano (CH_4) y otros gases de efecto invernadero (GEI), el uso improductivo del suelo y su contaminación de las aguas subterráneas. Teniendo siempre presente el reciclaje, existen tecnologías que permiten generar energía a partir de los RSU, unas de tipo biológico (digestión de la materia orgánica para producir biogás) y otras de tipo térmico (incineración, gasificación y pirólisis).

Las directivas sobre vertederos exigen un pretratamiento de los RSU con el fin de separar la materia biodegradable, lo que ha propiciado los tratamientos biológicos, que son comunes en aquellos lugares que no disponen de los tratamientos térmicos.

Entre los tratamientos térmicos la incineración es el más empleado y sobre el que se tiene una mayor experiencia. Consiste en la combustión de los RSU (en masa, o pretratados) con una cantidad de oxígeno suficiente para conseguir la combustión completa. Las plantas de incineración operan a una temperatura $T > 850\ ^{o}C$, convirtiéndose el residuo en CO_2 y vapor de agua. La parte no combustible se retira como escoria, que contiene algo de carbón, metales y vidrio.

Existen otras alternativas, que a veces se denominan "*Tratamiento Térmico Avanzado*", como son la *pirólisis* y la *gasificación*, para transformar los RSU en combustibles versátiles, bien para la producción de energía o para otros usos, aunque son técnicas en fase de desarrollo. Un esquema de los tratamientos térmicos se indica en la Fig. 3.1.

FIGURA 03-1 Tecnologías de transformación de los RSU y productos que se obtienen.



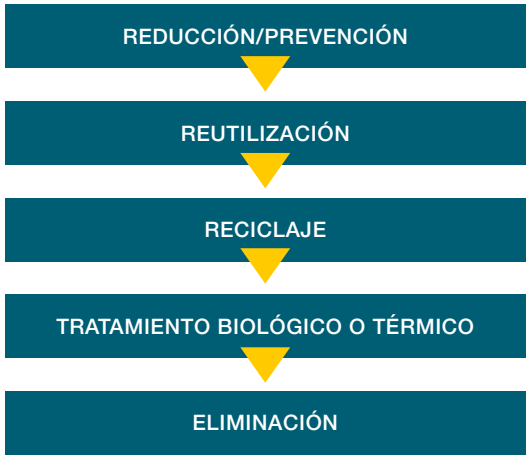
En la pirólisis la degradación térmica de RSU se realiza en ausencia de oxígeno, normalmente a una temperatura entre 400-850 ºC. Los productos de la pirólisis son el gas de síntesis (*syngas*) que contiene CO, H_2, CH_4 y diversos compuestos orgánicos líquidos o volátiles (VOCs), y un residuo carbonoso (*char*). La gasificación es un método intermedio entre la incineración y la pirólisis, en que el tratamiento térmico de RSU se realiza en una atmósfera pobre de oxígeno, de forma que no se llega a la combustión completa, a una temperatura T >650 ºC. Se forma un *syngas* que contiene básicamente CO, H_2 y CH_4, y un residuo carbonoso con un escaso contenido en carbono.

Tanto en la pirólisis como en la gasificación se tratan preferentemente los materiales biodegradables presentes en los RSU (*p.ej.* papel, restos de comida, residuos de jardinería) y plásticos. Es por ello conveniente realizar un pretratamiento para eliminar los materiales no combustibles, como *p.ej.* metales y vidrio.

3.2. Pretratamiento de los RSU

Los RSU destinados a procesos de valorización energética suelen someterse a una serie de tratamientos previos al proceso térmico. De acuerdo con la Directiva europea de 12 de diciembre de 2008 (2008/98/CE), se establece una jerarquía de gestión de residuos, que da prioridad a las tres R's (*Reducción, Reutilización y Reciclaje*), Fig. 3.2, que es una forma de reducir los residuos con un impacto ambiental mínimo. La prevención en la producción de residuos es la opción más favorable, mientras que la eliminación en vertedero o por incineración las menos favorables.

FIGURA 03-2 Jerarquía en la gestión de residuos.



El objetivo de la directiva es conseguir el máximo aprovechamiento de los residuos, al considerarlos como un recurso, lo que permite el ahorro de materias primas y energía. Mientras que con la reutilización y el reciclaje se busca una valorización material, con las tecnologías de valorización energética (*WtE, waste-to-energy*) se trata de transformar la energía contenida en los residuos en calor, vapor de agua y electricidad. Se consigue así aprovechar el residuo, ya que la energía que se obtiene del mismo tendría que obtenerse en plantas térmicas convencionales con combustibles fósiles. Asimismo, la legislación prioriza las operaciones de *WtE* frente a las de eliminación (*p.ej.* vertederos controlados). A continuación, se consideran las opciones en la jerarquía en la gestión de residuos, indicadas en la Fig. 3.2.

1. *Reducción o prevención*. Se suele decir que "el mejor residuo es el que no se genera"; por ese motivo la prevención en la generación de residuos es fundamental para reducir el problema. Si bien esta estrategia es la mejor, es la más difícil de llevar a la práctica, ya que no solamente requiere un elevado grado de concienciación ciudadana, sino que se han de implicar los diferentes estamentos de la sociedad (industrias, gobiernos, instituciones, etc.), lo que es cada vez más complejo en un mundo globalizado. En la prevención se incluye el desarrollo de tecnologías limpias y el diseño de productos que tengan un impacto medioambiental mínimo en su ciclo de vida.

2. *Reutilización*. La reutilización se refiere al uso de los residuos como materias primas, o bien sin que exista un proceso de transformación. Un ejemplo típico es el de las botellas retornables.

3. *Reciclaje*. Este concepto implica que el residuo, tras sufrir una transformación, se puede volver a utilizar, ya sea con un fin similar o diferente a aquel para el que fue fabricado. En esta tercera etapa de la jerarquía se suelen incluir también los procesos de tratamiento biológico, como el *compostaje* y la *biometanización*. En la jerarquía europea se incluyen en esta etapa todos aquellos procesos que tengan como finalidad la valorización material del residuo (nuevos materiales o materias primas). Como en el caso de la reducción, el reciclaje depende en gran medida de la concienciación ciudadana y del grado de implicación de los organismos responsables (gobiernos y ayuntamientos), ya que su éxito depende principalmente de la eficacia en la recogida selectiva.

4. *Tratamiento biológico o térmico*. Se refiere a todo lo que no sea reciclaje o valorización material. Dentro de este término se incluye la valorización energética, que consiste en aprovechar la energía presente en los residuos para la generación de energía: electricidad, vapor de agua o agua caliente. En este apartado se incluye la incineración con recuperación de energía, la coincineración (*p.ej.* con carbón), la gasificación (convencional o con plasma) y la pirólisis (estas dos últimas técnicas siempre que el producto generado no se utilice en procesos químicos). Sin embargo, cualquier incineración no puede considerarse como una operación de valorización, sino que han de cumplirse ciertos requisitos de eficacia energética, que se considerarán posteriormente.

5. *Eliminación*. Corresponde a la última opción de gestión e incluye toda operación que no conduzca a una valorización material o energética, al menos por encima de ciertos límites. En esta categoría se encuentran los *vertederos controlados,* que han sido uno de los principales métodos de gestión de los RSU durante décadas; también se incluyen las plantas de incineración o los procesos de valorización energética de baja eficacia. Por tanto, se considera a los vertederos controlados como la última opción.

Una vez implementadas las tres estrategias de gestión, aún queda una fracción que no se puede reutilizar ni reciclar, y no es adecuada para realizar tratamientos biológicos, ya que, según la opinión más difundida entre las empresas de tratamiento de residuos, la presencia de determinados contaminantes puede causar problemas técnicos y disminuir la calidad del compost producido. Esta parte de los residuos, cuya cantidad depende de las estrategias de gestión, del éxito en la recogida selectiva y de la concienciación ciudadana se denomina *fracción resto o rechazo*. Dicha fracción ha de minimizarse y aún en los países con mayores tasas de reciclaje puede llegar a superar el 25% del total de RSU que se producen [1].

3.3. Tratamiento biológico

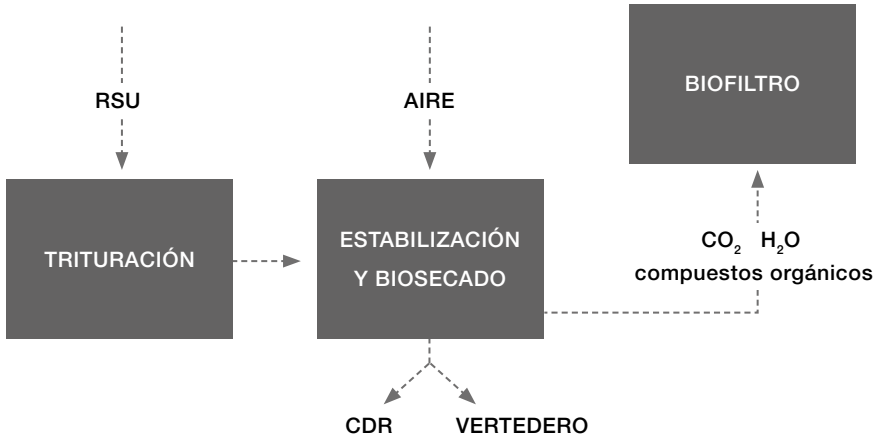
La recogida selectiva de RSU (vidrio, papel/cartón, envases y materia orgánica) permite valorizar cada una de las fracciones. Sin embargo, si se opta por la eliminación en vertedero controlado, la fracción resto puede someterse a procesos de estabilización e higienización, como son los tratamientos *biológico-mecánico* y *mecánico-biológico.* Además, pueden recuperarse combustibles gaseosos, lo cual presenta mayor dificultad en los vertederos.

El tratamiento biológico suele ser una combinación de un pretratamiento mecánico, seguido de procesos aerobios y anaerobios para la producción de biogás y el aprovechamiento energético de los residuos. La deshidratación biológica permite una reducción del volumen de residuos.

Los procesos biológicos (*bioestabilización o biosecado*) no son procesos que puedan englobarse dentro del término de reciclaje, pero pueden contribuir a reducir la cantidad de la fracción resto, debido a la deshidratación que se produce.

El proceso *biológico-mecánico*, Fig. 3.3, se inicia con un tratamiento mecánico y se potencia la evaporación de la humedad frente a la degradación de materia orgánica. No obstante, el material resultante no se puede considerar compost debido a su baja calidad, sino una fracción resto seca que se puede emplear como CDR o bien depositarse en un vertedero.

FIGURA 03-3 Proceso de estabilización y biosecado de residuos.



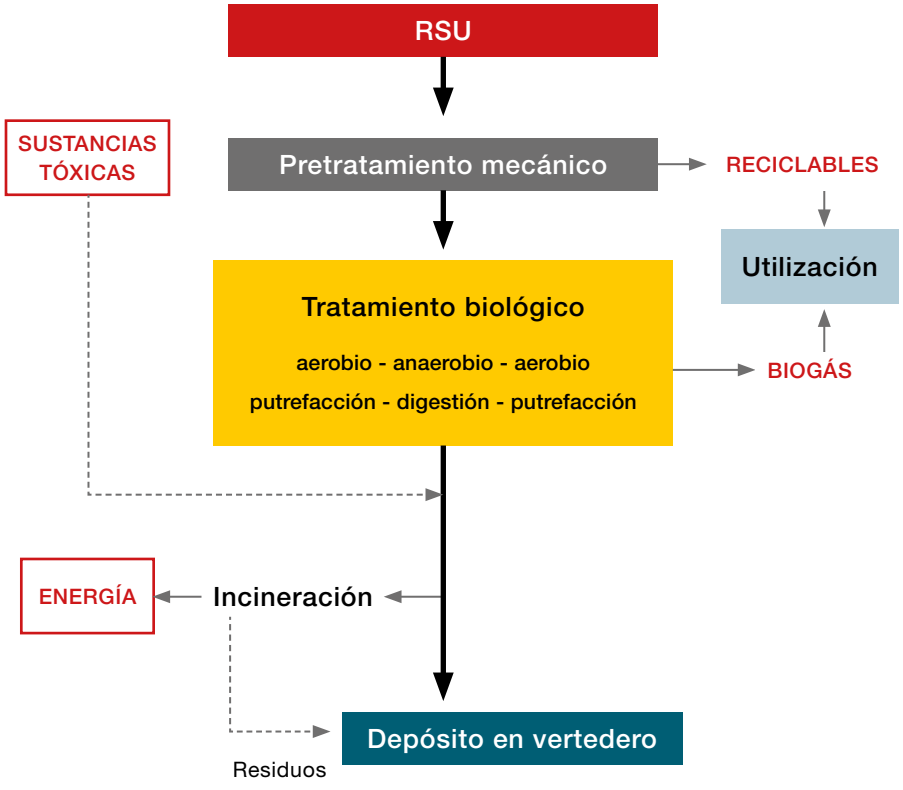
Dependiendo de la calidad de los RSU que se someten a este proceso se consigue una reducción en peso de los RSU entre 25-30%, debido al agua evaporada. En la Fig. 3.4 se ilustra una instalación de tratamiento mecánico-biológico en Giussago (Italia).

FIGURA 03-4 Planta en Giussago (Italia) con el proceso BIOCUBI [2].

En el proceso *mecánico-biológico*, Fig. 3.5, se lleva a cabo una aireación que favorece el crecimiento de microorganismos y aumenta la temperatura del residuo, de manera similar al compostaje, con lo que se consigue la evaporación de humedad.

El tratamiento mecánico consta de las etapas de trituración, cribado y recuperación de materiales no fermentables (papel, plástico, metales). La trituración se realiza con trituradoras de cizalla y molinos de martillos y el cribado en un trómel con tamaños de malla de 40-120 mm. En la etapa de tratamiento mecánico se pueden separar papel y plásticos para su valorización energética, así como recuperar los metales férreos, con un separador magnético, y los no férreos mediante corrientes de Foucault.

FIGURA 03-5 Tratamiento mecánico-biológico de RSU mediante el proceso BIOPERCOLAT [3].



En el tratamiento biológico se utilizan residuos orgánicos (restos de comida, residuos comerciales, residuos biológicos), pudiéndose añadir hasta un 50% de lodos de depuradora. Se realiza en primer lugar una digestión aerobia en la que se descomponen sustancias fácilmente biodegradables. A esta etapa sigue una digestión anaerobia en la que la materia orgánica se convierte en biogás (con un 55-65% de metano), que se suele utilizar en una planta de cogeneración, para la producción de electricidad y calor. Una vez realizadas las fermentaciones aerobia/anaerobia se obtiene, además del biogás, un combustible derivado de residuos (CDR) que se puede incinerar o simplemente enviar a vertedero.

Una planta de tratamiento mecánico-biológico o de biometanización se ilustra en la Fig. 3.6.

FIGURA 03-6 Planta de biometanización de Cogersa (Asturias) [4].

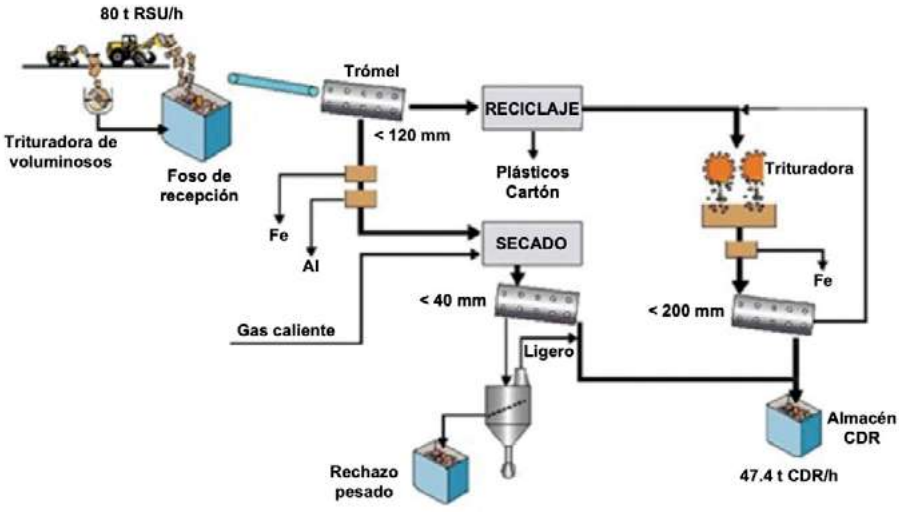
3.3.1. Combustibles sólidos recuperados (CSR) y derivados de residuos (CDR)

Los *combustibles sólidos recuperados* (CSR) son combustibles sólidos obtenidos a partir de residuos no peligrosos para su valorización energética en plantas de incineración o coincineración. Suelen obtenerse a partir de los rechazos del tratamiento mecánico-biológico, que cumplen la especificación técnica CEN-TS-15359 del Comité Europeo de Normalización. Estas especificaciones se refieren a su poder calorífico y al contenido en cloro y mercurio.

Los *combustibles derivados de residuos* (CDR) se obtienen también a partir de residuos peligrosos o no peligrosos para su valorización energética en plantas de incineración o coin-

cineración y no están sujetos a la normativa CEN-TS-15359. Su empleo para la obtención de energía está sometido a la normativa de incineración de residuos, que es menos restrictiva si se destinan a la coincineración. En la Fig. 3.7 se indica un esquema típico de una planta de pretratamiento de RSU para la obtención de CDRs.

FIGURA 03-7 Esquema de obtención de CDR en la planta de SOGAMA [5].



En España no existe una gran demanda de CSRs, pero sí de CDRs, principalmente con destino a plantas cementeras.

Se utilizan asimismo los CDRs en los hornos de incineración de lecho fluidizado. Se realiza una clasificación por tamaños que permita obtener una distribución lo más uniforme posible mediante trómeles. Las partículas de gran tamaño se someten a trituración y posterior clasificación por tamaños. En algunos casos puede ser necesario un secado de la fracción fina, con el fin de reducir la humedad y aumentar su poder calorífico. Tanto de las fracciones de finos o gruesos se separan los metales. Finalmente, de los finos se elimina la fracción pesada, que suele corresponder a inertes (vidrio, piedras) mediante una separación neumática (por densidad). Se obtiene un CDR de elevado poder calorífico y casi sin materiales inertes que suele quemarse con algún otro combustible (*p.ej.* lodos de depuradora, madera o carbón)

3.4. Valorización energética de los RSU

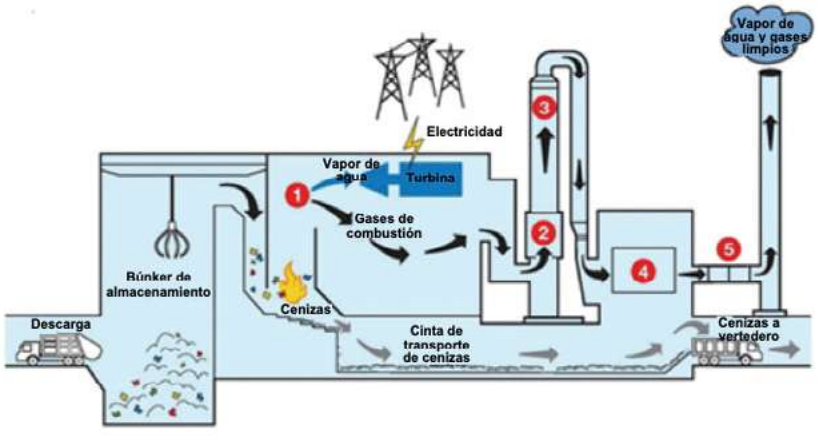
La eliminación de RSU mediante vertederos no puede considerarse una opción de tratamiento, es más bien de almacenamiento, ya que algunos materiales se encuentran allí en una concentración mayor que en sus fuentes minerales originales. Los vertederos generan gases, como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica, principalmente CH_4 que es un GEI más potente que el CO_2 por sus efectos sobre el calentamiento global. El CH_4 puede capturarse en parte para generar electricidad o con otros fines energéticos.

Además de los tratamientos biológicos indicados anteriormente, están los métodos de valorización energética, que consisten en aprovechar la energía presente en los residuos para la generación de energía en forma de electricidad o vapor de agua para calefacción. La valorización energética de los RSU se realiza comúnmente mediante tratamientos térmicos, que consisten en someter al residuo a elevada temperatura en presencia o ausencia de oxígeno.

3.4.1. Incineración

La incineración en masa es el procedimiento más utilizado para el tratamiento de RSU. Una de sus principales ventajas es la reducción de la cantidad de residuos a eliminar, aunque en la combustión se generan una serie de productos gaseosos y cenizas que requieren un tratamiento específico: partículas, SO_2, NO_x, Hg, dioxinas y furanos, Fig. 3.8.

FIGURA 03-8 Diagrama de una planta de valorización de RSU (*WtE*) [6].



Mediante una selección adecuada de técnicas de tratamiento de las distintas fracciones de RSU y sus residuos se puede conseguir, además de la reducción del residuo final, una minimización de su impacto ambiental.

En la incineración de RSU se realiza su combustión a elevada temperatura en presencia de oxígeno (aire). El calor producido se puede emplear para la obtención de energía (electricidad/calor) mediante el proceso de valorización energética de residuos, *WtE*. Las plantas *WtE* pueden ser de tres tipos:

- Incineración en masa (50-1000 t/día)
- Incineración modular (5-150 t/día)
- Incineración de combustibles derivados de residuos (CDR) (300-1500 t/día)

En Europa existen unas 500 plantas de valorización energética que permitieron en 2022 tratar unos 100 Mt de RSU. El poder calorífico de los RSU se recupera en la caldera para producir vapor. La caldera consta de bancadas de tubos por cuyo exterior circulan los gases de combustión a elevada temperatura. El agua que circula por el interior de los tubos se calienta hasta producir un vapor sobrecalentado, que en el caso de plantas de incineración suele estar a 40 bares y 400 °C. El vapor generado se puede aprovechar de dos maneras principalmente:

Producción de energía eléctrica. Una planta de valorización energética de residuos puede considerarse como un tipo de central termoeléctrica donde se utilizan los residuos como combustible. El vapor se aprovecha para generar energía eléctrica, típicamente mediante un ciclo de Rankine.

Calefacción. En países de clima frío como los del Norte y Centro de Europa, existen redes de agua caliente que llegan a los hogares para calefacción, siendo la fuente de calor las plantas de valorización energética de residuos.

El aprovechamiento del vapor generado en la caldera para calefacción es más eficaz que la producción de energía eléctrica, ya que ésta implica una transformación de la energía calorífica, con la consiguiente limitación termodinámica de la eficacia. La producción de ambos tipos de energía se realiza en las denominadas plantas combinadas de electricidad y calor (*combined heat and power, CHP*). Se estima que la producción de calor puede tener un rendimiento hasta del 80%, mientras que para la energía eléctrica se sitúa entre un 25-35% [7]. En la Fig. 3.9 se ilustra una planta de valorización de RSU.

FIGURA 03-9 Planta de valorización de RSU (*WtE*) [8].

La eficacia de las plantas CHP suele ser muy elevada y se recomiendan entre las Mejores técnicas disponibles MTD (*Best available techniques, BAT*) [9]. No obstante, el aprovechamiento de la energía para calefacción está muy supeditado a las condiciones climatológicas, especialmente en países del Sur de Europa, en que el clima es más caluroso.

3.4.2. Pirólisis

La pirólisis es un proceso químico de descomposición térmica en el que se obtienen diferentes productos al someter un material orgánico, o con elevado contenido en carbono, a

elevadas temperaturas (650-850 ºC) en ausencia de oxígeno. Se utiliza habitualmente en la producción de coque metalúrgico a partir de carbón; sin embargo, es posible también el tratamiento de la fracción resto de los RSU mediante este método.

Al calentar el residuo en total ausencia de O_2, la materia orgánica se descompone por un craqueo térmico y reacciones de condensación, obteniéndose tres fracciones cuya proporción depende de la composición del residuo, de la temperatura y de las condiciones en que se haya producido el tratamiento:

- *Gas de pirólisis (syngas).* Se trata de un gas con compuestos volátiles de elevado poder calorífico. En él están presentes CO, CO_2, H_2, CH_4, C_2H_6, C_3H_8 y también C_2H_4, C_3H_6, C_4H_8, C_4H_6 y otros hidrocarburos gaseosos de elevado peso molecular. El gas de pirólisis tiene un poder calorífico entre 10-20 MJ/m^3 y puede emplearse en una planta para la producción de energía (electricidad o vapor de agua).
- *Alquitranes y aceite de pirólisis.* Esta fracción está formada por compuestos orgánicos condensables que forman alquitranes y aceites, con un elevado poder calorífico, que en teoría puede utilizarse como combustible.
- *Residuo sólido carbonoso.* Este material con elevado contenido en carbono puede adoptar diferentes formas, en función de las condiciones y el material pirolizado: *char*, coque u hollín (*soot*). El residuo sólido carbonoso que se obtiene en la pirólisis de RSU o de su fracción resto se suele denominar *char*.

El gas de pirólisis se puede gestionar de dos maneras diferentes:

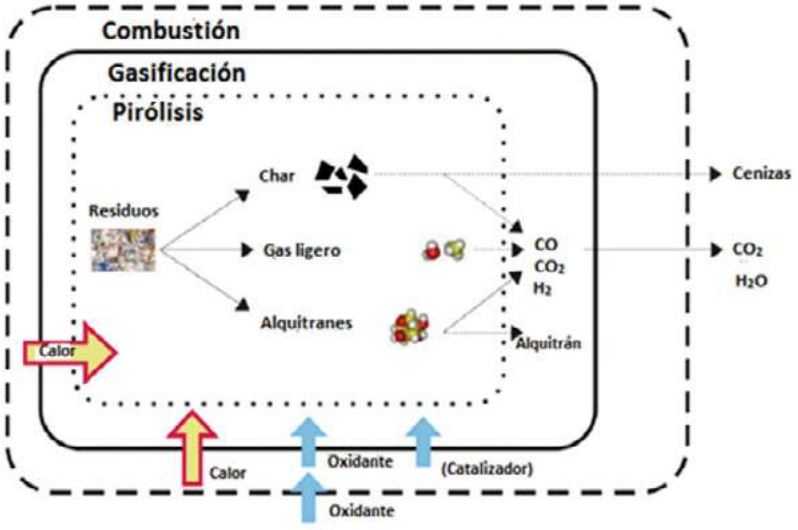
- *Combustión.* Debido a su elevado poder calorífico el gas se quema para producir energía en una cámara de combustión. Se trata de la opción más habitual en las plantas de pirólisis en Europa. La ventaja sobre la incineración convencional es que se necesita un menor exceso de aire, con lo que el tratamiento de gases de combustión puede realizarse con equipos de menor tamaño.
- *Gasificación.* Esta opción tiene lugar en ciertos métodos de gasificación en los que se lleva a cabo una pirólisis previa. El empleo de un agente de gasificación para obtener un *gas de síntesis* hace que aumente la proporción de CO y H_2 respecto a la del gas de pirólisis original. Esta opción se analiza en más detalle en el apartado de gasificación.

3.4.3. Gasificación

El proceso de gasificación consiste en una combustión parcial en condiciones reductoras de un residuo sólido rico en carbono (como puede ser la fracción resto de RSU), con un agente de gasificación (aire u oxígeno u otras mezclas de gases en cantidades limitadas) para generar un gas combustible que contiene CO (20% vol.), H_2 (20% vol.), CO_2 (10% vol.) y CH_4 (2% vol.), completándose el balance con N_2 y un producto sólido rico en carbono. Puede introducirse al reactor vapor de agua para una producción mayor de CO y H_2. La gasificación puede considerarse como un proceso intermedio entre la pirólisis y la combustión, y suele realizarse a temperaturas superiores a los 650 ºC.

En la Fig. 3.10 se indican esquemáticamente las etapas de un proceso de gasificación, junto con la combustión y pirólisis.

FIGURA 03-10 Representación esquemática de las etapas de pirólisis, gasificación y combustión [10].



- *Calentamiento y secado.* Tiene lugar alrededor de los 160 ºC e interviene el agua líquida, vapor de agua y la fase sólida porosa.

- *Desvolatilización* (pirólisis o descomposición térmica). Se producen reacciones de craqueo, obteniéndose gases ligeros (H_2, CO, CO_2, CH_4, H_2O, NH_3), breas (mezcla de gases y líquidos) y *char* (residuo sólido desvolatilizado).
- *Reacciones químicas.* Tienen lugar en un entorno reductor, a temperaturas superiores a los 700 °C, en presencia de oxígeno en una proporción inferior a 25-50% de la oxidación estequiométrica.

El proceso es de una cierta complejidad, ya que por un lado se produce la combustión por reacción de compuestos orgánicos con el O_2, pero al no haber una cantidad suficiente se produce también pirólisis. Tienen lugar reacciones tanto en fase homogénea (gaseosa) como heterogénea (sólido-gas). Estas últimas son las que conducen al proceso de gasificación, ya que mediante ellas el carbono presente en fase sólida (*char*) se transfiere a la fase gaseosa. Todos estos procesos y reacciones endotérmicas tienen lugar gracias al calor liberado en el resto de reacciones (principalmente combustión), que son exotérmicas.

En la Fig. 3.11 se ilustra una planta de gasificación de Energos, en la isla de Wight, con una capacidad de 30 000 t/año de CDR con un contenido elevado de materia biodegradable (70-80%) y un poder calorífico de 11-14 MJ/kg. Tiene una producción de 1.8 MWe de electricidad y calor residual que se utiliza localmente.

FIGURA 03-11 Planta de gasificación de Energos [11].

En la gasificación se produce gas de síntesis (*syngas*, CO + H_2), que tiene un elevado poder calorífico (10-18 MJ/Nm^3). Este gas en teoría se puede utilizar para la producción de metanol (CH_3OH) y abrir por tanto muchas vías de síntesis petroquímica. No obstante, el gas de síntesis generado a partir de gasificación de fracción resto de RSU se suele quemar para obtener vapor y electricidad. Como en el caso de la pirólisis, la gasificación se utilizó con frecuencia con otro tipo de materias primas, tales como el carbón o biomasa, hasta que fueron desplazadas por el gas natural entre 1930-1950. Hay diferencias sustanciales entre gasificación y combustión:

- En la gasificación solo se produce un 20% de combustión del sólido, el resto del sólido se convierte en gas ($CO+H_2$).
- Se requiere una menor área que en el proceso de combustión, básicamente proporcional a la combustión que tiene lugar.
- Casi todas las cenizas se pueden eliminar del reactor de gasificación por gravedad, antes de que el gas entre a la caldera.
- Si el gas se enfría para utilizarlo como combustible los vapores de alquitrán pueden separarse y a veces se reciclan al reactor.
- En el proceso de gasificación el gas se produce a temperaturas más bajas que en la combustión, por lo que se reduce la formación de NO_x.

Desde el punto de vista medioambiental la gasificación presenta ciertas ventajas. En un entorno con escasa presencia de oxígeno y abundante en hidrógeno, el cloro es difícil que se una a las moléculas orgánicas pesadas, formándose simplemente HCl, que es fácil de depurar en el *syngas*. Por otro lado, para la formación de dioxinas es necesaria la presencia de al menos un 6% de oxígeno, lo que no es posible en sistemas de gasificación.

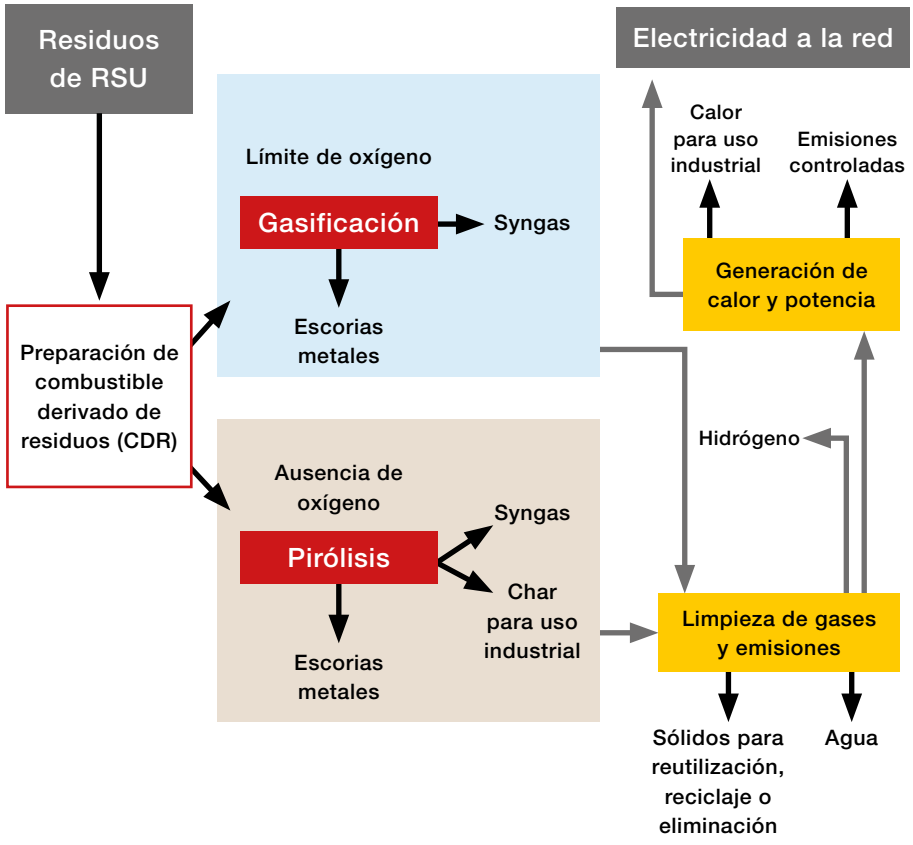
AGENTES DE GASIFICACIÓN

El reaccionante que se utiliza para llevar a cabo la gasificación es un gas. El aire es el agente más habitual en la gasificación de RSU en masa o de su fracción resto, utilizándose por debajo de las proporciones estequiométricas. Se produce por tanto una combustión parcial que proporciona el calor necesario para que tengan lugar otras reacciones. Sin embargo, al gasificar con aire la proporción de N_2 en el gas de síntesis es elevada (un 60%), lo que hace

que dicho gas no sea de buena calidad. La baja calidad y la elevada proporción de N_2 hacen que el gas de síntesis obtenido con aire no se utilice en la síntesis de metanol, sino que suele emplearse con fines energéticos. El poder calorífico del gas de síntesis generado con aire es bajo, entre 4-7 MJ/m^3.

En la Fig. 3.12 se indican los procesos de las técnicas y el empleo de sus productos gaseosos para la generación de energía.

FIGURA 03-12 Técnicas de pirólisis y gasificación [11].



El gas de síntesis que se obtiene en los procesos de pirólisis o gasificación puede emplearse con distintos fines, si bien se utiliza fundamentalmente para producir energía o como materia prima para la obtención de productos químicos. Para la producción de energía el gas de síntesis se quema en una caldera, generándose vapor de agua que puede accionar una turbina para generar electricidad o también para calefacción. Si se trata de emplear el gas de síntesis en procesos químicos es necesario realizar una limpieza del gas, particularmente de compuestos de azufre y halógenos. En cualquier caso, los gases que se producen en la combustión del gas de síntesis han de someterse a procesos de limpieza, igual que ocurre con las plantas de incineración.

Las plantas de pirólisis y gasificación son de menor tamaño que las de incineración y son modulares, si se han de tratar cantidades elevadas de RSU.

3.4.4. Plasma térmico

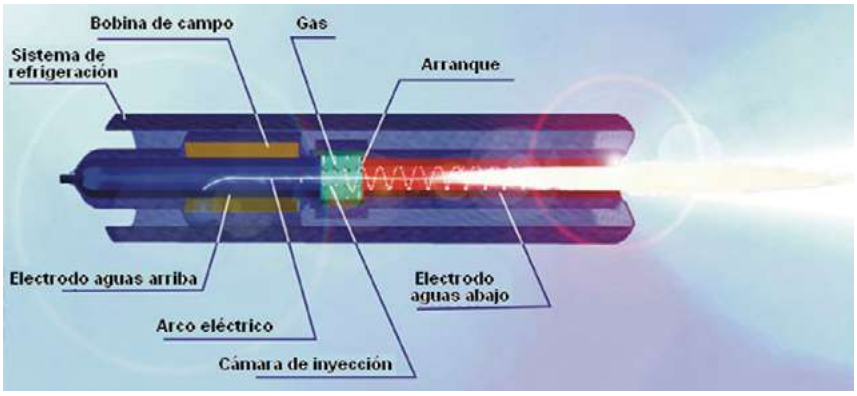
El plasma se considera el cuarto estado de la materia y está formado por un gas a temperaturas muy elevadas (puede llegar a los 5000 °C) cuyas partículas se encuentran altamente ionizadas. La antorcha de plasma se puede obtener de diferentes formas, lo que va a dar lugar también a diferentes tipos de plasma, en función de cómo se consiga la ionización del gas. Los métodos para obtener el plasma pueden ser eléctricos o bien mediante ondas tales como radiofrecuencias y microondas. El plasma tiene aplicaciones en campos como industrias metálicas, la química analítica y el tratamiento de residuos.

En las plantas comerciales de tratamiento de residuos sólidos el plasma se obtiene principalmente mediante arco eléctrico. Para ello se establece una fuerte diferencia de potencial entre dos electrodos, el gas entre ambos se ioniza y a continuación se inyecta un gas (N_2, aire, vapor de H_2O, CO_2, Ar u otros gases) que hace que dicho arco se transforme en una antorcha a elevada temperatura. Dentro de los plasmas de arco eléctrico se puede hacer otra clasificación en función de la naturaleza de los electrodos [12]:

Plasma con arco transferido. En este caso la descarga eléctrica tiene lugar entre un electrodo y un material conductor sobre el que se deposita el residuo. Este tipo de plasma es sensible a las variaciones en la composición del residuo, por lo que su uso se encuentra menos extendido a nivel comercial.

Plasma con arco no transferido. Como se aprecia en la Fig. 3.13, los electrodos que se emplean para efectuar la descarga son independientes del residuo y se utiliza un gas para mantener la antorcha sobre la que inciden los residuos o bien el gas de síntesis.

FIGURA 03-13 Esquema de funcionamiento de un plasma de arco no transferido [13].



El plasma, como tal, no es un proceso de tratamiento de RSU, sino una técnica que permite llevar a cabo otros procesos en función de las proporciones de O_2, lo que puede dar lugar a pirólisis, gasificación o incineración. Los actuales métodos de tratamiento con plasma de RSU y fracción resto los convierten en gas de síntesis y un residuo de tipo vidrioso que se denomina *escoria vitrificada*.

Cuando se realiza el tratamiento de residuos con plasma se producen los siguientes fenómenos, que constituyen sus principales ventajas:

- *Gasificación del residuo.* Se genera un gas de síntesis formado principalmente por CO y H_2 (*syngas*). Este se somete posteriormente a una limpieza antes de su utilización para eliminar partículas y otros contaminantes. El gas de síntesis puede emplearse para producir calor y electricidad por combustión, y si no contiene contaminantes puede emplearse en la síntesis química de metanol.

- *Destrucción de algunos contaminantes.* Las elevadas temperaturas que se alcanzan en el plasma hacen que gran parte de los compuestos orgánicos que entran en contacto con la antorcha o circulan cerca de ella se transformen en moléculas más sencillas. Como consecuencia de esto se produce una disminución de compuestos orgánicos volátiles y posibles precursores de dioxinas y furanos.
- *Fusión y vitrificación de los residuos sólidos.* El residuo de la gasificación con plasma es un material no combustible fundido debido a las elevadas temperaturas. Esto permite que tras un enfriamiento rápido se consiga un material vítreo (*slag*) con buenas propiedades en relación con su lixiviación. Puede emplearse en aislamientos, como material de relleno, en la fabricación de baldosas y como base de carreteras.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- *Contaminantes.* Aunque la antorcha del plasma elimina gran parte de los contaminantes orgánicos, no elimina los metales pesados que se encuentran en fase gaseosa y además su volatilización es aún mayor debido a las elevadas temperaturas. Asimismo, el plasma no permite eliminar contaminantes formados por moléculas sencillas (HCl, HF, H_2S).
- *Limpieza del gas de síntesis.* El gas de síntesis contiene HCl y H_2S que le impiden cumplir con los requisitos de calidad para su posterior utilización, por lo que es necesario someter el gas de síntesis a un tratamiento (lavado) que permita eliminar partículas, así como estos contaminantes.
- *Metales pesados.* La condensación de metales pesados (salvo el Hg) sobre las partículas arrastradas hace que se generen cenizas en los filtros que pueden presentar una elevada concentración de metales pesados. Sin embargo, la cantidad generada por estas cenizas no es muy elevada.

La tecnología de plasma sigue en proceso de desarrollo, pero por el momento no es económicamente viable, si se compara con la incineración.

3.5. Bibliografía

1. | Nieto, J., *Incineración de RSU en hornos de parrilla. Parámetros básicos de diseño y funcionamiento*; Ingeniería Química, 325, 127-134 (1996).

2. | Martínez Centeno, L.M., *"El tratamiento biológico-mecánico"*, TECONMA, S.A.

3. | Wehrle Werk AG, *"Tecnologías Medioambientales"*. Biometanización de residuos: Proceso BIO-PERCOLAT. Wehrle MA-Gijón.

4. | *Planta de biometanización de la FORM y lodos de EDAR de COGERSA* (Asturias). Retema 79 (Marzo-abril, 2014).

5. | Bischoff, A., *Einsatzbereiche der Wirbelschichtverbrennung für Abfälle oder "warum Abfälle verwirbeln"?*, Berliner Abfallwirtschaftskonferenz, Kvaerner Power, 22 Marzo (2006).

6. | Ecomaine's waste-to-energy power plant.
https://www.ecomaine.org/our-facility/waste-to-energy-plant/

7. | Página web de Babcock & Wilcox-Vølund.
www.volund.dk

8. | GEP ECOTECH. "*Waste incineration power generation, low carbon and environmental protection, help the city's green development"*. Industry news (2020).

9. | European Commission; *Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration* (2006).

10. | Arena, U., *"Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review"*. Waste Management 32, 625-639 (2012).

11. | Defra. *"Advanced thermal treatment of Municipal Solid Waste"*
www.defra.gov.uk

12. | Huang, H., Tang, L., *"Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology"*, Energy Conversion and Management, 48, 1331-1337 (2007).

13. | Página web de Europlasma.
www.europlasma.com

CAPÍTULO

04

VALORIZACIÓN TÉRMICA DE RSU MEDIANTE INCINERACIÓN *(WtE)*

4.1. Introducción
4.2. Energía a partir de la incineración de RSU
4.3. Elementos de una incineradora
4.4. Etapas en el diseño de incineradoras
4.5. Tratamiento de efluentes
4.5.1. Separación de partículas
4.5.2. Separación de gases ácidos
4.5.3. Separación de óxidos de nitrógeno (NOx)
4.5.4. Separación de metales
4.5.5. Productos de combustión incompleta
4.6. Escorias y cenizas volantes
4.6.1. Tratamientos de escorias
4.6.2. Tratamiento de cenizas volantes
4.6.3. Aplicaciones de las escorias
4.6.4. Aplicaciones de las cenizas volantes
4.7. Bibliografía

04.

VALORIZACIÓN TÉRMICA DE RSU MEDIANTE INCINERACIÓN (*WtE*)

4.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, la eliminación de RSU mediante vertederos no puede considerarse una opción de tratamiento, sino más bien de almacenamiento. La eliminación de residuos mediante vertederos representa una pérdida de materiales y de energía, además de los costes de recogida, tratamiento y eliminación final.

La incineración en masa es el procedimiento más utilizado para el tratamiento de RSU. Mediante una selección adecuada de técnicas de tratamiento de las distintas fracciones de RSU se consigue, además de la reducción del residuo final, la minimización del impacto ambiental.

Existen directivas de la UE respecto a la seguridad de los procesos de eliminación de los residuos procedentes de la incineración de RSU. Asimismo, técnicas como el *Análisis del Ciclo de Vida* (LCA) pueden contribuir a optimizar el reciclado, con el fin de conseguir disminuir los efectos medioambientales, manteniendo los costes a un nivel aceptable.

En numerosos países se intenta reducir la cantidad generada e incrementar sus tasas de reutilización y reciclaje. No obstante, cada vez se aplican más los procesos de valorización energética de residuos (*WtE*), sobre todo la incineración, que en algunos países (*p.ej.* Dinamarca) funcionan desde hace más de un siglo.

4.2. Energía a partir de la incineración de RSU

Los RSU representan una fuente de materiales recuperables y una fuente potencial de energía. Los métodos de incineración con recuperación energética pueden permitir un ahorro de petróleo de hasta 550 000 barriles/año (para una planta de 500 000 t/año de capacidad) y

una producción de energía eléctrica de hasta 700 kWh/t RSU. Si los RSU que no pueden ser reutilizados ni reciclados fuesen tratados en plantas *WtE*, en la UE se podría suministrar energía a 70 millones de personas, en forma de calor y electricidad, lo que sería equivalente a 25 centrales térmicas alimentadas con carbón [1]. En España un 42% de los RSU se reciclan, un 47% va a vertedero y solo un 11% se incinera (datos de 2023), con recuperación de energía en 11 plantas de incineración.

Una de las plantas más recientes de la UE, la de CopenHill (Amager Bakke), situada en el centro de Copenhague, entró en funcionamiento en 2017 y puede incinerar 440 000 t/año de RSU, proporcionando electricidad a unos 30 000 hogares y calefacción a unos 72 000, además de emplearse como un centro recreativo para actividades de esquí sobre hierba.

El coste del suelo y el impacto medioambiental negativo de los vertederos ha conducido a buscar alternativas limpias y menos costosas. La *WtE* es una alternativa que presenta las siguientes ventajas:

- Es una forma de obtener un valor añadido de los RSU antes de su eliminación final, lo que es importante cuando las posibilidades de eliminación final son limitadas o los costes de reciclaje (incluida la recogida y el transporte) son elevados. Si se recicla un 25% de los RSU queda un 75% que puede emplearse para recuperar energía.
- La cantidad de materiales que van al vertedero se reduce considerablemente.
- Se evita la contaminación del aire y del agua.
- Se mejoran las tasas de reciclaje.
- Se disminuye la dependencia de combustibles fósiles para la producción de energía.

En plantas de incineración la caldera consta de *secciones huecas* formadas por paredes de agua que recubren la parte interior de la cámara de combustión y de *secciones convectivas* (economizador, evaporador, recalentador) formadas por bancadas de tubos por cuyo exterior circulan los gases de combustión a elevada temperatura. El agua que circula por el interior de los tubos permite obtener un vapor sobrecalentado (a 40 bares y 400 °C) que se puede aprovechar de dos formas principalmente:

Producción de energía eléctrica. Una planta *WtE* de residuos puede considerarse como una central termoeléctrica donde se utilizan los residuos como combustible.

Calefacción. En países de clima frío como los del Norte y Centro de Europa, existen redes de agua caliente que llegan a los hogares para su uso como calefacción, siendo en muchos casos la fuente térmica las plantas *WtE*.

Antes de proceder a la incineración de los RSU suelen seguirse una serie de etapas de preparación. La primera etapa tiene lugar fuera de la planta, mediante la separación de materiales en contenedores específicos: *reciclables, compostaje y fracción resto*. Esta separación ya disminuye el volumen de residuos que va a la incineradora y afecta a la combustión, a la toxicidad de los gases que se producen y a las escorias y cenizas que se generan. Han de separarse asimismo los materiales peligrosos con el fin de:

- Evitar explosiones en el horno debido a materiales inflamables o explosivos.
- Evitar la presencia de componentes metálicos (baterías, partes de automóviles, menaje de cocina, etc.) ya que los metales pueden actuar como precursores de compuestos tóxicos en presencia de cloro (plásticos de PVC) y disolventes orgánicos (pinturas).
- En ocasiones se hace una recuperación de CDR, según se ha indicado previamente, pero lo más frecuente es la incineración en masa.

4.3. Elementos de una incineradora

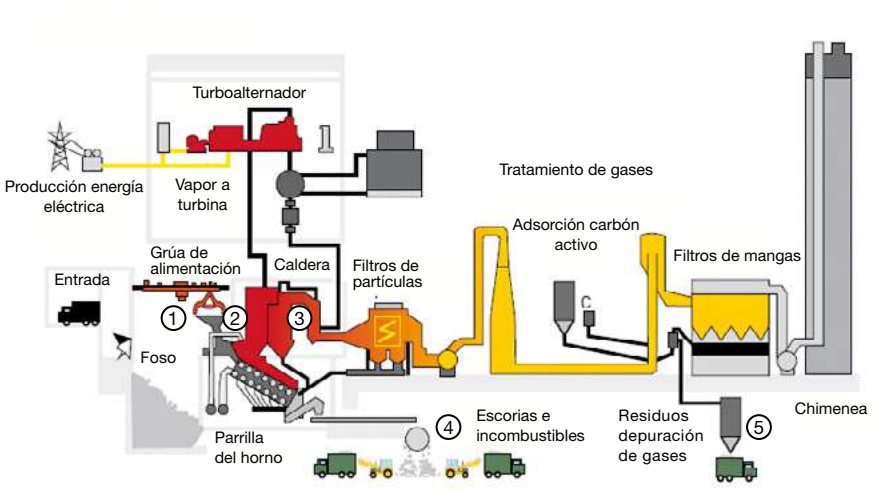
En las plantas de incineración en masa, el residuo se transporta generalmente en camiones hasta un foso desde el que se introducen mediante una grúa al horno de combustión. Las plantas de *WtE*, Fig. 4.1, constan de las siguientes zonas:

- *Horno de combustión.* En el horno se lleva a cabo la combustión del residuo. La parrilla mueve el residuo y se introduce aire por debajo de la misma y por la parte superior. Se producen gases calientes y escorias.
- *Recuperación energética.* En esta zona (caldera) los gases de combustión a temperatura elevada ceden su energía a una bancada de tubos llena de agua, disminuyen-

do su temperatura. El agua caliente se introduce en una caldera para la producción de vapor de agua, que a su vez servirá para la obtención de energía eléctrica.

- *Tratamiento de gases.* Los gases una vez enfriados se limpian mediante ciclones, filtros de mangas, *scrubbers* y otros equipos para eliminar los contaminantes (partículas y gases) presentes en la corriente gaseosa. Una vez tratados se procede a su dispersión a la atmósfera a través de una soplante y la chimenea.

FIGURA 04-1 Diagrama de una planta de incineración [2].



Los sólidos se alimentan a través de una *tolva* ① al horno de combustión o cámara de *combustión primaria* ②. Se introduce aire por la parte inferior de la parrilla (*aire primario*) y por la parte superior (*aire secundario*) para controlar la velocidad y temperatura de combustión. La temperatura más elevada se alcanza sobre la parrilla de combustión. Los gases y pequeñas partículas pasan a través de una cámara de *combustión secundaria* ③ donde se queman a temperaturas superiores a los 850 °C, destruyéndose también los compuestos que causan olores.

Algunas partículas y cenizas volantes pueden no ser retenidas en la cámara de combustión y han de tratarse en equipos para la depuración de gases. Con el fin de compensar las pérdidas de presión que se originan en el tratamiento de gases se puede insuflar aire a través de soplantes.

Los productos finales de la incineración son gases limpios que se descargan a través de una chimenea. Las escorias y materiales inquemados ④ se suelen apagar con agua. Las cenizas de caldera se recogen en tolvas. Las cenizas volantes y los residuos del tratamiento de gases suelen eliminarse a través de vertederos especiales ⑤.

CÁMARA DE COMBUSTIÓN

El diseño, tanto de la cámara de combustión primaria como de la secundaria, ha de ser tal que el grado de incineración de los residuos y productos volátiles generados sea lo más elevado posible. La eficacia se puede incrementar aumentando el tiempo de residencia del residuo o gases en zonas de alta temperatura, aumentando la reflexión del calor radiante o recirculando al horno los rechazos de parrilla.

FLUJO DE AIRE

La principal función del aire que se inyecta al horno es actuar como oxidante en la reacción de combustión de los RSU. Sin embargo, también tiene otras funciones importantes, como refrigerar la parrilla, asegurar una buena mezcla de los gases de combustión y minimizar la formación de escorias en el horno. En función del lugar de inyección del aire necesario para la combustión se pueden considerar dos tipos de aire:

- *Aire primario*, que se añade por debajo de la parrilla a través de los orificios de la misma y atraviesa la capa de residuo.
- *Aire secundario*, se inyecta mediante boquillas por encima del nivel de la parrilla, a la salida de los gases de la cámara de combustión primaria.

El *aire primario* suele aspirarse del foso o zona de almacenamiento de los residuos, de forma que así se eliminan parte de los compuestos volátiles que se encuentran en el ambiente y se evita la liberación de malos olores [3]. También hay opciones avanzadas, como en la planta de Erfurt (Alemania), donde se alimenta al horno el aire de salida del tratamiento biológico como aire de combustión [4].

El aire primario se inyecta mediante diferentes toberas en las parrillas o rodillos a 10-15 m/s. Al poder regular el flujo de aire en la sección de agotamiento se puede reducir la cantidad de inquemados en la escoria. El aire primario tiene también la función de enfriar la parrilla, lo que es importante para aumentar su resistencia mecánica. Muchas parillas móviles se refrigeran interiormente con agua.

La función del *aire secundario* es quemar los compuestos volátiles de elevado poder calorífico que se forman en la parrilla, ya que se genera un elevado grado de turbulencia, y proporcionar un exceso de oxígeno, con la consiguiente reducción de emisiones de CO (que no tiene sistema específico de tratamiento en la zona de limpieza de gases) y compuestos orgánicos volátiles (habitualmente expresado como carbono orgánico total, TOC). La proporción entre aire primario y aire secundario variará en función de las características del residuo. Así, la proporción de aire primario ha de ser mayor si el poder calorífico es bajo, con el fin de secar bien el residuo. En general, en hornos de parrilla el aire secundario suele ser un 20-40% del aire alimentado al horno [3].

Una parte de los gases de combustión pueden recircularse introduciendo en el horno gases de combustión fríos, que se utilizan para disminuir la formación de óxidos NO_x, limitando la temperatura de llama. No debe hacerse una recirculación excesiva para evitar que afecte negativamente al proceso de combustión.

Entre los tipos de hornos para llevar a cabo la incineración de RSU los más utilizados son los hornos de parrilla. Las parrillas son estructuras formadas por gradas o rodillos móviles. El residuo se deposita sobre la estructura y ésta va avanzando de manera similar a una cinta transportadora a lo largo de la cámara de combustión, mientras se inyecta aire por la parte inferior. Existen algunas variedades de los mismos:

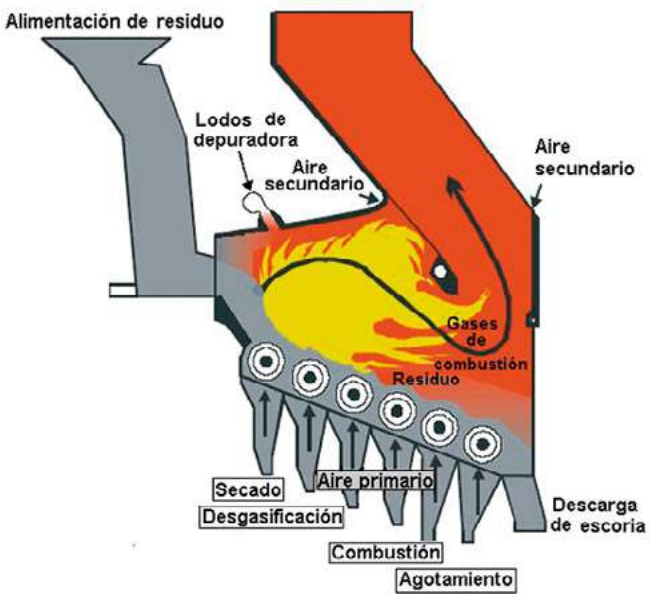
- *Hornos de parrilla múltiple.* Son adecuados para objetos voluminosos, como es el caso de transformadores o equipo contaminado. Han de emplearse tiempos de residencia elevados para bidones y es posible alcanzar elevados tiempos de residencia de los gases.
- *Hornos de parrilla móvil.* Se utilizan para residuos hospitalarios. Se puede realizar un control adecuado de la agitación para residuos con elevada producción de cenizas. Son más baratos que los hornos rotatorios.
- *Hornos estáticos de parrilla.* Son los más empleados en pequeños hospitales. No es necesaria la agitación, pero pueden formarse bolsas de inquemados. En los modelos más antiguos no existía control de emisiones.

Se ha conseguido un gran aumento de la eficacia de combustión en los hornos de parrilla, lo que permite que los gases de combustión tengan un menor contenido en productos de combustión incompleta (en especial dioxinas).

Los procesos que experimenta el residuo, al ir aumentando su temperatura, se traducen en la aparición de diferentes secciones en la parrilla que se indican en la Fig. 4.2:

- *Secado.* En esta sección se evapora la humedad del residuo.
- *Desgasificación.* Se empieza a quemar el residuo y se generan mediante descomposición térmica compuestos orgánicos volátiles que pasan a la cámara de combustión.
- *Combustión.* Tiene lugar la combustión de la mayor parte del residuo, así como la descomposición térmica y combustión de parte de los gases que se generan. En algunos puntos de la parrilla pueden tener lugar reacciones de gasificación [5].
- *Agotamiento.* Se completa la combustión de todos los productos

FIGURA 04-2 Esquema de los diferentes procesos en un horno de parrilla de rodillos [3].



Las parrillas suelen tener un cierto grado de inclinación, lo que ayuda al avance del residuo, ya que se alimenta por el extremo más elevado. En algunos casos el ángulo de inclinación varía en función de la sección de parrilla considerada (secado, combustión, agotamiento); en dichos casos hay cambios de nivel entre secciones que ayudan a voltear el residuo. El ángulo de inclinación se encuentra en un intervalo entre 0º (parrilla horizontal) y 26-30º [6]. Las parrillas inclinadas suelen ser más frecuentes que las horizontales, y suelen operar con menos desniveles.

4.4. Etapas en el diseño de incineradoras

El diseño de incineradoras requiere disponer de numerosos datos, así como información de datos físicos y químicos y experiencia práctica. Para el diseño del proceso es necesario tener en cuenta la clasificación de los residuos, han de realizarse los cálculos de combustión, equilibrios químicos, transferencia de calor y de materia y separación de partículas. Solo es posible una limitada predicción teórica y ha de recurrirse a la información derivada de la experiencia.

La implementación de una incineradora implica tres etapas principales:

- Evaluación de la factibilidad
- Preparación del proyecto
- Implementación del proyecto

La *evaluación de la factibilidad* suele hacerse en dos etapas: preliminar y detallada. En la primera etapa se basa en datos publicados, mientras que la detallada implica operar con datos reales de generación de RSU y su composición. Deben establecerse en esta etapa los criterios para el control de la contaminación del aire de la planta.

En la *preparación del proyecto* se tendrán en cuenta factores como la financiación del mismo, el suministro de agua y la venta de energía, así como la eliminación de residuos. También se hará la evaluación de impacto ambiental.

La organización del proyecto durante su *implementación* dependerá de si la planta de incineración de RSU es de carácter privado o público. Además de seguirse el progreso del proyecto, ha de cuidarse la gestión de la planta contratando a personal experto en la operación de la misma.

4.5. Tratamiento de efluentes

En la incineración de RSU, el material que se alimenta al horno es muy heterogéneo, lo que hace que se formen distintos tipos de sustancias contaminantes. La legislación relativa a emisiones de plantas de incineración de RSU es muy estricta, por ese motivo es necesario disponer de un sistema adecuado para el tratamiento de la corriente de gases. En primer lugar, debido a que el residuo está formado fundamentalmente por materia orgánica, se forma dióxido de carbono (CO_2), pero los contaminantes más importantes son otros. Las emisiones de CO_2 a partir de RSU están en el intervalo de 250-600 kg CO_2/t de residuo. Ha de prestarse particular atención a los residuos mineralizados de la incineración (escorias y cenizas volantes), así como los cloruros y sulfatos que se producen como resultado del tratamiento de los efluentes gaseosos.

El tratamiento de los gases de combustión en cualquier proceso es necesario para mantener la calidad del aire ambiente. Las emisiones de gases de combustión han de cumplir la normativa en cuanto a niveles de emisión de partículas, gases ácidos (cloruro de hidrógeno, HCl, dióxido de azufre, SO_2, fluoruro de hidrógeno, HF, y óxidos de nitrógeno, NO_x), metales pesados y otros micro-contaminantes, como dioxinas y furanos. En la Tabla 4.1 se indican los límites de emisión de partículas y gases de acuerdo con las directivas de la UE.

TABLA 04-1 Límites de emisión de contaminantes (273 K, 1 atm).

CONTAMINANTES	C (mg/Nm^3)
Partículas totales	10
HCl	10
HF	1
NO_x (instalaciones existentes)	800
NO_x (instalaciones nuevas)	500
SO_2	50
TOC	10
Cd + Ti	0.05
Hg	0.05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0.5
Dioxinas y furanos	0.1 ng/m^3

El diseño de los sistemas de tratamiento puede implicar también el empleo de cantidades importantes de productos químicos, lo que a su vez da lugar a un aumento de los residuos que se generan, con el consiguiente aumento de los costes de operación.

4.5.1. Separación de partículas

Hay una fracción de los residuos que no puede quemarse. Parte de esa fracción se obtiene como *escoria* en la parte inferior del horno, pero otra se arrastra con los gases de combustión y se denomina *cenizas volantes*. La base de las cenizas volantes es sílice y compuestos de aluminio, que además contienen metales pesados como Pb, Cu, Cd y Zn. Las cenizas volantes han de considerarse como un residuo especial, que requiere condiciones controladas para su eliminación final. Estas partículas constituyen la parte visible de los contaminantes y han de eliminarse de la corriente de gas. La cantidad de partículas en la corriente gaseosa está relacionada con la turbulencia del gas en la cámara de combustión y su concentración puede variar según el tipo de incineradora y sistema de tratamiento entre 27-485 mg/m^3.

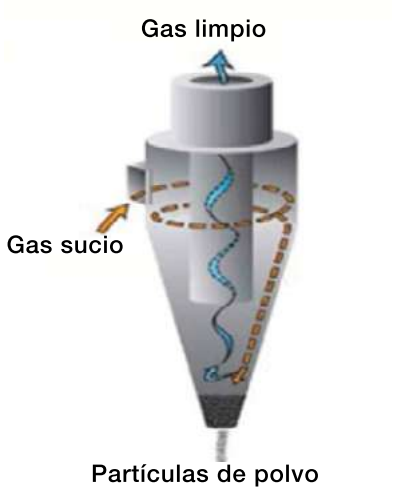
Para la eliminación de partículas los principales sistemas empleados son:

- Separadores mecánicos (ciclones y multi-ciclones)
- Filtros de mangas
- Lavadores de gases (scrubbers de Venturi)
- Precipitadores electrostáticos (electrofiltros)

El objetivo de estos dispositivos es eliminar de la corriente tanto las cenizas volantes como los productos químicos o sustancias sólidas que se hayan añadido a la corriente para su limpieza. Tanto en el método seco como en el semiseco, para eliminación de gases ácidos, es necesario disponer de un equipo para eliminar las partículas de residuo sólido y del reactivo que no ha reaccionado.

Los *ciclones* tienen forma cónica y los gases cargados de partículas entran al ciclón tangencialmente, Fig. 4.3. Debido a la fuerza centrífuga las partículas se depositan sobre las paredes y caen al conducto de descarga en la parte inferior. El gas limpio sale por la parte superior del vórtice. Los ciclones permiten separar del orden de un 80% de las partículas que contienen los gases de combustión, hasta una concentración de 150 mg/Nm^3 y pueden emplearse con temperaturas de hasta 1300 ºC. Para eliminar las partículas de menor tamaño se utilizan multi-ciclones en serie.

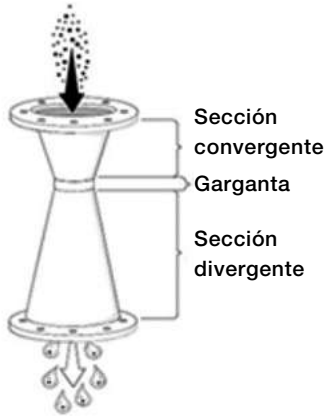
FIGURA 04-3 Esquema de un ciclón [7].



Las *torres de lavado de gases (scrubbers de Venturi),* Fig. 4.4, constan de un tubo de Venturi a través del cual se hace pasar el gas con una corriente líquida de lavado y debido al estrechamiento del Venturi se produce una elevada turbulencia, que permite la separación de las partículas de polvo. Pueden eliminar partículas hasta un límite de 150 mg/Nm^3. Si se utiliza en el Venturi una disolución alcalina (generalmente de calcio) para atomizarla y mezclarla con el gas se pueden eliminar mediante absorción la mayor parte de los gases ácidos generados en la combustión.

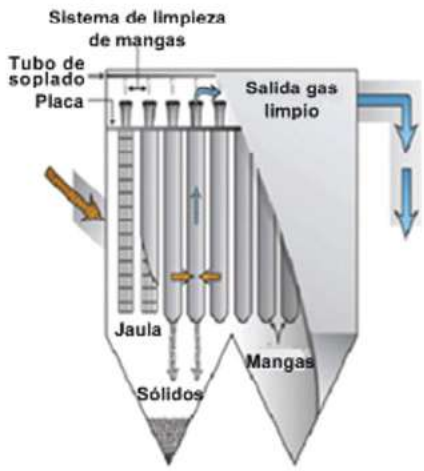
Las gotas de líquido que arrastran a las partículas se separan a la salida del Venturi mediante un ciclón u otro tipo de separador de impacto, de forma que parte del líquido se puede recircular al scrubber de Venturi.

FIGURA 04-4 Esquema de un Venturi.



Los *filtros de mangas,* Fig. 4.5, operan como filtros superficiales y son un elemento prácticamente indispensable en las plantas de incineración de RSU. Sirven para eliminar partículas sólidas de la corriente de gas, especialmente para tamaños inferiores a 10 µm.

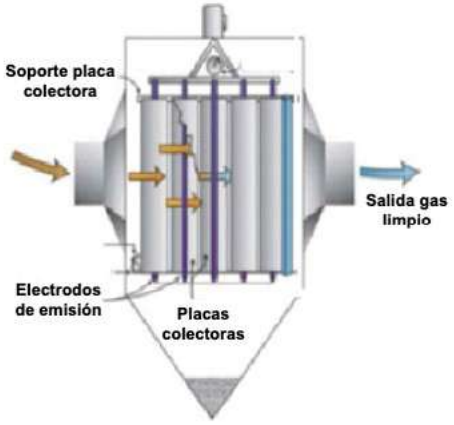
FIGURA 04-5 Esquema de un filtro de mangas [7].



El medio filtrante son las mangas, que son superficies cilíndricas formadas por fibras de polímeros naturales o sintéticos entrecruzadas, con forma de tela. Suelen operar a temperaturas entre 170-200 ºC. Tienen una eficacia de separación mayor del 99%, eliminando partículas hasta una concentración de 10 mg/Nm^3.

Los *filtros electrostáticos,* Fig. 4.6, se basan en la acción de fuerzas electrostáticas creadas por un campo eléctrico entre una serie de electrodos: *de descarga* y *colectores*, que atraen y precipitan las partículas. El gas que contiene las partículas se ioniza cuando pasa entre el electrodo de descarga y el electrodo colector, y las partículas se cargan negativamente. Después son atraídas por el campo eléctrico positivo del electrodo colector. Las partículas acumuladas se desprenden periódicamente mediante un golpe de martillo y caen al fondo del filtro. La eficacia de operación es menor a medida que disminuye el tamaño de las partículas. Normalmente pueden alcanzar eficacias del 99% y un límite de emisión de 30 mg/Nm^3. El intervalo de operación puede llegar a los 450 ºC; sin embargo, no suelen superarse los 200 ºC, para evitar la generación de furanos y dioxinas.

FIGURA 04-6 Carga de partículas en un filtro electrostático [7].



4.5.2. Separación de gases ácidos

Los gases ácidos más importantes que se forman en la combustión son cloruro de hidrógeno (HCl) y dióxido de azufre (SO_2), aunque también están presentes otros en menor medida, tales como el fluoruro de hidrógeno (HF) y el cloro (Cl_2). El HCl se forma como consecuencia del tratamiento térmico de los residuos que entran al horno que contienen cloro (plásticos de PVC, papel blanqueado con compuestos clorados, algunos poliestirenos, que pueden contener clorofluorocarbonos, y la basura en putrefacción). Los gases SO_x proceden de compuestos que contienen azufre (neumáticos, yeso de construcción). Los gases ácidos, además de poseer una cierta toxicidad, son precursores de la lluvia ácida.

Para eliminar los gases ácidos hay básicamente tres métodos:

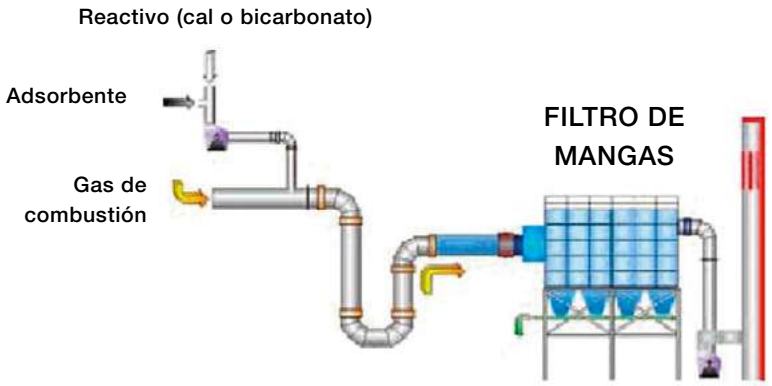
- Método seco
- Método semi-seco
- Método húmedo

Los diferentes métodos se basan en procesos químicos semejantes, en los que los gases ácidos se neutralizan con sustancias alcalinas, generándose las sales correspondientes de cloruros, sulfatos y fluoruros. Los *scrubbers* o *torres de lavado* permiten controlar las emisiones de gases ácidos y NO_x.

MÉTODO SECO

Un método sencillo y muy empleado para la eliminación de gases ácidos consiste en un *scrubber* con una pulverización seca, generalmente con $Ca(OH)_2$ o $NaHCO_3$, seguida por un filtro de mangas, Fig. 4.7.

FIGURA 04-7 Absorción por vía seca de gases ácidos [8]



Las reacciones de neutralización con $Ca(OH)_2$ o $NaHCO_3$ en el proceso seco o semi-seco son:

$$2HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2O$$

$$SO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_3 / SO_4 + H_2O$$

$$2HF + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaF_2 + 2H_2O$$

$$2NaHCO_3 \longrightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$$

$$Na_2CO_3 + 2HCl \longrightarrow 2NaCl + H_2O + CO_2$$

$$Na_2CO_3 + SO_2 + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow Na_2SO_4 + CO_2$$

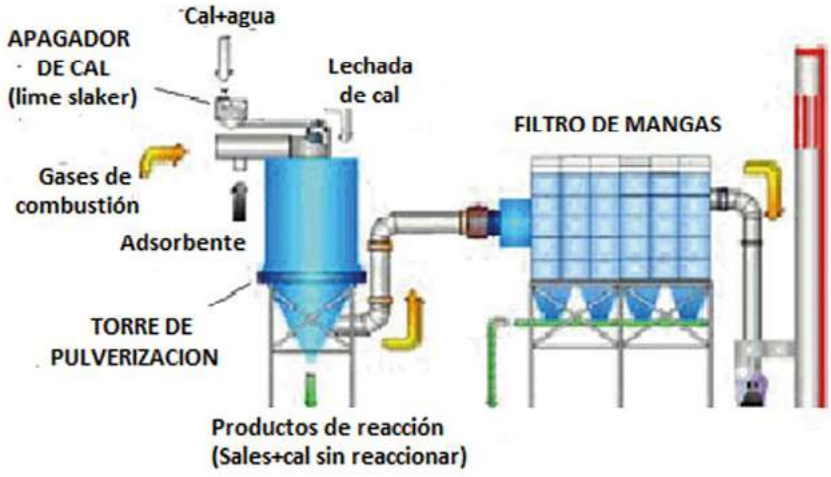
La reacción de neutralización se produce en la conducción del gas y continúa en la torta que se forma en los filtros de mangas. La torta del filtro se compone de una mezcla de varias sales y $Ca(OH)_2$ que no ha reaccionado debido a que el exceso de neutralizante es del orden de tres veces la proporción estequiométrica.

Los procesos por vía completamente seca ya no se utilizan actualmente.

MÉTODO SEMI-SECO

El método semi-seco es similar al seco respecto a la disposición del equipo, según se indica en la Fig. 4.8, pero la caliza se inyecta como suspensión acuosa.

FIGURA 04-8 Absorción por vía semi-seca con cal apagada de gases ácidos [8].

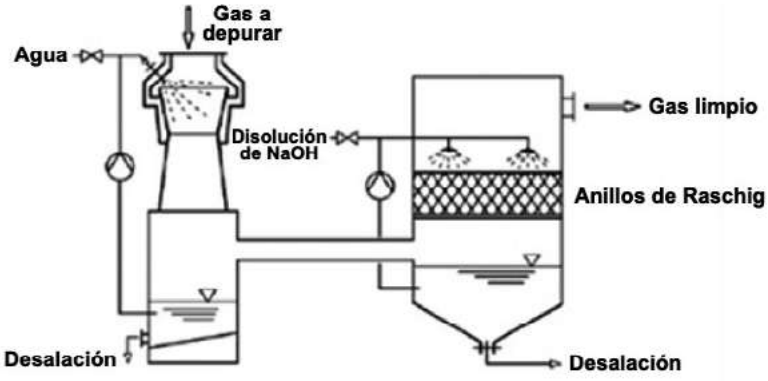


En la torre de pulverización se introduce el producto alcalino que reacciona con los componentes en fase gaseosa y se eliminan los productos de reacción y los que son arrastrados por la corriente gaseosa en un filtro de mangas o electrostático.

MÉTODO HÚMEDO

En este proceso los gases ácidos se separan por absorción en disoluciones acuosas. El proceso consta de dos etapas según se indica en la Fig. 4.9.

FIGURA 04-9 Absorción por vía húmeda de gases ácidos [9].



En el primer scrubber se separan los compuestos HCl y HF, y el mercurio queda como $HgCl_2$, que se transforma finalmente en un complejo clorado $[HgCl_4]^{2-}$ en la fase acuosa. En la torre de pulverización se realiza la separación del SO_2 en los gases de combustión.

Las incineradoras de RSU alcanzan niveles de dióxido de azufre (SO_2) de 45-85 ppm, y si se utilizan scrubbers la eficacia de eliminación puede alcanzar valores del 90-95%.

Los gases suelen abandonar el reactor de neutralización a unos 150 ºC y se hacen pasar por un filtro de mangas para separar los productos de reacción: cenizas volantes a la salida de la caldera y exceso de reactivo no reaccionado.

4.5.3. Separación de óxidos de nitrógeno (NOx)

La mezcla de óxidos de nitrógeno, NO_x, está formada por óxido nítrico (NO) que es el predominante, con pequeñas cantidades de NO_2. La presencia de NO_x en las emisiones se debe a dos fuentes. La primera es la oxidación del nitrógeno en el RSU, o compuestos orgánicos

que contienen nitrógeno fijo o amoniacal (alimentos, residuos de jardinería, etc.) y nitrógeno del combustible y la segunda procede de la fijación por oxidación a elevada temperatura del nitrógeno atmosférico (NO_x térmico). A la temperatura que operan las incineradoras, entre un 70-80% del NO_x que se produce corresponde al nitrógeno del residuo.

Para reducir las emisiones de NO_x ha de optimizarse el proceso de combustión, en particular la distribución del aire y la recirculación de los gases de combustión. Así, las emisiones de NO_x aumentan al aumentar la temperatura y el exceso de aire. A temperaturas inferiores a 1600 ºC la concentración de NO_x térmico se reduce considerablemente. Pueden alcanzarse en incineradoras concentraciones de NO_x entre 250-325 ppm. Normalmente, la legislación no permite valores superiores a las 180 ppm.

Aunque el HCl y el SO_2 son gases precursores de lluvia ácida, se tratan de manera diferente. Los principales métodos para su eliminación son los siguientes:

- Reducción catalítica selectiva *(SCR)* → 230-320 ºC
- Reducción no catalítica selectiva *(SNCR)* → 850-1000 ºC

Ambos métodos consisten en inyectar amoniaco o urea después de la combustión para la reducir la concentración de NO_x según las reacciones que se indican a continuación:

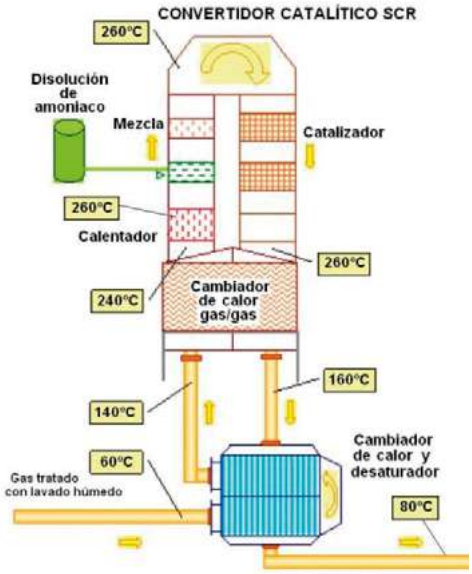
$$4NO + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 4N_2 + 6H_2O$$
$$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \longrightarrow 3N_2 + 6H_2O$$
$$NO + NO_2 + 2NH_3 \longrightarrow 2N_2 + 3H_2O$$
$$CO(NH_2)_2 + 2NO + \tfrac{1}{2}\, O_2 \longrightarrow 2N_2 + CO_2 + 2H_2O$$

PROCESO SCR

Un diagrama del proceso SCR se representa en la Fig. 4.10.

Los gases se calientan desde 150 a 230 ºC y se someten a la depuración de los óxidos de nitrógeno NO_x mediante inyecciones de amoniaco al 25% en peso o urea en el convertidor SCR, en presencia de un catalizador. Los catalizadores empleados en la SCR para eliminar NO_x son capaces también de destruir las dioxinas y furanos. La eficacia de separación suele ser superior al 70%, y es un proceso con elevados costes de inversión y de operación.

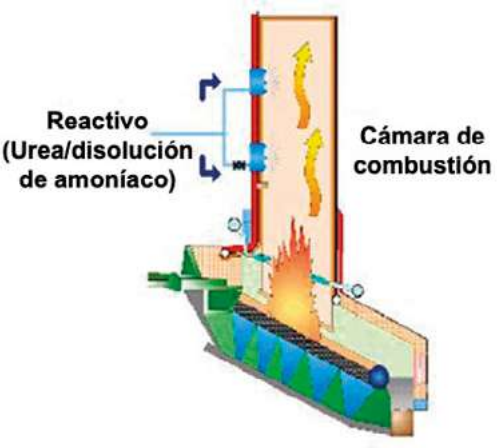
FIGURA 04-10 Convertidor catalítico selectivo (SCR) para el tratamiento de NO_x [3].



PROCESO SNCR

En el proceso SNCR se inyecta amoniaco o urea después de la cámara de combustión, produciéndose la reducción de los óxidos NO_x, según se indica en la Fig. 4.11.

FIGURA 04-11 Introducción de urea/amoniaco para el tratamiento de NO_x [3].



La temperatura de conversión óptima ha de ser de 950 ºC. Con un buen control de la temperatura y puntos de inyección se pueden conseguir el proceso SNCR reducciones de NO_x de hasta un 60%.

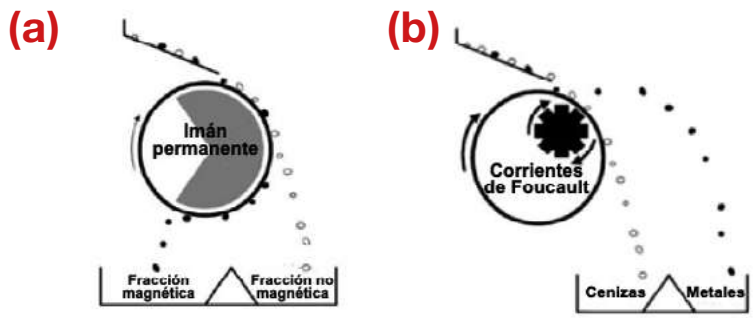
El proceso SNCR es más barato que el SCR debido a los menores costes de inversión y de operación. El mayor problema es que el amoniaco no reacciona totalmente en la caldera y eso lleva a un mayor consumo de productos químicos que han de tratarse posteriormente.

4.5.4. Separación de metales

En los RSU se encuentra una cierta cantidad de metales, que depende de la propia naturaleza del residuo. Las principales fuentes de metales son las baterías de automóviles (plomo), pilas en general y dispositivos electrónicos (cadmio, mercurio), vidrio de plomo (monitores de TV y ordenadores) y latas de bebidas y conservas. Algunas compañías que en el pasado se dedicaban a la fundición de metales se han convertido en empresas de recuperación de metales valiosos. En los residuos electrónicos (ordenadores, teléfonos móviles y catalizadores agotados de automóviles) pueden hallarse hasta 20 metales, entre ellos oro y platino, que pueden recuperarse y reciclarse.

Los metales férreos se eliminan mediante separadores magnéticos cuya eficacia es del 85% (15-30 kg metales férreos/t RSU). Los metales no férreos (aluminio, cobre, magnesio y plata) suelen recuperarse por separadores que funcionan según el principio de las corrientes de Foucault. Estas corrientes de torbellino inducen una fuerza propulsora que impulsa a las partículas no férreas fuera de las cenizas, alcanzándose eficacias del 60% (1.2-2.5 kg aluminio/t RSU), Fig. 4.12.

FIGURA 04-12 Sistemas para separación de: (a) metales férreos y (b) metales no férreos.



Los metales pueden ser tóxicos o bien catalizar la producción de compuestos tóxicos en los gases de combustión, como son los compuestos clorados (dioxinas y furanos). Algunos de esos metales y los compuestos a que dan lugar poseen una cierta volatilidad y saldrán con los gases de combustión. Otros estarán asociados a las cenizas volantes. Los principales métodos de eliminación son:

- Inyección de adsorbente (carbón activo o coque activo)
- Lavado húmedo

En el lavado húmedo los metales precipitan en la neutralización con hidróxidos, y pueden emplearse precipitantes especiales.

Los límites de metales en procesos de incineración están en el orden de 70 mg/m^3. Una forma de eliminarlos es por filtrado. Al enfriarse los gases de combustión los metales vaporizados condensan en forma de partículas (10 µm) y a través de filtros especiales con formas tortuosas se pueden controlar las partículas de pequeño tamaño.

4.5.5. Productos de combustión incompleta

En condiciones ideales (exceso de oxígeno, turbulencia, temperatura y tiempo de residencia) toda la materia orgánica del residuo debería transformarse en CO_2 en la cámara de combustión, pero en la práctica se van a formar en mayor o menor medida compuestos intermedios (monóxido de carbono, fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otras sustancias orgánicas) denominados productos de combustión incompleta. Los principales métodos de eliminar estas sustancias son:

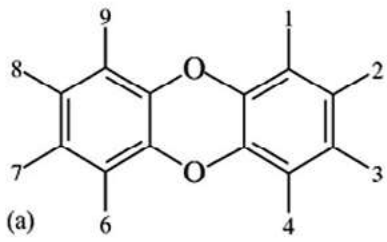
- Combustión eficaz
- Inyección de adsorbente (carbón activo o coque activo)

DIOXINAS Y FURANOS

En los compuestos orgánicos que contienen cloro, éste se convierte en HCl y Cl_2. El HCl se puede recuperar o neutralizar por tratamiento de los gases ácidos, en forma de NaCl, pero esto no se puede hacer con el Cl_2.

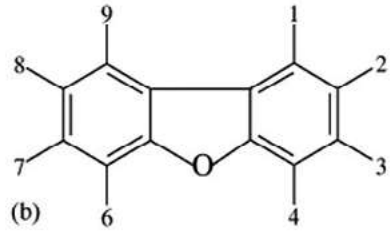
Las dioxinas y furanos son compuestos organoclorados (dibenzodioxinas cloradas PCDD, o dibenzofuranos PCDF), que son productos de combustión incompleta, particularmente cuando desciende la temperatura de los gases. En la combustión secundaria se hace un refino de los gases manteniendo la temperatura por encima de los 850 ºC. Se forman en concentraciones no muy elevadas si se comparan con el resto de contaminantes, pero presentan una elevada toxicidad, así como efectos cancerígenos y bioacumulativos.

(a)



Dibenzo-para-dioxina

(b)



Dibenzofurano

La formación de dioxinas depende en gran medida de la temperatura. En el horno pueden formarse si la combustión es mala (T < 850 ºC) o bien si el tiempo de residencia es escaso (< 2 s), pero esta vía de formación no es relevante en los hornos actuales, dado su diseño y las condiciones de operación exigidas por ley. Uno de los métodos más empleados para la retención de eventuales dioxinas y furanos en los efluentes es mediante adsorción en lechos fijos de carbón activo. Se consiguen de este modo eficacias de eliminación de un 95% y que la concentración de dioxinas en los efluentes se reduzca a 1 ng/m^3, que es una cantidad insignificante.

Se han empleado, asimismo, compuestos nitrogenados como etanolamina, amoniaco y urea, entre otros, como inhibidores en la formación de dioxinas. Un buen inhibidor es la tiourea, que contiene nitrógeno y azufre, y que reduce la concentración de dioxinas a 0.8 ng/m^3.

Los adsorbentes agotados se reciclan a la cámara de combustión, con lo que se destruyen las dioxinas adsorbidas y no se necesita un almacenaje especial de este residuo.

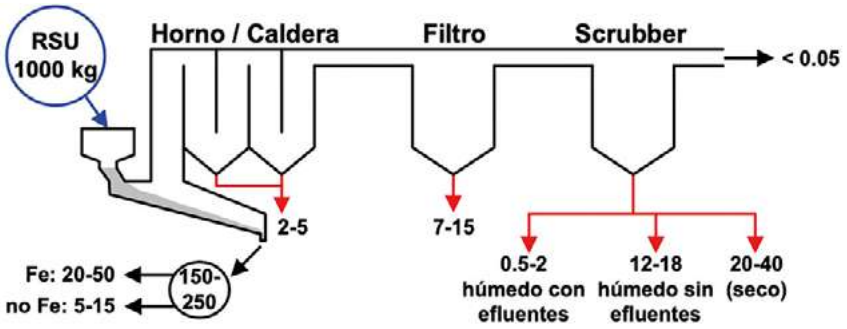
4.6. Escorias y cenizas volantes

La incineración de RSU permite reducir el volumen y el peso de dichos residuos. No obstante, el proceso origina una serie de residuos sólidos de diferente naturaleza: *escorias* y *cenizas*

volantes. Las escorias son el residuo mayoritario y no se consideran un residuo peligroso. Por otra parte, las cenizas volantes se generan en menor cantidad, pero debido a su contenido en metales y contaminantes orgánicos, se consideran residuos peligrosos.

El flujo de sólidos en una incineradora de rejilla se indica en la Fig. 4.13. La cantidad y la calidad de los residuos que se producen durante la incineración depende de los RSU que se alimentan y del modo de operación.

FIGURA 04-13 Residuos sólidos en una incineradora de rejilla (en kg).



La cantidad de escorias y cenizas que se generan durante la incineración de RSU es del orden de un 15-20% de los RSU procesados y un 5-15% del volumen de los mismos.

Las *escorias* son el residuo que se que se elimina por la parte inferior del horno una vez se ha completado el proceso de combustión. Representan un 80-90% del residuo y constan fundamentalmente de alúmina, sílice, óxidos de hierro y residuos carbonosos procedentes de la combustión incompleta. Después de una irrigación húmeda se reduce su temperatura a unos 60 ºC. Las escorias que son alcalinas, suelen someterse a procesos de cribado y maduración. Las escorias con un tamaño < 20 mm se destinan a plantas cementeras y el resto puede tener otras aplicaciones o enviarse a vertedero.

Las *cenizas volantes* son partículas de pequeño tamaño que se recogen de los gases de combustión por el equipo de depuración de gases y se mezclan con el sorbente utilizado en los *scrubbers*. Se pueden clasificar en varios tipos según su procedencia: cenizas de caldera, cenizas volantes y residuos de control de la contaminación del aire. Son residuos tóxicos y no se suelen utilizar como material de construcción. Representan un 10-20% en peso del total de residuos que se generan en la combustión.

Las cenizas de caldera representan unos 2-5 kg/t y no deben mezclarse con las escorias.

Las cenizas volantes, que representan un porcentaje muy pequeño del residuo total (entre 1-5%), suelen someterse a un proceso de cementación y se envían a depósitos de seguridad controlados de residuos peligrosos.

TOXICIDAD DE LAS CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son de naturaleza tóxica debido a la presencia en las mismas de metales pesados y compuestos orgánicos. Debido a los procesos de evaporación, condensación y concentración que tienen lugar en la cámara de combustión, las cenizas volantes tienen una elevada concentración en metales, sales y contaminantes orgánicos, lo que hace que se clasifiquen como sustancias peligrosas. Los metales más peligrosos, debido a su potencial contaminante y su elevada concentración en las cenizas, son Pb, Zn y Cd.

La concentración de dioxinas en las cenizas varía de un residuo a otro, y depende de las condiciones de operación de la incineradora. La temperatura tiene una gran influencia: si el intervalo de operación desciende de 850 ºC a 200–550 ºC, se favorece la formación de estos compuestos.

4.6.1. Tratamientos de escorias

ENVEJECIMIENTO

La escoria se suele someter a un proceso de "apagado" con agua a la salida del horno, por lo que tiene lugar un enfriamiento súbito de la misma. Con el paso del tiempo, la estabilización que se produce puede afectar a la estructura de las escorias y a sus propiedades geotécnicas. A este tratamiento se le denomina *envejecimiento* o *maduración*. Durante el envejecimiento tiene lugar la reacción del CO_2 del aire con los hidróxidos de la escoria, formándose carbonatos, con un descenso del pH, que permite fijar los metales a la escoria. El pH inicial de la escoria es de 12, pero con el envejecimiento puede descender hasta 8, aproximadamente. La mayoría de los metales son más lixiviables cuanto menor es el pH, a excepción del Pb, que es el metal que más preocupa, junto al Al, Cu, Zn y Cr. El potencial de lixiviación del Cu y Zn se reduce significativamente después de un mes de envejecimiento, mientras que se reduce notablemente el potencial de lixiviación del Pb. Sin embargo, un descenso excesivo del pH puede provocar un aumento de la concentración de metales en los lixiviados.

El envejecimiento se realiza almacenando la escoria durante varias semanas, al aire libre o en recintos cerrados. El documento BREF [3] recomienda el uso de naves techadas, con recogida de los lixiviados para minimizar los que podrían producirse si se almacenasen al aire libre. Se

recomienda mantener húmedas las pilas de escorias, mediante irrigación, para evitar la formación de polvo y mejorar la lixiviación de sales y metales. Asimismo, es recomendable mover periódicamente la pila para conseguir mayor homogeneidad durante los procesos de envejecimiento.

Normalmente un periodo de envejecimiento entre 6 y 20 semanas es suficiente para poder utilizar la escoria como material de construcción. Las principales características del tratamiento por envejecimiento son:

- Reducción del pH debido a la captura de CO_2 del aire o formado por la actividad biológica, por la humedad del medio.
- Degradación biológica de materia orgánica no incinerada.
- Cohesión de las partículas debido a la humedad y cambios en las fases de los minerales.
- Condiciones reductoras debido a la formación de hidrógeno.

CARBONATACIÓN ACELERADA

La carbonatación es una reacción del CO_2 con los hidróxidos de la escoria, dando lugar a carbonatos. En los últimos años se ha investigado llevar a cabo una carbonatación acelerada empleando el gas de chimenea procedente de la planta. Estos gases de combustión, que tienen un contenido en CO_2 en torno al 10%, se hacen pasar a través de la pila de escoria. Además de la disminución en el tiempo de tratamiento para la estabilización de la escoria, la carbonatación acelerada permite reducir las emisiones de CO_2 de la planta.

RECUPERACIÓN DE METALES

La separación de metales es un proceso importante para el posterior uso de la escoria. Los metales férreos son de fácil recuperación por vía magnética, mientras que los no férreos como el aluminio, cobre, zinc, etc., tienen una separación más compleja y representan alrededor del 2.5% en masa seca de la escoria.

La recuperación de algunos metales valiosos como cobre, plata y aluminio tiene beneficios económicos para la incineración de residuos sólidos urbanos. Solo en Holanda se pierden en torno a 45 millones de euros debido a la pérdida del 80% de estos metales. El problema radica en que, en las escorias que tienen un tamaño de partícula muy pequeño (< 12 mm), los metales que contienen son muy difíciles de recuperar.

Existen métodos patentados que tienen la ventaja de que se pueden integrar con otros equipos (filtros de mangas, precipitadores electroestáticos, etc.), lo que hace que la recuperación de metales mejore entre un 50-100%.

4.6.2. Tratamiento de cenizas volantes

CEMENTACIÓN

Consiste en fijar los metales en la matriz creada con cemento. Se adiciona la ceniza volante como parte de los áridos y también se puede utilizar junto a las escorias. La cantidad suele oscilar en torno a un 20% en peso. Los valores de la lixiviabilidad se consideran aceptables, dentro de los márgenes requeridos.

DESCENSO DEL pH

Al igual que en ocurre con las escorias, un descenso del pH de 12 a 8 ayuda a fijar ciertos metales peligrosos, como Pb, Cu y Zn, a las cenizas, reduciendo así su lixiviabilidad. Según esto se podría favorecer la carbonatación de las cenizas como se hace con las escorias (envejecimiento, carbonatación acelerada), aunque siempre teniendo en cuenta que se está manejando un residuo peligroso debido a la presencia de metales y dioxinas.

ESTABILIZACIÓN CON $FeSO_4$

Otra opción para la estabilización de las cenizas es emplear una disolución de sulfato ferroso ($FeSO_4$). Las cenizas se lavan con una solución de $FeSO_4$, con una relación de 5 L/kg de cenizas. El tratamiento dura unas 24 horas en un tanque agitado con aireación para favorecer la oxidación. Se consigue obtener en el producto tratado una significativa disminución de metales y sales, debido a la formación de complejos con el hierro. Este método se ha aplicado en algunas plantas de Dinamarca.

TRATAMIENTO TÉRMICO

Otra opción para el tratamiento de las cenizas es someterlas a temperaturas elevadas. Los tratamientos térmicos de las cenizas conducen a su estabilización; sin embargo, se requiere un elevado consumo energético. Si se tratan con plasma el residuo vitrificado que se genera es muy estable y su lixiviación muy baja. La técnica de tratamiento de cenizas con plasma se utiliza solamente en una planta de incineración de Burdeos.

VERTIDO EN DEPÓSITO DE SEGURIDAD

Como las cenizas de incineración se consideran un residuo peligroso, y al no ser las cantidades generadas demasiado elevadas, en muchos casos se opta simplemente por llevarlas a un depósito de seguridad. Las cenizas se introducen en unos contenedores de gran capacidad, de manera que se eviten las emisiones de partículas. En Alemania, por ejemplo, las cenizas de incineración se depositan en minas de sal abandonadas.

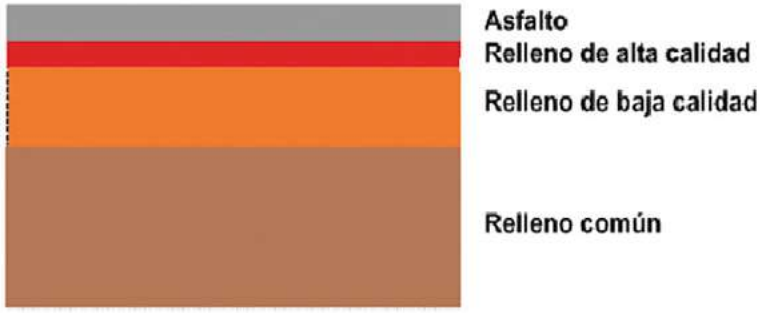
4.6.3. Aplicaciones de las escorias

El principal uso de las escorias es el relleno en carreteras y la fabricación de cemento y hormigón para estructuras y material de relleno, aunque hay otras posibles aplicaciones.

RELLENO EN CARRETERAS

La construcción de carreteras es la aplicación más habitual de las escorias de incineración. Se depositan las escorias en la base y subbase de las carreteras en forma de una capa trapezoidal que nunca puede sobrepasar los 50 cm. En la Fig. 4.14 se indica un esquema del relleno de carreteras.

FIGURA 04-14 Esquema de relleno de carreteras con escorias.



La primera capa de asfalto suele tener un espesor de 20 cm, la segunda es un relleno de alta calidad de unos 15 cm, y la tercera capa es un relleno similar al de la capa de relleno de alta calidad, pero con peores características (menos uniformidad de tamaño, etc.) que puede tener un espesor máximo de hasta 50 cm. Por último, se tendría el relleno común de espesor variable.

No se pueden utilizar en zonas inundables ni a menos de 30 m del cauce de un río debido a la posible lixiviación de los metales que puedan contener. Para minimizar la contaminación, se recomienda someter la escoria a los tratamientos indicados anteriormente.

EMPLEO DE ESCORIAS COMO ÁRIDO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Son numerosos los estudios que existen sobre la aplicación de las escorias como materiales de construcción, aunque no existe una aceptación general. Para la utilización de las escorias como material de construcción se han de eliminar en su mayor parte los metales férreos y no férreos.

Para la obtención de cemento y hormigón, la escoria sustituye parcialmente (hasta un 25% como máximo) a los áridos que junto al clínker forman cemento u hormigón en caso de añadir también grava. Dependiendo del tipo de escoria se pueden obtener diferentes tipos de cementos: ligeros, porosos, etc.

EMPLEO DE ESCORIAS PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS

Las escorias que se obtienen de la incineración de RSU se pueden emplear también reemplazando a la arena en la fabricación de ladrillos. Tanto la resistencia a la compresión como a la flexión mejoran si en el proceso de fabricación se aumenta la presión de compactación. Este tipo de ladrillos presenta una excelente resistencia a la abrasión, que aumenta al aumentar el contenido de escorias y una menor absorción de agua.

4.6.4. Aplicaciones de las cenizas volantes

INDUSTRIA DE CERÁMICA Y VIDRIO

Debido al alto contenido en Al_2O_3, SiO_2 y CaO, la fundición de cenizas es perfecta para la obtención de materiales cerámicos. Además, la vitrificación que se consigue es el mejor método para inmovilizar los metales que contengan las cenizas y obtener valores de lixiviabilidad muy bajos. Se han hecho ensayos utilizando cenizas volantes de una incineradora de RSU para la obtención de baldosas con resultados muy satisfactorios.

También se puede fabricar vidrio con las cenizas volantes, adicionando en torno a un 20% en peso de SiO_2 en la muestra junto a un 5% de MgO que facilita la formación de $CaMgSi_2O_6$, para lo que se adiciona un agente nucleante como el TiO_2 (un 2% en peso es suficiente).
El empleo de cenizas en la industria cerámica es interesante cuando la concentración de cloruros en las cenizas es elevada (> 10%), ya que éstos inhiben la fase de hidratación del cemento, que es la técnica de estabilización que se aplica generalmente.

USO DE CENIZAS COMO RELLENO EN CARRETERAS

La aplicación de cenizas como relleno en carreteras se inició en el año 1990 en Francia, cuando aún no se separaban las escorias de las cenizas. Pero debido a la gran concentración de metales que contienen se desaconseja su uso. En el caso de que se decida usar como material de relleno se han de aplicar los tratamientos previos que se han indicado.

4.7. Bibliografía

1. | Stengler, E., "*Circular economy and energy union"*. 8th CEWEP Waste-to-Energy Congress (2016).

2. | Ecomaine's waste-to-energy power plant.
https://www.ecomaine.org/our-facility/waste-to-energy-plant/

3. | European Commission, "*Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration* (BREF)" (2006).

4. | Westphal, W., "*Operational Experience with the Energy Recovery of Municipal Solid Waste (MSW) in the RABA Erfurt"*, Conference Proceedings, Waste-to-Energy. International Exhibition & Conference for Energy from Waste and Biomass, Messe Bremen, 9–10 mayo (2007).

5. | Niessen, W.R., *"Combustion and incineration processes"* CRC Press, 4ª edición (2010).

6. | Energy from Waste Working Group (UK). *Energy from Waste: A good practice guide*, The Chartered Institution for Wastes Management (CIWM) (2003).

7. | Redecam. "Air filtration products".
http://www.redecam.com/instagram-feed/#

8. | CNIM página web.
www.cnim.com

9. | Achternbosch, M., Richers, U., *"Material flows and investment costs of flue gas cleaning systems of municipal solid waste incinerators"*, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe (2002).

CAPÍTULO

05

FACTORES ECONÓMICOS Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

5.1. Introducción
5.2. Factores económicos en la *WtE*
5.2.1. Costes del procesado de RSU
5.2.2. Costes de la incineración y otros procedimientos de eliminación de RSU
5.2.3. Optimización de la recogida selectiva
5.3. Eficacia energética: Factor R1
5.4. Análisis del ciclo de vida (LCA) y de las tres R's
5.4.1. Reciclaje de plásticos
5.5. Futuro de la *WtE*
5.6. Localización de una planta de *WtE*
5.7. Bibliografía

05

FACTORES ECONÓMICOS Y LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

5.1. Introducción

La sostenibilidad de los sistemas productivos y el buen uso de los recursos primarios son objetivos prioritarios en la sociedad industrial y para su consecución es necesario integrar en el modelo la gestión los residuos sólidos que se generan.

Los factores económicos en el tratamiento de los RSU pueden dinamizar la industria, ya que los gastos en equipos repercuten sobre las deducciones de impuestos y, por consiguiente, hay un incentivo en renovar las instalaciones, maquinaria, edificios, etc.

En la gestión de los residuos pueden distinguirse varias etapas:

- Recogida
- Transporte
- Procesamiento de los residuos y su depósito (escorias y cenizas)

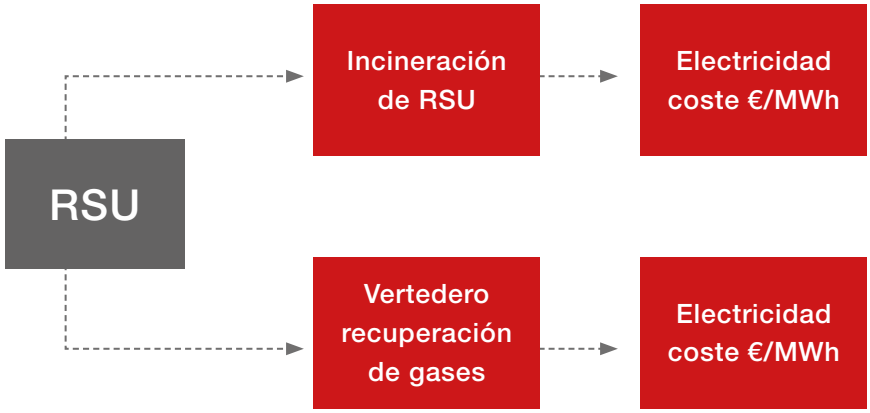
La adopción de un sistema de tratamiento u otro implica que los costes sean diferentes a corto y largo plazo.

La principal función de la recogida y el transporte es retirar los RSU del lugar en que se generan para salvaguardar la salud de las personas, prevenir la congestión en su tratamiento, evitar malos olores y problemas urbanos de salubridad. La recogida de las basuras es un coste muy importante.

El procesamiento consiste en transformar las características físicas de los RSU – ya sea mediante reciclaje, compostaje, incineración o compactación - haciendo menos perjudicial su vertido final y recuperando, cuando sea factible, algunas fracciones de los mismos. Las dos

opciones de procesado de residuos, desde el punto de vista de recuperación de energía, más utilizadas son: incineración y vertedero con aprovechamiento del biogás, Fig. 5.1.

FIGURA 05-1 Opciones en el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) para la producción de energía.



En la UE la incineración con recuperación de energía es la solución más utilizada para el tratamiento de residuos; sin embargo, en algunos países, entre ellos España, es elevado el porcentaje de residuos que se elimina mediante vertederos (prohibidos ya en muchos países) y solo en algunos casos se recupera la energía del biogás generado. El biogás (rico en metano) que se genera por la digestión anaerobia de la materia orgánica es también una fuente primaria de combustible para la obtención de calor, vapor de agua y electricidad. Se puede estimar que en un vertedero se generan unos 50 Nm^3 de metano/t RSU [1].

En un principio la incineración se consideró como un proceso para disminuir el volumen de residuos y preservar la salubridad del medio ambiente. Sin embargo, actualmente la incineración, tanto de los RSU como de los residuos industriales, tiene además un interés económico debido a la producción de energía a partir de dichos residuos.

Existen diferentes tipos de costes y también beneficios, según la tecnología empleada en valorización de RSU. Las instalaciones para la recuperación de materiales y energía a partir de los RSU implican un capital intensivo y costes elevados. Las tecnologías empleadas son complejas y los productos que se obtienen pueden tener un mercado difícil.

5.2. Factores económicos en la *WtE*

Los factores económicos en las plantas *WtE* dependen de las características de los RSU, normativa medioambiental, gestión de los subproductos y tasas/impuestos sobre los mismos. Los impuestos sobre los RSU normalmente cubren los costes de operación, así como los costes de capital de la planta y de eliminación de residuos no utilizables. Muchas plantas *WtE* se benefician de determinados impuestos sobre la inversión y producción, debido a que se consideran como fuentes de energía renovables, dado que una buena proporción de los materiales combustibles son de origen biogénico.

Una primera clasificación de los costes es en directos e indirectos. Los *costes directos* son aquellos en los que incurre la empresa de *WtE* y que son necesarios para el funcionamiento y operación de la planta, y están relacionados con el servicio que proporciona. Los *costes indirectos* son costes más generales y que no están directamente relacionados con el proceso de fabricación.

Entre los costes directos figuran los necesarios para realizar el tratamiento de los residuos, es decir, la compra de maquinaria, retribución del trabajo realizado y la adquisición del suelo en el que desarrollar las actividades, entre otros. Los principales costes directos e indirectos se indican en la Tabla 5.1.

TABLA 05-1 Costes y beneficios de una planta centralizada de residuos.

COSTES DIRECTOS	BENEFICIOS DIRECTOS
Planificación y diseño	
Inversión en planta y equipo	
Adquisición de terrenos y preparación	
Transporte	Producto de la venta de materiales y energía
Costes de operación, mantenimiento y supervisión	
Eliminación de residuos	
Combustible auxiliar	

COSTES INDIRECTOS	BENEFICIOS INDIRECTOS
Gastos jurídicos	Evitar los costes del vertedero
Tratamiento de efluentes gaseosos y líquidos de la planta	Evitar la contaminación de aguas por el vertedero
Eliminación de residuos	Reducción de los riesgos de salud y riesgos en la población debido al vertedero
Riesgos y seguridad de los trabajadores y de la población cercana	Mejora de las relaciones con la comunidad y las empresas

Si los costes directos son superiores a los beneficios es necesario crear una tasa para compensar los costes de la planta, algo que ya ocurre cuando los RSU se eliminan mediante vertederos. Los costes y beneficios dependen de una serie de factores, entre los cuales los más importantes son:

- Geográficos, según área en la que se presta el servicio
- Existencia de mercados para los productos recuperados
- Número y tamaño de las administraciones locales implicadas

Entre las consideraciones económicas que pueden afectar al diseño las más importantes son:

- Venta de los productos generados y reciclados
- Costes del proceso
- Costes del transporte

En el primer caso, determinados productos energéticos derivados de los RSU pueden tener un mayor coste de producción, al tener un mayor valor en el mercado, como es el caso de

los CDR. Ha de existir un compromiso entre los costes de transporte y la economía de escala de la instalación. Las plantas de mayor tamaño pueden procesar los RSU a un menor coste unitario, pero el coste de transporte desde zonas lejanas se incrementa.

5.2.1. Costes del procesado de RSU

Entre los factores económicos que han de considerarse en el procesado de RSU están los siguientes:

- Costes de inversión: costes de diseño, construcción, equipo de incineración y de producción de energía.
- Costes de operación: gestión de residuos, productos químicos, mano de obra, mantenimiento, etc.
- Métodos de financiación de los costes.
- Beneficio potencial de los materiales y energía que se recuperan.
- Compromiso entre la economía de escala y los costes de transporte.

Dichos factores dependen de la tecnología empleada, del tamaño de la planta, del método de financiación, de los costes de construcción y del coste de la mano de obra. Los costes por unidad de residuo procesada dependen del factor de capacidad utilizada, es decir, la capacidad máxima de la planta que se utiliza sobre base diaria o anual.

Algunos costes de inversión para plantas que procesan 1000 t/día, se indican en la Tabla 5.2.

TABLA 05-2 Costes de inversión y operación de plantas centralizadas de RSU (1000 t/día).

Tecnología	Costes de inversión* (M €/t, 2010)	Costes de operación* (M €/t, 2010)	Coste total del proceso* (M €/t, 2010)
Incinerador de paredes refrigeradas para producción de vapor de agua	74	22	51
Recuperación de combustibles derivados de residuos	34	18	31
Productos de pirólisis	76	34	60
Incineración modular (200 t/día)	51	74	41

* Estimaciones utilizando el Engineering News Record

El coste del capital se puede determinar multiplicando la inversión en la planta por un factor de recuperación del capital, que depende del periodo de amortización y los impuestos. Se puede tomar en primera estimación un factor de 0.10, que correspondería a un interés del 8% con un periodo de amortización de 20 años. El factor de capacidad de utilización suele tomarse como 0.70-0.80. Se obtiene así la formula siguiente:

$$\text{Costes del capital, (€/t)} = \frac{(\text{Inversión en la planta}) \times (\text{factor de recuperación del capital})}{(365 \text{ días}) \times (\text{capacidad máxima de la planta, t/día}) \times (\text{factor de capacidad de utilización})} \quad [5.1]$$

Los costes de operación que se indican en la Tabla 5.2 incluyen la mano de obra, el mantenimiento, suministros, seguros y servicios. Los costes unitarios de mano de obra disminuyen al aumentar la capacidad de la planta, siendo los otros factores aproximadamente proporcionales a la capacidad. Como puede observarse, los costes totales por tonelada tratada difieren según la tecnología empleada, obteniéndose productos de valor diferente. En general los procesos de mayor coste dan lugar a productos de mayor valor y ningún sistema permite obtener suficientes beneficios sin que sea necesaria una tasa municipal sobre los RSU.

En general, los costes de inversión son menores cuando se emplean sistemas sencillos de tratamiento de gases, generándose cantidades elevadas de residuos. Si los procesos de tratamiento son más complejos se generan cantidades mínimas de residuos, pero los costes de inversión son más elevados.

5.2.2. Costes de la incineración y otros procedimientos de eliminación de RSU

La incineración de RSU es una tecnología que requiere una inversión elevada, y también lo son los costes de operación y mantenimiento, con independencia de que se realice o no la valorización energética. En principio, el sistema que requiere menos capital es la eliminación en vertedero. En general, el tamaño de la instalación, aire en exceso y volumen de gas a tratar es mucho mayor que el de las plantas térmicas que utilizan carbón. Los costes de inversión y mantenimiento de una incineradora son del orden de tres veces el coste de una planta térmica de carbón, para la misma producción de electricidad.

Si se realiza un reciclado previo, será posible obtener ingresos por la materia prima, *p.ej.* papel o vidrio, además de la obtención de energía. Muchas veces, estos beneficios dependen de la composición de los residuos.

La composición y las características físicas de los RSU afectan a los costes de su recogida, procesado y eliminación. Algunas de las características clave son:

- Densidad
- Contenido de materiales biodegradables
- Proporción de humedad en la parte biodegradable
- Poder calorífico

Así, un contenido elevado de materia biodegradable puede favorecer la producción de compost o metano, por ejemplo, y, por lo tanto, la opción del compostaje puede resultar de

fácil aplicación frente a otras alternativas, como el vertido. Por el contrario, un alto contenido de humedad dificulta la incineración o el buen funcionamiento de determinados equipos, haciéndolos menos rentables. Por tanto, la composición de los residuos incide sobre los costes y los beneficios de las diversas alternativas de tratamiento. Desde este punto de vista, se sugiere que la gestión de los RSU debería ser lo suficientemente flexible como para poder tratar residuos con diferente composición.

Los costes de los componentes más importantes en una planta *WtE* para el tratamiento de RSU son los siguientes:

- Recogida y recepción de RSU
- Horno de combustión, caldera y equipo auxiliar
- Sistema para la eliminación de escorias y cenizas volantes
- Equipos de instrumentación y transformación en electricidad

Los costes de operación de una planta *WtE* para el tratamiento de RSU se pueden clasificar en *costes fijos*: costes del capital, mano de obra, seguros, permisos, etc., y *costes variables*: transporte, suelo para vertedero, consumibles, etc. La relación entre costes fijos y variables suele estar en el intervalo 1:1 a 2:1, dependiendo de la capacidad de la planta. El porcentaje de estos costes puede ser del siguiente orden [2]:

• Capital	30-40%
• Mano de obra	15-23%
• Mantenimiento	15-25%
• Consumibles, análisis, etc.	10-12%
• Eliminación de residuos	11-15%

Si en los costes del capital se consideran los costes del inmovilizado (equipo de combustión y electro-mecánico) y costes de operaciones en el proceso, así como los correspondientes a edificios e infraestructura civil, el porcentaje es el siguiente [2]:

• Manejo de los RSU, incineradora y caldera	52%
• Generación de energía	16%
• Tratamiento de efluentes gaseosos	17%
• Edificios e infraestructura civil	15%

En la Tabla 5.3 aparecen algunas estimaciones de los costes de procesamiento con diversas alternativas, así como de los posibles ingresos por valorización. La tercera columna muestra el coste neto, es decir el coste del proceso menos los ingresos por valorización.

TABLA 05-3 Costes-beneficios en los procesos de tratamiento de RSU (€/t).

	Coste del proceso	Ingresos por valorización	Coste final neto
Recogida domiciliaria:			
- normal	18	–	18
- selectiva	30	21	8
Vertedero controlado			
- Sin recuperación de energía	12.8	–	10
- Recuperación de energía	10.9		
Reciclado después del triaje	18	10	8
Compostaje	20	12	8
Incineración:			
- residuo bruto	55	23	32
- residuo elaborado	70	46	24
- recuperación calor+electricidad	13.1		

El proceso menos costoso es el vertedero controlado, seguido del reciclado, el compostaje y la incineración. Al incorporar la posibilidad de valorización del residuo, puede observarse que la preferencia por el tipo de proceso se alteraría: el compostaje y el reciclado pasarían a ser ahora las alternativas más baratas. La Tabla 5.3, sin embargo, no contempla la totalidad de los costes y beneficios.

Algunos costes del tratamiento de emisiones se indican en la Tabla 5.4.

TABLA 05-4 Coste del tratamiento de emisiones en incineración y vertederos.

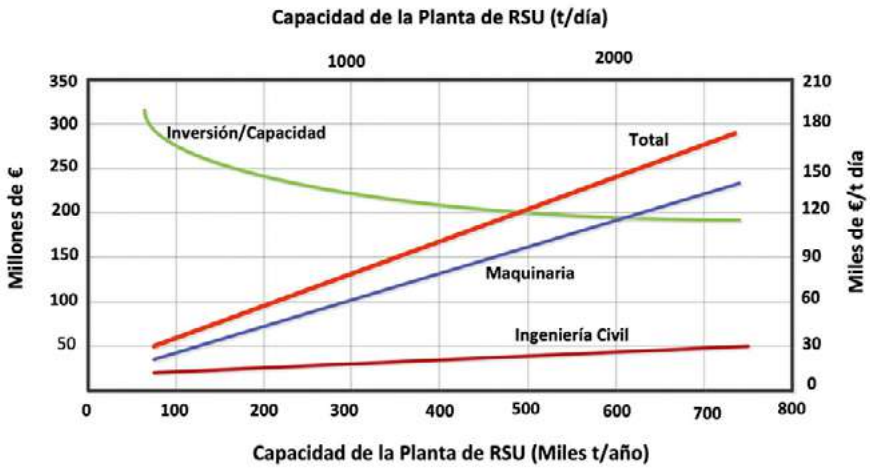
Proceso	Emisión	Coste final neto, €/t
Incineración	Total	23
	CO_2	15
	NO_x, SO_2	3
	Metales	2.5
	Dioxinas	0.1
Vertedero controlado	Total	13
	CO_2+CH_4	11
	NO_x, SO_2	2

Las incineradoras de RSU suelen diseñarse para una capacidad de 20-30 t/h, siendo recomendable entre 10-20 t/h. Es preferible que la capacidad esté dividida en dos líneas idénticas, con lo que se favorece la flexibilidad y disponibilidad de la planta, por ejemplo, para realizar el mantenimiento de una de las líneas. La inversión en una incineradora depende en parte de la forma de energía que se desea producir. Las más baratas son las que disponen de calderas para producir únicamente agua caliente. Si se desea producir vapor de agua y electricidad, la inversión puede aumentar en un 40%.

Ha de considerarse asimismo la economía de escala en el tratamiento de los RSU, según se indica en la Fig. 5.2. En la decisión sobre la capacidad de una incineradora ha de tenerse

en cuenta la necesidad de recuperar los costes de inversión y operación, teniendo en cuenta que su periodo de vida es de unos 20-30 años. Algunos equipos e instalaciones tienen ciertos costes fijos, independientes de la cantidad de residuos, como por ejemplo las licencias o los costes de construcción de los accesos a las instalaciones. En segundo lugar, el coste medio del tratamiento de residuos puede disminuir conforme aumenta la cantidad de residuos gestionada, al tiempo que es necesario más capital y más trabajo especializado. Para ser económicamente factibles, las plantas de incineración individuales han de tener capacidades de al menos 240 t/dia (10 t/h).

FIGURA 05-2 Costes de inversión en plantas de incineración de RSU (basado en Rand, et al. [3]).



La gestión de residuos mediante la introducción de los costes conlleva una drástica disminución de residuos, lo cual permite espaciar la recogida, disminuyendo de nuevo el coste. Así, en la mayoría de países desarrollados la recogida de RSU suele hacerse una vez por semana, incluso en lugares donde el verano es más caluroso que en España. El actual sistema dominante en España de recogida casi diaria es demasiado costoso.

La política de precios se suele complementar con incentivos a la selección en origen que permita un mayor volumen de recuperación, ya sea vía reutilización o reciclaje. Los municipios más planificados en este sentido recogen los RSU recuperables, como vidrio, papel, cartón, o aluminio, de forma separada y gratuita.

En resumen, la introducción de los costes en la gestión de RSU permite una racionalización de las cantidades generadas y la introducción de mecanismos complementarios de política económica que puedan conducir a un óptimo social de generación de RSU.

5.2.3. Optimización de la recogida selectiva

Para separar los diferentes materiales que componen los RSU se necesita energía; por este motivo la separación en origen, mediante la recogida selectiva, representa en general el sistema más eficaz y el que se suele promover.

Recoger y trasportar 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 transportes. El mejor sistema es aquel que maximiza el balance ambiental, o sea el valor neto de la energía y de los materiales recuperados, una vez descontados la energía y los materiales utilizados para su recuperación.

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 corresponde a los costes ambientales mínimos.

El porcentaje óptimo de recogida selectiva depende de los sistemas de recogida y de recuperación utilizados, del desarrollo tecnológico de los sistemas de tratamiento y de las características del territorio.

5.3. Eficacia energética: Factor R1

La directiva 2008/98/EC, conocida como Directiva Marco de Residuos (WFD), introduce un criterio conocido como eficacia energética, la fórmula R1, que establece las condiciones para que la incineración de RSU se considere una operación de recuperación o una operación de eliminación [4]. La fórmula para R1 es la siguiente:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{f_B (E_w + E_f)} \qquad [5.2]$$

El valor de la relación de utilización energética es de 0.6 para las plantas que existían antes de 2008 y 0.65 para las plantas a partir del 31/12/2008, siendo:

- E_p: energía anual producida (calor o electricidad). Si se calcula como energía eléctrica se multiplica por 2.6 y si es como energía calorífica por 1.1
- E_f: es la energía anual suministrada al sistema en forma de combustible (combustible suplementario)
- E_i: es la energía anual que se importa (no empleada para la producción de calor) y excluyendo E_w y E_f
- E_w: energía anual que contiene el RSU (energía liberada en el proceso de combustión)
- f_B: factor de pérdida de energía por radiación y a través de las escorias (normalmente = 0.97)

La fórmula R1 permite determinar la eficacia energética global de las plantas *WtE*, que incluye la eficacia de la planta en la recuperación de la energía del RSU, así como el empleo eficaz de esa energía en la planta. La recuperación de energía en la planta de incineración es elevada, hasta el 85% de la energía del residuo si es en forma de vapor de agua.

La formula R1 para incineración no tiene en cuenta las condiciones locales, que de acuerdo con la directiva han de tenerse en cuenta. Hay al menos tres factores técnicos que afectan al valor de R1:

- Clima local
- Forma de la energía exportada (electricidad únicamente, calor únicamente, CHP: ciclo combinado de calor y potencia)
- Tamaño de la planta

Así, por ejemplo, cuanto más baja es la temperatura ambiente mayor es la caída de entalpía y en consecuencia más eficaz es la turbina.

En general, el valor de R1 es más elevado si la planta exporta únicamente calor que si se dedica a la producción de electricidad.

5.4. Análisis del ciclo de vida (LCA) y de las tres R's

El uso de materiales reciclados en vez de materias primas hace que los costes de éstas se reduzcan. Dentro de las tres R's, la *reducción* y *reutilización* de materiales es beneficiosa desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, en lo que respecta al *reciclaje* se requieren procesos adicionales que implican el uso de energía y/o recursos para que los materiales reciclados puedan utilizarse de nuevo. Con el fin de evaluar si el reciclaje es una opción potencial se emplea el análisis del ciclo de vida (LCA) para cuantificar los efectos medioambientales en el ciclo completo de vida del sistema de reciclaje. El concepto de LCA consiste en tener en cuenta todos los estadios a lo largo de la vida de un proceso o producto. Para un determinado producto habría que considerar: la extracción de las materias primas, su tratamiento, la obtención del producto, su uso, reciclaje y eliminación final. Asimismo, ha de tenerse en cuenta el impacto medioambiental que causan los subproductos y el proceso que se emplea para obtener un "producto verde".

5.4.1. Reciclaje de plásticos

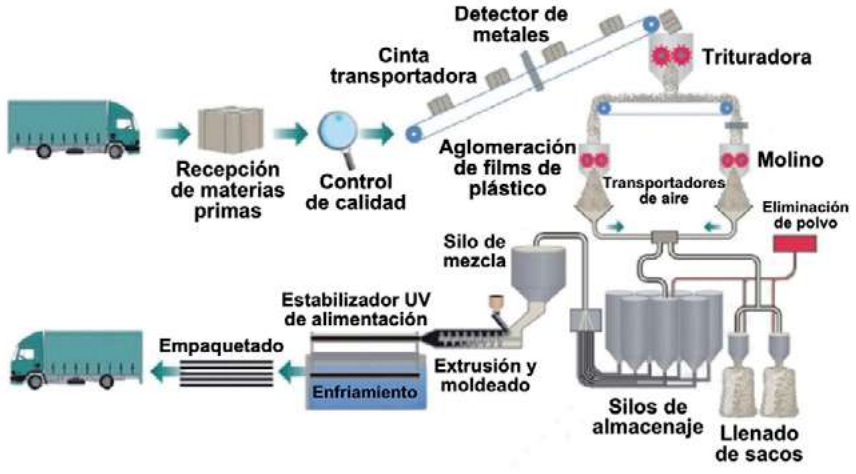
Los plásticos residuales son demasiado valiosos como para eliminarlos en vertederos. Entre los años 2006 y 2012, debido a las restricciones para el empleo de vertederos, la cantidad de plásticos que iba a vertedero se ha reducido en la UE en un 26% (9.6 Mt) y su reciclaje ha aumentado en un 40%. Si en el año 2025 se prohíben los vertederos, se evitaría el vertido a los mismos de 60 Mt de plásticos, y el reciclaje aumentaría en unos 5 Mt. Los plásticos que no es posible reciclar de modo sostenible serían incinerados, produciendo 330 TWh de energía. Los plásticos juegan un papel fundamental como aislantes y, mediante el ahorro de energía con los mismos, se disminuye la producción de GEI y se contribuye a un ahorro energético que sería equivalente al calor necesario para las viviendas de 40 millones de personas [5].

Los plásticos residuales se utilizan como materia prima para obtener productos diferentes. Los productos finales del reciclado de plásticos se utilizan principalmente como perfiles en construcción y en agricultura. Estos perfiles pueden cortarse, perforarse o pintarse. Tienen la ventaja sobre los perfiles de madera en que no se pudren y se pueden limpiar y desinfectar con facilidad. Los plásticos más utilizados para reciclaje son HDPE, LDPE, PP y PS (60-80%) y PET, ABS y PC (10-30%). Algunos se emplean como materiales de relleno, como PA, PMMA y PVC (0-10%).

El proceso empleado por la empresa Muovix en Finlandia y en otras empresas europeas, con la misma tecnología, se indica en la Fig. 5.3 [6].

- El proceso comienza con el control de calidad del producto que se recibe.
- El material se almacena en silos y entra al proceso a través de una cinta transportadora con un detector de metales.
- El producto sigue dos líneas de pretratamiento: (1) los plásticos duros se muelen finamente y (2) las bolsas/cintas de plástico se aglomeran, almacenándose en silos de mezclado.
- Se añaden colorantes a la masa y se mezcla.
- El producto pasa por un extrusor donde se funde y se le da la forma deseada.
- Finalmente, el producto se enfría y se embala.

FIGURA 05-3 Diagrama de flujo del proceso Muovix para reciclaje de plásticos [6].



Un estudio completo del LCA es complicado y con frecuencia se utiliza la reducción de las emisiones de gases invernadero para comparar las emisiones de un producto fabricado a partir de un material reciclado, que sirva para la misma función. Las emisiones se determinan del modo siguiente:

Producto reciclado

- Procesado del material reciclado (materiales auxiliares y electricidad)
- Gestión de residuos
- Transporte

Producto virgen

- Fabricación del producto
- Procesado de la materia prima (materiales auxiliares y electricidad)
- Gestión de residuos
- Transporte

Para el éxito de la industria de reciclaje es necesario que los costes de transporte y reprocesamiento del material reciclado sean menores que los costes de transporte y producción a partir del material virgen. Esto se aplica a materiales en los que se ahorran cantidades elevadas de energía durante el reprocesamiento, comparado con los costes de producción a partir del material virgen. Sin embargo, en algunos materiales con costes elevados de reprocesamiento y un ahorro pequeño de energía, puede no ser factible obtener un producto reciclado a un precio competitivo.

5.5. Futuro de la *WtE*

La implantación de tecnologías *WtE* ha aumentado significativamente en las últimas décadas, en primer lugar porque en muchos países se ha abandonado o prohibido el empleo de vertederos, debido a ser muy perjudiciales para el medio ambiente y al haber aumentado la

cantidad de RSU que pueden destinarse a la recuperación de energía. Se evita así la utilización de suelo que queda degradado e improductivo, la generación de emisiones de metano, que afectan gravemente al cambio climático y lixiviados que dan lugar a la contaminación del suelo y aguas subterráneas.

En Singapur se ha construido una planta *WtE*, TuasOne, que puede procesar 3600 t RSU/día produciendo 120 MWh/día de electricidad, con lo cual se recicla un 60% de los residuos, un 38% se destina a la planta *WtE* y únicamente un 2% se destina al vertedero. De esta forma el país será menos dependiente de las importaciones de crudo de petróleo [7].

En España, la planta de TIRME en Palma de Mallorca, Fig. 5.4, da servicio a una población de 850 000 habitantes, tratando 500 000 t/año de RSU, 6000 t/año de lodos Edar, y 150 000 t/año de CSR, generando 250 GWh/año de energía eléctrica.

FIGURA 05-4 Planta Tirme de valorización energética de RSU (catálogo Tirme).

En la producción de energía a partir de residuos, algunos objetivos prioritarios son los siguientes [8, 9]:

- Una gestión sostenible de los RSU debe implementarse a través del eco-diseño y mediante cambios en el comportamiento social. Una mala gestión tiene efectos medioambientales adversos e impide el desarrollo de una economía circular sostenible.
- Han de evitarse los vertederos de RSU por sus efectos nocivos sobre la salud (por razones de higiene) y por la emisión de metano (gas de efecto invernadero) y filtraciones que contaminan las capas freáticas.
- La incineración de RSU con recuperación de energía es una tecnología probada y que contribuirá a satisfacer las crecientes necesidades energéticas y a reducir el uso de combustibles fósiles. La producción de energía a partir de RSU mediante técnicas *WtE* es una opción de generación de energía renovable y una gestión sostenible de residuos, siendo la única forma posible de operar en una economía circular.
- Las tecnologías de *WtE* han tenido una implementación muy limitada en los países en vías de desarrollo. Generalmente, en algunos de esos países se utilizan como máximo tecnologías de captura de biogás procedente de vertederos y algún coprocesamiento con combustibles fósiles.
- Las plantas de *WtE* requieren un personal cualificado y un mantenimiento permanente, lo que conduce a generar un elevado número de puestos de trabajo.
- Los CDR o CSR tienen un elevado poder calorífico y pueden ser empleados como una fuente energética importante en plantas de coincineración, *p.ej.* cementeras.
- Los ingresos por la venta de energía de las plantas *WtE* no cubren los costes de capital y de operación. El sector privado tiene un papel primordial en la construcción y operación de las plantas de *WtE*, pero esto requiere que haya beneficios y una seguridad legal. En algunos países se han construido dentro de parques industriales, con lo cual se pueden eliminar residuos industriales, además de los RSU, y disponer las industrias del parque de vapor de agua y electricidad, generados en la planta de *WtE*.

5.6. Localización de una planta de *WtE*

Las plantas de valorización térmica de RSU deben construirse en zonas aisladas o parques industriales en los que se necesite a lo largo del año el suministro de calor y de electricidad, o bien cerca de zonas urbanas en las que existan redes de distribución de calor.

En la localización de una planta de valorización energética de residuos deben considerarse algunos factores:

- *Transporte de RSU.* La planta debe estar bien comunicada con los centros de producción de RSU, para poder ser transportados con facilidad en camiones e incluso por ferrocarril desde algún centro de transferencia.
- *Centros de población.* Si bien existen varias plantas situadas dentro de grandes urbes, es recomendable situarlas al menos a 500 m del núcleo de población más cercano, para evitar sobre todo olores procedentes de las vías de transporte o de los fosos donde se depositan los RSU. El proceso de combustión destruye las sustancias causantes de olores, y las escorias y cenizas volantes no tienen olor una vez se han enfriado.
- *Dirección del viento.* Ha de determinarse la dirección preferente del viento en la zona donde se construye la planta, de modo que el viento no transporte humos y olores a zonas pobladas.
- *Altura de chimenea*. Los gases procedentes de las plantas *WtE* necesitan una chimenea de descarga a la atmósfera, con independencia de la tecnología empleada. La altura de chimenea debe ser tal que los edificios próximos de mayor altura no interfieran con la dispersión de los efluentes gaseosos.
- *Servicios de la planta.* Las oficinas de administración, laboratorios y talleres han de situarse a una distancia adecuada de la planta, para que tengan el menor impacto posible derivado de su funcionamiento: ruidos, tráfico y eventuales olores. Una distancia prudencial es también un requisito en cuanto a la seguridad de los servicios.

Una ubicación idónea de plantas *WtE* podría ser cerca de alguna planta térmica de combustibles fósiles ya existente o en parques industriales, ya que reporta indudables beneficios al clima y las industrias allí situadas pueden prescindir de sus calderas de producción de vapor de agua, empleando combustibles fósiles. Se puede así contribuir a reducir la descarbonización en los dos sectores que resulta más difícil: la industria y el transporte. Ha de tenerse en cuenta que la mitad de la energía que se obtiene de RSU procede de residuos renovables de origen biológico. La implicación de la industria en la gestión de plantas *WtE*, como sucede en algunos países de la UE, proporciona grandes beneficios para las empresas, se fomenta el reciclaje y la recuperación de materiales y es la forma sostenible de implementar una economía circular.

5.7. Bibliografía

1. | Themelis, N.J., Ulloa, P.A., *"Methane generation in landfields"* Renew Energy, 32(7) 1243-57 (2007).

2. | McKendry, P., *"Costs of incineration and non-incineration energy from waste technologies"*, SLR Consulting Ltd. Ref: 402-1183-00002, Londres (2008).

3. | Rand, T., Haukohl, J., Marxen, U., *"Municipal solid waste incineration"*, WTP 462, The World Bank, Washington, D.C. (2000).

4. | Clerens Consulting y ESWET, *"Energy recovery efficiency in Municipal Solid Waste-to-Energy plant in relation to local climate conditions"*, Bruselas (2012).

5. | Foerster, K.H., *"Shaping the path towards sustainability".* Circular Economy in Europe. The European files, Nr. 38 (2015).

6. | Korhonen, M-R., Dahlbo, H., *"Reducing greenhouse gas emissions by recycling plastics and textiles into products"*, The Finish Environment, 30, 24 (2007).

7. | *"120 MW Waste to Energy Contract for MHI in Singapore",* Waste Management World Sept.-Oct. (2015).

8. | GIZ, *"Waste-to –energy options in municipal solid waste management"*, Eschborn (2017).

9. | *Roadmap: "New Circular Economy Action Plan, European Commission",* 23 December (2019).

CAPÍTULO

06

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

06

SÍMBOLOS Y
ABREVIACIONES

ASTM	*American Society for Testing and Materials* (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales)
CCAA	Comunidades autónomas
CH_4	Metano
CDR	Combustible derivado de residuos
CHP	*Combined Heat and Power* (Plantas combinadas de calor y electricidad)
CSR	Combustibles sólidos recuperados
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
FORS	Fracción orgánica de recogida separada
GEI	Gases de efecto invernadero
Gt	Mil millones de toneladas
HCl	Cloruro de hidrógeno
HDPE	*High Density Polyethylene* (Polietileno de alta densidad)
HF	Fluoruro de hidrógeno
INE	Instituto Nacional de Estadística

IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
J	Julio
K	Kelvin
kcal	kilocaloría
kg	kilogramo
kJ	kilojulio
kPa	kilopascal
kWh	kilowatio-hora
L	litro
LCA	*Life-cycle assessment* (Análisis de ciclo de vida)
LDPE	*Low density Polyethylene* (Polietileno de baja densidad)
M	Millones
Mt	Millones de toneladas
MTD	Mejores técnicas disponibles (*Best available techniques, BAT*)
Mtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
MW	Megawatio
MWh	Megawatio-hora
MWe	Megawatio eléctrico
µm	Micra
ng	Nanogramos
Nm^3	Metro cúbico normal

NO_x	Óxidos de nitrógeno
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PCI	Poder calorífico inferior
PET	*Polyethylene terephthalate* (Tereftalato de polietileno)
PMMA	*Poly(methyl methacrylate)* Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de vinilo
RS	Residuos sólidos
RSU	Residuos sólidos urbanos
SO_x	Óxidos de azufre
SO_2	Dióxido de azufre
TMB	Tratamiento mecánico-biológico
TOC	Carbono orgánico total
Tt	Teratón, Millón de millones de toneladas (1×10^{12} toneladas)
UE	Unión Europea
WtE	*Waste to energy* (Energía a partir de residuos)
VOC's	*Volatile organic compounds* (Compuestos orgánicos volátiles)

Se terminó de editar el libro

Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en una economía circular y sostenible

el 19 de junio de 2025

estando a cargo de la edición

la Editorial de la Universidad de Huelva.

Universidad de Huelva

CÁTEDRA ATLANTIC COPPER
Universidad de Huelva

9 788417 288921

Este libro dispone de versión EBOOK