

La producción de residuos se encuentra en continuo aumento y la actividad económica vinculada a ellos alcanza cada vez mayor importancia, tanto por su envergadura como por su repercusión directa en la sostenibilidad del modelo económico europeo.

En este contexto, el presente documento se ha elaborado por iniciativa de la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible y la Universitat Politècnica de València y se enmarca en las actividades que esta Cátedra Universidad-Empresa realiza para desarrollar acciones formativas de sensibilización y divulgación a técnicos y responsables de la experiencia acumulada en las actuaciones realizadas y de formación permanente propiamente dicha a responsables de los distintos entornos funcionales con los que trata.

El documento se ha elaborado de forma que recoge de forma resumida el estado actual de las técnicas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos, sirviendo de esta forma de apoyo a los técnicos de las administraciones públicas y a los profesionales del sector de la gestión de residuos sólidos urbanos.



ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

J. RODRIGO ILARRI - M.E. RODRIGO CLAVERO - J.M. FERNÁNDEZ GONZÁLEZ

ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

JAVIER RODRIGO ILARRI
MARÍA ELENA RODRIGO CLAVERO
JOSÉ MARÍA FERNÁNDEZ GONZÁLEZ



ISBN 978-84-942396-1-8



9 788494 239618

Javier Rodrigo Ilarri
María Elena Rodrigo Clavero
José María Fernández González

ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Cátedra ACAL Ciudad Sostenible

© Autores: Javier Rodrigo Ilarri
María Elena Rodrigo Clavero
José María Fernández González

Director de la cátedra: José Vicente Colomer Ferrándiz

Edita: ENTORNOS Diseño y percepción, S.L.
entornos@entornosdp.com

Imprime: Reapproval, S.L.

ISBN: 978-84-942396-1-8

Depósito Legal: V2598-2014

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

Prólogo

Hay que repasar la forma en que se están gestionando las ciudades. Después de 40 años de desarrollo, hemos acabado con ciudades poco sostenibles y muy caras de mantener, con problemas muy serios para costear las infraestructuras de las que disponen. Se ha evolucionado desde el modelo clásico de ciudad, con un urbanismo estructural, a otro funcional y desestructurado. Esto acarrea problemas de movilidad, altos costes energéticos, despilfarro territorial y ambiental. Todo esto no es sostenible.

En el trabajo que desde ACAL realizamos día a día con responsables técnicos y políticos de la gestión municipal, venimos apreciando, cada vez con mayor intensidad, los problemas que se generan en torno a las infraestructuras, las instalaciones y los servicios públicos: su diseño, la organización de los mismos y los costes asociados, las tecnologías empleadas y su sostenibilidad. Nuestro trabajo con estos problemas es desde el terreno jurídico y económico, unas veces instrumentando su contratación y otras veces en el terreno de los conflictos que se plantean con las empresas que prestan estos servicios. Sin embargo, para poder mejorar en este campo es preciso dar un mayor peso a los aspectos técnicos y a la ingeniería.

En ACAL estamos sensibilizados con la problemática expuesta y es por ello que hemos creado un espacio de intercambio de experiencias y soluciones con las que se pueda mejorar la gestión de nuestras ciudades, mejorando la eficacia de los recursos destinados y la eficiencia de los métodos de trabajo. Para ello, ACAL y la Universitat Politècnica de València han puesto en marcha la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible, un ámbito de colaboración entre las dos entidades donde confluyen nuestra experiencia en la administración y la solvencia y el potencial tecnológico de la UPV.

Con esta serie de monografías publicadas por la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible, se ha querido documentar diferentes experiencias o investigaciones, llevadas a cabo en el ámbito de la cátedra, de las que se pueden extraer metodologías de trabajo aplicables en distintos ámbitos de la gestión de la ciudad y que pueden ser de utilidad para los responsables municipales encargados de los mismos.

Jesús García Navarro
Director, ACAL

Monografías

Cátedra ACAL Ciudad Sostenible

La Cátedra ACAL Ciudad Sostenible es el resultado de la firma de un convenio de colaboración entre la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) y la empresa Abogados Consultores de Administración Local (ACAL). El proyecto nace con el objetivo de poner a disposición de los ayuntamientos los conocimientos y las soluciones de las que dispone la Universitat Politècnica de València, con el fin de poder revisar con una perspectiva técnica, organizativa y económica, la gestión de los servicios municipales.

Los ámbitos principales de la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible se articulan en cuatro ejes: actividades de formación, de investigación, actividades de difusión y transferencia de conocimiento y actividades de apoyo en servicios de consultoría. Sus actuaciones se refieren a los distintos ámbitos que inciden en la sostenibilidad de las ciudades como son: agua, residuos, energía, transportes, medio ambiente u otros.

Dentro de las actividades de difusión, se ha considerado conveniente el abordar la publicación de los resúmenes de aquellas acciones de investigación o apoyo a la consultoría en las que ha colaborado la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible, para cumplir mejor el objetivo fundamental de esta cátedra: poner a disposición de los ayuntamientos los conocimientos y soluciones que contribuyen a una mejor gestión de los servicios municipales.

José Vicente Colomer Ferrándiz
Director de la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible

Introducción

En el preámbulo de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados se deja de manifiesto que la producción de residuos se encuentra en continuo aumento y que la actividad económica vinculada a los residuos alcanza cada vez mayor importancia, tanto por su envergadura como por su repercusión directa en la sostenibilidad del modelo económico europeo.

En este contexto, el presente documento se ha elaborado por iniciativa de la Cátedra ACAL Ciudad Sostenible y la Universitat Politècnica de València y se enmarca en las actividades que esta Cátedra Universidad-Empresa realiza para desarrollar acciones formativas de sensibilización y divulgación a técnicos y responsables de la experiencia acumulada en las actuaciones realizadas y de formación permanente propiamente dicha a responsables de los distintos entornos funcionales con los que trata.

El documento se ha elaborado de forma que recoja de forma resumida el estado actual de las técnicas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos, sirviendo de esta forma de apoyo a los técnicos de las administraciones públicas y a los profesionales del sector de la gestión de RSU.

El documento se ha estructurado en seis capítulos independientes:

El capítulo 1 presenta los aspectos fundamentales de la legislación vigente en materia de gestión de RSU y se refiere al ámbito comunitario, estatal y de la Comunidad Valenciana.

El capítulo 2 desarrolla los conceptos fundamentales de aplicación sobre el compostaje, como la técnica de valorización de RSU comúnmente aceptada como solución de gestión en la mayoría de las instalaciones de tratamiento en España.

El capítulo 3 presenta las características principales de la biometanización, como alternativa de valorización energética de RSU.

El capítulo 4 explora otras alternativas de valorización energética de carácter emergente: fabricación de combustibles alternativos, biocarburantes y tratamientos térmicos de RSU.

El capítulo 5 realiza un análisis de los vertederos de RSU como la alternativa de eliminación de los residuos comúnmente empleada, desde la fase de selección del emplazamiento hasta el sellado y restauración ambiental del mismo.

El capítulo 6 realiza un análisis de los costes de gestión de RSU. Partiendo de la definición de un modelo de costes sencillo, se incluyen cinco casos de estudio correspondientes a distintas alternativas de valorización energética.

El documento se complementa con un CD donde se incluyen íntegramente los textos de las disposiciones legales de la Unión Europea y ámbitos estatal y autonómico valenciano actualmente vigentes en materia de gestión de residuos sólidos.

Índice

1.- Legislación.....	1
1.1.- Definiciones, concepto y clasificación de los residuos.....	1
1.2.- Legislación de la Unión Europea.....	2
1.2.1.- Criterios normativos.....	2
1.2.2.- Los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (BREFs).....	3
1.3.- Legislación estatal	5
1.3.1.- Programa Estatal de Prevención de Residuos	7
1.3.2.- Plan Nacional Integral de Residuos	8
1.3.3.- Planes y programas de las Comunidades Autónomas	9
1.4.- Legislación de la Comunidad Valenciana	13
1.4.1.- Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana.....	13
1.4.2.- Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.....	14
2.- El compostaje.....	19

2.1.- Concepto de compostaje	19
2.2.- Factores que intervienen en el proceso de compostaje	21
2.3.- Sistemas de compostaje	25
2.3.1.- Sistemas abiertos	26
2.3.2.- Sistemas cerrados	30
2.4.- Productos obtenidos en el compostaje. El compost	37
3.- La biometanización	39
3.1.- Concepto de biometanización	39
3.2.- Factores que intervienen en el proceso de biometanización	44
3.3.- Sistemas de biometanización	46
3.3.1.- Sistemas en una etapa	47
3.3.2.- Sistemas en dos etapas	49
3.3.3.- Sistemas discontinuos	49
3.4.- Productos obtenidos en la biometanización	55
3.4.1.- El biogás	55
3.4.1.- Lodos de digestión y efluentes	57
4.- Otras tecnologías de valorización energética	59
4.1.- Aprovechamiento energético de RSU	59
4.1.1.- Combustibles alternativos: CDR/CSR	60
4.1.2.- Características del CSR producido	68
4.1.3.- Factores determinantes del precio	68
4.1.4.- Beneficios del CSR	69
4.2.- Biocarburantes a partir de la fracción orgánica de RSU	70
4.2.1.- Biodiesel	71
4.2.2.- Bioetanol	74
4.3.- Ecodiesel o diesel sintético	78
4.3.1.- Descripción de la tecnología	79
4.3.2.- Fases del proceso	80
4.3.3.- Efluentes y emisiones generadas en el proceso	81

4.3.4.- Valorización de los residuos con la tecnología SMRF.....	81
4.3.5.- Ventajas	82
4.4.- Incineración e incineración con recuperación de energía.....	84
4.4.1.-Incineración	84
4.4.2.- Incineración con recuperación de la energía: combustión controlada para residuos.....	90
4.5.- Coincineración en procesos industriales a altas temperaturas	97
4.6.- Cogeneración a partir de residuos.....	97
4.7.- Desgasificación de vertederos	99
4.8.- Procesos basados en la generación de plasma	102
4.9.- Gasificación.....	102
4.9.1.- Evolución histórica y perspectivas.....	102
4.10.2.- Gasificación tradicional	103
4.10.3.- Gasificación de residuos integrada en ciclo combinado (GICC)	108
4.10.4.- Gasificación con reactor horizontal giratorio.....	111
4.10.- Gasificación y vitrificación de residuos por plasma con optimización de la producción eléctrica	115
4.11.- Pirólisis	120
4.12.- Termólisis	123
5.- Los vertederos de RSU	125
5.1.- Introducción.....	125
5.2.- Clasificación de los vertederos controlados	128
5.3.- Selección del emplazamiento de vertederos	128
5.4.- Impermeabilización del vaso y drenaje exterior	130
5.5.- Producción y gestión de lixiviados	132
5.5.1.- El lixiviado.....	132
5.5.2.- Sistema de captación y almacenamiento de lixiviados	133
5.6.- Producción y gestión del biogás	137
5.6.1.- El biogás	137

5.6.2.- Problemas derivados de la generación de biogás en vertederos	138
5.6.3.- Formación de biogás: etapas de la degradación anaerobia.....	138
5.6.4.- Sistemas de captación de biogás	140
5.7.- Sellado y restauración ambiental de vertederos.....	144
6.- Determinación de los costes de gestión de los RSU	147
6.1.- Introducción.....	147
6.2.- Parámetros y estimaciones generales.....	148
6.3.- El modelo de costes	151
6.4.- Costes asociados a las instalaciones de gestión de RSU	153
6.5.- Servicios centrales y/o comunes.....	156
6.6.- Ejemplos de estudios económicos para nuevos servicios.....	157
6.6.1.- Planta de tratamiento mecánico-biológico y vertedero de rechazos con recuperación energética.....	157
6.6.2.- Planta de tratamiento mecánico-biológico con tecnología de biometanización para obtención de biogás a partir de la fracción orgánica y vertedero de rechazos con recuperación energética.....	163
6.6.3.- Planta de tratamiento mecánico biológico y valorización del rechazo mediante tecnología de CSR/CDR	169
6.6.4.- Planta de Ecodiesel o diesel sintético y valorización material del rechazo	176
6.6.5.- Planta de tratamiento mecánico y valorización con tecnología de gasificación	180
6.6.6.- Canon de explotación del servicio según tecnología.....	183
7.- Bibliografía	189
7.1.- Compostaje	189
7.2.- Biometanización	191
7.3.- Otras técnicas de valorización energética.....	193
7.4.- Vertederos de RSU	195

Índice de tablas

Tabla 1.1.- Planes y Programas de las Comunidades Autónomas	10
Tabla 1.2.- Nomenclatura de los Planes Zonales en el PIRCV	16
Tabla 2.1.- Factores que intervienen en el proceso de compostaje	21
Tabla 2.2.- Sistemas de compostaje	26
Tabla 3.1.- Factores que intervienen en el proceso de biometanización	44
Tabla 3.2.- Ventajas/Desventajas de los sistemas de tratamiento continuo (una etapa) y discontinuo	51
Tabla 3.3.- Balance de masas con tecnología de Biometanización en plantas MBT	54
Tabla 4.1.- Sistema de clasificación para CSR	61
Tabla 4.2.- Características CDR obtenido de RSU	65
Tabla 4.3.- Composición media del CDR	66
Tabla 4.4.- Características del CSR producido en función del usuario final.....	68
Tabla 4.5.- Diferentes métodos de producción de biodiesel	72
Tabla 4.6.- Residuos resultantes de la combustión	85
Tabla 4.7.- Tipos de hornos de combustión	87
Tabla 4.8.- Instalaciones de combustión controlada en España (2010).....	94
Tabla 4.9.- Características de los motores de cogeneración y de las microturbinas	99

Tabla 4.10.- Equivalencias energéticas del biogás	101
Tabla 4.11.- Propiedades combustibles	110
Tabla 4.12.- Experiencia en centrales de GICC	111
Tabla 5.1.- Datos típicos sobre la composición de los lixiviados	132
Tabla 5.2.- Elementos de captación y almacenamiento de lixiviados	134
Tabla 5.3.- Componentes principales del biogás.....	137
Tabla 6.1.- Parámetros a considerar en la determinación del canon de gestión de RSU	148
Tabla 6.2.- Costes asociados a las instalaciones de gestión de RSU.....	153
Tabla 6.3.- Costes de la planta de tratamiento mecánico	158
Tabla 6.4.- Costes de la planta de tratamiento biológico	159
Tabla 6.5.- Costes del vertedero con recuperación energética	160
Tabla 6.6.- Ingresos por ventas de elementos valorizables	161
Tabla 6.7.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado	161
Tabla 6.8.- Ingresos por ventas de energía obtenida	161
Tabla 6.9.- Balance económico de la planta MBT y vertedero con recuperación energética	162
Tabla 6.10.- Costes de la planta de tratamiento mecánico	164
Tabla 6.11.- Costes de la planta biometanización con aprovechamiento biogás.....	165
Tabla 6.12.- Costes del vertedero con recuperación energética	166
Tabla 6.13.- Ingresos por ventas de elementos valorizables	167
Tabla 6.14.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado	167
Tabla 6.15.- Ingresos por ventas de energía obtenida en biometanización	167
Tabla 6.16.- Ingresos por ventas de energía obtenida en vertedero	167
Tabla 6.17.- Balance económico de la planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación energética	168
Tabla 6.18.- Costes de la planta de tratamiento mecánico	170
Tabla 6.19.- Costes de la planta de tratamiento biológico	171
Tabla 6.20.- Costes de la planta de CSR/CDR.....	172
Tabla 6.21.- Costes del vertedero con recuperación energética	173
Tabla 6.22.- Ingresos por ventas de elementos valorizables	174
Tabla 6.23.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado	174

Tabla 6.24.- Ingresos por ventas de CSR/CDR.....	174
Tabla 6.25.- Ingresos por ventas de energía obtenida en vertedero	174
Tabla 6.26.- Balance económico de la planta MBT, planta de CSR/CDR y vertedero con recuperación energética	175
Tabla 6.27.- Costes de la planta de Ecodiesel o diesel sintético	177
Tabla 6.28.- Ingresos por ventas de elementos valorizables	178
Tabla 6.29.- Ingresos por ventas de Ecodiesel	178
Tabla 6.30.- Balance económico de la planta de Ecosiesel o diesel sintético	179
Tabla 6.31.-Costes de la planta de tratamiento mecánico y gasificación	181
Tabla 6.32.- Ingresos por ventas de energía.....	182
Tabla 6.33.- Balance económico de la planta de gasificación.....	182
Tabla 6.34.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico-biológico y vertedero de rechazos con recuperación energética	183
Tabla 6.35.- Canon de explotación de una planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación energética	184
Tabla 6.36.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico-biológico y valorización del rechazo mediante tecnología de CSR/CDR	185
Tabla 6.37.- Canon de explotación de una planta de Ecodiesel o diesel sintético y valorización material del rechazo.....	186
Tabla 6.38.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico y valorización con tecnología de gasificación	187
Tabla 6.39.- Resumen canon de explotación según tecnología.....	188

Índice de figuras

Figura 1.1. - Sistema de gestión de RSU	5
Figura 1.2.- Generación de residuos urbanos en España.....	6
Figura 1.3.- Generación de residuos urbanos en Europa en 2010	6
Figura 1.4.- Ámbito de actuación geográfico de cada plan zonal (PIR2013)	17
Figura 2.1.- Esquema del proceso de compostaje	20
Figura 2.2.- Evolución de la temperatura y el pH durante el proceso de maduración.....	22
Figura 2.3.- Nivel de oxígeno durante el compostaje en una pila volteada semanalmente	27
Figura 2.4.- Volteadora trabajando en campo	27
Figura 2.5.- Sistema de compostaje en pilas estáticas aireadas.....	28
Figura 2.6.- Dimensiones de las pilas estáticas aireadas	29
Figura 2.7.- Reactor de lecho empaquetado tipo silo	31
Figura 2.8.- Reactor circular de lecho agitado	32
Figura 2.9.- Reactor circular dinámico	33
Figura 2.10.- Ejemplos de compostaje tipo “cajón”	33
Figura 2.11.- Sistema de compostaje en canales o trincheras	34
Figura 2.12.- Esquema de compostaje en tambores rotativos	35

Figura 2.13.- Reactor tipo túnel	36
Figura 2.14.- Compostaje en contenedores a gran escala.....	36
Figura 3.1.- Esquema del proceso de biometanización	40
Figura 3.2.- Diagrama de una planta de biometanización	41
Figura 3.3.- Esquema de reacciones de la digestión anaerobia	43
Figura 3.4.- Clasificación de las tecnologías de digestión anaerobia de residuos sólidos	47
Figura 3.5.- Tipos de digestor empleados en la digestión anaerobia (Sistema seco en una etapa)	48
Figura 3.6.- Planta de Biometanización de Las Dehesas	52
Figura 3.7.- Planta de Biometanización de La Paloma	53
Figura 3.8.- Planta de tratamiento de biogás en el Complejo de Valdemingómez.....	54
Figura 4.1.- Principales tecnologías de valorización energética y material de RSU	60
Figura 4.2.- Tratamientos generales previos a la producción de CSR/CDR	62
Figura 4.3.- Proceso de producción de CSR/CDR mediante tratamiento mecánico	63
Figura 4.4.- Proceso de producción de CSR/CDR mediante biosecado.....	63
Figura 4.5.- Esquema de fabricación de CSR en Andalucía (50.000 t/año).....	66
Figura 4.6.- Actividades de aplicación al CSR	67
Figura 4.7.- Esquema del proceso de fabricación del CSR. Datos particularizados para el CVSE.....	70
Figura 4.8.- Diagrama de flujo para la producción de Bioetanol	75
Figura 4.9.- Biorefinería de petróleo.....	76
Figura 4.10.- Procesos en Proyecto Perseo	77
Figura 4.11.- Planta Proyecto Perseo. L' Alcúdia (Valencia)	77
Figura 4.12.- Procesos en Proyecto Atenea.....	78
Figura 4.13.- Esquema del proceso de fabricación de Ecodiesel	82
Figura 4.14.- Diagrama del proceso de producción de ECODIESEL. Patente S.M.R.F.	83
Figura 4.15.- Aprovechamiento de los RSU con incineración.....	84
Figura 4.16.- Reacciones estequiométricas.....	85
Figura 4.17.- Energía cedida en el proceso de combustión.....	85
Figura 4.18.- Esquema de incineración en horno de parrilla.....	88
Figura 4.19.- Detalle horno de parrilla.....	88

Figura 4.20.- Detalle horno lecho fluidizado circulante.....	89
Figura 4.21.- Detalle horno rotativo.....	90
Figura 4.22.- Aprovechamiento de la escoria como grava (Escograva).....	91
Figura 4.23.- Combustión controlada para residuos.....	91
Figura 4.24.- Balance en la incineradora de Tarragona	92
Figura 4.25.- Central de combustión controlada de Tarragona	94
Figura 4.26.- Planta de combustión controlada en Copenhague	95
Figura 4.27.- Tecnologías de valorización energética de RSU: Combustión controlada.....	96
Figura 4.28.- Planta de extracción, tratamiento y aprovechamiento energético de biogás en vertedero	100
Figura 4.29.- Producción de biogás en vertederos controlados.....	101
Figura 4.30.- Esquema del proceso de gasificación	104
Figura 4.31.- Tipos de gasificadores	105
Figura 4.32.- a) Gasificador de Lecho Fijo a contracorriente y b) Gasificador de lecho fijo con corrientes paralelas	106
Figura 4.33.- Gasificador de lecho fluidizado burbujeante	106
Figura 4.34.- Gasificador de lecho de arrastre	107
Figura 4.35.- Ejemplo balance de masas gasificación.....	108
Figura 4.36.- Principio de funcionamiento de GICC	109
Figura 4.37.- Planta Residuo Cero	112
Figura 4.38.- Planta piloto de gasificación con cilindro horizontal	114
Figura 4.39.- Creación del gas de plasma	116
Figura 4.40.- Proceso de generación del plasma.....	117
Figura 4.41.- Proceso patentado por Acciona de PGV.....	118
Figura 4.42.- Balance de masas general para tecnología PGV.....	119
Figura 4.43.- Reacciones de pirólisis	120
Figura 4.44.- Diagrama de una planta de pirólisis	120
Figura 4.45.- Esquema de procesos en la tecnología de pirolisis	122
Figura 5.1.- Fases de la operación de un vertedero.....	127
Figura 5.2.- Capas de impermeabilización en vertedero de residuos no peligrosos.....	131
Figura 5.3.- Volumen de control.....	133

Figura 5.4.- Fases del proceso de la formación del biogás en un depósito controlado	139
Figura 5.5.- Detalle tipo de una chimenea para la extracción del gas de vertedero	141
Figura 5.6.- Esquema de distribución de chimeneas de desgasificación.....	142
Figura 5.7.- Sistema de recuperación del gas del vertedero mediante chimeneas verticales	143
Figura 5.8.- Capa de sellado de un vertedero de residuos no peligrosos.....	145
Figura 5.9.- Ejemplo de capas de sellado en un vertedero de RSU.....	145
Figura 6.1.- Ejemplo de modelo de costes	152
Figura 6.2.- Procesos y balance de masas en una planta MBT y vertedero	157
Figura 6.3.- Procesos y balance de masas en una planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación energética.....	163
Figura 6.4.- Procesos y balance de masas en una planta MBT, planta de CSR/CDR y vertedero con recuperación energética	169
Figura 6.5.- Procesos y balance de masas en una planta de Ecodiesel.....	176
Figura 6.6.- Procesos con planta de tratamiento y gasificación	180

Capítulo 1

Legislación

1.1.- Definiciones, concepto y clasificación de los residuos

De acuerdo con la legislación estatal actualmente en vigor - Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados - se considera residuo a cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche, tenga la intención o la obligación de desechar.

La clasificación de los residuos según su origen la encontramos en el artículo 3 de la citada Ley 22/2011:

- “Residuos domésticos”: residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres así como los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.
- “Residuos comerciales”: residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios.

- “Residuos industriales”: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.

La Ley 22/2011 incluye por vez primera la definición de “biorresiduo”, englobando en ese término todo aquel residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor; así como, residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos.

Las operaciones de valorización de residuos incluyen cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general. En el anexo II de la Ley 22/2011 se recoge una lista no exhaustiva de operaciones de valorización.

Desde el punto de vista de su grado de peligrosidad, la determinación de los residuos que han de considerarse como residuos peligrosos y no peligrosos se hará de conformidad con la lista establecida en la Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000.

1.2.- Legislación de la Unión Europea

1.2.1.- Criterios normativos

La promulgación de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas integrándolas en una única norma («Directiva marco de residuos») establece el marco jurídico de la Unión Europea para la gestión de los residuos, proporciona los instrumentos que permiten disociar la relación existente entre crecimiento económico y producción de residuos.

La Directiva 2008/98/CE hace especial hincapié en la prevención, entendida como el conjunto de medidas adoptadas antes de que un producto se convierta en residuo, para reducir tanto la cantidad y contenido en sustancias peligrosas como los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados. Así incorpora el principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos que ha de centrarse en la prevención, la preparación para la reutilización, el reciclaje u otras formas de valorización, incluida la valorización energética y aspira a transformar la

Unión Europea en una «sociedad del reciclado» y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

Mediante esta Directiva Marco de residuos la estrategia europea trata de crear nuevas posibilidades de gestión de los mismos para disminuir al máximo la producción y la peligrosidad de los residuos. Esto se consigue adoptando soluciones de minimización o bien mediante la reutilización o el aprovechamiento energético.

Los objetivos fundamentales de la estrategia europea sobre prevención y reciclado de los residuos se pueden resumir en estos puntos:

- Mejora del marco legislativo general. La estrategia simplificará la legislación vigente fusionando directivas y eliminará solapamientos.
- Se llevará a cabo una prevención del impacto negativo de los residuos. Se pretende minimizar el impacto ambiental de los residuos, aplicando esta disminución del impacto en todas las etapas de la vida de los recursos. Será un enfoque basado en el ciclo de vida de los productos.
- Se fomentará el reciclado de los residuos. La estrategia prevé animar al sector del reciclado a reintroducir los residuos en el ciclo económico, mediante productos de calidad.

1.2.2.- Los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (BREFs)

En el marco de la Unión Europea, se establece el intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias para la elección de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) que deben servir de referencia común para los Estados miembros a la hora de establecer el objetivo tecnológico de aplicación a las diferentes actividades.

A tal efecto, la Comisión Europea a través de la Oficina Europea de IPPC (*European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau*), ha organizado una serie de grupos de trabajo técnico que, por epígrafes y actividades, proponen a la Comisión Europea los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD - BREFs).

Los BREFs informarán a las autoridades competentes sobre qué es técnica y económicamente viable para cada sector industrial, en orden a mejorar sus actuaciones medioambientales y, consecuentemente, lograr la mejora del medio ambiente en su conjunto.

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino ha asumido la tarea, de acuerdo con los mandatos de la Directiva IPPC y de la Ley 16/2002, de llevar a cabo un correcto intercambio de información en materia de Mejores Técnicas Disponibles; este documento, en cumplimiento de las exigencias legales, obedece a una serie de

traducciones emprendidas por el Ministerio de Medio Ambiente sobre documentos BREF europeos.

Se pretende dar un paso más en la adecuación progresiva de la industria española a los principios de la Ley 16/2002, cuya aplicación efectiva debe conducir a una mejora del comportamiento ambiental de las instalaciones afectadas, que las haga plenamente respetuosas con el medio ambiente.

La Directiva de Emisiones Industriales establece que las conclusiones sobre las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) deben constituir la referencia para el establecimiento de las condiciones del permiso para la explotación de una instalación y pueden complementarse con otras fuentes. En todo caso la Comisión debe tratar de actualizar los documentos de referencia MTD a más tardar a los 8 años de su publicación de la versión anterior.

Los documentos BREF que son de aplicación directa a la gestión de residuos son los siguientes:

- BREF sobre incineración de residuos
- BREF sobre residuos de minería
- BREF sobre tratamiento de residuos

Elaboración de los documentos BREF

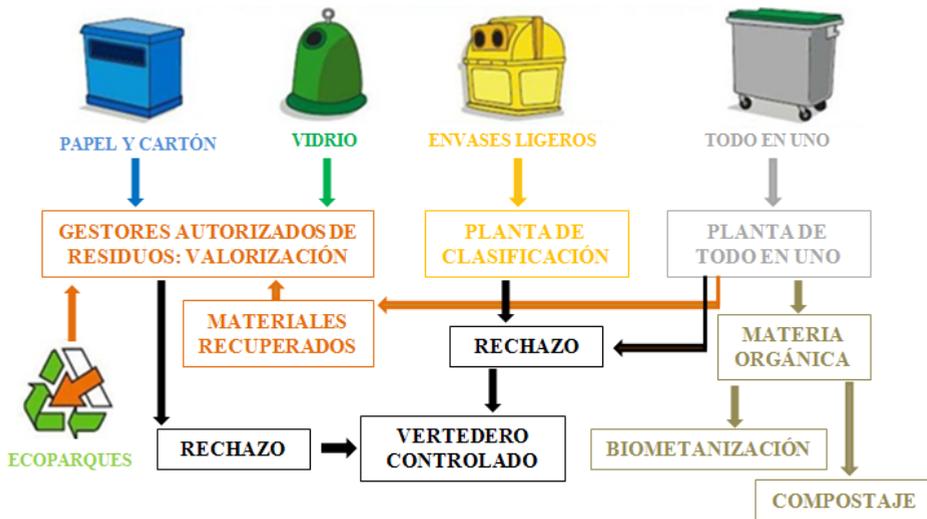
En el documento publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea titulado “Decisión de Ejecución de la Comisión de 10 de febrero de 2012, por la que se establecen normas en relación con las guías sobre la recogida de datos y las orientaciones sobre la redacción de documentos de referencia MTD y sobre su aseguramiento de la calidad a que se refiere la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las emisiones industriales” se establecen las guías sobre la recogida de datos, así como las orientaciones sobre la redacción de documentos de referencia MTD y sobre su aseguramiento de la calidad, incluido el carácter adecuado de su contenido y formato

La elaboración de los documentos BREF implica establecer cuáles son las mejores técnicas disponibles. El proceso de establecimiento de las mejores técnicas disponibles (MTD) para un sector concreto se basa en el intercambio de información en el ámbito de toda la Unión Europea.

La coordinación del intercambio de información y de la elaboración de documentos de referencia la hace el *European IPPC Bureau* (EIPPCB), que está situado en el Instituto de Estudios de Prospectiva Tecnológica (IPTS), en Sevilla. Además, el EIPPCB coordina los grupos de trabajo técnico (TWG).

1.3.- Legislación estatal

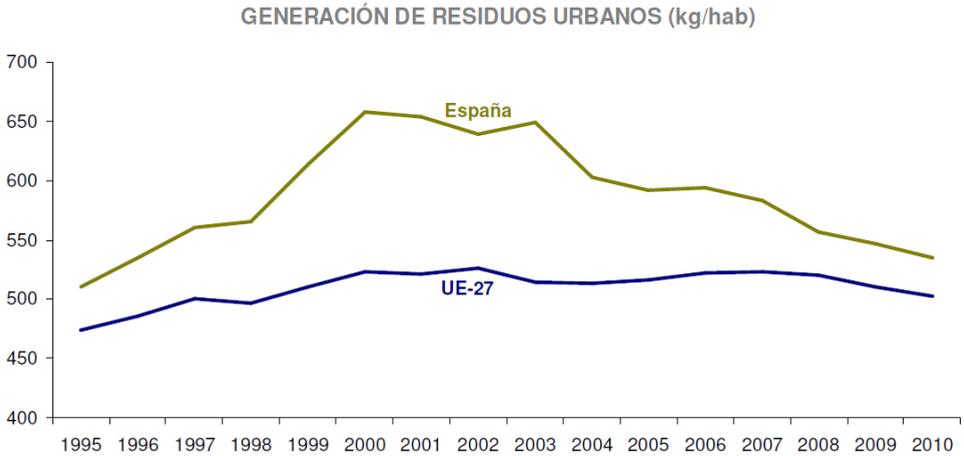
En España, el sistema establecido para la recuperación y posterior reciclaje de los residuos se basa en un sistema separativo de recogida de residuos. De esta forma, cada uno de los residuos recibe un tratamiento específico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.1. - Sistema de gestión de RSU

Durante el año 2010, las actuaciones del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en materia de residuos se han enmarcado dentro del Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (PNIR), a la vez que se ha desarrollado una intensa actividad legislativa con la transposición de la Directiva Marco de Residuos (DMR) a nuestro ordenamiento jurídico.

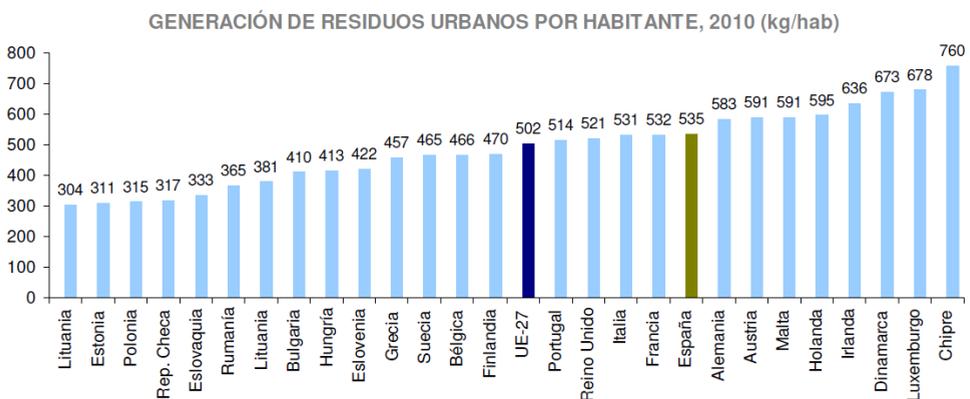


Fuente: Eurostat – Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Figura 1.2.- Generación de residuos urbanos en España

Como se observa en la Figura 1.2, en España en 2010 se generaron 535 kg de residuos urbanos por habitante, manteniendo la tendencia de descenso iniciada en 2003. En el conjunto de la Unión Europea, la generación de residuos urbanos fue de 502 kg/habitante.

En el entorno europeo, España ocupó en 2010 la novena posición en generación de residuos por habitante, posición similar a la del año anterior.



Fuente: Eurostat – Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Figura 1.3.- Generación de residuos urbanos en Europa en 2010

1.3.1.- Programa Estatal de Prevención de Residuos

El Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 tiene por objetivo avanzar hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos de la Estrategia 2020 de la Unión Europea. El programa desarrolla la política de prevención de residuos, conforme a la normativa vigente para avanzar en el cumplimiento del objetivo de reducción de los residuos generados en 2020 en un 10% respecto del peso de los residuos generados en 2010.

Este programa describe la situación actual de la prevención en España, realiza un análisis de las medidas de prevención existentes y valora la eficacia de las mismas y se configura en torno a cuatro líneas estratégicas destinadas a incidir en los elementos clave de la prevención de residuos:

- Reducción de la cantidad de residuos,
- Reutilización y alargamiento de la vida útil de los productos,
- Reducción del contenido de sustancias nocivas en materiales y productos, y
- Reducción de los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente, de los residuos generados.

La prevención en materia de residuos ha de ser entendida como el conjunto de actuaciones adoptadas en las etapas de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo para evitar la generación de residuos, disminuir el contenido de sustancias nocivas de peligrosidad o minimizar los impactos sobre la salud humana y el medio ambiente de los residuos generados. Además la prevención tiene importantes consecuencias económicas tanto para los productores y prestatarios de bienes y servicios como para los consumidores y usuarios.

En este sentido es crucial el papel de las administraciones públicas tanto en el desempeño de sus funciones de protección ambiental, como en el papel de impulsoras de una economía más eficiente, próspera y socialmente inclusiva. La prevención rinde beneficios tangibles que se manifiestan en un ahorro en los consumos de materias primas y una reducción en los costes de gestión de los residuos. Lo que supone un incremento en la rentabilidad de las actividades empresariales y un ahorro de costes para las administraciones.

Cada línea estratégica identifica los productos o sectores de actividad en los que se actuará prioritariamente, proponiendo las medidas de prevención que se han demostrado más efectivas en cada una de las áreas, siguiendo la clasificación establecida en el Anexo IV de la Directiva Marco de Residuos y de la Ley de residuos (medidas que afectan al establecimiento de las condiciones marco de la generación de residuos (marco jurídico normativo, de planificación y de actuación de las administraciones), a la fase de diseño, producción y distribución de los productos, y a la fase de consumo y uso).

La puesta en práctica de estas medidas depende de acciones múltiples en distintos ámbitos en las que están implicados los agentes siguientes:

- Los fabricantes, el sector de la distribución y el sector servicios
- Los consumidores y usuarios finales
- Las Administraciones Públicas

1.3.2.- Plan Nacional Integral de Residuos

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas, y de ahí la existencia de una política europea en materia de residuos. El abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. No obstante, cuando los residuos se gestionan de forma adecuada se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales, del clima y al desarrollo sostenible.

Mediante el Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR), se identifican los objetivos a cumplir en materia de residuos y se impulsa a las distintas Administraciones y agentes económicos involucrados a la consolidación de una gestión que integre de forma efectiva los principios que rigen la política europea de residuos y que consiga cambiar de forma significativa la gestión de los residuos en España. Los objetivos y medidas incluidas en el Plan tienen, en muchos casos, carácter estratégico y pretenden servir de guía para el desarrollo de políticas específicas de gestión para distintos flujos y orientadas a cambiar la gestión de los residuos en España.

El PNIR incluye los residuos domésticos y similares, los residuos con legislación específica, los suelos contaminados, además de algunos residuos agrarios e industriales no peligrosos que aunque no disponen de regulación específica, son relevantes por su cuantía y su incidencia sobre el entorno. Incluye además la Estrategia de Reducción de Vertido de Residuos Biodegradables, que cumpliendo con una obligación legal, contribuye a alargar la vida de los vertederos, a disminuir su impacto sobre el entorno y de forma especial a la reducción de los Gases de Efecto invernadero (GEI).

Objetivos generales del PNIR

- Modificar la tendencia actual del crecimiento de la generación de residuos.
- Erradicar el vertido ilegal.
- Disminuir el vertido y fomentar de forma eficaz: la prevención y la reutilización, el reciclado de la fracción reciclable, así como otras formas de valorización de la fracción de residuos no reciclable.
- Completar las infraestructuras de tratamiento y mejorar el funcionamiento de las instalaciones existentes.
- Obtener estadísticas fiables en materia de infraestructuras, empresas gestoras y producción y gestión de residuos.
- Evaluar los Instrumentos económicos y en particular los fiscales que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión existentes. Identificar la conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.
- Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al Cambio Climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

Tanto los objetivos generales, como los específicos y las medidas asociadas pretenden conducir a la reducción de la generación de los residuos, a un mejor aprovechamiento de los recursos contenidos en ellos y a la reducción del impacto que tienen la producción y gestión de los residuos en el medio ambiente, en particular, en las emisiones de GEI.

1.3.3.- Planes y programas de las Comunidades Autónomas

La Tabla 1.1 recoge los planes y programas existentes en la actualidad en las Comunidades Autónomas.

Tabla 1.1.- Planes y Programas de las Comunidades Autónomas

Planes y programas de las Comunidades Autónomas	
Andalucía	Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019 aprobado por el Decreto 397/2010, de 2 de noviembre Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía 2012-2020 aprobado por el Decreto 7/2012, de 17 de enero
Aragón	Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón (GIRA) (2009-2015). Aprobado por la Orden de 22 de abril de 2009, del Consejero de Medio Ambiente, por la que se da publicidad al Acuerdo del Gobierno de Aragón de fecha 14 de abril de 2009, por el que se aprueba el Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón (2009-2015). (BOA nº 94, de 20/05/2009). Este plan está actualmente en revisión.
Asturias	Plan Básico de Gestión de Residuos de Asturias 2001-2010 En tramitación el Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias PERPA 2014-2024. Incluye el Programa de Prevención de Residuos de Asturias.
Baleares	Mallorca: Plan Director Sectorial de Residuos sólidos urbanos. Revisión aprobada por el Pleno de 6 de febrero de 2006, BOIB 35 de 09/03/2006. Mallorca: Plan Director Sectorial para la Gestión de los Residuos de Construcción, Demolición, Voluminosos y Neumáticos fuera de uso de la isla de Mallorca. Aprobado por el Pleno de 08/04/2002, BOIB 05.16.2002, Texto Refundido BOIB 141 de 23/11/2002. Menorca: Plan Director Sectorial para la gestión de los residuos no peligrosos de Menorca (BOIB Núm. 109, de 03/08/2006). Ibiza y Formentera: Plan Director Sectorial para la gestión de los residuos urbanos de Ibiza y Formentera. Aprobado definitivamente mediante Decreto 46/2001, de 30 de marzo.
Canarias	Plan Integral de Residuos de Canarias, Aprobado mediante Decreto 161/2001, de 30 de julio (BOC nº 134, de lunes 15/OCT/2001). Se están desarrollando planes de ámbito insular. Ya están aprobados Planes insulares en materia de residuos, en Tenerife y Fuerteventura.
Cantabria	Plan de Residuos de Cantabria Planes Sectoriales de Residuos de Cantabria
Galicia	Plan de Gestión de Residuos Urbanos de Galicia 2010-2020 Resolución de 7 de febrero de 2011, de la Secretaría de Calidad y Evaluación Ambiental Programa de Prevención de Residuos Industriales de Galicia 2013-2016
Murcia	Plan Estratégico de los Residuos de la Región de Murcia 2007-2012.(Documento de referencia) En tramitación el Plan de Residuos de la Región de Murcia 2014-2020. En elaboración la Prevención de Residuos de la Región de Murcia.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Tabla 1.1.- Planes y Programas de las Comunidades Autónomas (cont.)

Planes y programas de las Comunidades Autónomas (cont.)	
Cataluña	<p>Programa de Gestión de Residuos Municipales de Catalunya (PROGEMIC 2007-2012). Aprobado por el Decreto 87/2010, de 29 de junio</p> <p>Plan Territorial Sectorial de Infraestructuras de Gestión de Residuos Municipales de Cataluña. Aprobado por el DECRETO 16/2010, de 16 de febrero, por el que se aprueba el Plan territorial sectorial de Infraestructuras de gestión de residuos municipales</p> <p>Programa de gestión de residuos de la Construcción a Cataluña y el canon sobre la deposición controlada de los residuos de la construcción (PROGROC 2007-2012). Aprobado por el Decreto 89/2010, de 29 de junio</p> <p>Programa de gestión de residuos industriales de Cataluña (PROGRIC 2007-2012). Aprobado por el Decreto 88/2010, de 29 de junio.</p> <p>En preparación: Programa General de Gestión de Residuos y Recursos de Cataluña 2013- 2020 (Plan integrado de prevención y gestión para todos los residuos).</p> <p>Plan Territorial Sectorial de Infraestructuras de Gestión de Residuos de Cataluña 2013-2020</p>
Comunidad de Madrid	<p>Plan Regional de Residuos Urbanos de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Residuos Industriales de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Residuos de PCBs de la Comunidad de Madrid (2006-2011)</p> <p>Plan Regional de Vehículos al final de su vida útil de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Neumáticos fuera de uso de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Lodos de Depuradora de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>Plan Regional de Suelos Contaminados de la Comunidad de Madrid (2006-2016)</p> <p>En elaboración un programa de prevención de Residuos.</p>
Navarra	<p>Plan integrado de Gestión de Residuos de Navarra, y programa de prevención.</p>
País Vasco	<p>Plan de prevención y gestión residuos no peligrosos del País Vasco 2009-2012</p> <p>Plan de gestión de residuos peligrosos</p> <p>Plan de suelos contaminados de la Comunidad Autónoma del País Vasco</p> <p>En tramitación Plan de Prevención y Gestión de Residuos 2014-2020.</p>

Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Tabla 1.1.- Planes y Programas de las Comunidades Autónomas (cont.)

Planes y programas de las Comunidades Autónomas (cont.)	
Castilla-La Mancha	<p>Plan de Gestión de Residuos Urbanos de Castilla-La Mancha. Aprobado por Decreto 179/2009, de 24/11/2009.</p> <p>Plan de Gestión de Lodos Producidos en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales de Castilla-La Mancha. Aprobado por Decreto 32/2007, de 17-04-2007(DOCM nº 83 de 20-04-2007).</p> <p>Plan de Residuos Peligrosos. Aprobado por Decreto 158/2001, de 5 junio (DOCM) núm. 81 de 19-07-2001).</p> <p>Plan de Castilla-La Mancha de Gestión n de Residuos de Construcción y Demolición. Aprobado por Decreto 189/2005, de 13-12-2005, (DOCM nº253, de 16-12-2005).</p> <p>Los planes de lodos y residuos peligrosos están actualmente en revisión.</p>
Castilla y León	<p>Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos Urbanos y Residuos de Envases de Castilla y León (2004-2010). Aprobado por el Decreto 18/2005, de 17 de febrero)</p> <p>Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos Industriales de Castilla y León (2006-2010). Aprobado por Decreto 48/2006, de 13 de julio, modificado por Decreto 45/2012, de 27 de diciembre</p> <p>Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos de Construcción y Demolición (2008-2010). Aprobado por Decreto 54/2008, de 17 de julio</p> <p>En tramitación: Plan Integral de Residuos de Castilla y León.</p>
Extremadura	<p>Plan Integral de Residuos de Extremadura 2009-2015. Aprobado por Resolución de 12 de abril de 2010</p> <p>El Plan integral incluye un programa de prevención.</p>
Ceuta	<p>En elaboración el plan de Residuos de Ceuta.</p>
Melilla	<p>En tramitación el Plan Integral de Gestión de Residuos de la Ciudad de Melilla</p>
La Rioja	<p>Plan Director de Residuos de La Rioja 2007-2015. Aprobado mediante el Decreto 62/2008, de 14 de noviembre (BOR del viernes 21 de noviembre de 2008), en proceso de revisión.</p>
Comunidad Valenciana	<p>Plan Integral de residuos de la Comunidad Valenciana, que incluye el programa de Prevención de Residuos de la Comunidad Valenciana.</p>

Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

1.4.- Legislación de la Comunidad Valenciana

1.4.1.- Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana

La Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de Residuos de la Comunidad Valenciana destaca el concepto de residuo, del que expresamente se excluyen los objetos o sustancias que no tienen modificadas sus propiedades y características originales y que se utilizan de forma directa sin someterse previamente a una operación de valorización o eliminación. Esta exclusión explícita da lugar a la distinción entre los residuos y los tradicionalmente denominados subproductos o materias primas secundarias, haciéndose eco de la evolución que dicho concepto está experimentando en el ámbito comunitario.

La Ley prevé en el ámbito autonómico dos tipos de planes, el Plan Integral de Residuos y los planes zonales, ambos de obligado cumplimiento para todas las administraciones públicas y particulares, mediante los cuales se distribuyen en el territorio de la comunidad autónoma el conjunto de instalaciones necesarias para garantizar el respeto de los principios de autosuficiencia y proximidad. Ambos planes se elaboran previa audiencia de las entidades locales afectadas, y persiguen el cumplimiento de objetivos concretos de valorización, facilitándose la participación de la iniciativa privada en este ámbito y procurando una gestión correcta de los residuos que se generen en la Comunidad Valenciana, en todos los ámbitos de gestión, tanto públicos como privados.

Los planes zonales, que se constituyen como instrumentos de desarrollo y mejora del Plan Integral de Residuos, deben ser documentos detallados que adaptan las previsiones de éste a cada zona que delimiten, pudiendo modificar, cuando sea conveniente, aquellas previsiones del plan integral que no tengan un carácter vinculante o normativo.

Mediante estos planes autonómicos se pretende garantizar una adecuada dirección de la gestión de los residuos en toda la Comunidad Valenciana. Como instrumento bisagra entre las previsiones de los planes autonómicos y la gestión de los residuos de servicio público, se regulan los denominados proyectos de gestión. Son planes de alcance generalmente supramunicipal, que establecen la forma en que se va llevar a cabo la construcción de las infraestructuras e instalaciones y el desarrollo de la gestión de los residuos. A través de estos planes se da cabida asimismo a la prestación del servicio por la iniciativa privada, mediante un procedimiento de concurso en pública concurrencia, para obtener la condición de adjudicatario de la gestión indirecta de este servicio.

De esta forma, las determinaciones contenidas en el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana y en los planes zonales vinculan a los distintos instrumentos de ordenación urbanística y son de obligado cumplimiento tanto para las entidades públicas como para las entidades privadas.

1.4.2.- Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana

El Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana (PIRCV) fue aprobado por el Decreto 81/2013 de 21 de junio. El objeto de este plan es establecer las disposiciones de carácter general y vinculantes necesarias para la ordenación material y territorial de las actividades de gestión de residuos en la Comunidad Valenciana. El PIRCV contempla las medidas y prescripciones técnicas de obligado cumplimiento necesarias para implementar las previstas en el documento de ordenación no vinculante.

Dentro del ámbito de sus competencias en materia de ordenación del territorio y de protección del ambiente, la Generalitat Valenciana elabora este Plan Integral de Residuos como instrumento básico de planificación, control, coordinación y racionalización de todas las acciones relativas a los residuos generados o gestionados en la Comunidad Autónoma Valenciana.

El objetivo primordial del Plan es tratar de dotar a las Administraciones Públicas de la Comunidad Valenciana de un instrumento en desarrollo de las prescripciones de la Unión Europea en materia de residuos, permitiendo controlar, coordinar y racionalizar todas las acciones que en materia de residuos se emprendan.

De esta forma, los objetivos básicos del PIRCV se pueden sintetizar en:

- Planificación global de las actuaciones de la Generalitat y las Entidades Locales en materia de gestión de residuos, con el objeto de lograr una actuación coordinadora y eficaz entre ambas administraciones.
- Determinación de forma global y coherente, de los criterios esenciales sobre la implantación, financiación, gestión y explotación de las infraestructuras de tratamiento y eliminación.
- Establecimiento y justificación de las prioridades de actuaciones y señalamiento de las líneas fundamentales a seguir en materia de tratamiento y eliminación de residuos.
- Definición de las prioridades territoriales de inversión en cuanto a la política de gestión de residuos, en orden a cubrir las necesidades y déficits existentes.

Los principios básicos en los que se ha apoyado la realización del Plan Integral, y establecidos en la normativa europea y estatal, son los siguientes:

- Principio de autosuficiencia, en cuanto a la creación de una red integrada de instalaciones de gestión de residuos que permita a la Comunidad Valenciana ser autosuficiente en materia de tratamiento de aquellos residuos para los que existe la masa crítica que lo justifique.
- Principio de proximidad, de forma que se traten los residuos en las instalaciones adecuadas más próximas al lugar de su producción, evitando desplazamientos innecesarios de los mismos.

- Principio “quien contamina paga”, con el fin de lograr la internalización de los costos ambientales por parte de los agentes económicos como responsables primeros de la producción de residuos y de su introducción en el medio ambiente. De acuerdo con este principio, los costes de gestión de los residuos recaen sobre el poseedor de los residuos o el productor del producto del que proceden los residuos.
- Principio de subsidiariedad, por el cual la Generalitat Valenciana intervendrá sólo en la medida en que los objetivos de la acción pretendida no puedan ser alcanzada por los agentes involucrados.
- Principio de la responsabilidad compartida, que consiste en que todos los agentes, Administración Autonómica, Corporaciones Locales, empresas públicas y privadas y ciudadanos, trabajen de una forma concertada y en colaboración para la solución de los problemas planteados en la producción y gestión de los residuos.
- Principio de prevención, mediante la limitación en la generación de residuos en el propio origen.
- Principio de precaución, adoptando medidas de protección que reduzcan la posibilidad de riesgos o amenazas al medio ambiente.
- Principio de acceso a la información medioambiental, por el que los ciudadanos tienen derecho a recibir información en las condiciones establecidas en la normativa vigente.
- Fomento del desarrollo sostenible, mediante la adopción de medidas en favor del uso prudente de los recursos naturales y la protección del ecosistema, incluyendo el mantenimiento y conservación de la biodiversidad, la protección hidrológica,..., junto con la prosperidad económica y un desarrollo social equilibrado en aras de fomentar un desarrollo sostenible.
- Lucha contra el cambio climático: contribución al objetivo a largo plazo de estabilizar las concentraciones en la atmósfera de gases de efecto invernadero en un nivel que impida la interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático.
- Protección de la salud ambiental y humana: contribución a un alto nivel de calidad de vida y bienestar social para los ciudadanos, proporcionando un medio ambiente en el que los niveles de contaminación no tengan efectos perjudiciales sobre la salud humana y el medio ambiente.
- Eficiencia en los recursos, asegurando modelos de producción y consumo más sostenibles, disociando de este modo el uso de los recursos y la generación de residuos y la tasa de crecimiento económico, y para garantizar que el consumo de los recursos tanto renovables como no renovables no exceda la capacidad de absorción del medio ambiente.

El Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana aprobado en 2013 (PIR2013) se desarrolla mediante 11 Planes Zonales que integran en total 13 áreas de

gestión. La nomenclatura utilizada proviene de la revisión de la nomenclatura empleada por el anterior Plan Integral de residuos (PIR1998) aprobado mediante DECRETO 317/1997, de 24 de diciembre, del Gobierno Valenciano, por el que se aprueba el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana y que ha sido ampliamente utilizada durante el desarrollo de cada uno de los planes zonales de las 17 zonas existentes entre 1998 y 2013.

La Tabla 1.2 muestra la relación entre la nomenclatura utilizada por el PIR1998 y el PIR2013 y la Figura 1.4 muestra el ámbito de actuación geográfico de cada plan zonal.

Tabla 1.2.- Nomenclatura de los Planes Zonales en el PIRCV

Planes Zonales PIR1998	Áreas de gestión PIR1998	Planes Zonales PIR2013	Áreas de gestión PIR2013
Plan Zonal - Zona I	-	Plan Zonal 1	C1
Plan Zonal - Zonas II, IV, V	-	Plan Zonal 2	C2
Plan Zonal - Zonas III, VIII	AG 2	Plan Zonal 3	C3/V1
Plan Zonal - Zonas III, VIII	AG 1	Plan Zonal 3	V2
Plan Zonal - Zonas VI, VII, IX	-	Plan Zonal 4	V3
Plan Zonal - Zonas X, XI, XII	AG1	Plan Zonal 5	V4
Plan Zonal - Zonas X, XI, XII	AG 2	Plan Zonal 5	V5
Plan Zonal de las Zonas XV	-	Plan Zonal 6	A1
Plan Zonal de las Zonas XIV	-	Plan Zonal 7	A2
Plan Zonal de las Zonas XIII	-	Plan Zonal 8	A3
Plan Zonal de las Zonas XVI	-	Plan Zonal 9	A4
Plan Zonal de las Zonas XVIII	-	Plan Zonal 10	A5
Plan Zonal de las Zonas XVII	-	Plan Zonal 11	A6

Fuente: Elaboración propia a partir de www.cma.gva.es

ÁREAS DE GESTIÓN

Castellón

-  C1
-  C2
-  C3 / V1

Valencia

-  C3 / V1
-  V2
-  V3
-  V4
-  V5

Alicante

-  A1
-  A2
-  A3
-  A4
-  A5
-  A6



Fuente: www.cma.gva.es

Figura 1.4.- Ámbito de actuación geográfico de cada plan zonal (PIR2013)

Capítulo 2

El compostaje

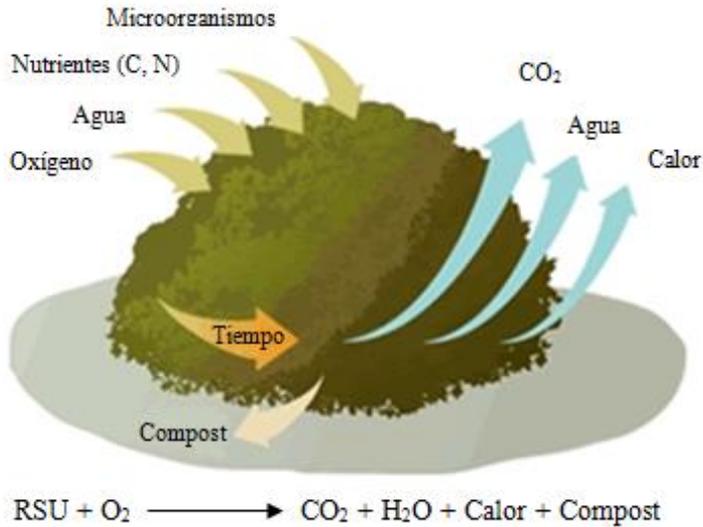
2.1.- Concepto de compostaje

El compostaje es un proceso de fermentación aerobia de la materia orgánica y la experiencia que se tiene del mismo es amplia. Los pilares en los que se basa están muy definidos (Poincelot, 1975; Mustin, 1987; Haug, 1993; Hoitking y Keener, 1993), ya que el proceso está documentado desde el siglo I a.C. (Holgado *et al.*, 1998). Desde entonces, los agricultores han seguido esta práctica natural utilizando la materia transformada como abono para los cultivos.

El compostaje se define como un proceso dinámico, biológico, aerobio y en consecuencia termófilo (Saña y Soliva, 1987), que para que se lleve a cabo necesita: materia orgánica biodegradable, población microbiana inicial que permitirá el desarrollo del proceso y condiciones óptimas del mismo.

La técnica del compostaje se describe como biológica y oxidativa, ya que se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios (Haug, 1993) que actúan de manera sucesiva sobre la materia orgánica inicial, produciendo una serie de reacciones que elevan la temperatura durante el proceso, reducen el volumen y el peso de los residuos y provocan su humificación y oscurecimiento.

El esquema básico del proceso de compostaje se sintetiza en la Figura 2.1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2.1.- Esquema del proceso de compostaje

Los principales objetivos del proceso de fermentación de la fracción orgánica de los residuos son:

- Higieneización de la materia orgánica: se consigue la destrucción o reducción de los microorganismos patógenos y la inhibición de la capacidad germinativa de las semillas presentes en los residuos.
- Reducción de olores en el producto final, por la estabilización de la materia orgánica.
- Reducción del volumen de la materia original: reducción de masa y volumen, debido a la reducción del contenido de agua y a la pérdida de materia seca, principalmente en forma de CO₂.
- Estabilización y homogeneización de la materia orgánica, permitiendo su uso agrícola o en jardinería.

2.2.- Factores que intervienen en el proceso de compostaje

Los factores que intervienen en cualquier proceso biológico son muchos y complejos. Todas estas variables están a su vez influenciadas por las condiciones ambientales, el tipo de residuo a tratar, la técnica de compostaje, la manera en que se desarrolla la operación y por la interacción entre ellas.

Las variables más importantes que afectan al sistema de compostaje se clasifican en dos tipos:

1. Parámetros de seguimiento del proceso: aquellos que deben ser seguidos a lo largo de éste y controlados para que se sitúen entre los valores adecuados para que cada fase se desarrolle adecuadamente (Jeris *et al.*, 1973). Entre estos parámetros se encuentran la temperatura, la humedad, la aireación y el pH.

2. Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato: que han de ser medidos y adecuados para que sus valores sean los correctos fundamentalmente al inicio del proceso (Madejón *et al.*, 2001). Entre estos parámetros se encuentran el tamaño de la partícula y la relación C/N.

Actualmente (Helynen, 2004; Fitzpatrick *et al.* 2005) se hace necesario el control tanto del proceso de producción (compostaje) como del producto final (compost) para garantizar una óptima calidad y mínimos costes.

Tabla 2.1.- Factores que intervienen en el proceso de compostaje

Factores que intervienen en el proceso de compostaje	
1.	Temperatura
2.	Humedad
3.	Aireación
4.	pH
5.	Tamaño de la partícula
6.	Relación C/N

Fuente: Elaboración propia

1. Temperatura

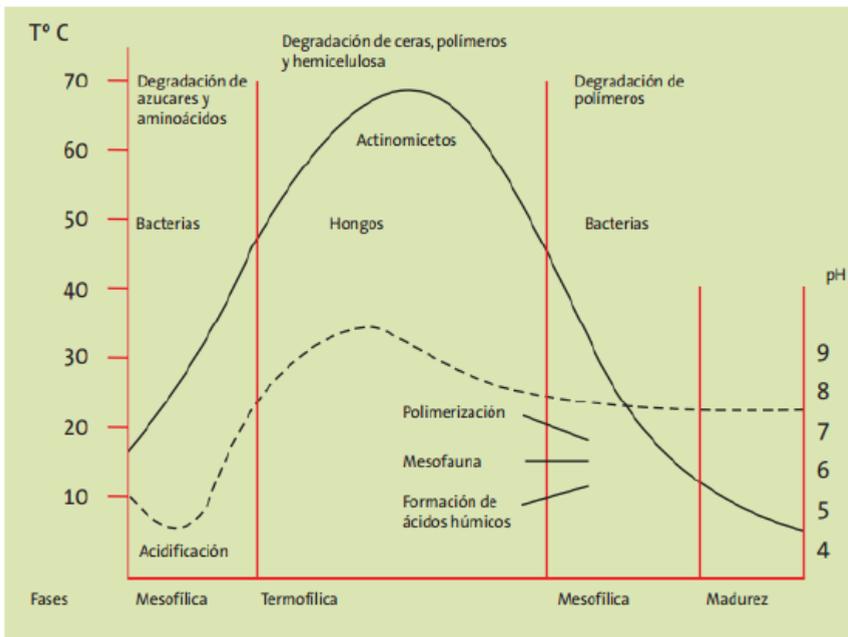
Es el parámetro que mejor indica el desarrollo del proceso de compostaje, dado que es un indicador de la actividad biológica de los microorganismos.

La evolución de la temperatura es un claro indicador de la evolución del compostaje, pues se ha comprobado que pequeñas variaciones de ésta afectan de manera determinante a la actividad microbiana en mayor proporción que otros factores como el

pH, humedad o C/N. Asimismo existe una clara relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. A veces, ésta ha llegado a ser tan elevada que inhibe el crecimiento de los microorganismos, produciéndose el fenómeno de *suicidio microbiano* (Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. 2008).

En función de la temperatura, se distinguen tres fases en el proceso de compostaje: la fase mesofílica inicial ($T < 45^{\circ}\text{C}$), al final de la cual se producen ácidos orgánicos; la fase termofílica ($T > 45^{\circ}\text{C}$); y fase mesofílica final, considerándose finalizado el proceso cuando alcanza de nuevo al temperatura inicial.

Cada microorganismo tiene un intervalo de temperatura óptimo en el cual desarrolla de manera eficaz su actividad: entre $15\text{-}40^{\circ}\text{C}$ se desarrollan correctamente los mesófilos y entre los $40\text{-}70^{\circ}\text{C}$ los termófilos (Suler *et al.*, 1977). Así, los microorganismos que resulten beneficiados a una temperatura concreta son los que principalmente descompondrán la materia orgánica.



Fuente: Mustin, 1987

Figura 2.2.- Evolución de la temperatura (-) y el pH (--) durante el proceso de maduración

2. Humedad

Al ser el compostaje un proceso biológico de descomposición, la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos.

La humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa (Miyatake *et al.*, 2006) para que así permita la circulación tanto del oxígeno como de otros gases producidos en la reacción.

La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%; la actividad biológica decrece mucho cuando la humedad está por debajo del 30%; y por encima del 70% el agua consigue desplazar al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y generando condiciones anaerobias, que dan lugar a malos olores y a una disminución de la velocidad del proceso.

El exceso de humedad puede reducirse aumentando la aireación, mediante el volteo o la adición de aire. Además, la humedad óptima depende del tipo de residuo.

3. pH

El pH varía durante el proceso del compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. Se trata de un parámetro imprescindible a la hora de evaluar el ambiente microbiano y la estabilidad de los residuos.

En general, según algunos autores la evolución del pH presenta tres fases principales:

- Fase mesofílica inicial, con una disminución del pH (entre 5 y 8) que ocasiona la liberación de ácidos orgánicos.
- La segunda fase se caracteriza por una alcalinización del medio (pH entre 6-7,5), debido a la descomposición de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sánchez-Monedero, 2001).
- La tercera fase tiende a la neutralidad (pH 7-8) debido a la formación final de compuestos húmicos que poseen propiedades tampón.

Se recomienda que el proceso de compostaje se desarrolle en un intervalo de pH 6,5 a 8,5, para lo cual la mezcla del material a compostar debe oscilar en dicho intervalo.

En el proceso de compostaje un valor de pH cercano al neutro (pH 6,5 – pH 7,5), ligeramente ácido o ligeramente alcalino, asegura el desarrollo favorable de la gran mayoría de los grupos fisiológicos. Valores de pH menores que 5,5, pueden inhibir el crecimiento de la gran mayoría de los microorganismos, y valores marcadamente alcalinos también pueden ser agentes inhibidores del crecimiento microbiano, porque disminuye la disponibilidad de los nutrientes para los organismos.

4. Aireación

Como se ha comentado, la necesidad de aireación en el proceso de compostaje es imprescindible para asegurar el desarrollo de los microorganismos aerobios. Los niveles óptimos de oxígeno se sitúan entre el 5% y el 15%. Niveles de oxígeno menores que 5% pueden provocar condiciones anaerobias, mientras que niveles mayores que 15% pueden dar lugar a pérdidas de calor y a una mínima destrucción de los organismos patógenos.

No existen frecuencias preestablecidas de aireación, por lo que se recomienda airear cuando comienza a descender la temperatura, después de alcanzar su valor máximo en la etapa termofílica. El movimiento del material por volteo hace descender la temperatura de la unidad, que paulatinamente vuelve a aumentar hasta completar una nueva etapa termofílica.

Tan importante es la mala aireación del proceso, por los posibles problemas de anaerobiosis, como el exceso de ventilación que puede ocasionar el enfriamiento de la masa y una alta desecación que ocasionaría la reducción de la actividad metabólica de los microorganismos (Zhu, 2006), pérdida de calor y la volatilización del amoníaco. La insuficiente aireación provocará condiciones anaerobias, putrefacción, elementos tóxicos, lixiviados, malos olores, sustitución de los microorganismos por otros propios del proceso anaeróbico, produciendo la acumulación de ácidos orgánicos ya que estos en lugar de oxígeno utilizan nitratos (NO_3), sulfatos y carbonatos para obtener energía produciendo H_2S y CH_3 retardando de esta manera el proceso de 4 a 6 meses.

5. Tamaño de partícula

La estructura física y el tamaño de los residuos que componen la masa a compostar influyen directamente en la optimización del proceso, afectando a la aireación, la temperatura y la duración del mismo.

Conviene evitar condiciones extremas en el grado de división de los materiales a compostar. Para ello se recomienda reducir los residuos grandes mediante el uso de trituradoras y mezclarlos con materiales auxiliares (de menor tamaño) con el fin de obtener una estructura de porosidad adecuada para evitar la compactación de las unidades de compostaje y mejorar la capacidad de intercambio gaseoso.

Las dimensiones consideradas óptimas varían según los criterios de distintos autores: 1-5 cm (Haug, 1993), 2-5 cm (Kiehl, 1985), 2,5-2,7 (Tchobanoglous *et al.*, 1996).

6. Relación carbono-nitrógeno

La relación C/N expresa las unidades de carbono por unidades de nitrógeno que contiene la materia orgánica. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica de los mismos. Una relación adecuada entre estos dos nutrientes favorece un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos. Éstos suelen utilizar aproximadamente 30 partes de C por cada parte de N, por ello se considera que una buena relación de ambos elementos para el desarrollo del compostaje debe estar entre 25-30 (Jhorar *et al.*, 1991).

A nivel práctico, es un indicador de la velocidad de descomposición y permite una determinación del tiempo de compostaje, siempre y cuando las condiciones de humedad, aireación y temperatura sean las óptimas.

Si la relación C/N es superior a 35, disminuye la actividad biológica, el proceso de fermentación se alarga hasta que el exceso de carbono es oxidado y la relación C/N descende a niveles que permiten un metabolismo adecuado. Si la relación C/N es muy baja, se pierde el exceso de nitrógeno en forma de amoníaco.

Si el material a compostar presenta una relación C/N inicial diferente al intervalo recomendado, es conveniente mezclar con otros materiales. Los residuos de origen vegetal presentan mayor relación C/N que los residuos de origen animal por lo que la práctica de combinarlos es muy habitual.

2.3.- Sistemas de compostaje

Existen diferentes sistemas o tecnologías de compostaje, siendo el objetivo de todos transformar los residuos en un material húmico estable y alcanzar las condiciones consideradas necesarias para eliminar los microorganismos patógenos, hongos, esporas, semillas y otros organismos indeseables en el producto final. De esta manera obtendremos un material estabilizado y con unas características que nos permitan aplicarlo al suelo y/o comercializarlo cumpliendo la normativa de fertilizantes, el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

Los sistemas de compostaje se diferencian por la forma de incorporación del aire, el control de la temperatura, la mezcla o el volteo del material y la duración del proceso. La selección del sistema, dependerá de las necesidades, los recursos disponibles y las condiciones ambientales, entre otros factores.

Tabla 2.2.- Sistemas de compostaje

Sistemas de compostaje	
<p>Abiertos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Pilas o hileras volteadas 2. Pilas estáticas con aireación forzada 3. Sistemas combinados 	<p>Cerrados</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Reactores verticales 5. Reactores horizontales

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.- *Sistemas abiertos*

Son los sistemas más tradicionales de compostaje y se aplican en zonas rurales y, en general, donde el terreno es abundante. Son de bajo coste y tecnología relativamente sencilla.

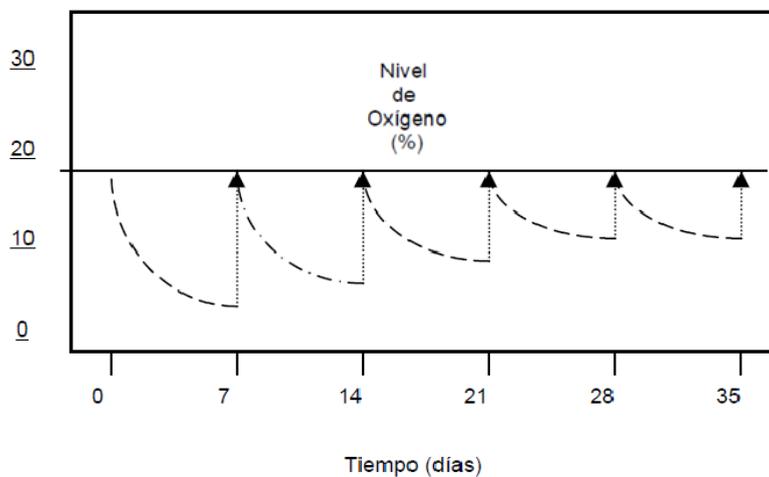
En estos sistemas de compostaje la masa de residuos se dispone como una pila o hilera. La altura ideal de una pila se determina por su capacidad para producir y mantener la temperatura necesaria y permitir que el oxígeno llegue al punto central de la masa de compostaje. Generalmente la altura varía entre 1 m y 3 m, con un ancho de hasta aproximadamente 4-5 m.

1. **Pilas o hileras volteadas**

Es el sistema más generalizado, pero da lugar a un proceso lento ya que es un sistema discontinuo. Se basa en la formación de pilas, agrupando los residuos en montones que generalmente adoptan forma triangular. Estas pilas necesitan una estructura porosa y estable durante el proceso de compostaje. Se utilizan para descomponer lentamente materiales como poda de árboles de hoja caduca, maleza, corteza, astillas y otros materiales voluminosos provenientes de la actividad agrícola y paisajística.

Es un método económico y fiable si se dispone de tiempo y espacio, y requiere un mínimo de atención. Se mezclan pilas de sección triangular o trapezoidal. Suelen tener de base entre 3 y 5 metros y de altura unos 2-2,5 metros. La longitud varía entre unos pocos y unas docenas de metros.

La principal desventaja de estos sistemas es la dificultad de mantener un nivel de oxígeno constante, como se aprecia en la Figura 3, ya que sufre fuertes oscilaciones dependiendo de la frecuencia de los volteos y en algunos casos puede caer por debajo del 8% O₂ (De Bertoldi *et al.*, 1982). La frecuencia de los volteos depende del tipo de materiales a compostar, de la humedad y de la rapidez con la que se desea que se realice el proceso, por lo que se deben realizar controles automáticos de temperatura, humedad y oxígeno para determinar el momento óptimo para efectuar el volteo.



Fuente: Gasser, 1985

Figura 2.3.- Nivel de oxígeno durante el compostaje en una pila volteada semanalmente



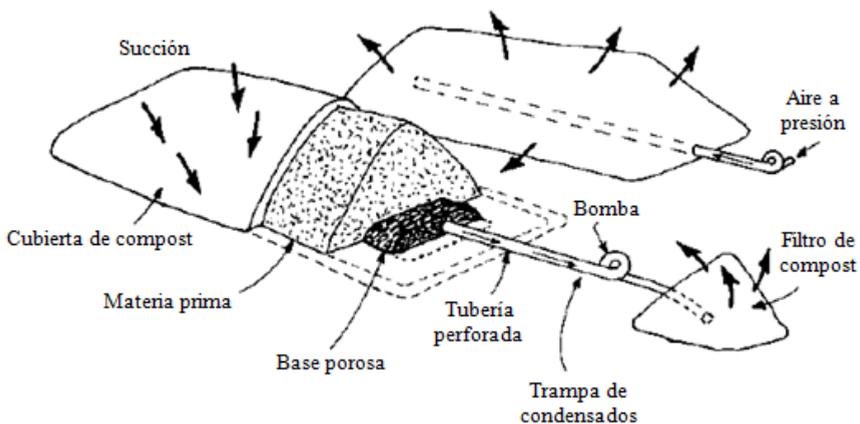
Fuente: www2.vermeer.com

Figura 2.4.- Volteadora trabajando en campo

Para la elección del tamaño de la pila también ha de tenerse en cuenta la proporción de materiales fácilmente degradables presentes en el residuo y en la estructura, porosidad, del mismo. La primera marca la tasa de consumo de oxígeno una vez que el proceso esté en marcha y la segunda la capacidad de reposición de oxígeno a través de los poros del material en descomposición, así como la distribución del calor generado en la fermentación.

2. Pilas estáticas con aireación forzada

Este método fue desarrollado en los años sesenta en los Estados Unidos por primera vez por investigadores del Departamento de Agricultura, en Belstville, Maryland (Willson y Dalmat, 1983). En este sistema se coloca el material a compostar en hileras sobre un conjunto de tubos perforados o una solera porosa. Con este sistema, un flujo de aire de $0,2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$ es suficiente para proveer de una concentración de oxígeno del 15% a un compost compuesto de lodo de depuradora y de virutas de madera. Para reducir los problemas de olor, el aire se puede pasar por una pila de compost maduro que actuará como filtro (Figura 2.5).



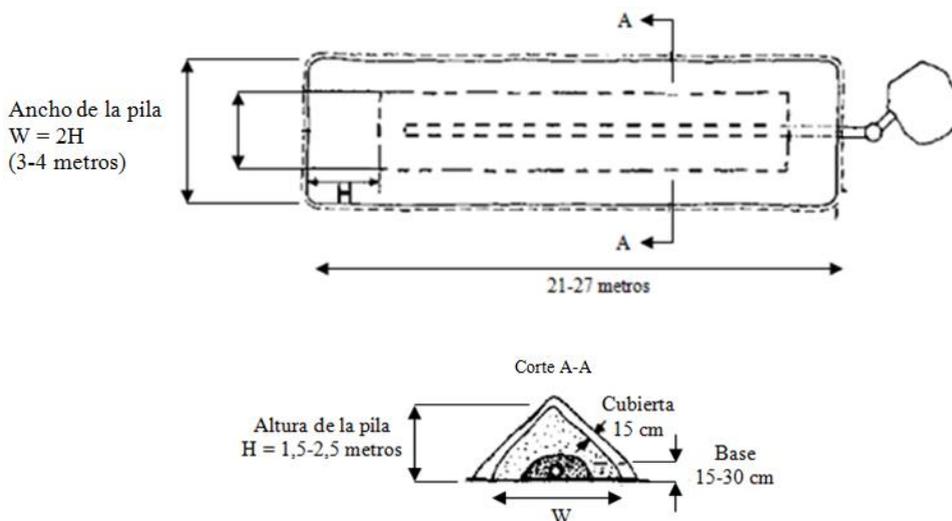
Fuente: Rynk *et al.*, 1992

Figura 2.5.- Sistema de compostaje en pilas estáticas aireadas

La aireación forzada suministra O_2 , enfría la pila y elimina vapor de agua, CO_2 y otros productos de descomposición. Una vez se constituye la pila, no se toca, en general, hasta que la etapa de compostaje ha terminado.

Los componentes de una pila estática aireada incluyen una red de distribución de aire, una capa base de un material con elevada porosidad, el material a compostar, una capa externa de material estable (compost maduro) de 18-30 cm y un sistema de control y suministro de aire. Esta capa exterior aísla la tubería, y separa las moscas y otros insectos del material a compostar. Además ayuda a retener olores, el NH_3 y el agua (Rynk y Richard, 2004).

La Figura 2.6 muestra las dimensiones más habituales de estas pilas estáticas.



Fuente: Rynk *et al.*, 1992

Figura 2.6.- Dimensiones de las pilas estáticas aireadas

3. Sistemas combinados

La combinación de la aireación forzada y el volteo mejora las condiciones y acelera el proceso de compostaje en comparación con los sistemas que solamente se voltean o airean con ventiladores. La elección de este sistema depende del tipo de residuo a compostar y sus características.

2.3.2.- Sistemas cerrados

En estos sistemas los residuos se procesan en instalaciones estáticas o dinámicas, que se conocen como reactores. Estos sistemas van desde recipientes simples hasta sistemas muy complejos que combinan agitación mecánica y aireación forzada de los residuos a compostar. En términos generales, los materiales son introducidos en un recipiente o contenedor diseñado a tal fin, en el cual se desarrolla principalmente la fase activa o termófila del proceso (Rynk *et al.*, 1992; Díaz *et al.*, 2007). Pueden ser verticales u horizontales, los horizontales a su vez pueden configurarse en canales, celdas, contenedores o túneles, y según incorporen funciones de mezclado, ser estáticos o dinámicos.

Son estructuras por lo general metálicas, de forma cilíndrica o rectangular, donde se mantienen controlados determinados parámetros, como por ejemplo, la humedad, la aireación, la temperatura, etc. Este tipo de sistemas permite acelerar las etapas iniciales del proceso, aquellas que son biológicamente activas que se incluyen dentro de la fase de fermentación. Cuando estas etapas finalizan, el material se retira del reactor y se acopia para que se cumpla la maduración al aire libre o en naves abiertas. Los sistemas de compostaje en reactores, en general, son sistemas industriales y sus costes son elevados. En todos ellos se dispone de un sistema de depuración de olores mediante biofiltro de compost (Eweis, 1999) y una recirculación de los lixiviados.

Una de las principales ventajas de estos sistemas es que reducen considerablemente las superficies de compostaje y logran un mejor control de los parámetros de fermentación y de los olores. Además, aunque requieren costes de instalación superiores a los sistemas abiertos, presentan la ventaja de ser más rápidos.

4. Reactores verticales

Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 m y pueden ser continuos o discontinuos.

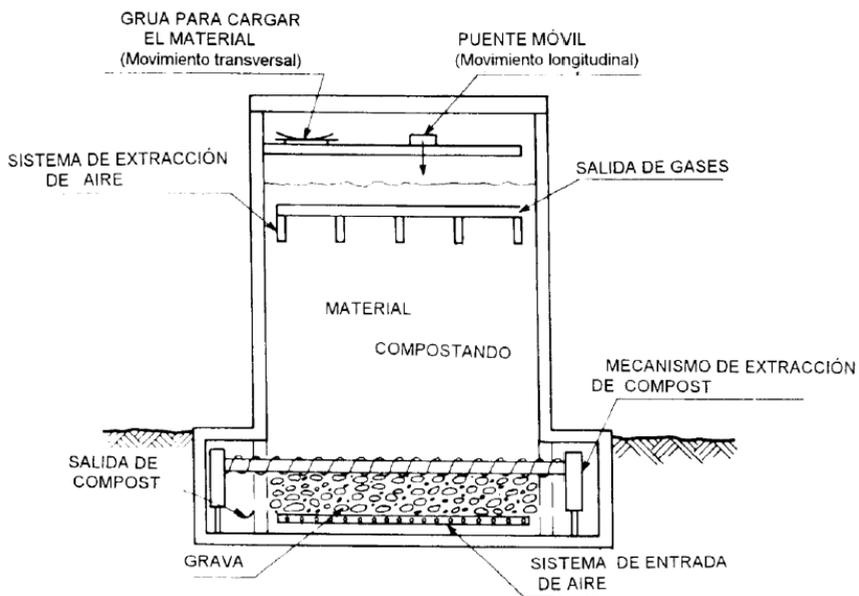
Los reactores discontinuos contienen pilas de 2-3 m a diferentes alturas, con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores. Su principal inconveniente es el elevado coste de construcción en relación a las pilas estáticas, pero presenta una baja relación coste por unidad de volumen de trabajo.

En los reactores continuos el material a compostar se encuentra en forma de masa única.

Silos o reactores verticales continuos

Están formados por reactores de 4-10 m de altura, con un volumen total de 1.000 a 3.000 m³ (Figura 2.7). El biorreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. El material se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida. En la parte superior se encuentra el mecanismo mediante el cual se pueden filtrar los gases con malos olores.

El tiempo de residencia dependerá de cada caso particular, pero se estima en 14 días, tras los cuales el compost estará estabilizado. Estos sistemas minimizan el área requerida, y pueden no incluir un mecanismo de volteo (Rynk *et al.*, 1992; Díaz *et al.*, 2007).



Fuente: Saña y Soliva, 1987

Figura 2.7.- Reactor de lecho empacado tipo silo

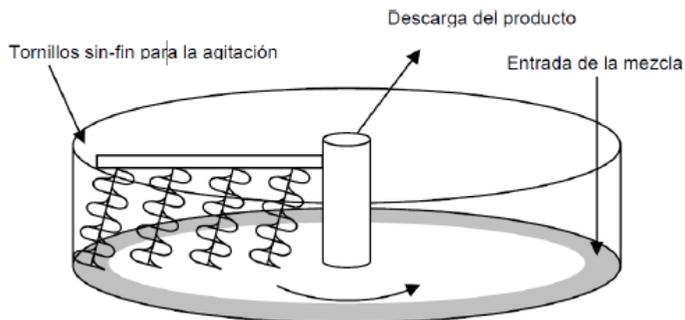
Silos o reactores verticales continuos

Constan de un depósito cilíndrico de grandes dimensiones dividido en varios niveles (cada nivel tiene de 2 a 3 m de altura). Los residuos a compostar se colocan en el piso más alto y mediante dispositivos mecánicos se voltean a la vez que van descendiendo al piso inferior

La humedad requerida para llevar a cabo el proceso se consigue bien por evaporación del agua del material situado en los niveles inferiores, la cual se encuentra a una mayor temperatura, bien mediante de sistemas de suministro de agua. Cuando la materia orgánica ha descendido al último piso se da por concluida la fermentación y el compost está preparado para la fase de maduración. El tiempo en el fermentador es de una semana aproximadamente. El inconveniente de este tipo de reactores es el elevado coste de instalación y de mantenimiento de la planta.

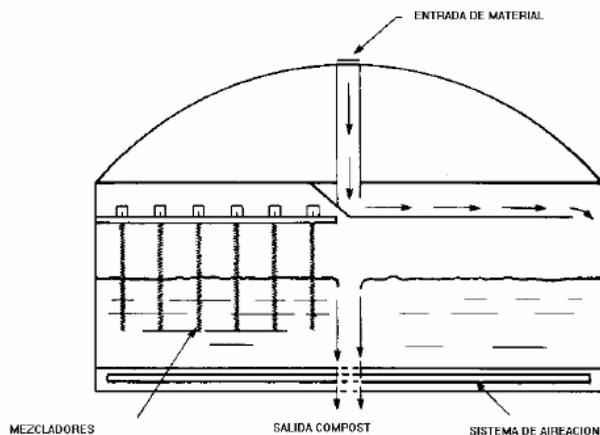
Reactor circular

Otra variante del reactor vertical es el reactor circular (Figuras 2.8 y 2.9). Actualmente presentan un diámetro de 6 a 36 metros y una altura de 2 a 3 metros. El material a compostar se introduce por la parte superior del reactor, la aireación se realiza por la parte inferior y la masa se voltea mediante un brazo giratorio. La salida del material se realiza por el centro de la base. El tiempo de residencia en el reactor es de 10 días.



Fuente: Haug, 1993

Figura 2.8.- Reactor circular de lecho agitado



Fuente: Saña y Soliva, 1987

Figura 2.9.- Reactor circular dinámico

Compostaje en cajones (*Bin composting*)

Es el sistema más simple dentro de los denominados sistemas tipo tanque (*In-Vessel systems*) y se utilizan de forma doméstica. Al estar cubiertos, resuelven el problema de exceso de agua por lluvias o nevadas, contienen los olores y permiten el control de la temperatura.

Pueden funcionar como una pila estática aireada, incluyendo alguna forma de aireación, o disponer de un mecanismo de volteo (Rynk *et al.*, 1992).



Figura 2.10.- Ejemplos de compostaje tipo "cajón"

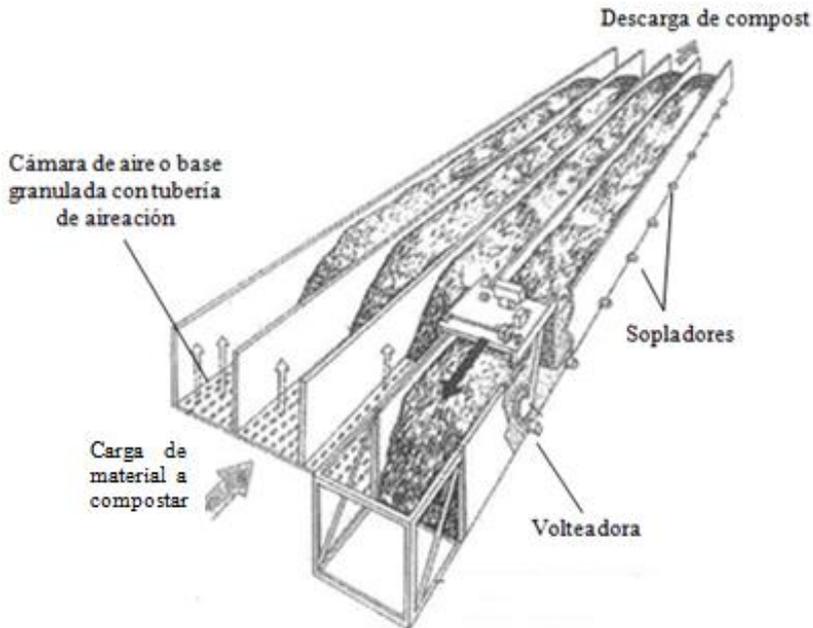
5. Reactores horizontales

Los reactores de flujo horizontal se dividen entre aquellos que poseen un depósito rotatorio, los que poseen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no poseen un sistema de agitación y permanecen estáticos.

Canales rectangulares de agitación (trincheras)

En este caso se combina la aireación controlada y los volteos periódicos, además de poder incluir un sistema de riego. Frecuentemente se instalan bajo techo.

El compostaje se produce entre paredes que forman largos canales rectangulares o trincheras, cuyas dimensiones son 2-6 m de ancho, 1-3 m de profundidad y 30 m o más de largo. Estos canales adosado un sistema de volteo que se se desplaza mediante rieles ubicados en la zona superior de las paredes. La aireación normalmente se proporciona mediante un sistema de cañerías ubicadas en la base de los canales. Pueden operarse de manera continua o en lotes. El tiempo estimado para el compostaje en estos sistemas va de 2 a 4 semanas más un tiempo de maduración (Rynk *et al.*, 1992; Díaz *et al.*, 2007).



Fuente: Rynk *et al.*, 1992

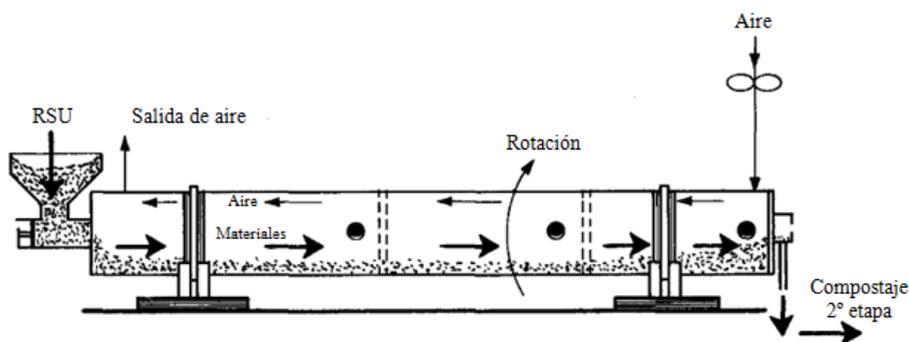
Figura 2.11.- Sistema de compostaje en canales o trincheras

Tambores rotativos

Estos reactores permiten el mezclado, aireación y movimiento del material a lo largo del sistema. Normalmente no incluyen un mecanismo de aireación forzado, pero sí mecanismos de control del oxígeno y humedad. El aire se introduce por el extremo del reactor por el cual se descarga el material estabilizado. También pueden incluir un mecanismo de riego.

Las dimensiones de los reactores oscilan entre 30-45 m de longitud y 2-4 m de diámetro (Figura 2.12). El tiempo de residencia está determinado por la inclinación del tambor y la velocidad de giro del mismo. Un tambor preparado para una carga diaria de 50 t (3 m de diámetro y 36 m de largo) tiene un tiempo de residencia aproximado de 3 días, tras el cual debe completar el proceso en la etapa de maduración.

Estos sistemas pueden adaptarse para funcionar a una menor escala, reciclando equipos como mezcladores de cemento, mezcladores de piensos o viejos hornos de cemento. Últimamente se han desarrollado modelos aplicables al compostaje en el hogar o jardines residenciales (Rynk *et al.*, 1992; Stoffella & Kahn, 2001).

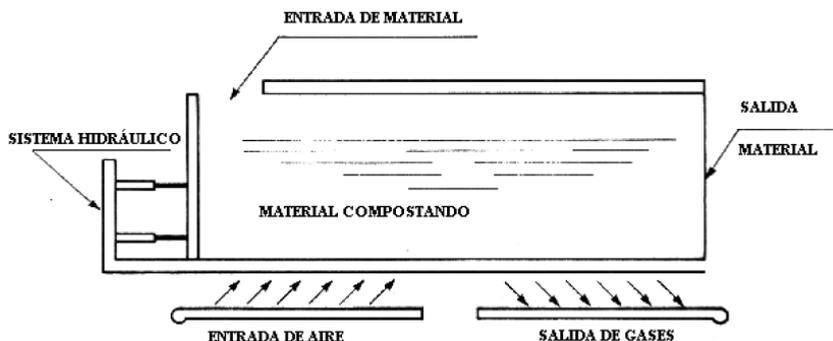


Fuente: Rynk *et al.*, 1992

Figura 2.12.- Esquema de compostaje en tambores rotativos

Contenedores con lecho de sólidos estático

Se trata de un túnel de flujo pistón de sección transversal rectangular. El volumen del reactor puede oscilar entre 10 y 500 m³. Se construyen generalmente de hormigón armado y acero. Los túneles suelen tener una longitud de 30 a 59 metros y una anchura y altura de 4 a 6 metros. La ventilación es controlada por impulsión o aspiración. En un extremo se sitúa una placa de empuje con movimiento hacia adelante y hacia atrás. Al avanzar dicha placa, el compost se descarga del túnel; la carga diaria de residuos a compostar se coloca en la zona vacía creada al moverse el pistón.



Fuente: Saña, 1987

Figura 2.13.- Reactor tipo túnel

Túneles estáticos

Se trata de recipientes rectangulares con una capacidad volumétrica que varía entre 20 y 40 m³. Frecuentemente se instalan en módulos, con los cuales se puede dar tratamiento a 3000 – 5000 t/año (configuración de 6 a 8 contenedores en módulo). La aireación es forzada desde la base del contenedor y después de atravesar la masa el compostaje es recolectado y tratado en filtros.

Cuentan con un sistema de riego, y en caso de exceso de humedad, ésta es removida por gravedad mediante perforaciones en la base del contenedor. El tratamiento típico se realiza por lotes, siendo el tiempo de residencia de 8-15 días, seguido por un período de maduración (Stoffella & Kahn, 2001; Díaz *et al.* 2007).



Figura 2.14.- Compostaje en contenedores a gran escala

2.4.- Productos obtenidos en el compostaje. El compost

El compost es el producto obtenido tras la descomposición de materia orgánica en el proceso de compostaje. El compost debe ser un producto inocuo, sin sustancias fitotóxicas, y rico nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro y otros oligoelementos.

La calidad final del compost depende de varios factores, entre los que destacan (Soliva, 2001):

- Tipo de material que se somete a compostaje
- Procedencia y recogida del material
- Desarrollo del proceso de compostaje
- Selección adicional en planta
- Tratamiento del residuo (tipo de tecnología, equipamiento, funcionamiento, organización...)

La calidad no solamente se ha de controlar en el producto final, ya que ésta dependerá totalmente de los controles que se realicen tanto en las materias primas como durante el proceso. Los diferentes materiales que se pueden compostar determinan los tipos de compost que puede obtenerse. Esta diversidad aumenta la dificultad de establecer sistemas para valorar la calidad del producto final.

Los usos que se pueden dar al compost son muchos y las exigencias para cada uno de ellos son diferentes. Es importante establecer qué tipo de características interesa más valorar cuando el producto final se fabrica con una finalidad determinada.

La ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados en su artículo 3 presenta la siguiente definición de compost:

«Compost»: enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio y termófilo de residuos biodegradables recogidos separadamente. No se considerará compost el material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico biológico de residuos mezclados, que se denominará material bioestabilizado

De esta forma, en la práctica, de acuerdo a esta legislación, la gran mayoría de la producción obtenida en las plantas de valorización de RSU de España pasa a ser considerado material bioestabilizado en lugar de compost. Los efectos que sobre los precios de mercado ha supuesto este cambio en los criterios normativos están por determinar y son objeto de intenso debate en el ámbito de la gestión de RSU.

Por otra parte, el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes define en su anexo I las características de los abonos (grupo 2) o enmiendas orgánicas (grupo 6) obtenidas mediante compostaje.

Capítulo 3

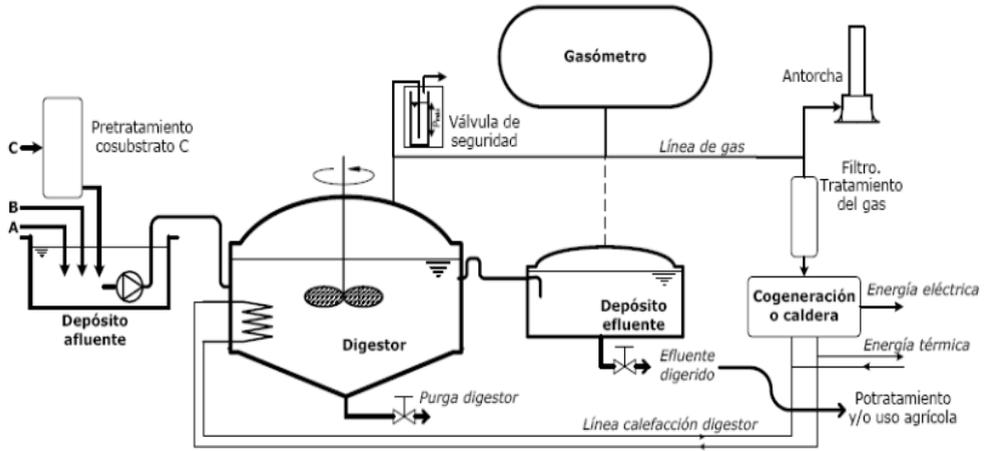
La biometanización

3.1.- Concepto de biometanización

La biometanización es un proceso de digestión anaerobia, cuyo objetivo es transformar la fracción orgánica recuperada en las plantas de tratamiento mecánico biológico (material biodegradable) en dos productos: por un lado, biogás compuesto por metano y dióxido de carbono y por otro lado el digesto, que es la materia orgánica resultante con destino a procesos biológicos de los que se obtendrá material bioestabilizado.

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica, un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo en diversos ámbitos, como por ejemplo en pantanos, en yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales.

El proceso para la producción de biogás se detalla en la Figura 3.1, donde se muestran las distintas etapas que tienen lugar en una planta de digestión anaerobia: pretratamiento y depósito para la alimentación; digestor donde tiene lugar el proceso biológico; gasómetro para recoger el biogás producido y otro depósito para el digerido (efluente).



Fuente: AgroWaste

Figura 3.1.- Esquema del proceso de biometanización

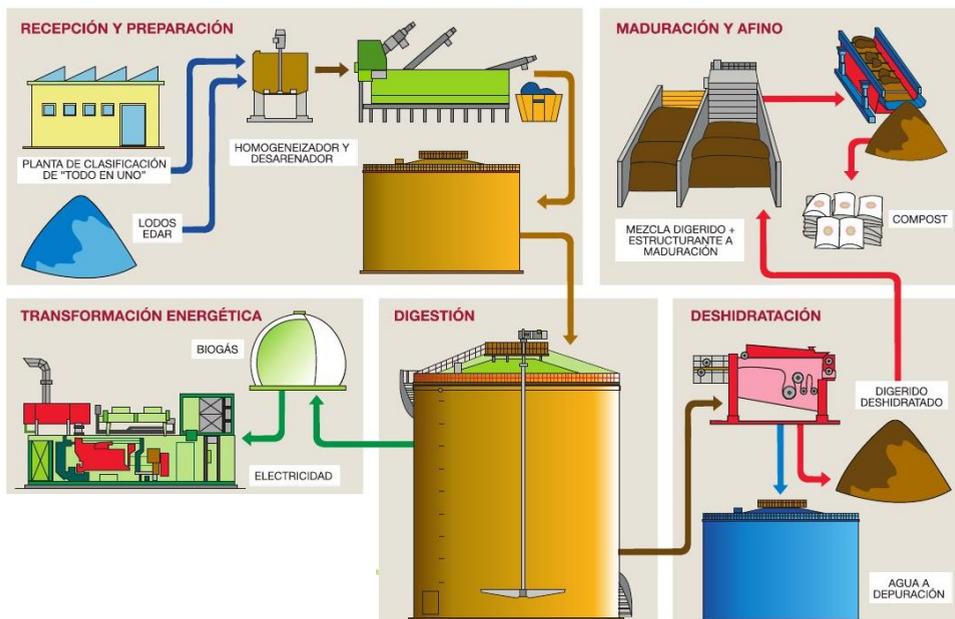
De forma resumida, el proceso que se realiza en una planta de biometanización consiste en primer lugar en un tratamiento del material de entrada para poder recuperar la materia seca que pudiese aparecer mezclada junto con el residuo biodegradable.

El segundo paso es el tratamiento de la materia húmeda, que tras ser homogeneizada y acondicionada se produce la hidrólisis y estará en condiciones de alimentar a los digestores en los que se realizará la fermentación anaerobia (en ausencia de oxígeno). De este modo se obtiene el biogás combustible.

Por último, se debe estabilizar la materia orgánica digerida, que en este caso será una fermentación aerobia, en presencia de aire. En este paso se obtiene material bioestabilizado que será valorizado materialmente.

Además, en el tratamiento biológico de la materia orgánica, se generan aguas residuales que deben ser tratadas, correspondiendo con las pérdidas por lixiviados; otras pérdidas en el proceso son por evaporación.

La Figura 3.2 muestra un diagrama tipo de una planta de biometanización.



Fuente: ECOEMBES

Figura 3.2.- Diagrama de una planta de biometanización

La digestión anaerobia ha sido considerada, en muchos casos, como un proceso difícilmente controlable y sujeto a posibles distorsiones. No obstante, existen ventajas de la digestión anaerobia que convierten el proceso en una tecnología muy competitiva:

Proceso

- Permite el tratamiento de fracciones orgánicas de residuos urbanos de diferentes procedencias (Tchobanoglous *et al.*, 1993)
- Elevados porcentajes de eliminación de materia volátil (40-60%) (Vogt *et al.*, 2002; Mata-Álvarez *et al.*, 2000; De Baere, 2000)
- Elevada destrucción de organismos patógenos y organismos parásitos: también produce la inactivación de algunos virus patógenos, según el tipo de éste, del proceso de depuración y de la temperatura (Turner y Burton, 1997)
- Baja producción y estabilización de lodos (Carreras y Dorronsoro, 1999);
- Alto grado de estabilización del vertido trabajando con altas velocidades de carga (Lissens *et al.*, 2001)

Producto final

- Baja generación total de sólidos biológicos: el producto final posee características similares al compost producido aeróbicamente (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Además, el producto final es inerte y rico en ciertos nutrientes y puede emplearse en agricultura como mejorador de suelo (Nopharatana *et al.*, 2003; Chugh *et al.*, 1999)
- Eliminación de ácidos volátiles y otros compuestos fácilmente biodegradables, que contribuyen a disminuir la fitotoxicidad del residuo final (Flotats *et al.*, 2000)
- Buenas condiciones de deshidratación mediante un proceso de secado (van der Berg y Kennedy, 1981)

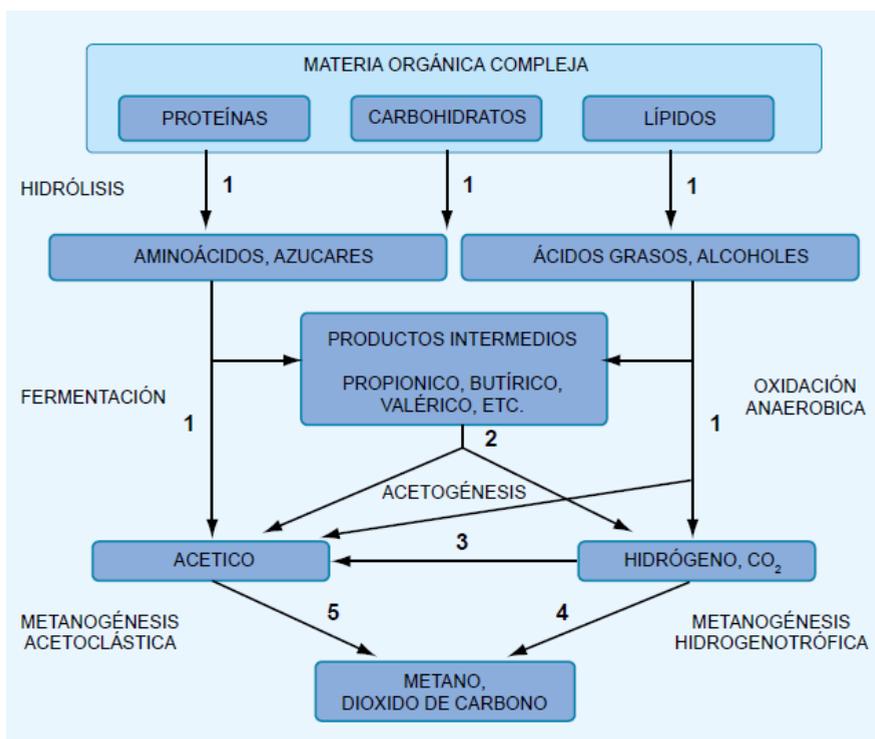
Energía

- Alta producción de biogás compuesto fundamentalmente por CH₄ y CO₂
- Obtención de biogás susceptible de aprovechamiento energético y económico (Carreras y Dorronsoro, 1999)
- Bajo consumo energético: la alta producción de biogás con elevado valor energético reduce significativamente los costes del tratamiento (Milán *et al.*, 2001)
- Reducción de la emisión de gases responsables por del efecto invernadero (El-Fadel y Massoud, 2001)

El proceso de biometanización requiere la actividad metabólica combinada y coordinada de un conjunto de poblaciones microbiológicas en el reactor y puede ser resumida en cuatro siguientes fases: hidrólisis, fermentación acidogénica o acidogénesis, fermentación acetogénica o acetogénesis y fermentación metanogénica (Polanco y Encina, 2000).

- Etapa de hidrólisis. La hidrólisis consiste en una transformación controlada por enzimas extracelulares en la que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para las células de los microorganismos.
- Etapa acidogénica. La segunda etapa, controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera etapa en otros compuestos de peso molecular intermedio; como dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos y alcoholes alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico. Esta etapa se denomina acidogénesis.

- Etapa acetogénica. En la etapa de acetogénesis, los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Etapa metanogénica. La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.



Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991

Figura 3.3.- Esquema de reacciones de la digestión anaerobia

3.2.- Factores que intervienen en el proceso de biometanización

La digestión anaerobia requiere del estricto control de diversos factores ambientales (temperatura, pH del medio, disponibilidad de nutrientes, presencia de sustancias tóxicas) y operacionales (tiempo de retención y nivel de carga) que condicionan el desarrollo de las diferentes poblaciones microbianas que actúan en el proceso (Vélez Sánchez *et al.*, 2008).

Tabla 3.1.- Factores que intervienen en el proceso de biometanización

Factores que intervienen en el proceso de biometanización	
1.	Temperatura
2.	pH y alcalinidad
3.	Contenido en nutrientes
4.	Presencia de sustancias tóxicas e inhibidores
5.	Tiempo de retención hidráulico
6.	Nivel de carga orgánica

Fuente: Elaboración propia

1. Temperatura

La digestión anaerobia puede desarrollarse en un amplio rango de temperaturas: entre los 10°C y los 70°C (Mata-Álvarez, 2002). La temperatura tiene una gran influencia en las velocidades de degradación y en los rendimientos del proceso y particularmente en la metanogénesis.

Se han identificado dos rangos de máxima actividad: el mesófilo, que opera entre 30°C y 40°C, y el termófilo, entre 45°C y 60°C (Van Lier *et al.*, 2001). En cada uno de ellos predominan grupos distintos de bacterias, siendo las bacterias termofílicas más sensibles a las variaciones térmicas con lo que requieren un control del sistema más preciso y costoso.

Las plantas de digestión en el régimen termófilo son menos numerosas y su implantación ha comenzado más tarde, aunque es previsible un crecimiento parejo de los tratamientos mesófilos y termófilos (De Baere, 2000) dado que, aunque las necesidades de calor de los procesos termófilos son mayores, los mejores rendimientos en la obtención de biogás, la destrucción de sólidos volátiles y la eliminación más eficaz de patógenos favorecen su demanda.

2. pH y alcalinidad

La acidez del medio tiene una influencia acusada sobre la producción de biogás debido, fundamentalmente, a su efecto sobre la actividad enzimática de los microorganismos (Clark y Speece, 1989) y a su influencia sobre varios equilibrios químicos como el $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$. El rango óptimo de pH se encuentra entre el 6,7 y el 7,6 (Jarabo, 1999), y se presentan problemas graves cuando se sale del rango 6-8,3 (Lay *et al.*, 1997).

Habitualmente, cuando se detectan fuertes variaciones de pH, el sistema ya ha fracasado irreversiblemente, por lo que no se considera al pH como una buena variable de control del proceso.

3. Contenido de nutrientes

Aunque los tratamientos anaeróbicos se caracterizan por sus bajos requerimientos de nutrientes; una proporción adecuada de nitrógeno y fósforo es necesaria para el crecimiento de la población bacteriana.

Algunos autores señalan que la proporción C/N debe oscilar entre 15-30/1 y de C/P de 75- 113/1; valores muy inferiores disminuyen la velocidad de reacción y superiores crean problemas de inhibición del proceso biológico (Speece, 1987). Otros nutrientes que se requieren en cantidades mínimas son el sulfuro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y vitamina B12.

4. Presencia de sustancias tóxicas e inhibidores

La principal sustancia tóxica de la digestión anaerobia es el oxígeno. Los microorganismos metanogénicos se encuentran entre los más estrictamente anaerobios que se conocen: 0,01 ppm de oxígeno inhiben completamente su crecimiento (Jarabo, 1999).

El resto de inhibidores más frecuentes son el NH_3 libre, los ácidos grasos y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Mata-Álvarez, 2002). Algunas sustancias que pueden acompañar a los residuos (disolventes, pesticidas, detergentes, etc.) también pueden ser tóxicas para el proceso.

5. Tiempo de retención hidráulico

Es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de alimentación, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los

microorganismos, para alcanzar los niveles de energía y/o reducción de la carga contaminante que se hayan prefijado.

Hay un tiempo de retención mínimo por debajo del cual no es posible el proceso. Éste, en un sistema de mezcla completa, deberá ser como mínimo el correspondiente a la velocidad de crecimiento de los microorganismos. Aunque cuanto mayor sea el tiempo de retención mayor será la producción de biogás por unidad de materia orgánica introducida y mayor grado de eliminación de materia orgánica se obtendrá, la producción diaria disminuirá una vez superado el óptimo. Por tanto, es fundamental determinar el tiempo de retención óptimo.

6. Nivel de carga orgánica

Es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor, expresada normalmente en sólidos volátiles, por unidad de volumen y tiempo.

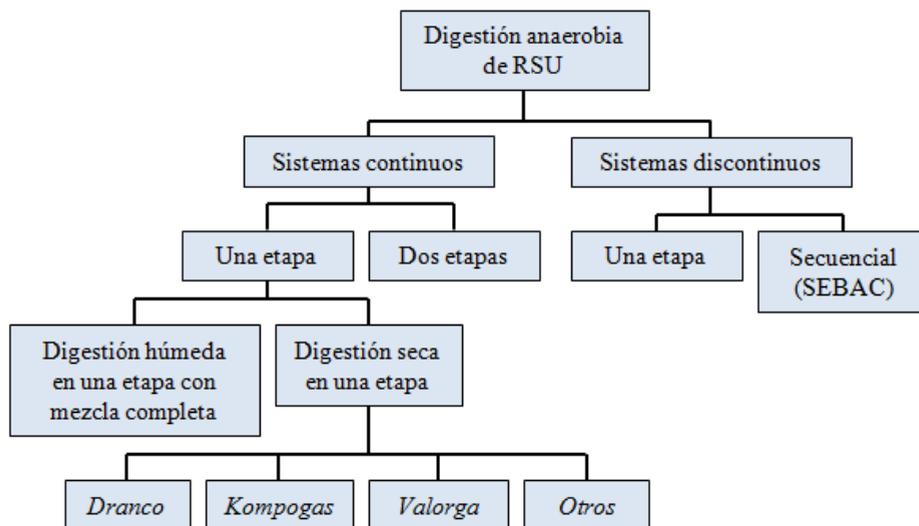
Depende de la composición del sustrato y del tiempo de retención. Un aumento repentino de la carga orgánica puede provocar una sobrecarga

3.3.- Sistemas de biometanización

En general, pueden distinguirse los siguientes tipos de sistemas de digestión anaerobia de residuos sólidos:

- Sistemas en una etapa
- Sistemas en dos etapas
- Sistemas discontinuos o por lotes

Por otro lado, puede distinguirse entre sistemas húmedos y secos, dependiendo del contenido en sólidos totales (ST) del sustrato. Como orientación, se puede convenir que hasta el 15% de ST la digestión es húmeda, y entre el 20 y el 40% de ST, seca. La Figura 3.4 presenta la clasificación de los sistemas.



Fuente: Elaboraci3n propia

Figura 3.4.- Clasificaci3n de las tecnologas de digesti3n anaerobia de residuos s3lidos

3.3.1.- Sistemas en una etapa

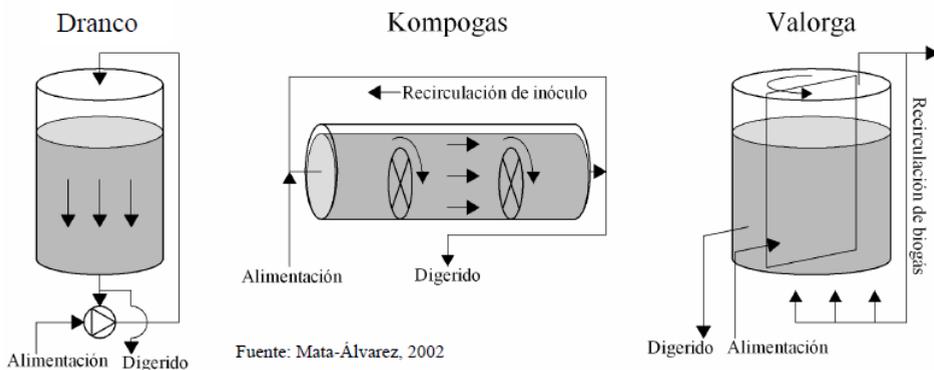
El 90% de las plantas de digesti3n anaerobia en Europa son de una etapa y estas se dividen, aproximadamente, en partes iguales entre sistemas hmedo y seco (De Baere, 2000).

La digesti3n hmeda en una etapa con mezcla completa es una tecnologa muy extendida y bien conocida desde hace d3cadas debido a su aplicaci3n para la estabilizaci3n de bioslidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los sistemas secos demostraron, mediante investigaciones desarrolladas en la d3cada de los 80, que podan proporcionar producciones de biog3s tan altas como los sistemas hmedos (Mata-3lvarez, 2002). El principal reto de los sistemas secos no es tanto el mantenimiento de las reacciones bioquimicas, como el manejo, bombeo y mezcla de los bioslidos. El transporte en los sistemas secos requiere equipos m3s robustos y caros que los lquidos (que utilizan principalmente bombas centrífugas), como cintas transportadoras, tornillos y bombas diseadas especialmente para el trasiego de materiales altamente viscosos. Sin embargo, las necesidades de pretratamiento son menores, siendo necesaria s3lo la eliminaci3n de impurezas gruesas con cribas de tambor o desmenuzadoras (Levasseur, 1999).

Los sistemas secos en una etapa, contrariamente a los húmedos, no son de mezcla completa debido a las propiedades reológicas del residuo, sino de flujo sin mezcla. El uso de este flujo tiene la ventaja de no necesitar la instalación de dispositivos mecánicos dentro del reactor. Sin embargo, no soluciona la necesidad de mezclar el material de entrada con la masa que está siendo digerida, lo cual es crucial para garantizar la inoculación y para prevenir sobrecargas locales y la acidificación.

Existen al menos tres diseños eficaces para la mezcla de los residuos sólidos a escala industrial: Dranco, Kompogas y Valorga (Figura 3.5).



Fuente: Mata-Álvarez, 2002

Fuente: Mata-Álvarez, 2002

Figura 3.5.- Tipos de digestor empleados en la digestión anaerobia (Sistema seco en una etapa)

El principal factor limitante que condiciona el rendimiento biológico de los reactores en los sistemas húmedos con mezcla completa es la acumulación de sustancias inhibitoras como los ácidos grasos y el amoníaco. Este factor puede controlarse añadiendo agua al proceso para reducir las concentraciones de inhibidores, lo cual no es posible en los sistemas secos. Sin embargo, los sistemas secos han demostrado ser menos sensibles a la inhibición que los húmedos. La robustez de estos sistemas no está completamente explicada y son necesarias más investigaciones al respecto, pero se especula que los microorganismos presentes en el medio de fermentación seca están protegidos frente a las altas concentraciones transitorias de inhibidores (cosa que no ocurre en reactores con mezcla completa). Las producciones de metano y la destrucción de SV de los sistemas secos referidos son parecidas a los de los sistemas húmedos (Mata-Álvarez, 2002).

Desde un punto de vista económico, las diferencias entre los sistemas húmedos y secos parecen pequeñas. Los sistemas secos necesitan equipos más robustos, pero los pretratamientos son más baratos y los reactores más pequeños. Las necesidades de calefacción de los sistemas secos también son menores, pero esto sólo se traduce en un

beneficio económico si se encuentra aplicación al exceso de calor de los motores de gas raramente se vende. Aproximadamente el 30% de la electricidad producida se emplea en la propia planta tanto en los sistemas secos como en los húmedos (Mata-Álvarez, 2002).

Desde un punto de vista medioambiental, las diferencias entre ambos sistemas son más importantes: el consumo de agua es unas 10 veces mayor en los sistemas húmedos respecto a los secos, y otro tanto ocurre con las aguas residuales generadas (Mata-Álvarez, 2002).

3.3.2.- Sistemas en dos etapas

Los sistemas en dos etapas se fundamentan en que las reacciones bioquímicas que conducen a la conversión del biorresiduo en biogás no comparten necesariamente las mismas condiciones ambientales óptimas. Las reacciones se optimizan en distintos reactores para mejorar el proceso en conjunto y la producción de biogás.

De forma general, la primera etapa acoge las reacciones de licuefacción y acidificación (hidrólisis y acidogénesis), mientras en la segunda transcurre la metanogénesis, donde el factor limitante es la baja tasa de crecimiento microbiano. La complejidad técnica de los sistemas de dos etapas es mayor que la de una etapa, pero esto no siempre se traduce en los rendimientos esperados.

De hecho, la principal ventaja de los sistemas de dos etapas respecto a los de una, más que un mejor rendimiento global, es una mayor seguridad frente a los residuos que causan inestabilidades en los sistemas de una etapa. En el contexto de las aplicaciones industriales, se tiende a la simplicidad técnica de las plantas de una etapa (Weiland, 1992).

3.3.3.- Sistemas discontinuos

En los sistemas discontinuos o por lotes, los digestores se cargan una vez con el residuo fresco y se le hace pasar por las fases de degradación secuencialmente en un régimen seco. A pesar de su similitud con la extracción de gas de vertederos, los sistemas por lotes tienen producciones 50 a 100 veces mayores que aquellos (Mata-Álvarez, 2002) debido básicamente a dos características:

- El lixiviado se recircula continuamente, lo cual permite la dispersión de humedad, inóculo, nutrientes y ácidos. Esta recirculación equivale a una mezcla parcial
- El proceso transcurre a temperaturas más altas que las de los vertederos.

Hasta hoy los sistemas por lotes no han tenido un éxito comercial significativo. Sin embargo, características tales como su sencillez de diseño y de control del proceso, su robustez frente a gruesos y contaminantes y sus bajos costes de inversión, los hacen atractivos especialmente en zonas poco desarrolladas (Ouedraogo, 1999).

Hay dos diseños básicos que difieren en los lugares donde transcurren la acidogénesis y la metanogénesis: sistema discontinuo de una etapa y sistema discontinuo secuencial SEBAC (*Sequential Batch Anaerobic Composting*)

En el sistema discontinuo de una etapa, el lixiviado es recirculado hacia la parte superior del mismo reactor donde se ha producido. Éste es el fundamento del proceso Biocel. Un inconveniente que se presenta frecuentemente en éste y otros sistemas por lotes es el taponamiento del suelo perforado, que provoca la interrupción del proceso de percolación. Para prevenir este problema se limita el espesor de la capa de biorresiduos en cuatro metros, reduciéndose así la compactación, y mezclando el material de entrada con estructurante y con material digerido y deshidratado.

En el sistema discontinuo secuencial SEBAC, el lixiviado de un reactor recién cargado o “fresco” (que tiene un alto contenido en ácidos orgánicos) se recircula hacia un reactor más “maduro”, donde tiene lugar la metanogénesis. El lixiviado del reactor “maduro”, libre de ácidos y con propiedades de tampón, se bombea hacia el reactor “fresco”. Esta configuración asegura la inoculación entre los reactores y elimina la necesidad de mezclar el sustrato con material digerido.

Las plantas que utilizan sistemas discontinuos tienen producciones de biogás menores que los sistemas de una fase y alimentación continua. Las causas de esta diferencia son principalmente la formación de canales preferentes en la circulación del lixiviado y el ya mencionado taponamiento. Desde el punto de vista económico, la inversión en los sistemas discontinuos es baja (cerca de un 40% respecto a los sistemas de alimentación continua). En contrapartida, la limitación en altura necesaria para evitar la compactación hace que se necesiten grandes superficies para las instalaciones (10 veces más por tonelada tratada respecto a los sistemas secos continuos).

En sistemas discontinuos hay riesgo de explosión durante la apertura y vaciado de los reactores, por lo que requieren fuertes medidas de seguridad.

Tabla 3.2.- Ventajas/Desventajas de los sistemas de tratamiento continuo (una etapa) y discontinuo

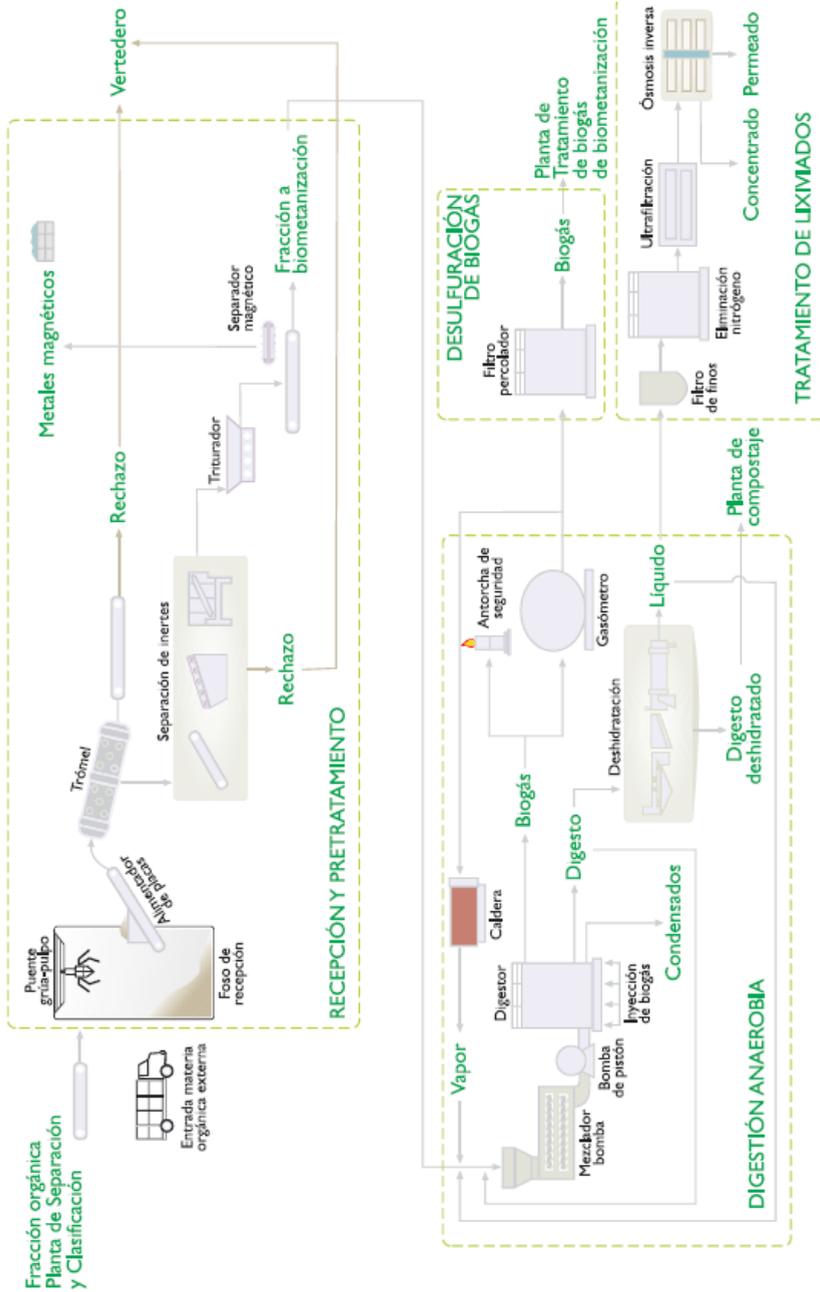
Criterio	Sistemas secos de una etapa		Sistemas discontinuos	
	Ventajas	Inconvenientes	Ventajas	Inconvenientes
Técnico	Sin partes móviles en el reactor Robustos (no hay que quitar inertes y plásticos)	No se pueden tratar residuos húmedos solos	Simples Robustos	Problemas de obstrucción Es necesario agente estructurante Riesgo de explosión en el vaciado
Biológico	Menor pérdida de SV en pretratamientos Resistencia frente a aumentos transitorios de inhibidores	No se pueden diluir los inhibidores con agua	Sistema fiable debido a nichos y uso de varios reactores	Baja producción de biogás Baja carga orgánica
Económico y ambiental	Pretratamientos baratos y reactores pequeños Poco uso de agua y poca generación de efluente Menos necesidades de calefacción	Equipos más robustos y caros que los sistemas húmedos	Bajo coste de inversión Poco uso de agua y poca generación de efluente	Necesidad de grandes superficies (comparable a compostaje)

Fuente: Adaptación de Mata-Álvarez, 2002

Algunos ejemplos en España son las plantas que existen en Ávila, Valladolid, A Coruña, Logroño, Pinto, Tarrasa, Barcelona, Madrid, Burgos, Palma, etc.

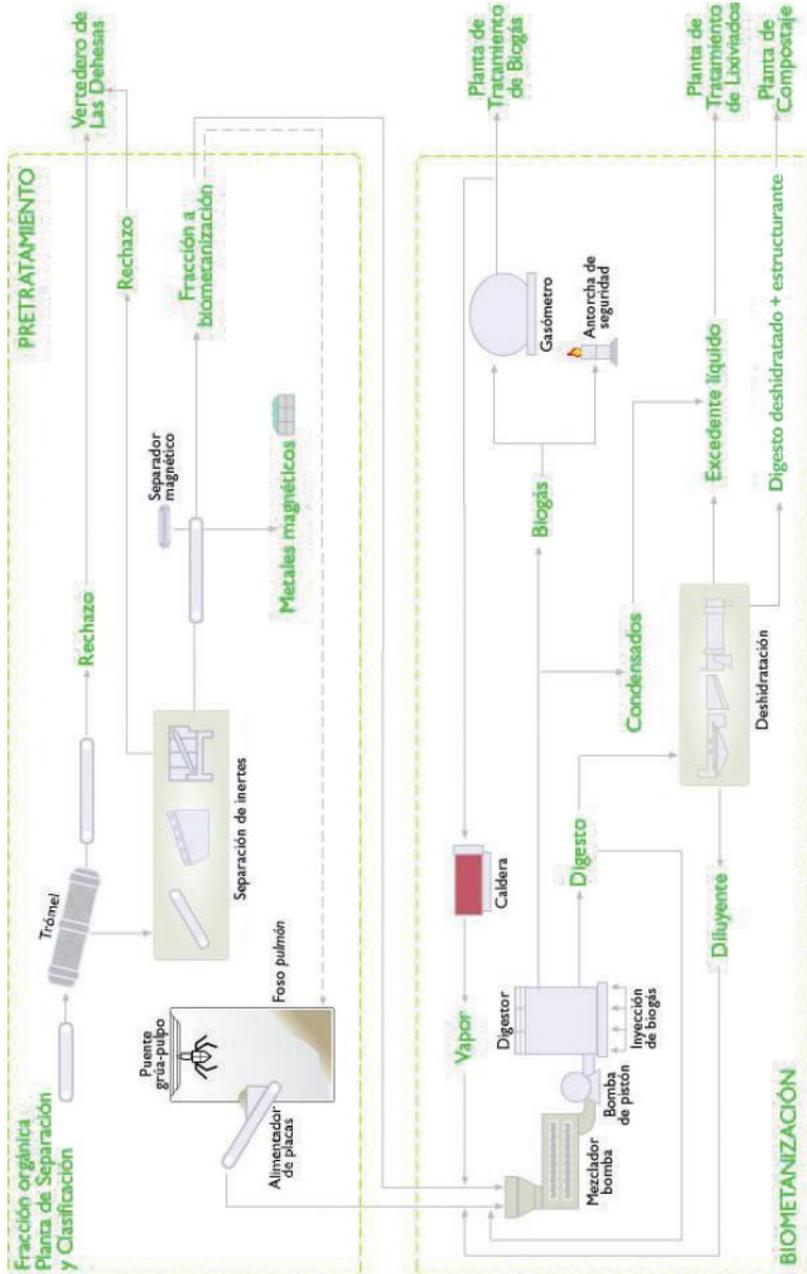
El Parque Tecnológico de Valdemingómez en Madrid cuenta con dos plantas de biometanización:

- Planta de Las Dehesas, con una capacidad media de operación de 161.000 t/año a partir de 5 digestores y 1 gasómetro.
- Planta de La Paloma, en este caso con una capacidad de operación de 108.175 t/año mediante 4 digestores y 1 gasómetro.



Fuente: Parque Tecnológico de Valdemingómez

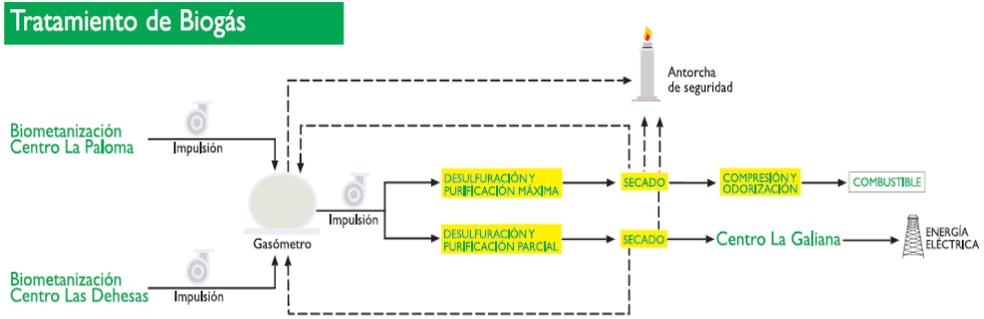
Figura 3.6.- Planta de Biometanización de Las Dehasas



Fuente: Parque Tecnológico de Valdemingómez

Figura 3.7.- Planta de Biometanización de La Paloma

El biogás generado en las mismas se deriva a la planta de tratamiento de biogás que presenta una capacidad de operación de 4.000 Nm³/hora; el destino del biogás es su uso como biocombustibles y producción de energía eléctrica.



Fuente: Parque Tecnológico de Valdemingómez

Figura 3.8.- Planta de tratamiento de biogás en el Complejo de Valdemingómez

En cuanto al balance de masas, son aceptables los siguientes porcentajes:

Tabla 3.3.- Balance de masas con tecnología de Biometanización en plantas MBT

Entradas a planta MBT	%
Reciclables	8,10
Biogás	2,60
Bioestabilizado	10,50
Rechazo pre-tratamiento	36,10
Rechazo bioestabilizado	12,70
Pérdidas	30

Fuente: Planta de Biometanización y Compostaje de Jundiz (Vitoria-Gasteiz)

Con respecto a la eficiencia energética, hay que señalar que es moderada, en torno a los 200 kWh/t.

3.4.- Productos obtenidos en la biometanización

3.4.1.- El biogás

El biogás es el principal producto obtenido en el proceso. Está compuesto por un 60% de metano (CH_4), un 38% de dióxido de carbono (CO_2) aproximadamente y trazas de otros gases. La composición o riqueza del biogás depende del sustrato digerido y del funcionamiento del proceso.

En la actualidad, las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica ya que puede ser utilizado en una variedad de equipos comerciales: motores de combustión interna, estufas, etc. No obstante, existe un interés creciente por otras alternativas como son su aplicación como combustible de automoción y su integración en la red de gas natural.

El biogás debe ser refinado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas. En este sentido, las operaciones de depuración varían en función del uso del biogás; los requerimientos de calidad son mayores cuando se utiliza como combustible de automoción, se inyecta en las líneas de distribución del gas natural o se utilizan en pilas de combustible. La purificación del biogás incluye la eliminación de CO_2 , SH_2 , NH_3 , agua y partículas sólidas.

Producción de calor o vapor

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas a pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación.

Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H_2S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C .

Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del

proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso si se compara con la utilización del biogás sólo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H₂S (bajo 100 ppm) y vapor de agua.

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones.

Combustible para vehículos

El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, que lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión. No obstante, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

Su difusión está limitada por una serie de problemas:

- A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.
- La conversión de los motores es costosa (instalación similar a la del gas natural) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- Por último la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso.

3.4.1.- Lodos de digestión y efluentes

Además del biogás, en el proceso de biometanización también se genera el denominado digestato (producto digerido), que es la mezcla del residuo orgánico ya digerido y la biomasa microbiana producida, y efluentes con contenido en nutrientes.

Lodos de digestión

Cada seis o doce meses es aconsejable descargar totalmente el biodigestor continuo, para una adecuada mantención. Esto permite retirar del fondo del biodigestor los lodos de digestión, material sólido pastoso, con un elevado contenido de agua, constituido por fracciones de materia orgánica estabilizada, nutrientes totales y disponibles, sales solubles, con valores de pH cercanos a la neutralidad.

Estos lodos están enriquecidos en inóculos microbianos metanogénicos. Por lo tanto, entre los usos más comunes de los lodos de digestión se tiene:

- Acondicionamiento de suelos
- Mulch
- Biofertilizante
- En mezcla para macetas
- Cubierta vegetal en rellenos sanitarios
- Recuperación de suelos o sitios degradados
- Biorremediación de suelos

Efluentes

En un biodigestor de carga continua, el tiempo de retención hidráulico permite definir el volumen de afluente o material de carga diaria, que tendrá el digestor durante toda su etapa de trabajo. Esta carga diaria de afluente, como máximo tiene un 8% de sólidos totales. La entrada de este afluente, genera un volumen equivalente de efluente o material de descarga, que por lo general presenta alrededor de un 2% de sólidos; además de una proporción de nutrientes y fuentes carbonadas disueltas.

Este efluente, dependiendo de su composición química puede utilizarse:

- Como fuente de nutrientes y/o riego en cultivos hidropónicos, en huertas de hortalizas.
- Para favorecer el crecimiento de plancton de algún medio acuático.

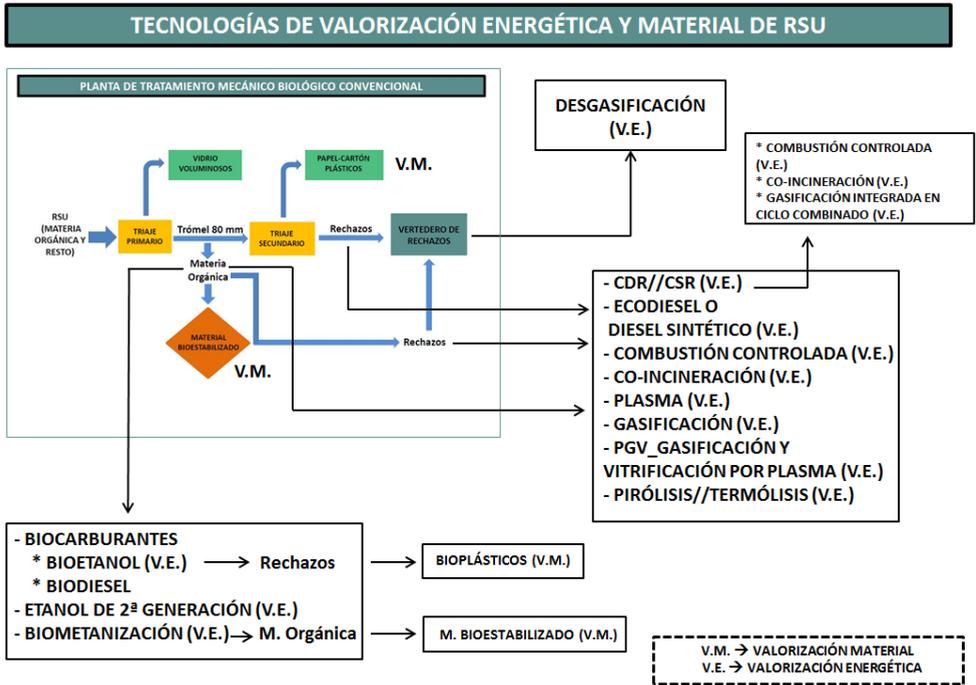
Capítulo 4

Otras tecnologías de valorización energética

4.1.- Aprovechamiento energético de RSU

Considerando las nuevas legislaciones ambientales, se deben implementar sistemas de aprovechamiento de energía contenida en los rechazos de las plantas de tratamiento para intentar, siempre y cuando sea viable, que la cantidad de residuos con destino a vertedero sea mínima o nula, para así minimizar su gestión y cumplir con la jerarquía y objetivos de tratamiento de la Unión Europea, potenciando el reciclaje y la valorización.

La Figura 4.1 muestra los principales sistemas de aprovechamiento energético y material de los residuos sólidos urbanos (RSU).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1.- Principales tecnologías de valorización energética y material de RSU

4.1.1.- Combustibles alternativos: CDR/CSR

La diferencia entre el CDR (Combustible Derivado de Residuo) y el CSR (Combustible Sólido Recuperado) radica en que el primero se obtiene a partir de residuos tanto peligrosos como no peligrosos, mientras que el segundo sólo se fabrica con residuos no peligrosos y además debe cumplir las especificaciones técnicas de CEN/TC 343¹ en base a valores límite de:

¹ CEN/TC 343 es la normalización europea para los Combustibles Sólidos Recuperados, preparados a partir de residuos no peligrosos, que se utilizan para recuperación de energía en plantas de incineración o co-incineración de residuos.

- PCI: Valor medio del poder calorífico inferior (PCI) en base húmeda.
- Valor medio del contenido en cloro en base seca.
- Media y percentil del contenido de mercurio en relación al PCI en base húmeda.

Por este motivo el CSR será de mayor calidad que el CDR. Otorgando a cada parámetro un valor entre el 1 y el 5 obtendremos el código que designa a cada clase de combustible CSR (Tabla 4.1)

Tabla 4.1.- Sistema de clasificación para CSR

Propiedad	Media estadística	Unidad	Clases				
			1	2	3	4	5
PCI	Valor medio	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Contenido en Cl	Valor medio	%	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Contenido en Hg	Valor medio	Mg/MJ	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	Percentil 80%	Mg/MJ	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,00$

Fuente: CEN/TS 15359:2006 *Solid recovered fuels-Specifications and classes*

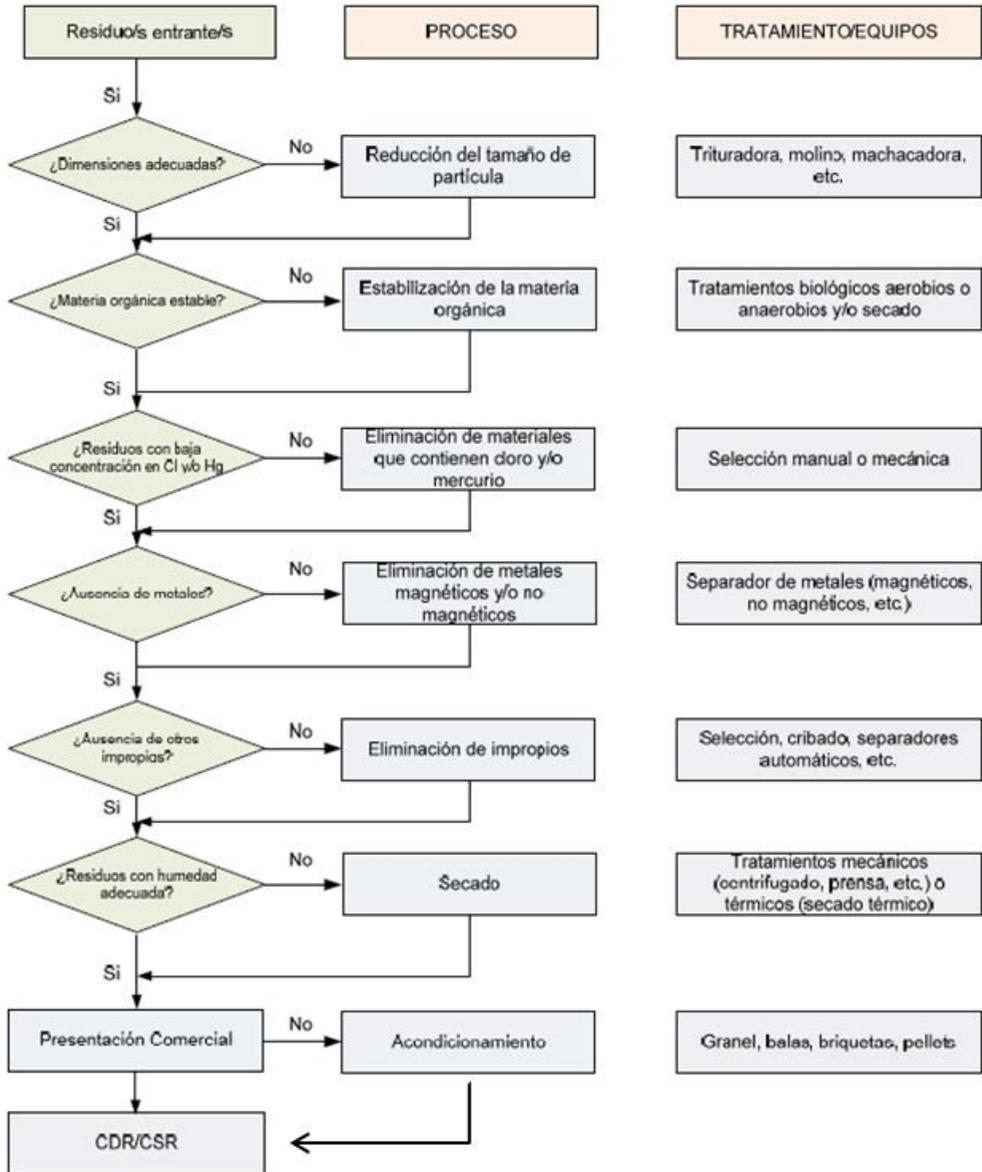
La calidad del producto exigido por las cementeras corresponde con las propiedades del CSR de Clase 3.

La técnica de fabricación más extendida para la obtención de estos combustibles es la que se basa en el aprovechamiento de los rechazos de las plantas de tratamiento mecánico-biológico (preferente los rechazos de la fracción inorgánica) para obtener un combustible que estará destinado principalmente, a plantas de incineración con recuperación de la energía o coincineración (actualmente se utilizan en los hornos de plantas cementeras, que deben estar en un radio inferior a los 100 km o 1,30 horas de distancia para que sea rentable su adquisición, no obstante la “Red Española contra la incineración en hornos de cemento” persigue darle otras salidas a estos combustibles).

Otra posible salida en proceso de desarrollo es la gasificación integrada en ciclo combinado (GICC).

Cabe señalar que no todos los tratamientos mecánico biológicos conducen a la producción de combustibles alternativos de calidad.

Para su fabricación es esencial conocer la composición de los residuos, ya que estas alternativas de recuperación de energía necesitan una composición específica: deben predominar, por tener gran poder calorífico, las fracciones papel, plástico y textiles entre otras, además los residuos se someterán a un proceso de estabilización para homogeneizar el tamaño de las partículas, eliminar impropios y reducir la humedad. Incluso en algunos casos concretos, la producción de los combustibles deberá adaptarse a los usos previstos, corrigiendo determinados parámetros.

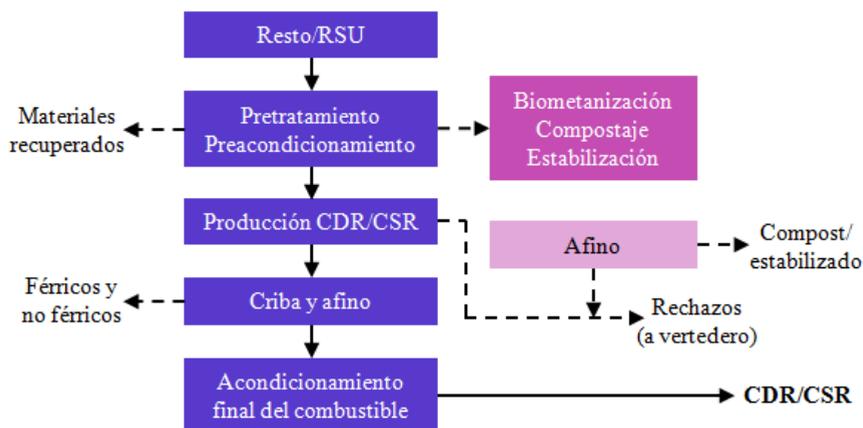


Fuente: Alonso, 2009

Figura 4.2.- Tratamientos generales previos a la producción de CSR/CDR

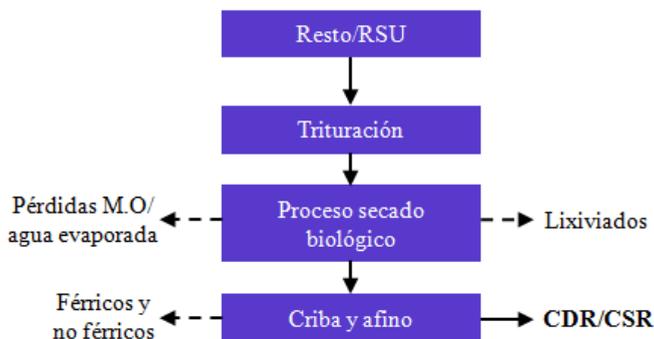
Se puede considerar que existen actualmente dos métodos para la producción de CDR/CSR:

- Por tratamiento mecánico/físico en plantas MBT (*Mechanical and Biological Treatment*)
- Por biosecado, seguido de una clasificación posterior (en plantas MBT). Este método de “estabilización en seco” se desarrolló en Alemania y tiene el nombre comercial de *Trockenstabilat*.



Fuente: IDAE

Figura 4.3.- Proceso de producción de CSR/CDR mediante tratamiento mecánico



Fuente: IDAE

Figura 4.4.- Proceso de producción de CSR/CDR mediante biosecado

El biosecado aparece como solución al problema que presenta la basura doméstica en los municipios: el cambio en sus características a lo largo de los años y entre las variaciones estacionales. Algunas de las tendencias más relevantes que han surgido en las últimas décadas es que el PCI ha evolucionado al alza, y los productos biogénicos han disminuido; si en una planta de valorización energética se llega al límite térmico de la instalación, habrá que reducir la cantidad de residuos a introducir en la misma o ampliar la planta, con el consiguiente sobrecoste.

Descripción del proceso de biosecado

Consiste en un tratamiento biológico en el que se da una elevada temperatura que se alcanza en el interior de la masa de residuos (50-60°C), y por ello el proceso aeróbico es un eficaz sistema de estabilización, desodorización e higienización del material.

Durante el proceso, se evapora el agua contenida en los residuos y se degrada parte de la materia orgánica, por lo que se reduce un 25-30% en peso.

Las fases son las siguientes:

- Recepción.
- Trituración, a tamaño 25-30 cm para homogeneizar el material. También se lleva a cabo la rotura de las bolsas de basura.
- Estabilización y biosecado. Consiste en la evaporación de la parte húmeda contenida en los residuos mediante la circulación de una corriente de aire forzada y el calor producido en las reacciones de degradación aeróbica de la materia orgánica. El proceso tiene una duración aproximada de 14 a 15 días.
- Tratamiento de gases, mediante un biofiltro que actúa como un sistema biológico de depuración de gases.
- Afino (preparación del CSR/CDR), se procede a la extracción de metales férricos y no férricos, seguido de una trituración tras el cribado para conseguir el tamaño requerido por el consumidor final. La fracción fina que resulta de esta fase se trata como un rechazo. Se obtiene un producto con un poder calorífico elevado (del orden de 14.000-16.000 KJ/kg) que se prensa dando lugar a unos materiales de mayor densidad, lo que facilita su transporte y manipulación.
- El producto preparado está en condiciones para ser enviado a las plantas de valorización energética. En el caso de que su destino sea preparar combustibles con destino a hornos industriales, se debe introducir la mezcla en un trómel con el objetivo de separar el rechazo y el producto final.

A nivel europeo, las tecnologías del CSR y CDR son muy empleadas en países como Austria, Alemania y Holanda.

En España no existe actualmente una demanda de CSR que se produzca bajo las especificaciones de la CEN/TC 343, sino una demanda emergente de CDR que haya sido elaborado conforme a las necesidades específicas en el destino de consumo (normalmente, plantas cementeras).

Algunos ejemplos representativos de estas tecnologías en España son los siguientes:

- Planta en Andalucía. Se dedica a la elaboración de CSR. Hay que resaltar que el 28,5% de los rechazos entrantes en masa es recuperado en forma de CSR.
- Instalaciones de CSR en el Centro de Tratamiento del PI Zona Franca de Barcelona (en la que se obtiene un 80% de rendimiento en la producción de CSR), Ecoparque de El Aceituno (Toledo), Centro de Tratamiento de Murcia y Centro de Tratamiento de Alginet (Valencia).
- Planta de producción de CDR/CSR de Vitoria – Gasteiz: en este caso la cifra de recuperación asciende a 49%.

Por lo general, las características del CDR obtenido de los RSU en España son:

Tabla 4.2.- Características CDR obtenido de RSU

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

Fuente: “Alternativas de Gestión en el Ecovertedero de Zaragoza”

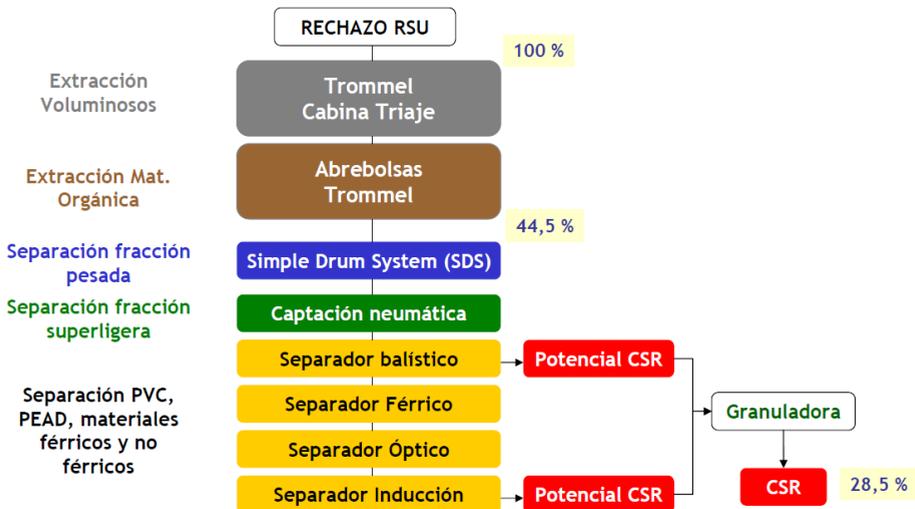
Por otro lado, la composición media del CDR utilizado en las plantas cementeras corresponde se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3.- Composición media del CDR

Categoría	Composición media (%)
Restos de comida y poda	16,84
Celulosa sanitaria	4,23
Papel y cartón	32,15
Plásticos	22,2
Vidrio	1,13
Tetrabrick	2,03
Madera	3,25
Calzados	1,41
Textiles	7,91
Goma, caucho y cuero	0,6
Metales	4,39
RP's	0,15
Tierra, cenizas y cerámica	1,42
Otros	2,29

Fuente: “Alternativas de Gestión en el Ecovertedero de Zaragoza”

La Figura 4.5 muestra un esquema de una planta de fabricación de CSR en Andalucía, con una capacidad de 50.000 t/año.



Fuente: Relea, 2009

Figura 4.5.- Esquema de fabricación de CSR en Andalucía (50.000 t/año)

El proceso tecnológico de fabricación del CSR dependerá de la calidad requerida en el CSR obtenido y de las características del residuo utilizado: residuos no peligrosos, no valorizables materialmente y con elevado poder calorífico que provienen, de entre otros destinos, de los rechazos industriales, rechazos de las plantas de selección de envases, rechazos de ecoparques, rechazos de plantas MBT, etc.

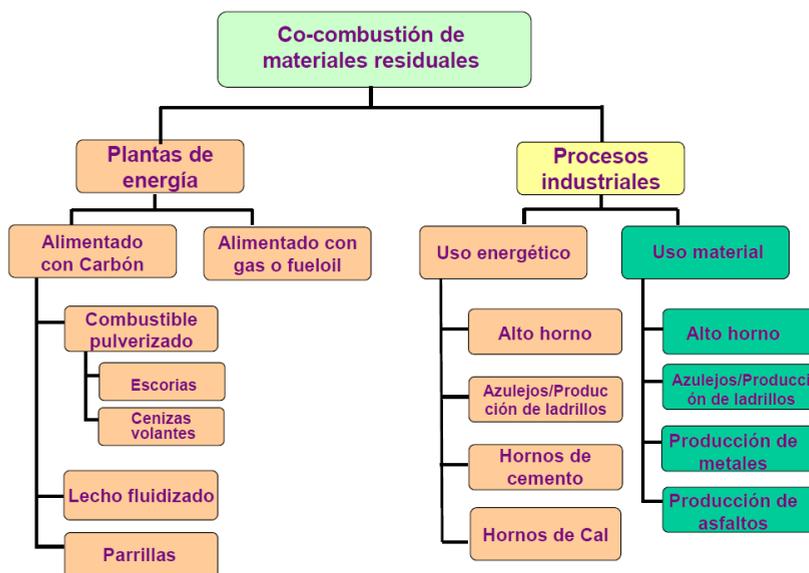
Actividades que demandan CSR

El uso de CSR como combustible alternativo a los tradicionales combustibles fósiles es una opción interesante en las actividades industriales que necesitan grandes cantidades de combustible para los procesos productivos.

Lo habitual para el CSR es usarlo en procesos de co-combustión en donde se mezcla con carbón. De este modo, se obtiene un mayor poder calorífico para aplicación en calderas. En este caso, se debe ajustar la mezcla para adaptarse a las instalaciones de quema y para controlar los gases resultantes.

Una mezcla del 80% de Coque de Petróleo y 20% de CSR puede ser adecuada.

La Figura 4.6 muestra algunas de las actividades que demandan CSR homologado destinado a procesos de co-combustión.



Fuente: Relea, 2009

Figura 4.6.- Actividades de aplicación al CSR

4.1.2.- Características del CSR producido

Las características referidas al CSR, dependen del usuario final al que va destinado:

Tabla 4.4.- Características del CSR producido en función del usuario final

	Sector Industrial	Sector doméstico	Lecho fluido	Coque de petróleo	CSR RI	CSR RSU
Tamaño	0-10 M	> 30 mm	El que más interese	-	Según granulador	Según granulador
Humedad	La menor posible	La menor posible	La menor posible	Max 8%	15-20%	15-20%
Cenizas (% sms)	< 5-6%	< 5-6%	< 15-20%	Max 0,5%	7	7
Azufre (% sms)	< 6%	< 6%	< 6%	Max 5,5%	0,1	0,1
Volátiles (% sms)	10-15%	10-15%	> 10%	9-14%	-	-
Índice de dureza	Min 40	No requerido	No requerido	Min 40	-	-
PCS (Kcal/kg)	6.500	6.500	6.500	8.400	5.450	5.180

Fuente: Repsol YPF

Según datos correspondientes al período marzo-septiembre 2012, en este caso en la planta de la Zona Franca de Barcelona, se tiene que:

- Horas producidas: aprox. 1900 h
- Residuo procesado: aprox. 40.000 t
- Cantidades de CSR producidas: Aprox. 30.000 t. (Rechazos: aprox. 20%)
- Características del CSR producido: Categoría 3
 - PCI: aprox. 4.000-4.200 Kcal/kg
 - H₂O: aprox. 10-15%
 - Cl: Aprox. 0,5%
 - Granulometría < 30 mm

4.1.3.-Factores determinantes del precio

En cuanto a los costes de fabricación del CSR y su precio, es imprescindible considerar:

- El ingreso que percibe la planta por tratar los residuos.
- La inversión inicial y los costes de operación, mantenimiento y amortización de la construcción.

- El coste del transporte del combustible hasta el consumidor final.
- La retribución que, en principio, cobrará el consumidor por aceptar este combustible.
- La tecnología empleada en la producción.
- La ubicación de la planta (gestión del rechazo, mantenimiento, consumo eléctrico, personal, logística,...).
- El residuo utilizado.

4.1.4.-Beneficios del CSR

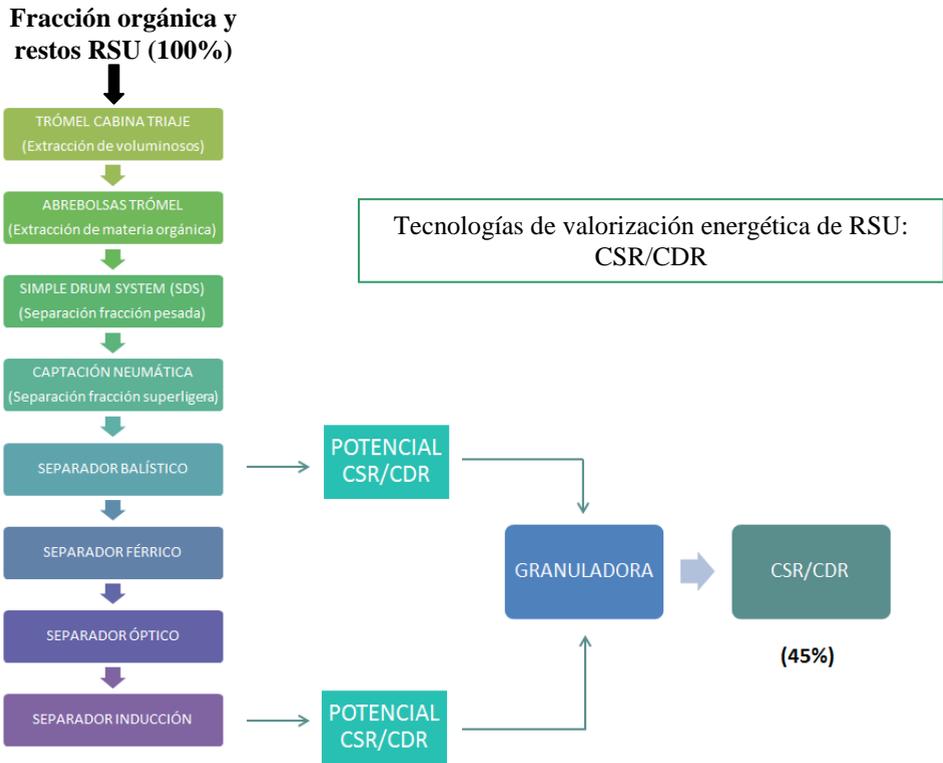
- Alternativa económicamente favorable.
- Reducción de la eliminación de los residuos en vertederos. Aumento de su vida útil.
- Valorización y aprovechamiento energético del poder calorífico contenido en los residuos. Incremento del uso de energías renovables.
- Reducción del consumo de combustibles fósiles. Disminución del uso de recursos naturales.
- Reducción de emisiones a la atmósfera:
 - Instalaciones de combustión: Reducción emisiones CO₂.
 - Vertedero: Reducción de la eliminación de metano.

En la Figura 4.7 se muestra el balance de masas previsible en el caso de implantar la tecnología de CSR/CDR. Se espera que el PCI de estos combustibles sea de 3.500-4.000 Kcal/Kg (14.600-17.600 KJ/Kg) y un contenido de CI <0,5%.

El rendimiento de producción dependerá de la calidad del rechazo, como se ha comentado. En general, se puede prever que para plantas que producen un porcentaje elevado de rechazo (> 65%,) éste tendrá un alto contenido en materia orgánica por lo que disminuirá el porcentaje recuperado de combustibles sólidos.

Si las previsiones de rechazo fuesen, por ejemplo del 53%, se puede estimar que la producción de CSR/CDR será menor del 55% respecto de las entradas.

Hay que añadir que actualmente, estos combustibles no tienen la salida que se esperaba en industrias cementeras ya que el precio de venta de los mismos es superior al precio del coque. Debe darse la condición de que el precio del CSR/CDR sea inferior al precio del coque para garantizar el éxito de venta. Este precio de venta se verá muy influenciado por la composición del CSR/CDR obtenido, principalmente, se tendrá en cuenta el PCI y el porcentaje de humedad.



Fuente: Elaboración propia a partir de Relea, 2009

Figura 4.7.- Esquema del proceso de fabricación del CSR

4.2.- Biocarburantes a partir de la fracción orgánica de RSU

Se entiende por biocarburante un combustible líquido o gaseoso utilizado para el transporte producido a partir de biomasa. En este grupo se incluyen el bioetanol, biodiesel, bioETB, aceite vegetal y biohidrógeno (Directiva 2009/28/CE).

Recientes cambios en la normativa estatal, consideran la fracción biodegradable de los residuos municipales como biomasa (Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos), por ello es muy interesante considerar las siguientes modalidades de valorización energética de residuos.

4.2.1.- Biodiesel

El biodiesel es un biocombustible obtenido a partir de plantas oleaginosas (que producen aceites vegetales) tales como la soja, colza, girasol o palma debidamente sometidas a un proceso de transesterificación (proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un alcohol).

Realmente no es un proceso que utilice los RSU; el biodiesel se obtiene de cultivos agrícolas o cultivos vegetales no destinados a alimentación (plantas como la *Euphorbia lathyris* o microalgas). Por ello, no es una tecnología de valorización energética de RSU: no se alimenta de rechazos de procesos, la materia prima usada se cultiva para estos fines.

- Las principales ventajas de los aceites vegetales como combustibles diesel son su disponibilidad, poseer menor contenido de azufre y contenido de aromáticos, que son biodegradables y renovables, etc.
- Las principales desventajas son una mayor viscosidad, menor volatilidad y la reactividad de las cadenas de hidrocarburos insaturados. Los problemas encontrados en las pruebas de motor a largo plazo, de acuerdo con diversos investigadores, pueden ser la formación de coque en los inyectores, la existencia de más depósitos de carbón y el engrosamiento y la gelificación del aceite lubricante del motor.

Hay cuatro formas de transformación de los aceites vegetales en carburantes: el uso directo de aceites y mezcla de las mismas con gasóleo mineral, micro-emulsiones, craqueo térmico y transesterificación, método más común de transformación.

Tabla 4.5.- Diferentes métodos de producción de biodiesel

Métodos	
Uso directo y mezcla con gasóleo	
Definición	Uso directo como combustible diesel o mezcla con gasóleo
Ventajas	Naturaleza líquida-portabilidad Contenido de calor (80% del combustible diesel) Fácilmente disponibles. Renovable
Desventajas	Mayor viscosidad Baja volatilidad Reactividad de las cadenas de hidrocarburos insaturadas
Problemas de utilización en motores	Formación de coque Depósitos de carbono Formación de un anillo de lubricación adherente en el cilindro de los motores Espesantes y gelificantes del aceite lubricante
Microemulsiones	
Definición	Microemulsiones de aceite y alcohol etílico que sustituyen al diesel nº 2 ¹ Microestructuras con dimensiones generalmente en el rango 1-150 nm, formadas de manera espontánea a partir de dos líquidos inmiscibles
Ventajas	Buena pulverización durante la combustión Viscosidades de combustible más bajas
Desventajas	Menor número de cetano Bajo contenido de energía
Problemas de utilización en motores	Combustión incompleta Formación de depósitos de carbón pesados Aumento de la lubricación del aceite
Craqueo térmico (Pirólisis)	
Definición	Conversión de cadenas largas y sustancias saturadas (base de la biomasa) en biodiesel por medio de calor
Ventajas	Químicamente similar a los derivados de petróleo, gasolina y diesel
Desventajas	Uso intensivo de energía durante el craqueo, por lo tanto mayores costes
Transesterificación	
Definición	Reacción de un aceite o grasa con un alcohol en presencia de un catalizador para formar ésteres y glicerina
Ventajas	Renovable Mayor número de cetano Menos emisiones Alta eficiencia de combustión
Desventajas	Eliminación de subproductos (glicerina y aguas residuales)

1: Diesel con una temperatura de ignición entre 254-285 °C y nº de cetano entre 40-55

Fuente: Pardal, 2012

En España hay más de 36 empresas de producción de biodiesel entre las que destacan:

- Infinita Renovables Castellón, (Castellón), con una producción de 300.000 t.
- Bioenergética Extremeña, Bionex, (Badajoz) con 250.000 t producidas.
- Saras Energía (Valle de Escombreras, Murcia), 200.000 t.

Con los propósitos de la Unión Europea de incrementar el uso de biocombustibles para el 2020, el biodiesel ha evolucionado desde una “Primera Generación” hasta el biodiesel de “Tercera Generación”.

Los biocombustibles pretenden ser una alternativa más sostenible a los combustibles fósiles convencionales. Para ello sus responsables han emprendido una evolución hacia mejores productos y con los menores inconvenientes posibles. Los primeros que se empezaron a producir utilizaban materia prima de procedencia agrícola, como caña de azúcar o semillas de palma. Por ello, entraban en conflicto con los cultivos alimenticios convencionales. Para evitar este problema y conseguir nuevas materias primas, los biocombustibles de “Segunda Generación” usan todo tipo de residuos o cultivos que no entran en conflicto con la producción de alimentos, como la jatropha.

La jatropha, planta originaria de América Central, puede crecer en tierras marginales no dedicadas al cultivo de alimentos. Las semillas de esta planta son tóxicas y, por ello, el aceite que producen no es comestible: su uso no compite con la producción alimentaria. La plantación de jatropha es un buen elemento de biorremediación ya que recupera tierras abandonadas, improductivas y hasta contaminadas con metales. Es posible regarla con aguas residuales, con más nutrientes que la lluvia natural. Su generalización ayudaría a luchar contra la desertificación y el cambio climático: una hectárea puede captar hasta 60 toneladas de dióxido de carbono.

Los biocombustibles de “Tercera Generación” trabajan con vegetales no destinados a la alimentación, con una gran capacidad de crecimiento rápido y potencial energético. Para mejorar su rendimiento y características productivas utilizan diversas tecnologías, como la ingeniería genética. Los árboles bajos en lignina o el maíz con celulasas integradas son algunos ejemplos de este tipo de cultivos. Es el caso de la planta *Euphorbia lathyris*, empleada en el proyecto de investigación EULAFUEL, promovido por un consorcio internacional universidad-empresa en el que participan la Universidad de Barcelona, el Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas del CSIC, el Instituto de Biología Molecular de Plantas del CNRS, la Universidad de Estrasburgo (Francia), el Instituto Leibniz de Genética, Cosechas y Plantas (Alemania) y las empresas españolas Synergia y Repsol. La planta crece rápido en climas diversos con poca agua, y de ella se extraen triterpenoides, unos hidrocarburos que se aprovechan para hacer el combustible. Con ellas se puede producir un aceite que tras ser refinado puede utilizarse como biodiesel, y si se las manipula de forma genética se pueden elaborar todo tipo de combustibles.

No obstante, diversos expertos señalan a las microalgas como los más característicos y prometedores biocombustibles de tercera generación.

Las microalgas se pueden producir de diversas formas: al aire libre, más sencillas de cultivar pero con un menor rendimiento; en sistemas cerrados, similares a los cultivos al aire libre pero en atmósferas controladas con dióxido de carbono (CO₂); y en fotobiorreactores, unos tubos cerrados transparentes donde van los cultivos que incrementan su productividad, aunque son más caros y complejos.

Los biocarburantes de tercera generación tienen varias ventajas. Para empezar, no utilizan cultivos destinados a alimentación y, por tanto, no interfieren en la producción convencional y en sus precios de venta, como ocurría con los de primera generación. Su alta productividad permite a sus responsables recoger cultivos cada pocos días.

En el caso de las microalgas, su gran absorción de CO₂ las convierte en una posible herramienta en la lucha contra el cambio climático. Algunos de sus impulsores señalan que podrían colocarse cultivos de estas algas en las industrias productoras de dicho gas de efecto invernadero. De esta manera se lograría alimentarlas a la vez que se reducen las emisiones a la atmósfera. Otra función ecológica doble sería usar aguas residuales de sustento: las microalgas se alimentarían a la vez que las depurarían.

Por su parte, estos biocombustibles tienen que superar varios desafíos. Aunque las microalgas crecen en aguas residuales y con CO₂, también necesitan otros nutrientes como nitrógeno o fósforo. Estos fertilizantes empleados a gran escala podrían tener efectos negativos en el medio ambiente. Asimismo, los costes de la inversión y el mantenimiento de estos cultivos son todavía elevados.

Algunos expertos hablan incluso de una cuarta generación, cuya producción se basa en bacterias modificadas de forma genética que aprovechan mejor el CO₂ como sumidero de carbono.

4.2.2.- Bioetanol

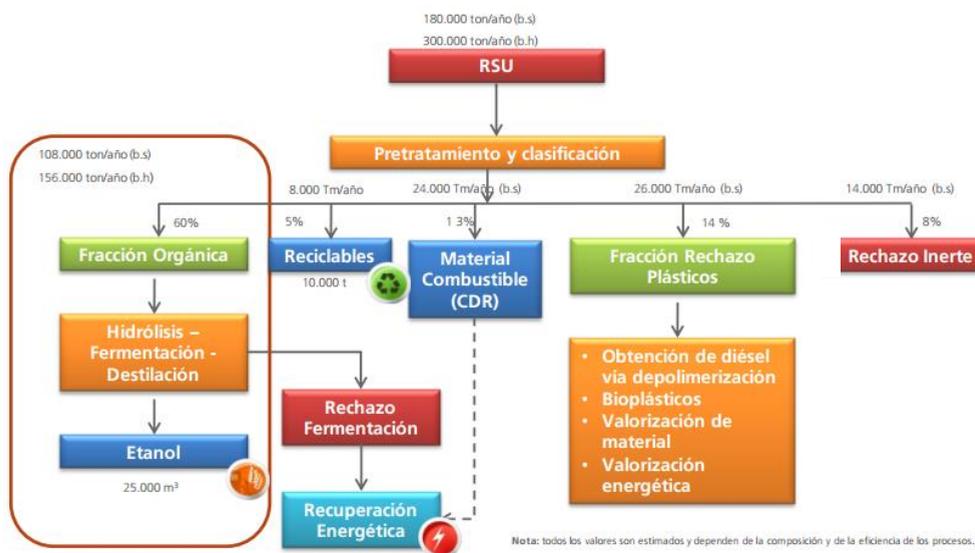
Se obtiene a partir de materias primas ricas en azúcar: maíz (USA), caña de azúcar (Brasil) y cereales (España). El proceso de obtención es mediante fermentación.

La tecnología desarrollada por Abengoa, denominada “*Waste-to-biofuels*” (W2B), permite resolver simultáneamente la gestión eficiente de residuos sólidos urbanos y la producción sostenible de energía (Rodríguez Mendiola, 2012). Consiste en obtener recursos energéticos y materiales a partir de los RSU.

Abengoa produce etanol de biomasa usando enzimas que hidrolizan la celulosa y la hemicelulosa para su conversión en azúcares que luego se fermentan y se concentran, dando lugar al etanol. Para poder producir una cantidad adecuada de azúcar

fermentable a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, es necesario realizar un tratamiento previo que homogenice la materia orgánica produciendo una fibra granular limpia.

La solución integral W2B de Abengoa no se limita al tratamiento de la fracción orgánica, sino que contempla el aprovechamiento del resto de componentes de los residuos sólidos urbanos, tanto de los reciclables (plásticos, PET, metales) como de los no reciclables CDR (principalmente mezclas de gomas, maderas y textiles), así como de otros plásticos mediante tecnologías de pirólisis para obtención de diesel, obtención de bioplásticos o valorización energética o material (Rodríguez Mendiola, 2012).



Fuente: Rodríguez Mendiola, 2012

Figura 4.8.- Diagrama de flujo para la producción de Bioetanol

En España, esta tecnología se desarrolla en la planta de Babilafuente en Salamanca.

Bioplásticos a partir de rechazos generados en la producción de bioetanol

Actualmente el Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS) trabaja en el proyecto europeo “Biorefine 2G” para obtener biopolímeros a partir de los residuos generados por las refinerías de segunda generación en la fabricación de bioetanol. Es por tanto una tecnología de recuperación material de los rechazos.

Los bioplásticos obtenidos estarán destinados, principalmente a su uso en envases como láminas para termoformado, adhesivos y recubrimientos, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles.

Este proyecto, con tan solo unos meses de vida, supone un impulso muy importante para las biorefinerías de segunda generación debido a que permitirán la reducción de sus rechazos y “aseguran la viabilidad económica a través de la generación de productos de mayor valor añadido, muy demandados por la industria y respetuosos con el medio ambiente”.



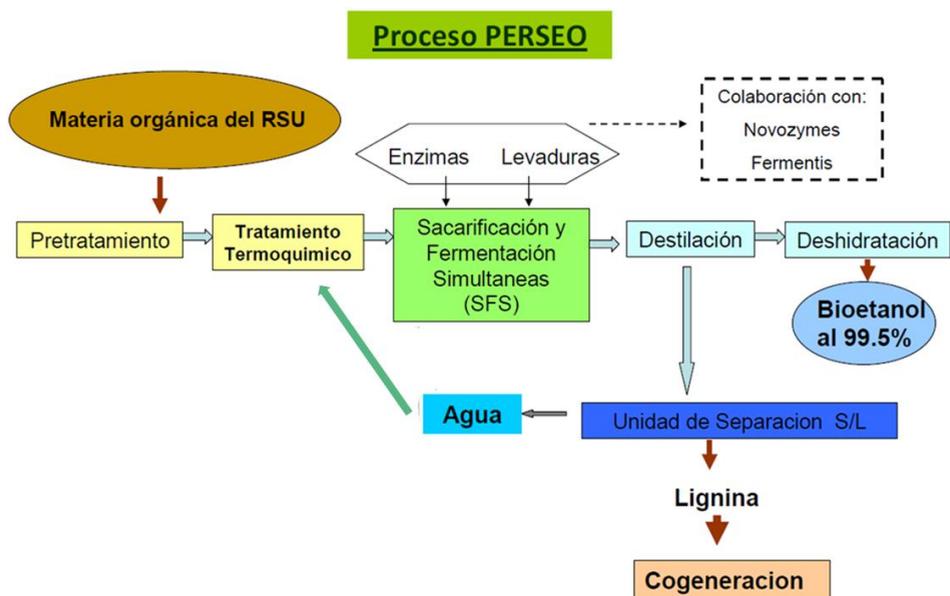
Fuente: www.ecoticias.com

Figura 4.9.- Biorefinería de petróleo

Etanol de 2ª generación: Proyectos Perseo y Atenea (Lignocelulosa)

Actualmente se está trabajando en estos proyectos como evolución de la tecnología anterior aplicada a los condicionantes territoriales y las características espaciales de los residuos en el ámbito nacional.

El Proyecto Perseo se dedica al estudio de la producción de etanol a partir de Residuos Sólidos Domésticos Orgánicos.



Fuente: Castañeda y Coll, 2008

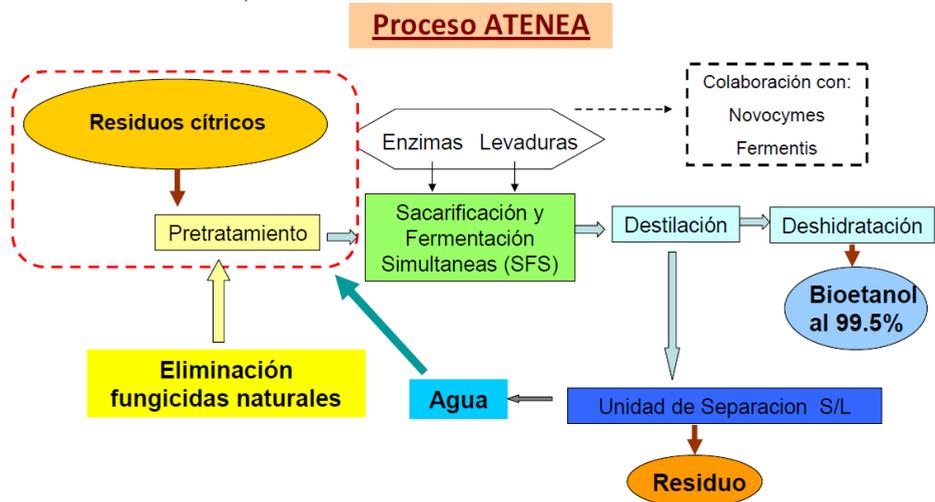
Figura 4.10.- Procesos en Proyecto Perseo



Fuente: Castañeda y Coll, 2008

Figura 4.11.- Planta Proyecto Perseo. L'Alcúdia (Valencia)

El Proyecto Atenea trabaja en la producción de bioetanol a partir de residuos cítricos. (Generalitat Valenciana).



Fuente: Castañeda y Coll, 2008

Figura 4.12.- Procesos en Proyecto Atenea

4.3.- Ecodiesel o diesel sintético

Esta tecnología está patentada por el Dr. Ingeniero Industrial D. Pedro Server Barceló. Las características esenciales son:

- Descripción del producto principal: hidrocarburo inflamable principalmente diesel sintético de alta calidad. Diesel bajo normativa UNE o DIN 590.
- Materia prima: Materiales considerados residuos orgánicos de diferentes orígenes
- Proceso tecnológico: Proceso de Separación y Conversión Termo-Atmosférica (TACS) llamado también rotura molecular controlada (SMRF)
- Productos-residuales: compuesto de carbono y agua destilada
- Relación de conversión: El porcentaje de conversión varía entre un 30% a un 90% dependiendo de tipo de materia prima ingresada y de la separación selectiva.
- Emisiones generadas por la instalación: no se generan emisiones nocivas.
- Compatibilidad de residuos: El sistema está preparado para incorporar tanto residuos urbanos, como residuos de agricultura y vegetación, papel, plásticos, aceites y grasas usadas de baja calidad, residuos sólidos de tratamiento de aguas negras, y residuos de hospitales asimilables a urbanos.

Se entiende como biodiesel al biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales, o de biomasa (vegetal y animal). El biocombustible procedente de los residuos sólidos urbanos al contener derivados del petróleo se denomina ECODIESEL, al estar dando un segundo uso a este tipo de materia.

4.3.1.- Descripción de la tecnología

La tecnología es el Proceso de Separación y Conversión Termo-Atmosférica (TACS) o *Server Molecular Roture Fracture* (SMRF).

El TACS consiste en una conversión de no-combustión que transforma la biomasa y las materias primas orgánicas procedentes de residuos urbanos, en combustibles diesel sintéticos de alta calidad, compuestos del carbón y agua.

A través de varios procesos, el TACS imita los procedimientos geológicos de la tierra y geotérmicos naturales que transforman el material orgánico en el petróleo crudo fósil.

El tiempo real de la conversión ocurre en un corto período de tiempo.

El principio tecnológico en el que se sustenta es la posibilidad de romper mecánicamente las grandes moléculas orgánicas en otras más pequeñas, y aprovecharse de la propiedad de los hidrocarburos de tener una temperatura de ebullición más baja cuanto más corta es la cadena del hidrocarburo, principio ya utilizado en tecnologías actuales de cracking térmico convencional.

La materialización del principio requiere de mecanismos específicos, accionados eléctricamente, denominados “turbinas”, y de la contribución de un “catalizador mecánico”, producto comercial modificado de origen natural o artificial duro e inerte, que produce un fuerte amasamiento de la materia orgánica, rompiendo sus moléculas y calentándola. De ahí el término utilizado de “cracking termomecánico”.

Conversión a Hidrocarburos

El objetivo del proceso TACS es obtener hidrocarburos por despolimerización o escote y recombinar el carbón y elementos hidrógenos contenidos en los residuos. El Proceso TACS es físico-mecánico-químico en el cual el residuo es reducido por molino a tamaño de 3 milímetros o más pequeños y una segunda seducción a tamaño de nivel molecular, en este caso, por roce y pulverizado con materiales exotérmicos tales como aquellos usados en la industria petroquímica.

Para iniciar el Proceso TACS, los residuos son calentados a temperaturas alrededor de 200 grados por intercambios de calor para modificar el residuo de las reservas

alimenticias y para remover el contenido de agua. La parte líquida de las reservas alimenticias después del calentamiento es presurizada en el reactor termal para destrozarse la materia orgánica y separar materiales (minerales) orgánicos e inorgánicos.

La combinación de calor y presión empleados asegura que ningún patógeno o contagioso contenido sea destruido.

Gran parte de la energía de calentamiento aplicada en la conversión es recuperada y es un factor clave en el proceso de energía de alta eficiencia. Esta mezcla es analizada y cuantificada para determinar la química orgánica molecular asociada a las cadenas de hidrógeno y carbono. Estas moléculas orgánicas con generalmente halógeno, cloro, flúor los cuales son entonces tratados con sustancias neutralizantes. Mercurio, cromo, metales pesados y otros elementos no deseados son neutralizados con otros materiales como Ciolitas, produciéndose una amalgama que, por su mayor peso, queda separada.

La materia prima es calentada antes de la introducción en el sistema de alimentación para mayor preparación, mezclado y calentamiento de la mezcla. La mezcla es reducida en tamaño de aproximadamente 20 micras. Las turbinas reducen más la mezcla a dimensiones coloidales (casi moleculares). Esta mezcla coloidal contiene ambas moléculas tanto libres como adheridas a moléculas de hidrógeno y carbono. Las aplicaciones térmicas y atmosféricas son usadas para recombinar estas moléculas de hidrógeno y carbono a formar vapor de hidrocarburo, compuestos de carbono y agua. Esta reducción y recombinación de moléculas de hidrógeno y carbono es similar al proceso de agrietado usado en la industria petroquímica.

Al salir de las turbinas, las moléculas de hidrocarburo contenidas en los vapores son transferidas para la torre de destilación y condensado. El vapor de hidrocarburo es enfriado y el agua es separada del proceso de destilación. Los materiales sólidos inorgánicos y los compuestos de carbón conteniendo elementos incluyendo nitrógeno, fosfatos, potasio y las entradas catalíticas son recuperadas.

El combustible diesel sintético, los compuestos del carbón y de agua son separados usando equipos de separación convencional y es conducido por tuberías a tanques de almacenaje.

4.3.2.- Fases del proceso

El proceso consta de cuatro fases:

- Aplicación de temperatura Termal a la materia orgánica
- Presión Atmosférica para desprender hidrocarburos
- Conversión para producir aceite liviano y agua de los sólidos
- Separación de aceites livianos y agua usando reducción por destilación

La materia orgánica convertible se transforma en gasóleo con un rendimiento estimado en el 40%. Este rendimiento depende del análisis elemental, y sobre todo del contenido de oxígeno de la materia prima y de las posibles entradas de aire en el proceso.

Se estima, por lo tanto, que para producir 1.000 litros de gasóleo, equivalentes a 840 kg, se requieren 2.100 kg de materia convertible, o lo que es lo mismo, 2.800 kg de rechazo seco o bien 3.733 kg de rechazo húmedo.

La primera operación es el tratamiento y preparación de la materia prima, consistente principalmente es la separación de vidrio y metales, molienda, secado y 2da molienda, hasta conseguir una granulometría fina, pasa por la malla de 6 mm y no pasa por la malla de 0,5 mm de apertura.

4.3.3.- Efluentes y emisiones generadas en el proceso

Además del gasóleo, el producto principal, son efluentes del proceso los siguientes:

- Gases: Dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua. No serán emitidos otros gases, en cantidades significativas.
- Líquidos: agua de proceso
- Sólidos: partículas, inorgánicos que se consideran inertes, metales y vidrio
- Calor

4.3.4.- Valorización de los residuos con la tecnología SMRF

Este combustible Diesel puede ir directamente a la automoción, cumpliendo la Normativa DIN o UNE 590.

No representa ningún problema pues también pueden ir mezclados con papeles, cartones y material orgánico. Esta mezcla es triturada y secada y entraría directamente en el proceso. Se admiten:

- Envases ligeros
- Vehículos Fuera de Uso (VFU)
- Neumáticos Fuera de Uso (NFU)
- Residuos de Construcción y Demolición (RCD)
- Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)
- Otros residuos

4.3.5.- Ventajas

Las principales ventajas a destacar del uso del ecodiesel respecto al gasóleo son:

- El ecodiesel, comparado con el gasóleo A (automoción), al no contener bencénicos ni ciclo parafinas, reduce las emisiones de todos los contaminantes.
- Su uso no demanda modificaciones de las infraestructuras de distribución y venta de combustibles líquidos ya instaladas.
- Presenta un mayor punto de ignición (reduce peligro de explosiones por emanación de gases durante el almacenamiento).
- Su uso no requiere ninguna modificación en los motores diesel convencionales, obteniéndose rendimientos similares.
- Presenta un índice de cetano promedio de 55, cumpliendo la Normativa Vigente Actual del DIESEL DIN o UNE 590.
- Alta biodegradabilidad y menor toxicidad.

Esta tecnología podrá incorporarse tras el tratamiento que reciben los residuos en plantas de tratamiento mecánico biológico o bien directamente tras la recogida de RSU, previa selección manual de vidrio y voluminosos.



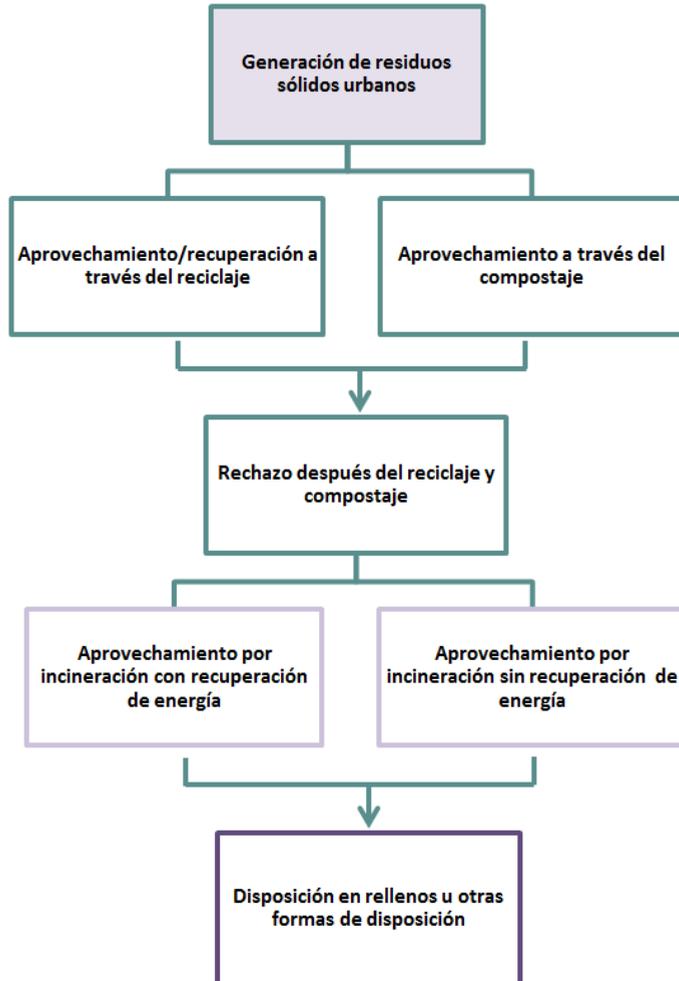
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13.- Esquema del proceso de fabricación de Ecodiesel

4.4.- Incineración e incineración con recuperación de energía

4.4.1.-Incineración

Las centrales incineradoras de rechazos de RSU que no han podido ser recuperados en las plantas de tratamiento pueden dedicarse a la incineración con o sin recuperación de la energía:

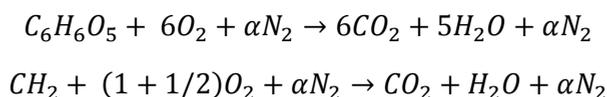


Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15.- Aprovechamiento de los RSU con incineración

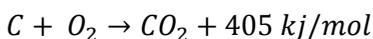
La incineración es un proceso de oxidación completa (en exceso de aire) de los elementos combustibles de los residuos (principalmente carbono e hidrógeno) a temperaturas superiores a 850°C.

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



Fuente: Guía de valorización energética de residuos FENERCOM

Figura 4.16.- Reacciones estequiométricas



Fuente: Guía de valorización energética de residuos FENERCOM

Figura 4.17.- Energía cedida en el proceso de combustión

El proceso es exotérmico y cede una importante cantidad de energía (Figura 4.17) y a la vez se destruye gran parte del producto sólido convirtiéndolo en gases y vapor de agua.

La cantidad de gases que se emiten por chimenea dependen de la cantidad de carbono e hidrógeno que tengan los residuos y del exceso de aire que cada tecnología utilice para garantizar la perfecta combustión del residuo.

Los productos sólidos resultantes de la combustión son las escorias o cenizas de fondo, las cenizas volantes y los residuos de la depuración húmeda. La gestión de estos residuos sólidos es una parte importante del diseño y de la operación de una incineradora.

Tabla 4.6.- Residuos resultantes de la combustión

Residuos resultantes de la combustión	
1.	Escorias o cenizas de fondo
2.	Cenizas volantes
3.	Residuos de la depuración húmeda

Fuente: Elaboración propia

1. Escorias o cenizas de fondo

Representa la porción no quemada de los RSU. En una instalación de quemado en bruto, las cenizas de fondo pueden contener cantidades importantes de metales y vidrio, así como materia orgánica no quemadas. Una forma de medir el rendimiento de la instalación es mediante la evaluación del porcentaje de materia orgánica no quemada en las cenizas. Si la combustión ha sido correcta, las escorias presentan menos de un 2% de residuos orgánicos. Las escorias de la mayoría de las incineradoras son eliminadas en vertederos controlados o bien reutilizadas como material de relleno en carreteras u otras obras civiles o para fabricar bloques de construcción.

2. Cenizas volantes

Los equipamientos utilizados para el control de las emisiones de partículas separan grandes cantidades de cenizas volantes, lo que origina un nuevo rechazo sólido que hay que gestionar. Las cenizas volantes deben ser manipuladas con mucho cuidado para evitar pérdidas incontroladas, por lo que deben ser transportadas en contenedores cerrados para su evacuación. Las cenizas son muy solubles en agua, por lo que es recomendable su vertido separado de las escorias, considerándolas como un residuo industrial tóxico o corrosivo.

3. Residuos de la depuración húmeda

Están constituidos por los lodos producidos en una depuradora húmeda utilizada para la separación de SO₂ y gases ácidos. El tratamiento de estos residuos consiste en una deshidratación para disminuir el volumen.

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

- Las diseñadas específicamente para la destrucción de residuos, con o sin recuperación de energía.
- Otras instalaciones diseñadas para otros fines pero que, por sus características, son susceptibles a ser usadas en el tratamiento de residuos. Para estas instalaciones (cementeras, centrales térmicas, etc.) el tratamiento de residuos persigue la reducción del coste energéticos de otras producciones mediante la sustitución de combustibles tradicionales por residuos.

La instalación básica de la incineración desde el punto de vista técnico, es el horno. El horno puede dividirse en dos partes fundamentales, parrillas y anexos y la cámara de combustión.

Tabla 4.7.- Tipos de hornos de combustión

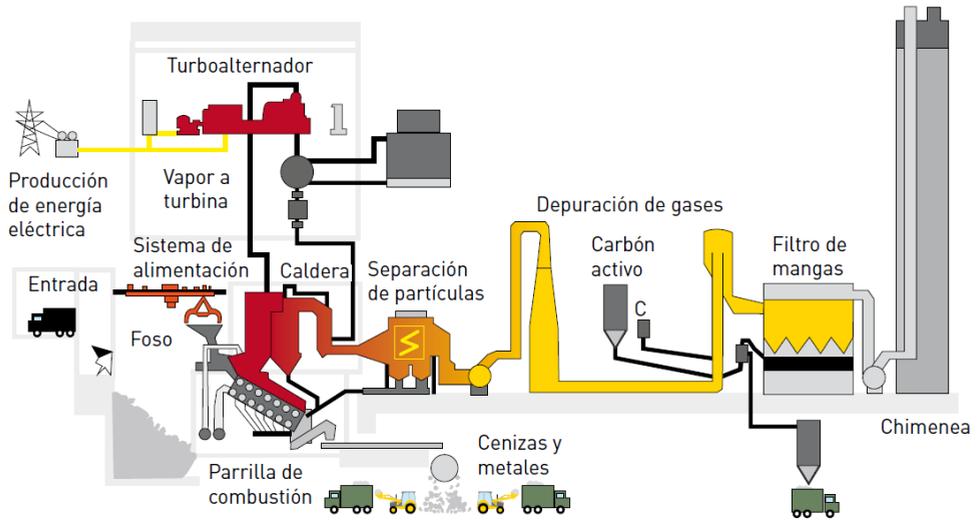
Tipos de hornos de combustión	
1.	Hornos de parrilla
2.	Hornos de lecho fluidizado
3.	Hornos rotativos

Fuente: Elaboración propia

1. Hornos de parrilla

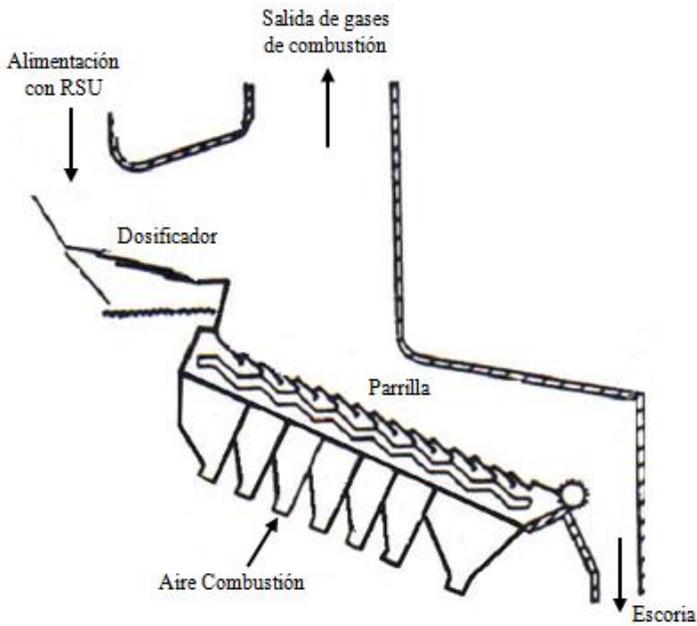
Este tipo de hornos es el más usado. Presenta una capacidad normal de tratamiento de 3 a 50 t/hora/línea y posibilidad de trabajar con residuos con PCI entre 1.400-4.500 Kcal/kg sin añadir combustible auxiliar.

Su nombre se debe a la parrilla que conforma el suelo del horno y que con su movimiento e inclinación, hace que el residuo avance a la vez que se desmenuza y se airea, por medio de unas rejillas. Las fases dentro del horno serán: secado emitiendo vapor de agua, pirólisis - gasificación y entrada de aire en defecto de O₂, todo ello en un tiempo de 45-90 minutos. Previamente a la entrada del residuo en el horno se debe precalentar hasta los 850°C. La carga térmica que debe procesar la parrilla (producto del P.C. por la cantidad de residuo alimentado) está en torno a los 400.000-800.000 Kcal/m²/h o lo que es igual, 200-340 Kg/m²/h. Al final del proceso quedarán las escorias.



Fuente: IDAE

Figura 4.18.- Esquema de incineración en horno de parrilla



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19.- Detalle horno de parrilla

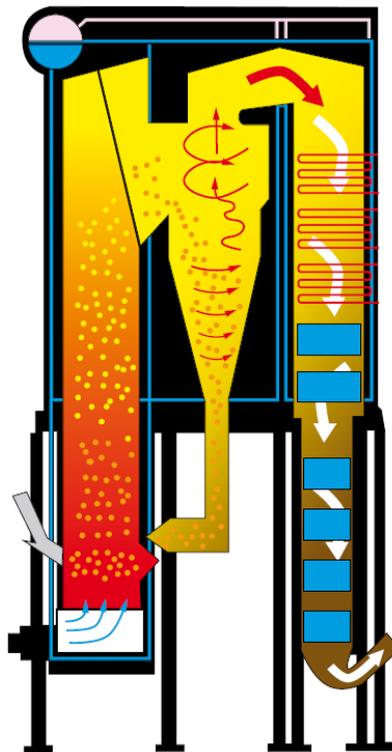
2. Horno de lecho fluidizado

Este tipo de hornos presenta dos modalidades: burbujeante y circulante

En su forma más sencilla consiste en un cilindro vertical de acero, normalmente forrado con ladrillos refractarios, un lecho de arena, una placa de rejilla de apoyo y toberas de inyección de aire.

Cuando se fuerza el aire hacia arriba a través de las toberas, el lecho se fluidiza y se expande hasta dos veces su volumen en reposo. La acción hirviente del lecho fluidizado provoca turbulencias y favorece la mezcla y transfiere calor al combustible. Cuando se pone en funcionamiento requiere combustible auxiliar (gas natural o aceite combustible) para subir la temperatura operacional (790 a 950 °C).

Los sistemas de lecho fluidizado son bastante versátiles y pueden operar sobre una amplia variedad de residuos, incluyendo RSU, fangos y numerosos residuos químicos peligrosos. El material del lecho puede ser arena o caliza.

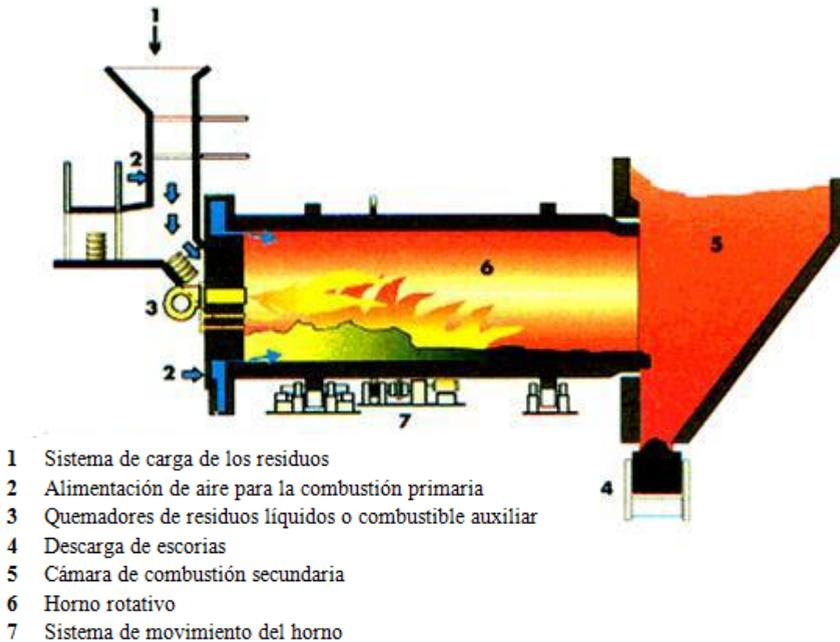


Fuente: IDAE

Figura 4.20.- Detalle horno lecho fluidizado circulante

3. Horno rotativo

Aplican la tecnología utilizada en las fábricas cementeras. Constan de un cilindro inclinado que gira sobre sí mismo, a través del cual van pasando los residuos. El aire necesario para la combustión se inyecta por el extremo opuesto a los residuos, arrastrando a los gases hacia la cámara de combustión. Debido a su forma de funcionar consiguen un mejor quemado de las basuras, debido fundamentalmente a su volteo.



Fuente: Guía de valorización energética de residuos FENERCOM

Figura 4.21.- Detalle horno rotativo

4.4.2.- Incineración con recuperación de la energía: combustión controlada para residuos

La incineración de residuos con aprovechamiento energético (en adelante la llamaremos “Instalación de combustión controlada para residuos”) es un proceso muy utilizado en Europa y consiste en una combustión con generación de vapor en un horno-caldera y la posterior expansión de éste en una turbina convencional acoplada a un generador eléctrico para producir electricidad.

Tras la combustión, los residuos se reducen aproximadamente en peso, un 75%. El 25% restante (cenizas volantes, escorias y los gases generados durante el proceso) reciben el tratamiento más adecuado. Este material orgánico incombustible se utiliza para obra pública, previa separación de metales presentes.



Fuente: SIRUSA. “Valorización energética de residuos urbanos”

Figura 4.22.- Aprovechamiento de la escoria como grava (Escograva)



Fuente: www.aeversu.org

Figura 4.23.- Combustión controlada para residuos

Realmente es una incineración clásica pero controlada, a 850°C durante al menos 2 segundos, de los rechazos de residuos urbanos de las plantas de tratamiento (también es adecuada para residuos industriales, peligrosos, agrícolas, etc.). En esta tecnología, la cámara de combustión está adaptada al tipo de combustible utilizado.

Igualmente se usan los tres tipos de hornos mencionados anteriormente: hornos tipo parrilla se suelen utilizar para rechazos con nula o escasa selección previa; los rotativos son más eficientes en el control de la combustión pero tienen limitaciones de tamaño; y los hornos de lecho fluidificado precisan combustibles procesados previamente con una granulometría homogénea.

La siguiente imagen detalla los procesos y balances de masas para la planta incineradora de Tarragona, con 150.000 t/año entrantes.



Fuente: SIRUSA. “Valorización energética de residuos urbanos”

Figura 4.24.- Balance en la incineradora de Tarragona

Algunas de las ventajas de la combustión controlada:

- No es necesario el pretratamiento del residuo, excepto en el caso de utilizar horno de lecho fluido
- La energía producida es considerada como renovable
- Se necesita poco espacio para estas instalaciones pudiendo ubicarlas incluso dentro de las ciudades

Entre los inconvenientes, decir que estos procesos generalmente se alimentan de los residuos tal y como se reciben o con ligeros acondicionamientos, lo que supone que, aunque el proceso sea útil desde el punto de vista de la gestión de residuos, no lo sea desde un punto de vista de generación eléctrica.

Además, concentrar los residuos en las grandes plantas de combustión tiene el inconveniente del transporte de dichos residuos desde las plantas de tratamiento.

Por estas razones son unas soluciones tecnológicas que requieren unas inversiones de capital muy elevadas.

En referencia a España, decir que en 2010 había 10 plantas incineradoras con recuperación de energía (combustión controlada). Destacar las siguientes:

- Palma de Mallorca, aprovecha la energía en forma de electricidad que es vertida a la red general. La tasa de incineración en Mallorca es la más alta de España debido a las ampliaciones que se hicieron en esta planta en el 2011. Dada la procedencia alemana de la gran parte de los residentes de esta isla, hubiese sido más lógico instalar el sistema de SDDR (Sistema de Depósito, Devolución y Retorno de envases). Sin embargo, se optó por la ampliación de las instalaciones de manera que actualmente es la planta de mayor capacidad en España.
- Zabalgardi (Vizcaya)
- Valdemingómez (Madrid)
- Mataró (Barcelona)
- San Adrià (Barcelona)

Las principales características de las plantas incineradoras españolas se recogen la Tabla 4.8.

Tabla 4.8.- Instalaciones de combustión controlada en España (2010)

Características de las plantas incineradoras en España
<ul style="list-style-type: none">• Distribuidas irregularmente en el territorio• Capacidad actual de tratamiento > 2,5 M toneladas• Cataluña es la comunidad autónoma con más instalaciones (Sant Adrià, Mataró, Gerona y Tarragona) y con una capacidad de tratamiento aproximada de 680.000 t/año• En Madrid se encuentra la planta de TIRMADRID en Valdemingómez (240.000 t/año)• En Galicia, SOGAMA gestiona la planta de Cerceda, con una capacidad aproximada de 500.000 t/año• Palma de Mallorca tiene la planta de TIRME, con una capacidad de 720.000 t/año• En Bilbao, la planta gestionada por ZABALGARBI tiene una capacidad de 230.000 t/año• Melilla incinera sus residuos en la planta de REMESA, de 40.000 t/año• Cantabria tiene una instalación en Meruelo, con capacidad para 100.000 t/año• La instalación de Asturias está en fase de proyecto, mientras que la de San Sebastián se encuentra en trámite administrativo

Fuente: SIRUSA. “Valorización energética de residuos urbanos”



Fuente: Incineradora de Tarragona

Figura 4.25.- Central de combustión controlada de Tarragona



Fuente: www.jmmag.com

Figura 4.26.- Planta de combustión controlada en Copenhague

A nivel europeo destaca la incineradora de Copenhague. La incineradora Amager Bakke (*Amager Resource Centre*, ARC) abastece de electricidad y calefacción a parte de los hogares en la ciudad de Copenhague. Consta con un innovador diseño arquitectónico y en su tejado se ha instalado una pista de esquí, atractivo del que carece la llana Dinamarca.

La chimenea permite emitir anillos de humo cada vez que se libera una tonelada de CO₂ de origen fósil. Estos anillos de humo se formarán debido a la condensación de agua en los gases de combustión a medida que avanzan a través del tubo de la chimenea que sirve como recordatorio de las consecuencias del consumo y es una manera de que la comunidad de Copenhague capte las emisiones de CO₂ de una manera directa. Por la noche, las luces de seguimiento de calor pueden utilizarse para colocar láseres en los anillos de humo.

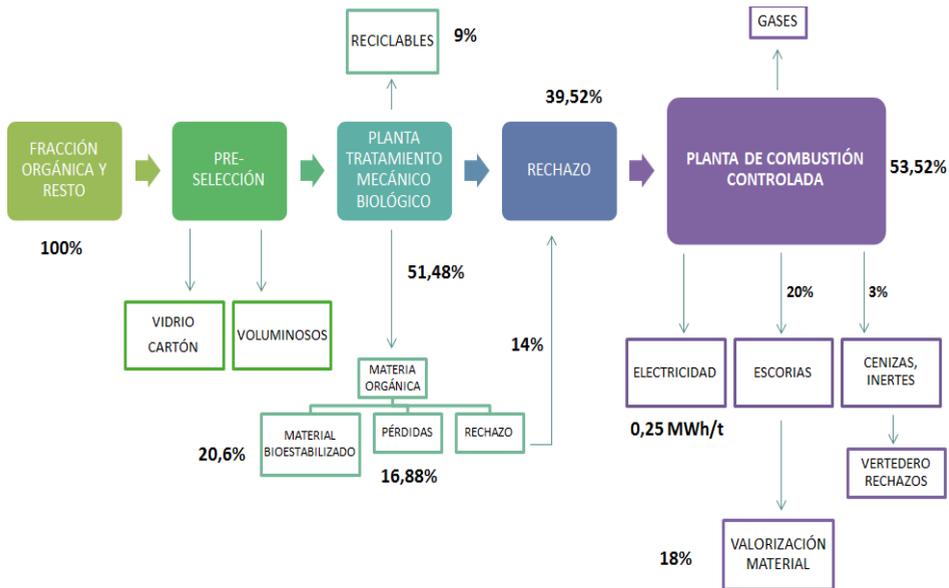
Resulta curioso que en Dinamarca se queman más residuos de los que se generan en países como la República Checa, Estonia, Bulgaria y Polonia. Esto se traduce en un porcentaje de incineración del 80% respecto a los residuos generados, consecuencia inmediata de que en todas las ciudades de Dinamarca exista una incineradora, la mayoría de ellas de propiedad pública.

Si los ciudadanos envían menos residuos a quemar (si reciclan menos), las incineradoras funcionarán por debajo de su capacidad nominal, reduciendo su eficiencia para generar energía y repercutiendo por tanto, en los gastos de gestión.

“La quema de residuos calienta los hogares daneses” ha sido el mantra que refleja la corriente principal en Dinamarca y en algunos otros países del norte de Europa. Los inviernos escandinavos largos, oscuros y fríos pueden justificar un mayor consumo de electricidad y esta ha sido la razón principal por la cual la generación de energía a partir de residuos ha sido pionera en estos países. Sin embargo, la quema de residuos es una forma extremadamente ineficiente de generar energía, que representa un obstáculo en Dinamarca para convertirse en un país carbono-neutral (la Unión Europea establece que a partir de 2020 todos los nuevos edificios tendrán que ser carbono-neutrales).

La paradoja es que en este país hay un exceso de capacidad de potencia instalada entre la incineración de residuos y las grandes instalaciones de combustión que hace que en los meses más fríos del año los aerogeneradores se detengan, a pesar de los fuertes vientos, para dar prioridad a las instalaciones térmicas.

Se puede hacer una estimación a grandes rasgos de las salidas esperadas para el proceso de combustión controlada como tecnología de tratamiento de los rechazos de una planta de tratamiento mecánico biológico. El siguiente esquema muestra estos resultados, para los que se ha supuesto que el porcentaje de escorias es del 20% y las cenizas volantes tendrán un peso del 3%.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.27.- Tecnologías de valorización energética de RSU: Combustión controlada

4.5.- Coincineración en procesos industriales a altas temperaturas

De acuerdo a lo indicado en el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, se define como instalación de coincineración “toda instalación fija o móvil cuya finalidad principal sea la generación de energía o la fabricación de productos materiales y que, o bien utilice residuos como combustible habitual o complementario, o bien los residuos reciban en ella tratamiento térmico para su eliminación mediante la incineración por oxidación de los residuos, así como por otros procesos de tratamiento térmico, si las sustancias resultantes del tratamiento se incineran a continuación, tales como pirólisis, gasificación y proceso de plasma”.

No obstante, si la coincineración tiene lugar de tal manera que el principal objetivo de la instalación no sea la generación de energía o fabricación de productos materiales, sino el tratamiento térmico de residuos, la instalación se considerará como una instalación de incineración.

Es un proceso que tiene potencial para mejorar la eficiencia de recuperación material y energética de la instalación pero, sin embargo, puede empeorar la situación desde el punto de vista medioambiental en cuanto a emisiones de contaminantes debido a la mezcla del combustible con residuos.

Supone una de las alternativas de aplicación directa para el CSR y CDR.

4.6.- Cogeneración a partir de residuos

La cogeneración consiste en la producción simultánea, y aprovechamiento, de dos o más tipos de energías diferentes; normalmente, energía eléctrica y energía térmica (calor).

A diferencia del proceso convencional de producción de electricidad en centrales térmicas, en el que se produce una gran cantidad de calor que no se aprovecha y que se libera al medio ambiente, en los sistemas de cogeneración, implícitamente, la planta de producción de energía está cerca del lugar de consumo de la misma.

La posibilidad de utilizar un residuo como materia prima para un proceso de producción de energía es muy atractiva tanto desde el punto de vista económico como desde el ambiental. Económicamente, porque se transforma un residuo (que lleva asociado un coste de gestión) en energía (que implica un ingreso económico). Y ambientalmente, porque es una vía de reducir la cantidad de residuos generados.

Así pues, las instalaciones idóneas para albergar un proceso de cogeneración deberán, por un lado, producir un residuo que sea combustible o pueda ser transformado en un

combustible. Y por el otro lado, deberán tener demanda de energía térmica y energía eléctrica. Estos requisitos se cumplen fácilmente en:

- Las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante proceso biológico, ya sean urbanas o industriales.

Los lodos generados, a través de un proceso de digestión anaerobia, son transformados en biogás (dióxido de carbono y metano) y lodos estabilizados, los cuales tienen aplicación agrícola como fertilizantes. El biogás, dependiendo de la riqueza relativa en metano que posea, tiene un mayor o menor poder calorífico, que en cualquier caso puede ser utilizado en un proceso de cogeneración.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, la energía térmica producida en el proceso de cogeneración se puede utilizar para mantener constante la temperatura del digestor anaerobio (a 36 °C) y para calentar previamente los lodos digeridos antes del proceso de deshidratación, y consecuentemente aumentar la eficacia de esta operación.

- Las explotaciones agrícolas y/o ganaderas, en las que se producen residuos biodegradables que también son sometidos a un tratamiento de digestión anaerobia, para reducir la cantidad de residuos, a la vez que se genera una considerable cantidad de biogás.

En este tipo de explotaciones, el calor que se desprende en la cogeneración se puede utilizar para mantener a una temperatura confortable las naves en las que se encuentran los animales, para mantener controlada la temperatura en los invernaderos y para disminuir la sequedad del residuo sólido final precalentándolo previamente a la deshidratación.

- Vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU), en los que, dadas las condiciones en las que se encuentran los residuos y su naturaleza orgánica, se produce un proceso natural de biometanización en el que se genera biogás.

En los vertederos de RSU, la energía térmica excedente de la cogeneración puede ser de gran utilidad en el proceso de tratamiento de los lixiviados generados, concretamente, para reducir la humedad del residuo final, incluso hasta llegar a secarlo, mediante un proceso de concentración-evaporación.

Para transformar el biogás en energía eléctrica y energía térmica existen dos tecnologías alternativas: los motores de combustión y las microturbinas.

Tabla 4.9.- Características de los motores de cogeneración y de las microturbinas

	Motor de combustión	Microturbina
Concentración mínima CH ₄	40%	30% (35% en arranque)
Eficiencia eléctrica	35-40%	25-30%
Eficiencia térmica	35-40% (dos fuentes)	55-60% (una fuente)
Rodamientos	Aceite	Aire. No lubricantes
Mantenimiento	Elevado: partes móviles	Bajo: una parte móvil
Emisiones	CO ₂ y NO _x elevadas	CO ₂ y NO _x bajas

Fuente: Elaboración propia

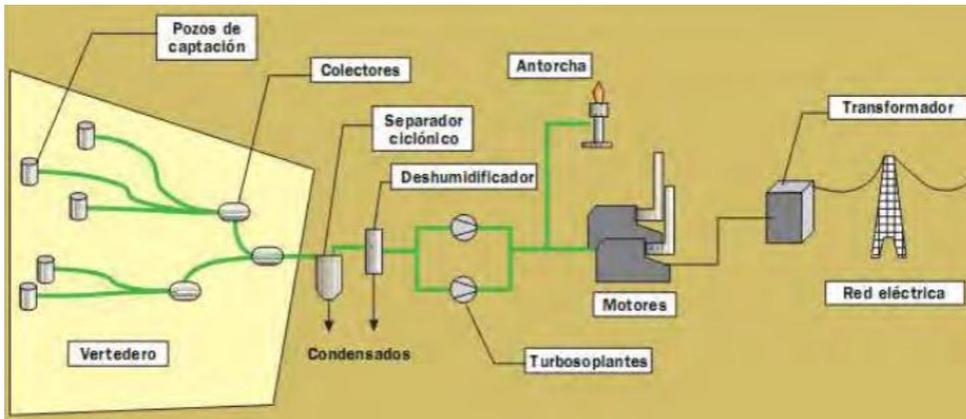
Así pues, mediante un proceso de cogeneración se puede reducir la cantidad de residuo generado a la vez que se produce energía eléctrica, que se puede autoconsumir o vender a través de la red general, y energía térmica, que se puede utilizar tanto dentro del propio proceso, como para reducir la humedad del residuo final mediante técnicas de evaporación-concentración. Tanto por la reducción de la cantidad de residuo como por la producción de energía, el proceso de cogeneración es completamente viable económicamente y el período de retorno de la inversión suele ser relativamente corto.

4.7.- Desgasificación de vertederos

Este proceso no tiene previsiones futuras, ya que los objetivos que se incluyen en el Real Decreto 1481/2001 limitan la cantidad de residuos biodegradables que se pueden depositar en vertederos. Si dichos objetivos se cumplen, no habrá suficiente materia orgánica fácilmente degradable en los vertederos para permitir el aprovechamiento energético del metano que se pudiera generar en los mismos.

Sin embargo, para vertederos antiguos la desgasificación es muy conveniente. El gas metano tiene un poder calorífico suficiente para su aprovechamiento energético. Además, si este gas se pusiera en contacto con la atmósfera repercutiría negativamente en el efecto invernadero.

El proceso de desgasificación del vertedero simplemente consiste en depurar el gas para eliminar las impurezas que pudieran ocasionar daños en los equipos de valorización, y seguidamente inyectar el gas en motores de combustión interna acoplados a los alternadores que generan la energía eléctrica. También existe la posibilidad de, una vez ajustadas las características del gas, inyectarlo directamente a las redes de distribución de gas o su utilización como combustible gaseoso, por ejemplo, en flotas municipales de camiones y autobuses.



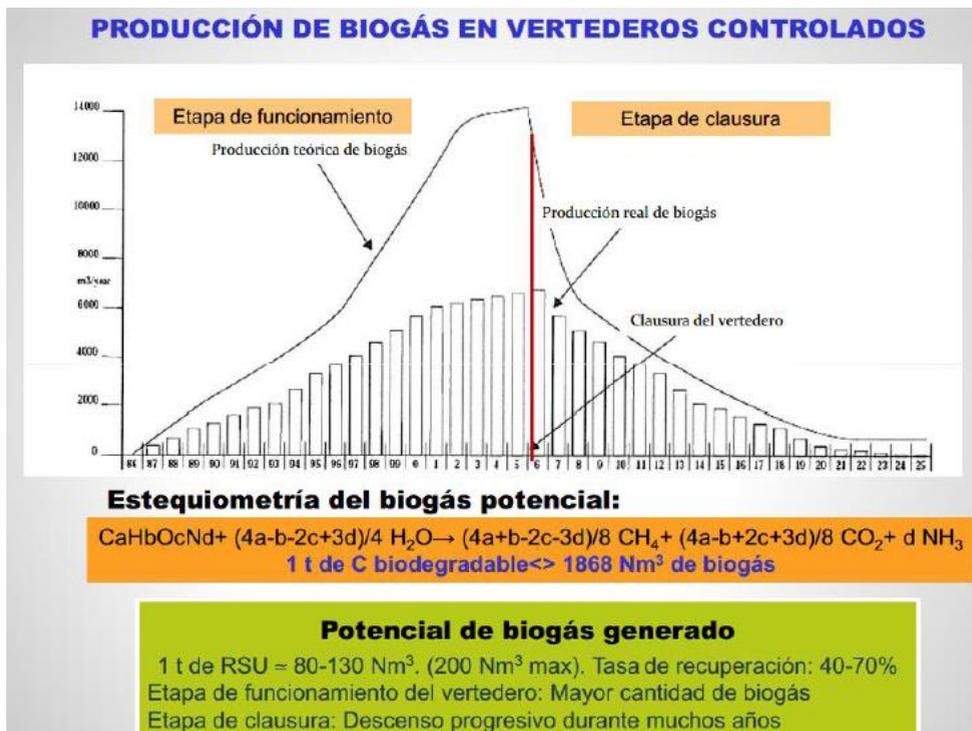
Fuente: Martínez y Cuenca, 2014

Figura 4.28.- Planta de extracción, tratamiento y aprovechamiento energético de biogás en vertedero

La cantidad de biogás producido y el tiempo empleado para ello dependen de factores como la composición del residuo, temperatura, contenido en humedad del residuo, pH, operaciones de relleno, etc.

Como norma general, los residuos con contenido en materia orgánica (papel, cartón, restos vegetales o de comida, textiles naturales, etc.) del 50% producirán por cada tonelada de residuos 200 Nm³ de biogás hasta su total degradación, pero esto es en el mejor de los casos.

En términos medios, la producción de biogás y rendimientos esperados son los siguientes:



Fuente: Martínez y Cuenca, 2014

Figura 4.29.- Producción de biogás en vertederos controlados

A modo informativo, la Tabla 4.10 muestra las equivalencias energéticas del biogás:

Tabla 4.10.- Equivalencias energéticas del biogás

Equivalencias energéticas	
1 m ³ biogás 70% CH ₄ + 30% CO ₂ 6.000 Kcal	0,8 l gasolina
	0,6 m ³ gas natural
	6,8 KWh electricidad
	1,5 kg madera
	0,71 l fuel-oil
	0,3 kg carbón
	1,2 l alcohol combustible

Fuente: Elaborada a partir de Martínez y Cuenca, 2014

4.8.- Procesos basados en la generación de plasma

Se puede definir el plasma como un gas ionizado eléctricamente neutro, un equilibrio entre partículas cargadas y neutras. Se conoce como el cuarto estado de la materia.

Una de las maneras más extendidas en la generación de plasma consiste en la formación de un arco eléctrico por el que se hace pasar una corriente continua entre dos electrodos, ánodo y cátodo. De este modo, el aire que existe entre ambos electrodos se calienta alcanzando temperaturas muy altas, si en este momento se introduce un gas inerte (normalmente argón o vapor de agua), se crea una antorcha de plasma que puede alcanzar temperaturas superiores a 10.000°C.

Respecto a su incorporación como sistema de tratamiento de residuos, el proceso del plasma irá asociado a otras tecnologías como puede ser la gasificación, la pirólisis, etc. para que realmente se convierta en un instrumento de valorización energética de residuos.

El proceso necesita de un aporte externo de energía con valores de 10-20 kW/t de residuo.

4.9.- Gasificación

4.9.1.- Evolución histórica y perspectivas

La gasificación es una tecnología usada desde hace más de doscientos años y fue extensivamente utilizada para la producción de gas de ciudad desde finales del siglo XIX y durante el siglo XX.

El verdadero impulso para el desarrollo de la tecnología de los gasificadores fue la escasez de gasolina durante la Segunda Guerra Mundial. Durante los años del conflicto, Francia tenía más de 60.000 coches alimentados con carbón vegetal y Suecia tenía cerca de 75.000 autobuses, coches, camiones y barcos equipados con gasificadores que gasificaban madera.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la abundancia de gasolina y gasóleo relativamente baratos condenó al olvido a la tecnología de los gasificadores para su uso en automoción. La utilización de la gasificación para producción de gas ciudad o para la automoción ha desaparecido prácticamente en la medida que otras fuentes de energía, como el petróleo o el gas natural, han satisfecho esta demanda de forma más ventajosa y económica.

No obstante, las nuevas aplicaciones que han ido apareciendo en los sectores industriales han forzado a los suministradores a obtener nuevos desarrollos tecnológicos para seguir siendo competitivos. Estos desarrollos han mantenido la

gasificación como un proceso industrial importante durante muchos años. La aparición de regulaciones medioambientales cada vez más restrictivas, junto con las presiones y oportunidades para el uso eficiente de fuentes energéticas de bajo coste, está promoviendo en la actualidad la investigación y el desarrollo de soluciones tecnológicas apropiadas. Estos avances tecnológicos son los que impulsarán el proceso de la gasificación durante el siglo XXI.

A finales del siglo XX, la gasificación se había desplegado ampliamente por todo el mundo. En 1999 existían 128 plantas, con 366 gasificadores en operación. La mayoría de estas plantas corresponden a países asiáticos con necesidades de ampliar su producción eléctrica debido a su desarrollo económico. El segundo área de importancia de crecimiento corresponde a Europa Occidental, seguida de Norteamérica, donde las refinerías de crudo necesitarán utilizar plenamente sus fuentes de alimentación disponibles mientras reducen su producción de fuelóleo.

Actualmente, la principal materia prima usada en las plantas de gasificación es el carbón y los residuos de petróleo, a los que corresponde más del 70% del gas de síntesis producido, seguido por el gas natural con un 20% aproximadamente de la capacidad actual. En este último caso, se utiliza exclusivamente como materia prima para la obtención de productos químicos. En los próximos años el crecimiento esperado corresponderá al uso de carbones de bajo rango, residuos de petróleo y otro tipo de residuos, como los RSU.

4.10.2.- Gasificación tradicional

La gasificación es un proceso de oxidación parcial de la materia en presencia de cantidades de oxígeno inferiores a las requeridas estequiométricamente.

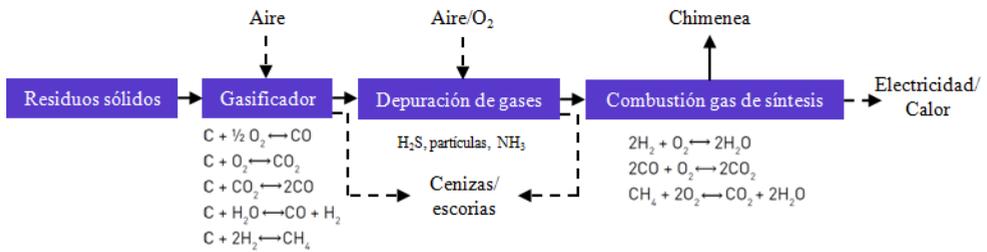
En términos generales, las características para el proceso de gasificación de una corriente de residuos, son las siguientes:

- Se usa aire, oxígeno o vapor como fuente de oxígeno, y en ocasiones como portador en la eliminación de los productos de reacción.
- La temperatura usual de trabajo es superior a los 750 °C.
- Las reacciones químicas producidas en este proceso son de dos tipos:
 - De cracking molecular: la temperatura provoca la rotura de los enlaces moleculares más débiles originando moléculas de menor tamaño, generalmente hidrocarburos volátiles.
 - De reformado de gases: estas reacciones son específicas de los procesos de gasificación y en ellas suele intervenir el vapor de agua como reactivo.

Como resultado del proceso de gasificación se obtiene un gas de síntesis o syngás y un residuo de diversa composición.

- Gas de síntesis compuesto principalmente por CO, H₂, CO₂, N₂ (si se emplea aire como gasificante) y CH₄ en menor proporción. Como productos secundarios se encuentran alquitranes, compuestos halogenados y partículas. Este gas podrá ser valorizado energéticamente por producción eléctrica mediante ciclos combinados o simples, turbinas de gas o motores de combustión interna.
- Residuo sólido, compuesto por materiales no combustibles e inertes presentes en el residuo alimentado; generalmente contiene parte del carbono sin gasificar. Las características de este residuo son similares a las escorias de los hornos en las plantas de incineración.

Al igual que la incineración, este proceso consiste en una reacción exotérmica.



Fuente: IDAE

Figura 4.30.- Esquema del proceso de gasificación

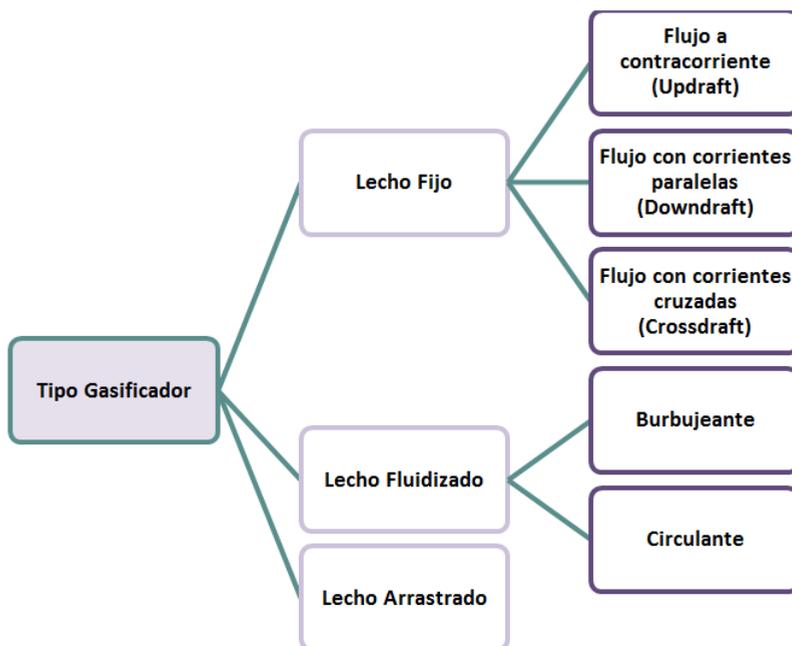
La cantidad, composición y poder calorífico de los gases procedentes de la gasificación dependerá de la composición de los residuos, de la temperatura y de las cantidades de aire y vapor utilizadas.

Se requiere un pretratamiento del residuo antes de introducirlo en el reactor, que podrá ser de varios tipos:

- Gasificador de lecho fijo: con flujo a contracorriente, en paralelo o con corrientes cruzadas.
- Gasificador de lecho fluidizado: que puede ser burbujeante o circulante.
- Gasificador de lecho de arrastre

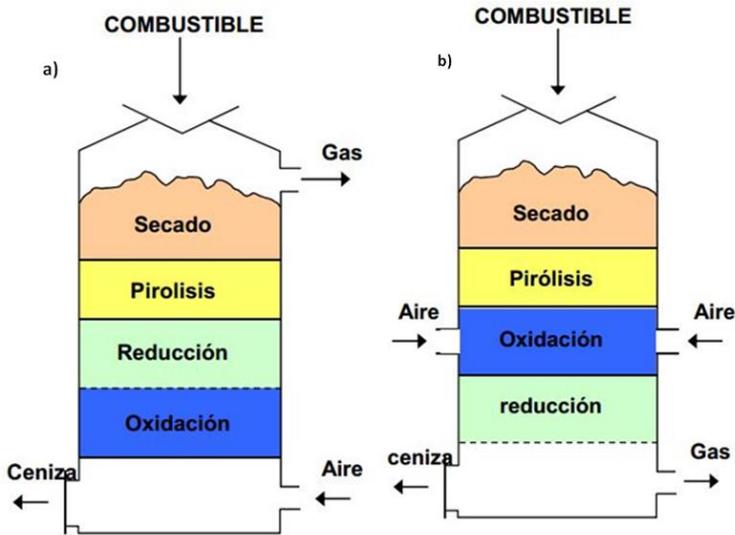
Con esta tecnología se reduce de forma considerable la cantidad sólida del residuo y sólo permanecerán los inertes que entren al gasificador.

El syngás combustible tiene un alto porcentaje de agua, si se quema rápidamente no se producirán alquitranes que se formarían al enfriarse, lo cual sería un problema para las instalaciones. Por otro lado, si el syngás se depura se podría utilizar en procesos industriales en un lugar distinto al de creación.



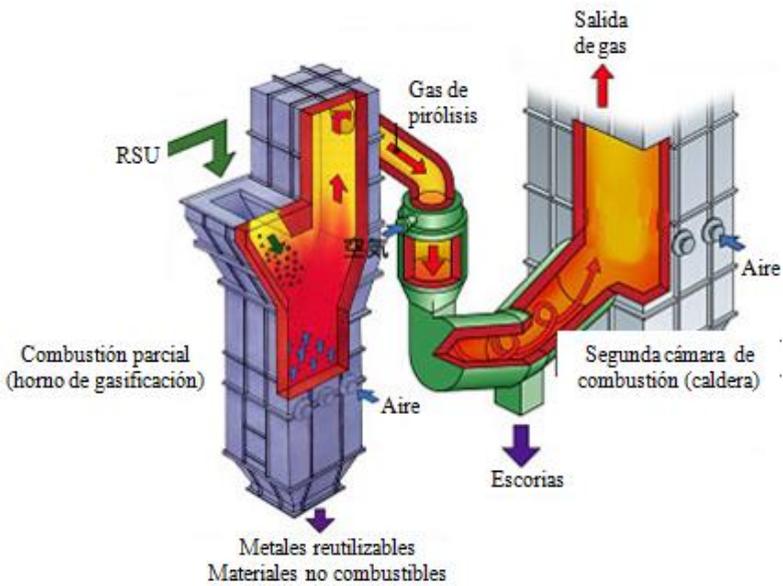
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.31.- Tipos de gasificadores



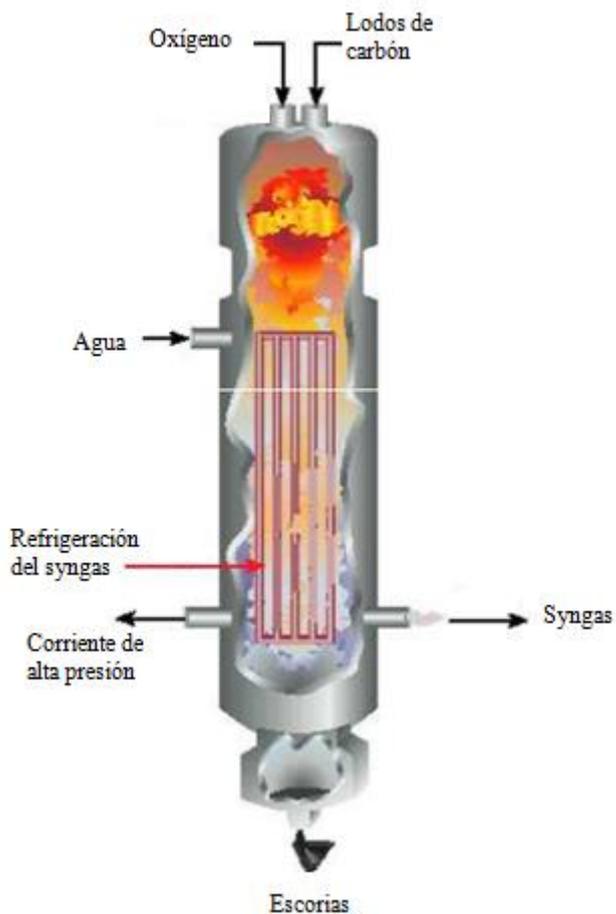
Fuente: Gómez Barea, 2013

Figura 4.32.- a) Gasificador de Lecho Fijo a contracorriente y b) Gasificador de lecho fijo con corrientes paralelas



Fuente: www.khi.co.jp

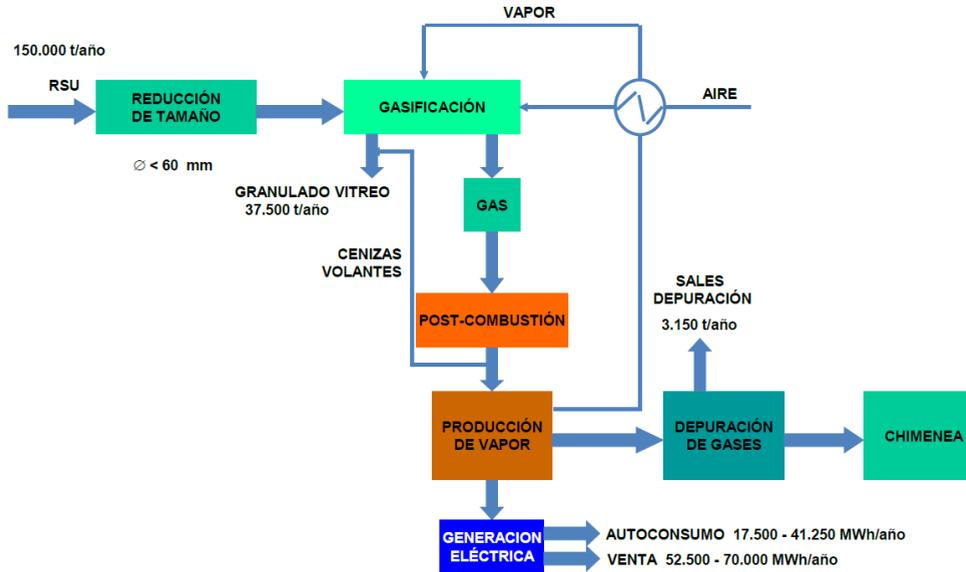
Figura 4.33.- Gasificador de lecho fluidizado burbujeante



Fuente: Gómez Barea, 2013

Figura 4.34.- Gasificador de lecho de arrastre

En la Figura 4.33 se puede ver un balance de masas para el proceso de gasificación en el caso de una planta con 150.000 t/año.



Fuente: SIRUSA. “Valorización energética de residuos urbanos”

Figura 4.35.- Ejemplo balance de masas gasificación

4.10.3.- Gasificación de residuos integrada en ciclo combinado (GICC)

Como se ha comentado en el apartado anterior, el ciclo combinado es un modo de valorizar energéticamente la energía obtenida por gasificación de residuos, a partir del gas de síntesis.

El principio de funcionamiento se basa en utilizar el syngás para impulsar una turbina de gas cuyo calor residual pasa a un sistema de turbina de vapor (ciclo combinado de turbina de gas).

Tabla 4.11.- Propiedades combustibles

	Carbón tipo (Illinois #6)	Carbón Puertollano	Coque de petróleo	Paja de cebada	Astillas de olivo	Harinas de animales	RSU
Humedad (% peso)	12,2	10	6,52	13,8	35,4	-	1,52
Volátiles (% peso)	35	23,13	11,16	75	78,1	63,7	38,6
Cenizas (% peso)	11	41,1	0,26	5,7	3	25,5	56,63
Azufre (% peso)	3,28	0,91	5,5	0,09	0,06	0,4	0,2
Carbono (% peso)	61	36,72	82,21	45,6	48,9	39,5	22,49
Hidrógeno (% peso)	4,25	2,48	3,11	5,6	6	6,2	2,49
Nitrógeno (% peso)	1,25	0,81	1,9	0,5	0,7	7,8	1,41
Cloruros (mg/kg)	700	-	-	4.720	350	2.560	7.150
PCS (MJ/kg)	25,5	13,58	32,65	20,06	26,96	18,91	9,95

Fuente: Elaboración propia a partir de Treviño, 2003

En España, se puede hacer referencia a la planta ELCOGAS, en Puertollano. Se trata de la primera instalación con tecnología de GICC en nuestro país.

Funciona empleando el carbón como combustible, sin embargo, la cogasificación RSU-carbón ofrece una alternativa flexible de utilización es este tipo de centrales, con los beneficios añadidos de alta eficiencia energética y bajas emisiones de gases. Por estas razones, se han llevado a cabo ensayos experimentales usando como combustibles la biomasa y RSU.

Tabla 4.12.- Experiencia en centrales de GICC

Propiedad para combustión/gasificación	Experiencia en centrales GICC
<p>Características muy variables en función del tipo de recursos. En general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poder calorífico medio-bajo • Ausencia de azufre • Alto contenido en elementos alcalinos, problemas de deposición de cenizas • En el caso de ciertos tipos de biomasa, se requiere un acondicionamiento previo por la elevada humedad <p>Estas características hacen que en los gasificadores de lecho arrastrado sea preferible la cogasificación.</p> <p>Son más adecuados para utilizar biomasa como combustible principal los gasificadores de lecho fijo y fluidizado</p>	<p style="text-align: center;">Biomasa</p> <ul style="list-style-type: none"> • ARBRE (Yorkshire, UK), 8 MW, residuos forestales • Tampa (Florida, USA) 1% de ramas de eucalipto <p style="text-align: center;">Residuos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ELCOGAS (Puertollano, España), pruebas con harinas cárnicas en proporciones 1-4% • SVZ-Schwarze Pumpe (Alemania), el combustible habitual es una mezcla al 50% de lignito y residuos sólidos diversos (caucho, plásticos, fangos de depuradora) • NOUN (Buggenum, Holanda), se consumen residuos de granjas avícolas y fangos de depuradoras, con expectativas de llegar al 20%

Fuente: Elaboración propia a partir de Treviño, 2003

4.10.4.- Gasificación con reactor horizontal giratorio

Este nuevo concepto de gasificación ha sido patentado por el grupo GreenE², y a pesar de mantener las bases de la gasificación tradicional, introduce nuevas técnicas en el reactor y en el tratamiento del syngás producto de la misma (en este caso, la patente es de Dimasa Grupo³), todo ello con objetivos de aumentar la vida útil de los equipos y conseguir mejores resultados en esta técnica.

Si además se consideran líneas de tratamiento mecánico de RSU previas a la entrada de los equipos, y que permitan acondicionar los residuos orgánicos conforme a

² Empresa dedicada al diseño, fabricación, instalación y puesta en marcha de plantas de tratamiento de residuos orgánicos y biomasa, para su eliminación y valorización energética. Elche, Alicante (España).

³ Especialistas en tratamiento de aguas y residuos, energías renovables y eficiencia energética. Diseño de procesos para tratamiento de lixiviados y limpieza de biogás de última generación. Barcelona (España).

características y composición específicas para esta tecnología (Grupo Leblán⁴), estaremos ante una solución que elimina el concepto de vertedero de rechazos actual, o planta de Residuo Cero, consecuencia de que el porcentaje de cenizas obtenido no supera el 10%.

El rendimiento energético con esta técnica varía entre el 75 y el 80%, dependiendo fundamentalmente de la composición, poder calorífico, humedad y contenido en inertes del residuo a tratar, por lo que es una instalación rentable desde 1 t/hora.



Fuente: Dimasa Grupo

Figura 4.37.- Planta Residuo Cero

Las fracciones susceptibles de ser gasificadas, son:

- Plásticos
- Madera
- Papel y cartón
- Textil
- Materia Orgánica

⁴ Se dedica al suministro de instalaciones, tecnología y maquinaria destinada a los sectores industriales de hormigón, áridos, tratamiento de residuos y graneles varios. La Puebla de Alfindén, Zaragoza (España).

La tecnología de gasificación GreenE se caracteriza por disponer de:

- Horno giratorio: utilizable para cualquier tipo de residuo orgánico
- Sistema avanzado de limpieza del syngás (cero alquitranes)
- Sistema de extracción de cenizas que permite trabajar con elevados contenidos de la misma (>10%)
- Fácil mantenimiento del sistema de filtrado. No se generan aguas contaminantes.
- Alta calidad y durabilidad: diseñados para trabajar 25 años a altas temperaturas.
- Analizador de gases en continuo.
- Control de 7 zonas diferentes en el proceso global de gasificación.

El cilíndrico horizontal y rotatorio, en cuyo interior unos elementos permiten separar las diferentes fases del proceso, está compuesto por 7 zonas en las que se producen separadamente y de forma controlada las reacciones del proceso de gasificación. En cada una de dichas zonas, unos agitadores homogenizan los productos en proceso.

Los procesos que se llevan a cabo en el interior del gasificador son:

- Secado (Proceso Endotérmico): evaporación de la humedad contenida en la materia.
- Pirólisis (Proceso Endotérmico): descomposición térmica en ausencia de oxígeno. Ocurre entre 300 a 600°C. Se desprenden los componentes más volátiles. Debido a que la cantidad de oxígeno en el interior del reactor es insuficiente, algunos de estos volátiles no se podrán destruir térmicamente, dando lugar a alquitranes no deseados (TAR).
- Combustión parcial (Proceso Exotérmico): oxidación de parte del carbono (CHAR) que ha quedado tras la pirólisis. Transcurre entre 600 y 1.100°C.
- Gasificación (Proceso Endotérmico): Reacción del carbono final (CHAR) con el CO₂, H₂ y H₂O con producción de gases combustibles fundamentalmente CO, H₂ y CH₄.

La combustión parcial aporta la energía necesaria para llevar a cabo el resto de procesos los cuales son endotérmicos. Es importante controlar la relación combustible/comburente para conseguir que el calor aportado por el proceso exotérmico sea igual al invertido en los procesos endotérmicos, manteniéndose así un equilibrio térmico que recibe el nombre de autotérmico.

El exterior del reactor se encuentra cubierto por una camisa que permite controlar y equilibrar las fases endotérmicas y exotérmicas del reactor.

En los extremos del reactor unos cuellos cilíndricos permiten la ubicación de unas tapas fijas, por las que se introducen todos los componentes del proceso, permitiendo la separación entre cada uno de ellos. En dichos cuellos, unas vías de rodadura que van apoyadas sobre rodillos de tracción permiten una rotación lenta para la homogenización del proceso y el avance entre cada una de las zonas de reacción.

En el extremo final del cilindro unas aberturas permiten la evacuación superior de los gases producidos y la inferior de las cenizas o productos sólidos no reaccionados. La canalización de dichos gases se lleva a cabo a través de una campana de extracción envolvente por cuya parte superior se extraen los gases que son canalizados a la fase de separación de partículas finas. Dicha separación se realiza a través de unos separadores multiciclones especiales para altas temperaturas y de alto rendimiento.

Posteriormente los gases son conducidos a un intercambiador, donde se produce un primer enfriamiento, por cesión de calor al aire atmosférico que se utiliza como comburente, para que al ser calentado no distorsione la reacción.



Fuente: Dimasa Grupo

Figura 4.38.- Planta piloto de gasificación con cilindro horizontal

A diferencia de la incineración, que trabaja en exceso de oxígeno, en la gasificación se emplea tan solo el 25-30% del oxígeno necesario para la combustión completa de la materia orgánica, lo cual conlleva una serie de ventajas medioambientales.

En la gasificación, la energía química contenida en la materia orgánica se convierte en energía química contenida en un gas.

Este gas se puede utilizar como combustible para la obtención de energía en motores, turbinas de gas o calderas.

Por otro lado, las cenizas pueden considerarse un residuo o bien valorizarlas, usándolas como material de construcción, fertilizante, en la fabricación de vidrio, etc.

Así pues, es una técnica eficaz para reducir el volumen de residuos sólidos y recuperar su energía, convirtiéndose en una de las vías más adecuadas para la obtención de energía eléctrica y térmica en el marco del desarrollo sostenible.

Como se ha dicho, son susceptibles de ser gasificados aquellos materiales con un alto contenido en carbono (cualquier tipo de carbón, biomasa, residuos orgánicos y residuos carbonosos).

El gas de síntesis resultante del proceso contiene:

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de carbono (CO₂)
- Hidrógeno (H₂)
- Metano (CH₄)
- Pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, agua (H₂O), nitrógeno (N₂), etc.
- Diversos contaminantes como pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites.

Los gases CO, H₂ y CH₄ confieren poder calorífico al gas, ya que pueden reaccionar con oxígeno en un motor de combustión, una caldera o una turbina de gas.

4.10.- Gasificación y vitrificación de RSU por plasma con optimización de la producción eléctrica

Se trata de un desarrollo tecnológico que forma parte de los trabajos que Acciona realiza en el ámbito de la valorización energética de los RSU.

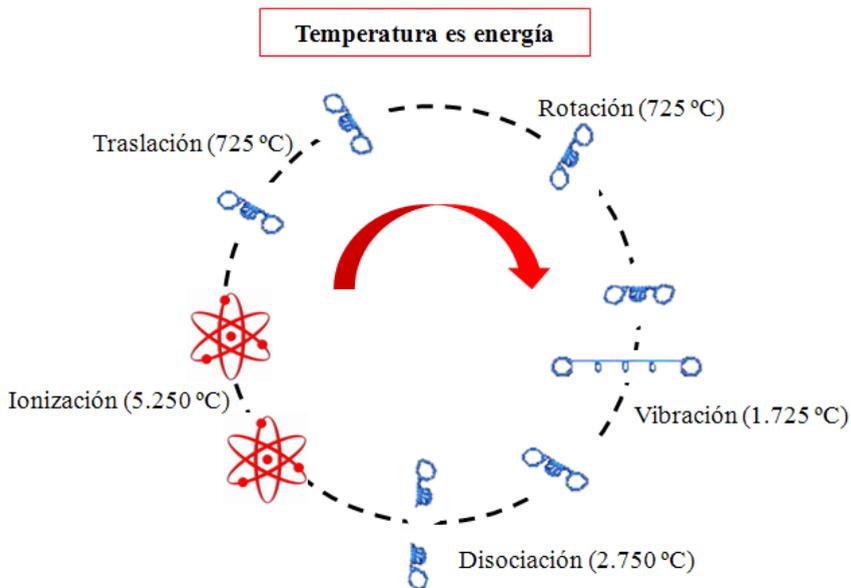
La gasificación de residuos a altas temperaturas combinada con sistemas de producción de energía de última generación es una solución sostenible ya que es aplicable a todo

tipo de residuos, permite a largo plazo alcanzar el objetivo de vertedero cero, no ocasiona impacto ambiental, permite inertizar total y definitivamente los residuos más contaminantes, etc.

Gasificación y vitrificación son dos procesos termodinámicos mediante los cuales, toda la sustancia sólida o líquida a la que, en una atmósfera reductora, se le aporta una cantidad de energía suficiente como para romper los enlaces moleculares, se transforma o bien en un gas de síntesis orgánico de bajo poder calorífico o bien en una lava fundida que al enfriarse se transforma en un producto vítreo inerte (*Slag*).

La Gasificación convencional al trabajar a temperaturas que en ningún caso superan los 1.700°C es incompleta y puede dar lugar a subproductos residuales (alquitranes, escorias y cenizas).

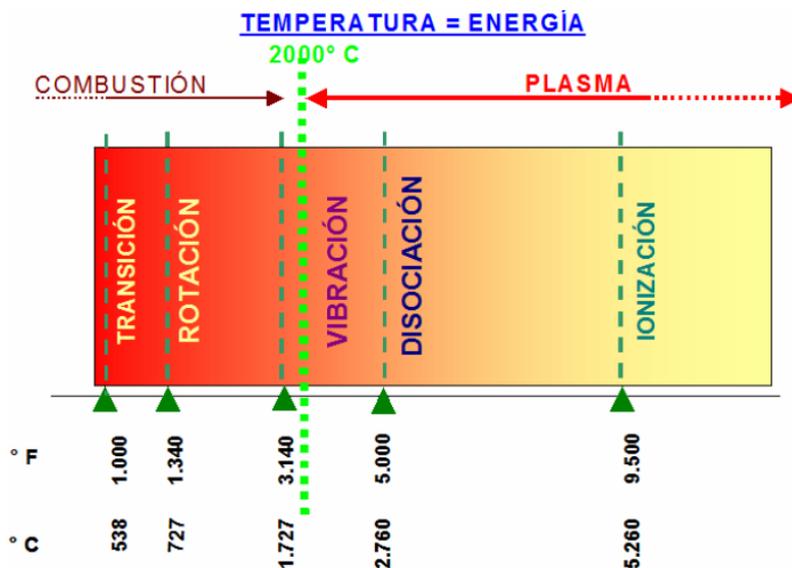
Con la gasificación a alta temperatura se consigue la disociación molecular completa y, consecuentemente, se evita la presencia de compuestos orgánicos semivolátiles (SVOC) y la formación de dioxinas y furanos. La alta temperatura necesaria se consigue mediante antorchas de plasma.



Fuente: Elaboración propia a partir de ACCIONA

Figura 4.39.- Creación del gas de plasma

El plasma es un gas ionizado que genera temperaturas extremas (hasta 14.000°C) mientras que la antorcha de plasma es un equipo industrial que permite producir gas ionizado a altas temperaturas mediante la generación controlada de un arco voltaico.



Fuente: ACCIONA

Figura 4.40.- Proceso de generación del plasma

Las características esenciales de esta tecnología son las siguientes:

- Altas temperaturas que permiten la disociación definitiva e irreversible de las estructuras moleculares en sus compuestos básicos.

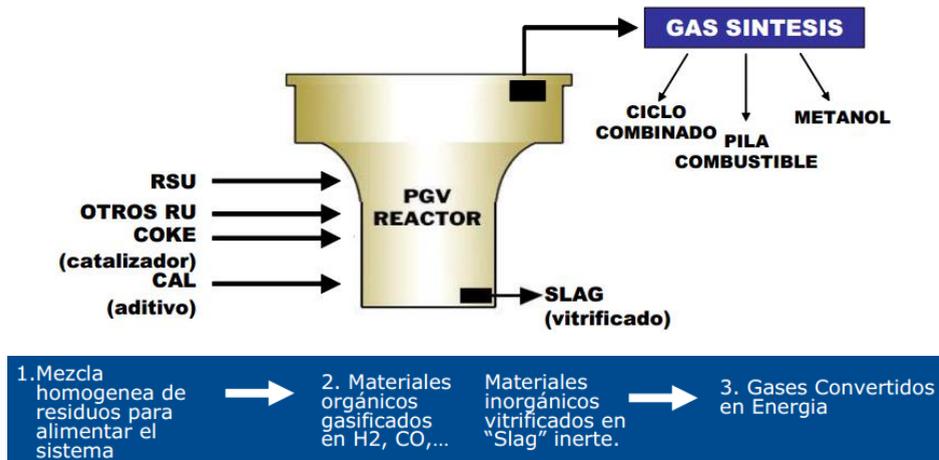
El proceso de disociación molecular se caracteriza por las reacciones de Cracking térmico (por el que las moléculas complejas son disociadas en moléculas más ligeras formando gases de hidrocarburos e hidrógeno), Oxidación parcial (que favorece la formación del monóxido de carbono y pequeñas cantidades de dióxido de carbono y agua por lo que es indispensable controlar la entrada de oxígeno al reactor para que la formación de estos dos últimos compuestos no sea significativa) y por último una Reformación (que ensambla los elementos primarios en nuevas moléculas).

La destrucción de compuestos tóxicos, incluso semivolátiles (SVOC), evita la formación de dioxinas y furanos.

La fusión de las moléculas inorgánicas genera lava de tipo volcánico que al enfriarse forma un vidrio basáltico inerte, no tóxico y valorizable materialmente que deja atrapado en la red cristalina interna los compuestos peligrosos.

- Conservación máxima de la energía contenida en los residuos.
- El balance energético resultante es positivo.
- Ausencia de subproductos potencialmente tóxicos o dañinos.

El resultado es que todos los residuos inorgánicos se vitrifican a partir de la lava producida por el plasma. Los residuos orgánicos son reducidos completamente a gas y cristal vitrificado (*Slag*), que tiene mejores prestaciones que el vidrio reciclado.

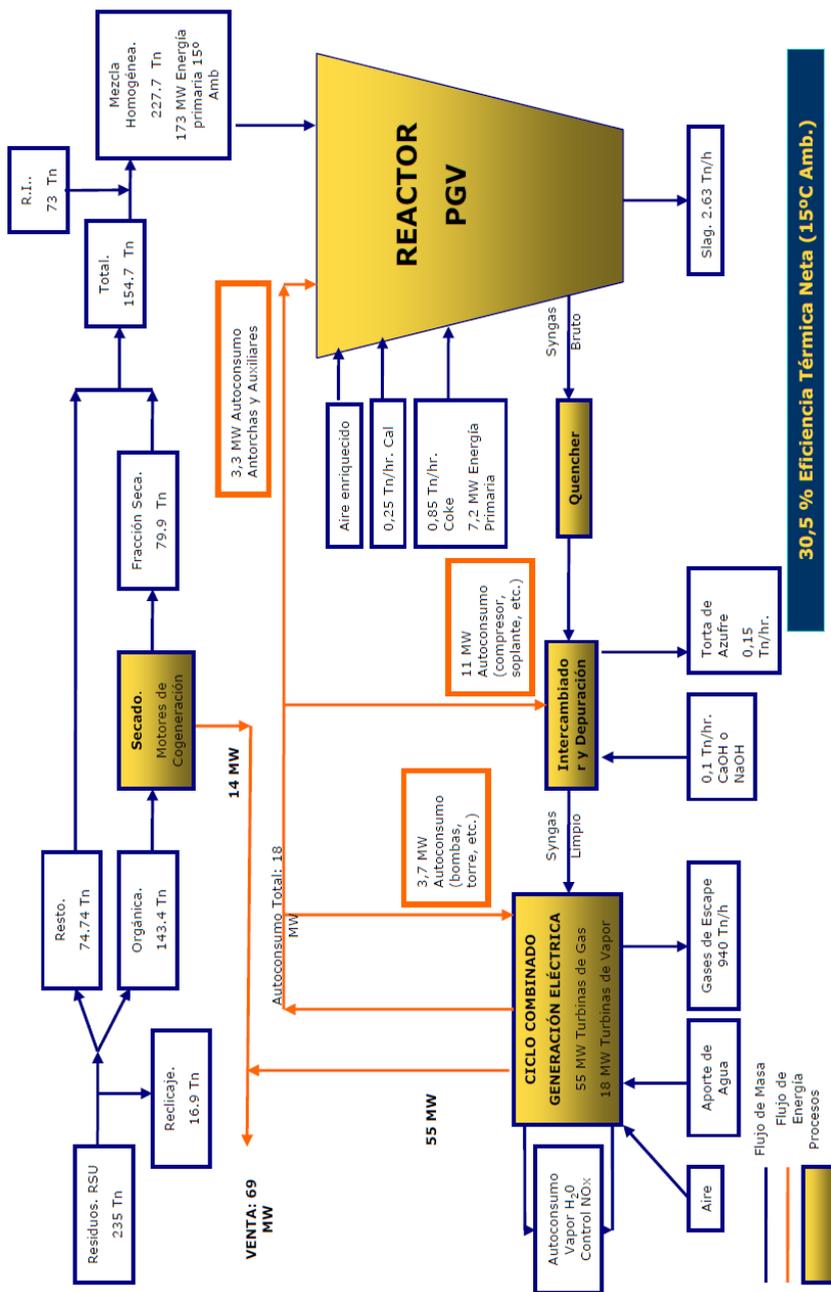


Fuente: ACCIONA

Figura 4.41.- Proceso patentado por Acciona de PGV

Algunas de sus ventajas son:

- Ausencia de dioxinas, cenizas o escorias.
- Emisiones gaseosas de turbina < límites Normativa europea.
- Es aplicable a todo tipo de residuos (RSU, industriales, tóxicos, neumáticos, etc.) y permitirá en un futuro alcanzar el objetivo de “vertedero cero”.
- Producción neta de energía: 1.400-2.400 kWh/t (75% de generación bruta).
- Alta eficiencia energética (entre 1,5 y 2,5 veces superior a las incineradoras de última generación).

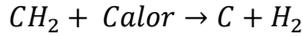


Fuente: Acciona

Figura 4.42.- Balance de masas general para tecnología PGV

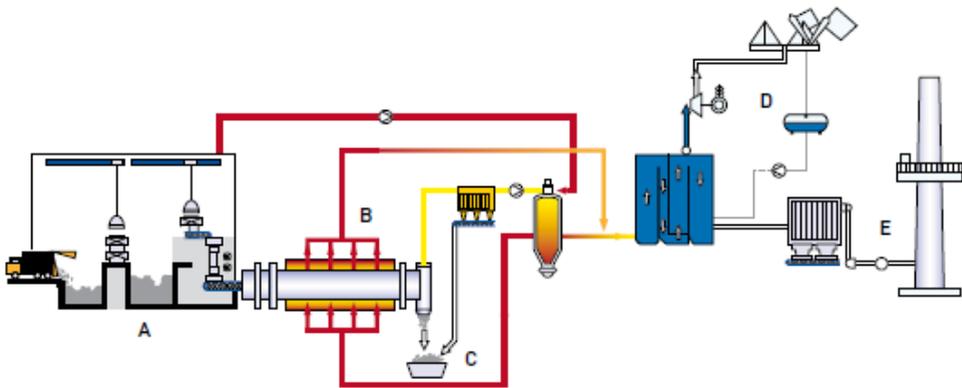
4.11.- Pirólisis

Consiste en someter a los residuos a temperaturas de 800-1.100 °C para producir una reacción de combustión en ausencia de oxígeno.



Fuente: Guía de valorización energética de residuos FENERCOM

Figura 4.43.- Reacciones de pirólisis



- A- Zona de descarga y trituración
- B- Pirólisis
- C- Recogida y selección de residuos procedentes del sistema
- D- Recuperación de energía
- E- Depuración de gases

Fuente: WasteGen

Figura 4.44.- Diagrama de una planta de pirólisis

El producto resultante de la reacción será un gas (syngás) con un poder calorífico variable entre 10.000 a 20.000 KJ/Nm³, y compuesto por de metano, hidrógeno, monóxido de carbono, nitrógeno. Además, en la pirólisis se obtienen líquidos y un residuo inerte “char”.

Según la temperatura y el tiempo de reacción, el producto final se desplaza preferentemente hacia una u otra de las fases (sólida, líquida o gaseosa). Otros parámetros que pueden influir son el tipo de residuo, su estado de disgregación, la presión, etc.

Esta técnica es de aplicación a la biomasa pero más dificultosa para los residuos urbanos por la aparición de compuestos orgánicos complejos en las diferentes fases, dificultando el aprovechamiento energético. No está muy extendida ya que necesita un mayor desarrollo tecnológico para su aplicación en el aprovechamiento energético a gran escala. Ocurre lo mismo con la termólisis. Además, la heterogeneidad del residuo genera tres subproductos, también heterogéneos en su calidad (gases combustibles, líquido combustible y sólido combustible) y alguno de ellos (el sólido), está contaminado.

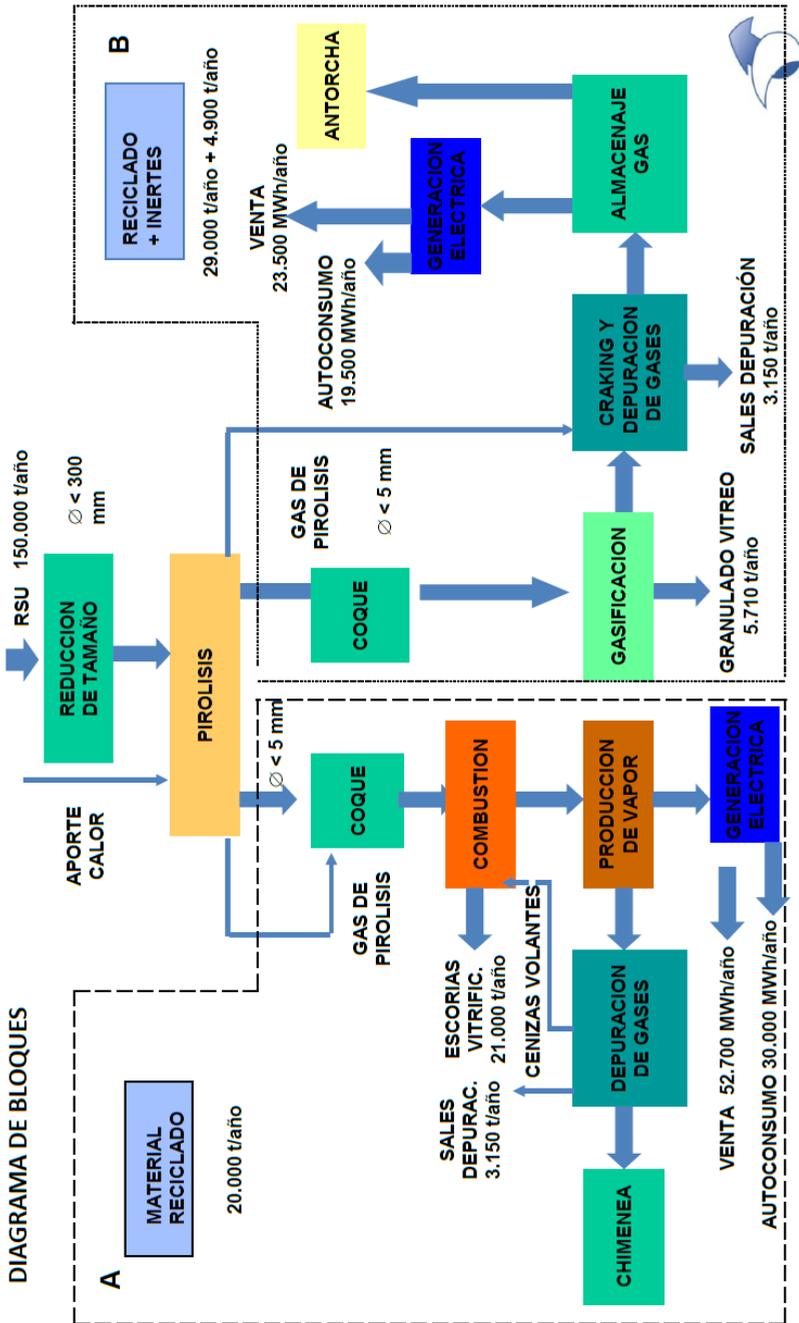
Algunos ejemplos de plantas de pirólisis las encontramos en Francia y Japón con capacidades entre 50.000 a 100.000 t/año.

El producto residual se destina a vertedero o incineración mientras que los residuos líquidos deben ser tratados en plantas especiales.

En la Figura 4.43 se muestra un esquema de procesos para esta tecnología particularizando para unas entradas de 150.000 t/año

El principal problema que presenta la pirólisis en su utilización para producir biocombustibles líquidos es la necesidad de empleo de catalizadores para obtener un mayor rendimiento en el proceso de refinado necesario para eliminar parte del oxígeno que se encuentra en la fase líquida obtenida del proceso (bioaceite) y obtener la gasolina “verde”, lo cual encarece el sistema enormemente.

La mejora denominada Pirólisis Reactiva de Gas Residual (TPGR), desarrollada en 2013 por científicos del grupo ARS en USA, consiste en reciclar los gases de salida del proceso en la pirólisis rápida recirculándolos y usándolos como gas de fluidización, replazando al nitrógeno. Esta mejora implica una reducción de los niveles de oxígeno sin la necesidad de usar catalizadores.



Fuente: SIRUSA. "Valorización energética de residuos urbanos"

Figura 4.45.- Esquema de procesos en la tecnología de pirolisis

4.12.- Termólisis

El residuo se somete a temperaturas cercanas a los 400 °C en un reactor en total ausencia de oxígeno.

En el reactor se produce una destilación de los residuos y a su vez se genera un gas combustible y un producto carbonado (coque), que puede utilizarse como carbón activo o valorizarse energéticamente como combustible, por ejemplo, en hornos de plantas cementeras.

Capítulo 5

Los vertederos de RSU

5.1.- Introducción

Tradicionalmente, la eliminación de residuos en vertedero ha constituido un procedimiento muy utilizado y recurrido, de fácil explotación y en la mayoría de los casos utilizado de forma incontrolada. A medida que se ha incrementado la producción de residuos y la normativa se ha hecho más exigente, la utilización de los vertederos es cada vez más restringida y con muchos mayores controles ambientales, lo que evidentemente disminuirá su uso masivo e incontrolado.

Según el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, se define el vertedero como una “instalación de eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en la superficie, por períodos de tiempo superior a un año en residuos no peligrosos y superior a seis meses para residuos peligrosos”.

De acuerdo con este Real Decreto, un vertedero es un almacenamiento con carácter definitivo de residuos en tierra, en el que se deben controlar y someter a seguimiento todos los aspectos ambientales al objeto de no afectar al entorno, o en todo caso, conseguir que los efectos ambientales sean mínimos. También estaría incluida la posibilidad de almacenamiento subterráneo, opción no utilizada para residuos urbanos.

Diversos autores también han definido de forma concreta el concepto de vertedero controlado, destacando:

Un vertedero controlado es fundamentalmente una obra de ingeniería, que precisa de una impermeabilización correcta, acorde con el terreno donde se ubica, de conducciones para los lixiviados y los gases producidos en la descomposición de los residuos, los cuales deberán estar correctamente colocados y cubiertos con los materiales adecuados (Hontoria *et al.*, 2000)

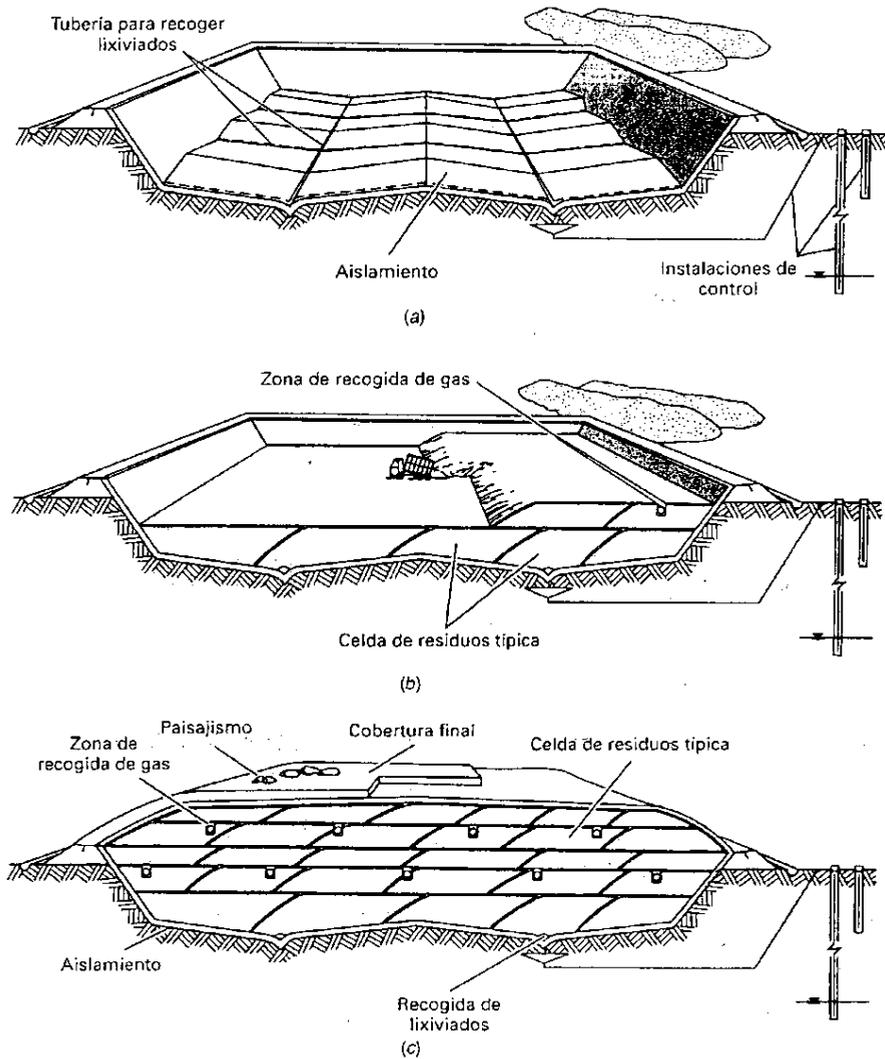
El vertedero controlado o sanitario se puede definir como un método consistente en enterrar los residuos en la tierra mediante operaciones controladas y con un diseño adecuado; los residuos pueden llegar en masa, pretratados, clasificados, en balas, incinerados, etc., y allí son compactados por maquinaria apropiada (Leton y Omotsho, 2003).

Los vertederos son importantes proyectos constructivos que deben ser convenientemente situados, diseñados, construidos, explotados, sellados y clausurados. Hoy en día son construidos y explotados siguiendo criterios científicos e ingenieriles, atendiendo especialmente al impacto social y medioambiental (Wells *et al.*, 1987).

El relleno sanitario o vertedero es una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en un área lo menor posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, para cubrir los materiales así depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria (*American Society of Civil Engineers-ASCE*)

Así pues, los residuos almacenados deben haber sido sometidos a un tratamiento previo y sólo cabe eliminar en vertederos aquellos que no puedan ser aprovechados o reciclados (Sener *et al.*, 2006). Sin embargo, una importante fracción (en ocasiones su totalidad) de los residuos generados en España y en los países mediterráneos terminan en vertederos, sea cual sea el sistema de tratamiento empleado (Garrido, 2008).

Por lo tanto, el vertedero siempre es el último eslabón para todos los sistemas de tratamiento, ya que, incluso con la implantación de las técnicas de minimización de producción de residuos, de reciclaje y de transformación de los mismos, la evacuación de los residuos en vertederos controlados sigue siendo un elemento importante en el sistema de gestión de residuos.



Fuente: Tchobanoglous, 1996

Figura 5.1.- Fases de la operación de un vertedero

a) excavación y recubrimiento del vaso, b) llenado mediante la formación de celdas, y c) sellado

5.2.- Clasificación de los vertederos controlados

El Real Decreto 1481/2001, que traspone la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, clasifica los vertederos en tres categorías: de residuos peligrosos, de residuos no peligrosos y de residuos inertes. Un vertedero puede clasificarse en más de una categoría, siempre que disponga de celdas independientes que cumplan los requisitos especificados en el Real Decreto.

- Vertederos de residuos peligrosos. En estas instalaciones de eliminación (vertederos de seguridad) se depositan residuos que representan un riesgo potencial para el medio ambiente y la salud, así como los recipientes y envases que los han contenido, figurando la lista de estas sustancias en la Directiva 91/689/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos. Se excluyen de esta categoría los residuos que poseen un tratamiento legislativo propio (radiactivos, mineros, etc.). En función de la composición de estos residuos o de los lixiviados que puedan generar, en algunos casos será necesario realizar un tratamiento de estabilización o inertización previo a su vertido.
- Vertederos de residuos no peligrosos. Almacenan residuos urbanos además de otros de cualquier origen no incluidos en la lista de residuos peligrosos. También se admite el vertido de residuos peligrosos no reactivos estables, es decir, residuos cuyo comportamiento de lixiviación no cambiará de forma adversa a largo plazo, ya sea por su biodegradación, por las condiciones ambientales o por el efecto de otros residuos
- Vertederos de residuos inertes, considerando “residuos inertes” aquellos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. La cantidad y carga contaminante de los lixiviados producidos por estos residuos deberán ser insignificantes y no suponer riesgo para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

5.3.- Selección del emplazamiento de vertederos

La ubicación de un vertedero es un complicado proceso en el cual su éxito depende de factores de diseño, impacto y valores comunitarios que deben considerar la combinación de parámetros sociales, medioambientales y técnicos, que a su vez supongan la minimización de costes, desde el punto de vista de su construcción y explotación (Vaillancourt y Waaub, 2002; McBean *et al.*, 1995).

Así pues, y de forma general, se considera que en la selección del emplazamiento de los vertederos controlados influyen tres tipos de factores: funcionales, económicos y sociales, entre los que destacan los siguientes.

- Geología e hidrogeología. Es quizás el condicionante más importante a los efectos de no dañar, a causa de los lixiviados, la calidad de las aguas subterráneas, acuíferos subsuperficiales o lechos de roca.
- Ambientales. Los vertederos controlados se deben instalar en áreas con nulo o escaso interés ambiental, con escasa o nula vegetación y obviamente sin ningún tipo de protección de fauna y flora, arqueológica, geológica, paisajística, etc., estando especialmente prohibida su ubicación en espacios protegidos.
- Distancias a viviendas. Es absolutamente necesario cumplir y mantener, dentro de límites tolerables, las condiciones relativas a la seguridad e higiene públicas.
- Topografía. Se debe tener en cuenta la topografía local porque afectará al tipo de operación de vertido utilizada, a las necesidades de equipamiento y al trabajo necesario para hacer que el lugar sea utilizable (Tchobanoglous *et al.*, 1996).
- Disponibilidad del material de recubrimiento. Este factor es importante desde el punto de vista de la planificación de la explotación, especialmente por su importante peso en los costes asociados a ella.
- Accesibilidad. Este punto, evidentemente necesario desde el punto de vista funcional, tiene además dimensión económica puesto que, en general, siempre es posible realizar los accesos correspondientes en los casos en que no existan.
- Distancia de transporte. La distancia de transporte puede afectar significativamente al diseño y a la operación global de un sistema de gestión de residuos. Aunque son deseables distancias mínimas, como la localización de vertedero normalmente se determina por necesidades ambientales y políticas, el transporte a larga distancia actualmente es muy común (Tchobanoglous *et al.*, 1996).
- Climatología. La influencia de este factor se produce fundamentalmente sobre la planificación de la explotación, llegando a impedir en algunos casos la explotación del vertedero. En general conviene zonas con una pluviometría baja y con temperaturas máximas no muy altas ni mínimas muy bajas. Respecto al viento conviene zonas resguardadas y con vientos dominantes que no se dirijan a las zonas pobladas.
- Usos futuros del terreno. Una de las ventajas de un vertedero clausurado es que se dispone de una superficie grande de terreno para otros usos. Si la decisión sobre el uso futuro del vertedero se toma antes de iniciar la explotación, es posible planificar ésta para obtener una topografía final prefijada.
- Sociales. Actualmente, la presión social puede decidir la implantación o no de un vertedero (fenómeno NIMBY – “*Not In My Back Yard*”). Por tanto, el punto de vista ciudadano ha de ser incorporado en la toma de decisiones, mediante un amplio proceso de información pública.

5.4.- Impermeabilización del vaso y drenaje exterior

Según el Real Decreto 1481/2001, todo vertedero deberá estar situado y diseñado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados.

La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales durante la fase activa o de explotación del vertedero se conseguirá mediante la combinación de una barrera geológica y de un revestimiento artificial estanco bajo la masa de residuos.

Existe barrera geológica cuando las condiciones geológicas e hidrogeológicas subyacentes y en las inmediaciones de un vertedero tienen la capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas.

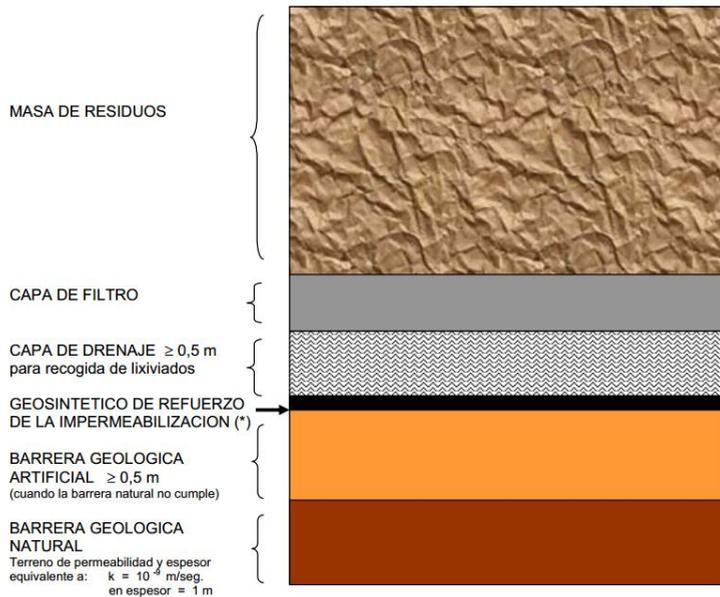
Esto se consigue cuando la base y los lados del vertedero disponen de una capa mineral con unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado sea por lo menos equivalente al derivado de los requisitos siguientes:

- Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 5 m.
- Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 1 m.
- Vertederos para residuos inertes: $k \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s; espesor ≥ 1 m.

Cuando la barrera geológica natural no cumpla estas condiciones, ésta deberá complementarse con una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 0,5 metros.

Además de las barreras geológicas descritas, deberá añadirse un revestimiento artificial impermeable bajo la masa de residuos y un sistema de recogida de lixiviados.

Siguiendo el Real Decreto 1481/2001, las barreras de protección mínimas que se dispondrán en los vertederos de RSU bajo la masa de residuos y las condiciones mínimas a exigir a dichas barreras se muestran en la Figura 5.2.



(*) Se dispondrá un geotextil protector encima del geosintético de refuerzo.

Fuente: Real Decreto 1481/2001

Figura 5.2.- Capas de impermeabilización en vertedero de residuos no peligrosos

La finalidad del sistema de drenaje exterior es evitar que las aguas superficiales debidas a la escorrentía de lluvias entren en el vaso y, por tanto, en contacto con los residuos vertidos. Para conseguir este objetivo pueden utilizarse, conjunta o separadamente, dos sistemas:

- Canalización de las aguas provenientes de vertiente arriba del vertedero. Este caso es muy usual cuando se utiliza un barranco como vertedero. La infraestructura utilizada suele conocerse como entubado. Consiste en la colocación de un tubo siguiendo el fondo del barranco. El diámetro del tubo se calcula teniendo en cuenta el caudal a evacuar. El espesor del tubo se calcula teniendo en cuenta el espesor de los residuos a soportar y las características y peso de los vehículos que vayan a circular sobre el tubo.
- Recogida de las aguas de escorrentía procedentes de las laderas que rodeen al vertedero y que puedan entrar en contacto con los residuos en fase de vertido. La forma usual de protección es la realización de cunetas perimetrales que por rodear la zona de vertido impiden la penetración en ellas de las aguas de escorrentía y las conducen en una dirección de desagüe adecuada.

5.5.- Producción y gestión de lixiviados

5.5.1.- El lixiviado

El lixiviado en vertederos se genera como resultado de degradaciones microbianas, procesos de solución/precipitación de constituyentes y reacciones de absorción/deserción (DoE, 1995) producidos en la descomposición de la fracción orgánica y putrescible de los residuos (Glysson, 2003; Tchobanoglous, 1993 y Kiely, 1999; Jones *et al.*, 2005; Slack *et al.*, 2005) y acentuados por la percolación del agua debido a las precipitaciones, la escorrentía y la infiltración o entrada de aguas subterráneas (Oman y Rosqvist 1999; Wu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2002).

Una de las características de los lixiviados es su fluctuación, tanto en cantidad producida, como en la composición de los mismos, algo que dificulta su tratamiento. La cantidad y composición del lixiviado depende, entre otros factores, de la composición y densidad de los residuos, de la edad del vertedero, hidrología del lugar, climatología, régimen de lluvias y del tipo de explotación.

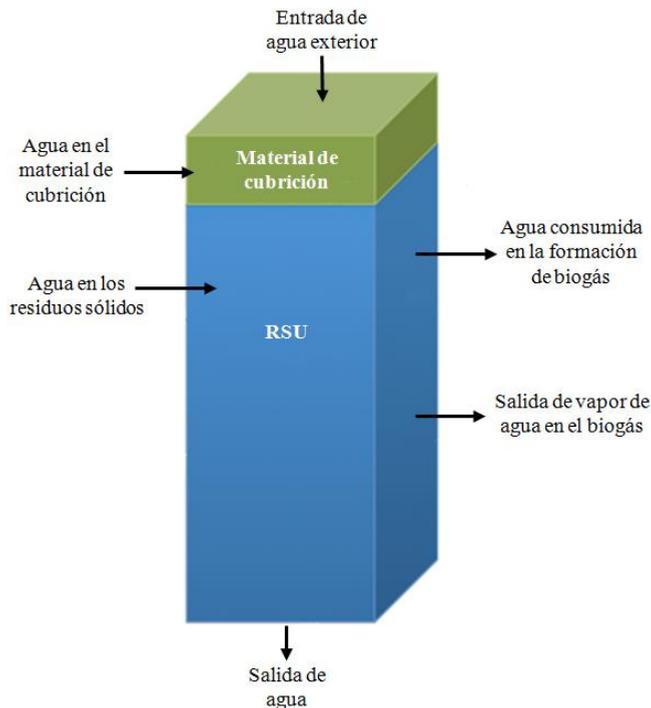
Tabla 5.1.- Datos típicos sobre la composición de los lixiviados

CONSTITUYENTE	VALOR (mg/l) excepto pH		
	VERTEDERO NUEVO (menos de 2 años)		VERTEDERO MADURO (más de 10 años)
	Rango	Típico	Rango
DBO ₅	2.000-30.000	10.000	100-200
COT	1.500-20.000	6.000	80-160
DQO	3.000-60.000	18.000	100-500
SST	200-2.000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	90-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad (CaCO ₃)	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Dureza total (CaCO ₃)	300-10.000	3.500	200-500
Calcio	200-3.000	1.000	100-400
Magnesio	50-1.500	250	50-200
Potasio	200-1.000	300	50-400
Sodio	200-2.500	500	100-200
Cloro	200-3.000	500	100-400
Sulfatos	50-1.000	300	20-50
Total Hierro	50-1.200	60	20-200

Fuente: Elaboración propia a partir de Tchobanoglous, 1996

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del vertedero. Este balance implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el vertedero y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material del vertedero.

Los componentes que conforman el balance de aguas para una fase del vertedero se identifican en la Figura 5.3:



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.3.- Volumen de control

5.5.2.- Sistema de captación y almacenamiento de lixiviados

El Real Decreto 1481/2001 establece la necesidad de recoger las aguas contaminadas y los lixiviados, teniendo en cuenta las características del vertedero y las condiciones meteorológicas. Para ello se diseñará un sistema de drenaje y evacuación de los lixiviados, así como un sistema de almacenamiento previo a su tratamiento.

La bibliografía consultada muestra diferentes recomendaciones destinadas a orientar en el diseño de estos sistemas, pudiendo establecer una serie de estándares para su diseño.

Tabla 5.2.- Elementos de captación y almacenamiento de lixiviados

Elementos de captación y almacenamiento de lixiviados	
1.	Capa drenante
2.	Materiales geosintéticos de drenaje
3.	Tuberías de drenaje ranuradas
4.	Tuberías de drenaje sin ranurar
5.	Protección del drenaje
6.	Capas de drenaje operacionales
7.	Balsa de drenaje de lixiviados

Fuente: Elaboración propia

1. Capa drenante

Una vez colocado el revestimiento artificial, se dispondrá una capa drenante de un grosor mínimo de 50 cm. y una permeabilidad $\geq 10^{-2}$ m/s según el borrador del Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001; o de al menos 30 cm de espesor con una permeabilidad comprendida entre 10^{-2} y 10^{-3} m/s según la “Guía de buenas prácticas en la ingeniería de vertederos” (1994); o 30 cm y permeabilidad de 10^{-1} m/s según Jessberger *et al.* (1995).

Los materiales de este nivel drenante pueden variar según su disponibilidad y coste, pudiendo utilizarse gravas, material geosintético, e incluso de tierra con bajo contenido en nutrientes.

2. Materiales geosintéticos de drenaje

En casos excepcionales, la autoridad competente puede autorizar soluciones de diseño distintas de la de referencia, planteando en los taludes del vertedero la colocación de geocompuestos de drenaje (georedes), siempre que tengan adecuada capacidad de drenaje y no presenten riesgos de colmatación.

Se tendrá en cuenta la presión vertical sobre el geocompuesto cuando se evalúe la capacidad hidráulica, así como la potencial precipitación de los efluentes en su interior, que supondrá una disminución de su capacidad hidráulica (Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001).

3. Tuberías de drenaje ranuradas

En el seno del nivel drenante, y sobre el fondo del vaso del depósito controlado, se instalará una red de tubos de drenaje que faciliten la evacuación de los lixiviados hacia un colector principal. Los tubos se colocarán en forma de espina de pez, de forma que sean capaces de recoger la mayor parte de los lixiviados generados en el vaso.

El material con que esté fabricado el tubo garantizará que el sistema de drenaje no perderá su funcionalidad durante la vida útil del vertedero (construcción, explotación, postclausura), debido a las acciones físicas, químicas o biológicas (Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001).

Serán lisos con un diámetro mínimo de 20 cm según la NRA (*Nacional Rivers Authority*) (1995), de 10 cm según Tchobanoglous (1996) y 15 cm según el Desarrollo del Real Decreto 1481/2001.

Los tubos poseerán unas perforaciones contadas con láser sobre la mitad de la circunferencia, espaciados en 0,6 cm con tamaño de corte de 0,00025 cm., que es el tamaño más pequeño de la arena (Tchobanoglous, 1996). Los tubos de recogida se cubrirán con una capa de arena de 60 cm antes de comenzar el vertido, donde la primera capa de residuos no se compactará (Tchobanoglous, 1996).

El diseño de los tubos contemplará la implantación de sistemas para inspección y mantenimiento, por ejemplo: pueden colocarse circuitos cerrados de televisión y control hidrométrico remoto para la inspección y limpieza en los trabajos de los tubos (Guía de Buenas Prácticas en la Ingeniería de Vertederos, 1994).

La pendiente mínima de los sistemas de drenaje hacia el punto de evacuación de los lixiviados será del 2% (Glysson., 2003; NRA, 1995; Desarrollo Técnico del Real Decreto), del 3% (Guía de buenas prácticas en la Ingeniería de Vertederos, 1994) o entre 1,2-1,8% (Tchobanoglous, 1996) para que el desagüe por gravedad sea eficaz durante el periodo de operación y después del mismo. Éste podría ser superior según las necesidades del lugar.

4. Tuberías de drenaje sin ranurar

Llevarán los lixiviados procedentes de los sistemas de drenaje hasta la balsa de lixiviados o bien a pozos de registro de control. Sus características son las mismas que las especificadas anteriormente, sólo que serán conductos ciegos.

5. Protección del drenaje

Si fuese necesario se colocará una capa filtrante protectora, constituida por geotextil filtrante o por una capa de material granular fino. Se colocará sobre el sumidero de material de alta permeabilidad para prevenir la posible obstrucción física de materiales de grano fino (Glysson, 2003).

Las características principales de estos materiales serán (Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001):

- Deberán ser químicamente resistentes al lixiviado.
- Los geotextiles deberán ser suficientemente resistentes para reforzar las aperturas de los materiales de drenaje a los que protegen.
- La resistencia al desgarramiento y a la perforación serán, al menos, el doble que las de las membranas a las que protegen.

6. Capas de drenaje operacionales

Estarán situadas sobre capas de cubrición operacionales. Su colocación será opcional, cuando se considere necesaria la captación de lixiviados en dichos niveles. En este caso es fundamental considerar los potenciales asientos del nivel de apoyo, que pueden afectar la operatividad del drenaje, así como la impermeabilidad de la barrera. Sus especificaciones serán las mismas que se han establecido. El espesor de estas capas de drenaje será como mínimo de 0,3 m (Desarrollo Técnico del Real Decreto 1481/2001).

7. Balsa de almacenamiento de lixiviados

Los lixiviados y todas las aguas que entren en contacto con los residuos se tratarán antes de su vertido de modo que cumplan los límites de vertido a cauce fijados en la autorización.

Así pues, la red de captación de lixiviados descrita en los puntos anteriores, conducirá éstos hasta una balsa de almacenamiento. Esta balsa estará impermeabilizada de forma similar al vaso de vertido, de forma que garantice la protección del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas.

Los lixiviados recogidos deberán ser tratados en instalaciones exteriores al vertedero tras su transporte en camiones cuba, o bien eliminarlos "in situ" utilizando algunos de los sistemas siguientes:

- Reincorporación al vertedero, mediante regado con ellos de la capa exterior, para disminuir su cantidad por evaporación y aumentar la rapidez del proceso de fermentación.
- Depuración "in situ", lo cual exige la construcción de la correspondiente estación de tratamiento. Se produce un incremento tanto en el costo de la inversión inicial como en la explotación, debiéndose eliminar posteriormente los fangos resultantes del proceso.
- Almacenamiento en balsas de poco fondo (lagunas) para favorecer la evaporación natural. Es necesario eliminar posteriormente los fangos obtenidos.
- Solidificación por adsorción química. Este sistema permite obtener una materia inerte, similar a la tierra, que puede utilizarse como material de recubrimiento en el propio vertedero.

5.6.- Producción y gestión del biogás

5.6.1.- El biogás

El biogás está formado una mezcla de gases producidos a lo largo de las múltiples etapas del proceso de descomposición de la materia orgánica y en las que intervienen una población heterogénea de microorganismos.

Los componentes principales del biogás son:

Tabla 5.3.- Componentes principales del biogás

Componente	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	45-60
Dióxido de carbono (CO ₂)	40-60
Nitrógeno (N ₂)	2-5
Oxígeno (O ₂)	0,1-1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos...	0-1,0
Amoníaco (NH ₃)	0,1-1,0
Hidrógeno (H ₂)	0-0,2
Monóxido de carbono (CO)	0-0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01-0,6

Fuente: Elaborada a partir de Tchobanoglous, 1996

Los porcentajes reflejados varían en función, entre otros, de los siguientes factores:

- Composición del residuo vertido.
- Sistema de gestión del vertido de residuos.
- La geometría del vaso receptor
- Edad del vertido.
- Condiciones climatológicas de la zona.

5.6.2.- Problemas derivados de la generación de biogás en vertederos

La generación de biogás es uno de los problemas medioambientales de los vertederos en los que se depositan residuos con materia orgánica. Puede generar los siguientes impactos:

- Afecta a la seguridad e higiene de trabajadores y población aledaña al vertedero. Esta afección puede ser únicamente una molestia, como los olores, o un riesgo serio para la salud, debido principalmente al riesgo de incendio y explosión, y a los efectos tóxicos de algunos de sus componentes, y también al riesgo de asfixia.
- Influye en el desarrollo de la vegetación, tanto en el vertedero como en terrenos colindantes. Los daños en la vegetación pueden ser en forma de clorosis, defoliación y pérdida de ramaje, o en crecimiento enano de la vegetación, desarrollo superficial de las raíces y hasta la muerte de la vegetación en casos severos.
- Efecto sobre el medio ambiente global: se calcula que entre un 6 y un 13% del metano emitido a la atmósfera tiene su origen en los vertederos.
- Estos problemas conducen a que la eliminación controlada del biogás sea necesaria para que un depósito de rechazos merezca ser considerado como realmente controlado y, por esta razón, las diferentes legislaciones han ido exigiendo, cada vez de una manera más estricta, la incorporación de la extracción y tratamiento controlado del biogás a la gestión de los depósitos de rechazos.

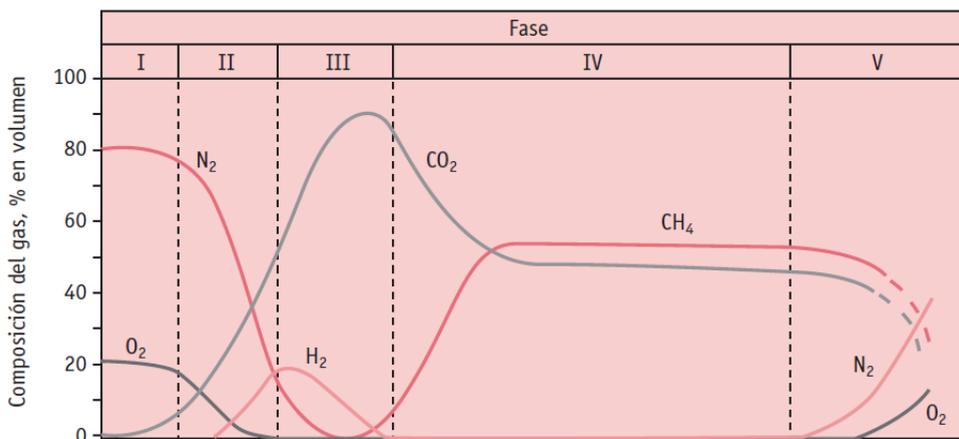
5.6.3.- Formación de biogás: etapas de la degradación anaerobia

Se considera que la generación de los principales gases del vertedero se produce en cinco o menos fases secuenciales. A continuación se describe cada una de estas fases.

- Fase I: Ajuste inicial. La fase I es la fase de ajuste inicial, en la que los componentes orgánicos biodegradables sufren descomposición microbiana. Se

produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del vertedero.

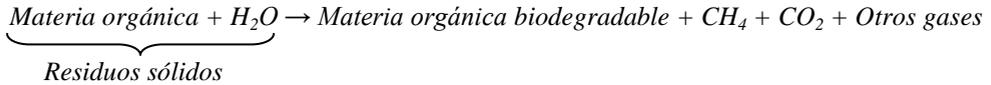
- Fase II: Fase de transición. En esta fase desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. El pH comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO_2 dentro del vertedero.
- Fase III: Fase ácida. Se acelera la actividad microbiana con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. La demanda de bioquímica de oxígeno (DOB_5), la demanda de oxígeno (DOQ) y la conductividad del lixiviado se incrementará debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado.
- Fase IV: Fase de fermentación del metano, donde los microorganismos convierten el ácido acético y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH_4 y CO_2 . El pH del vertedero subirá a valores más neutros (6,8 a 8) y se reducirán las concentraciones de DOB_5 y DOQ y el valor de conductividad del lixiviado.
- Fase V: Fase de maduración. La velocidad de generación del gas de vertedero en esta fase disminuye, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores.



Fuente: Carreras y Dorronsoro, 2006

Figura 5.4.- Fases del proceso de la formación del biogás en un depósito controlado

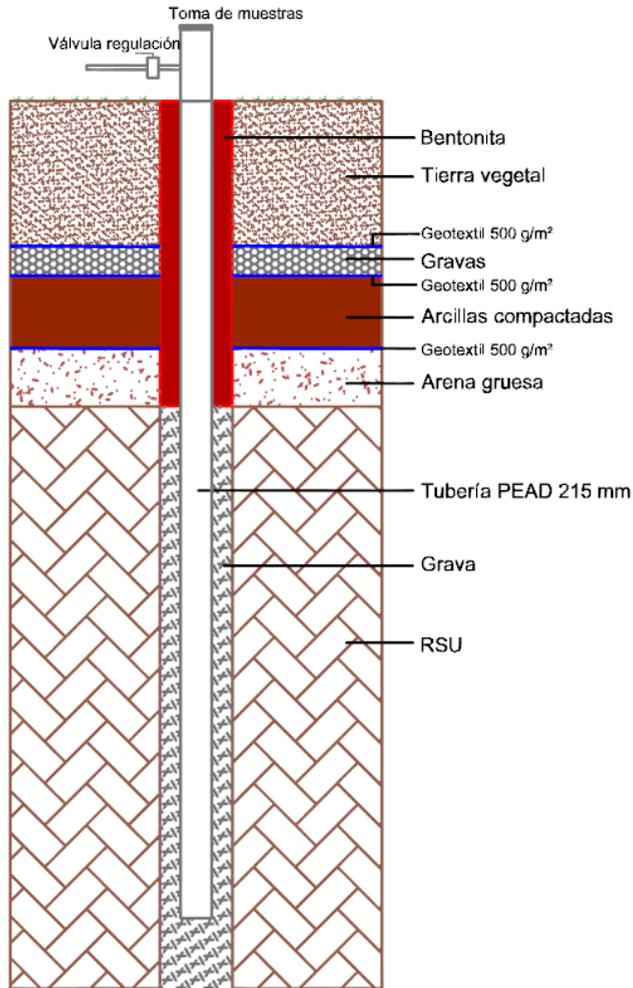
La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



5.6.4.- Sistemas de captación de biogás

La protección frente a las emanaciones de metano se obtiene forzando su salida para ser recogido y conducido hasta una antorcha para ser quemado o para su posterior reutilización tal y como recoge el Real Decreto 1481/2001. Las infraestructuras básicas para la recogida de los gases producidos son:

- Impermeabilización total de las paredes del vertedero con lo que los gases se ven obligados a pasar a los pozos de extracción. La impermeabilización es previa al comienzo de la explotación, pudiendo utilizarse alguno de los sistemas anteriormente indicados.
- Construcción de los pozos de extracción de gases conocidos como chimeneas de desgasificación, que atraviesen la masa de residuos (Figura 5.5). Estas chimeneas pueden ser desde simples huecos rellenos de grava, hasta tuberías ranuradas rellenas de material poroso con bombas de extracción forzada. El gas extraído puede ser conducido posteriormente por una red de tuberías hasta una antorcha donde se quema, o si la producción es suficiente, se puede utilizar como combustible en turbinas de gas para generar energía eléctrica o como combustible para las propias instalaciones del vertedero o industrias cercanas.



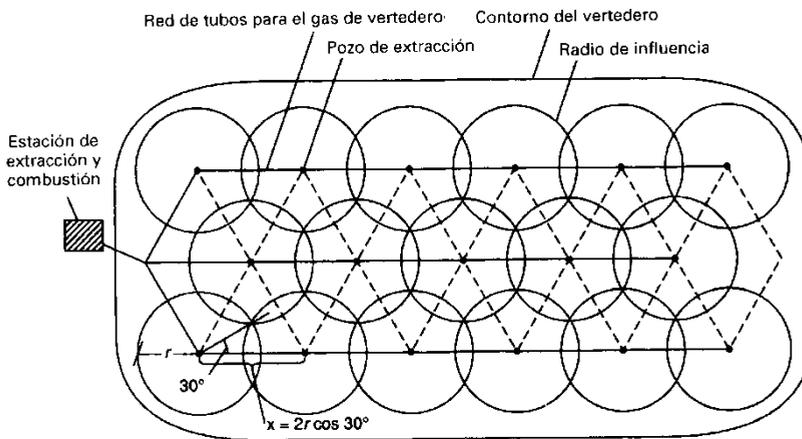
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.5.- Detalle tipo de una chimenea para la extracción del gas de vertedero

Dependiendo de la cantidad de residuos orgánicos biodegradables depositados en el vertedero la producción de gases puede ser importante y también larga. Este biogás puede emerger por fisuras del terreno por lo que es imprescindible la salida controlada y la recogida del mismo. De esta manera se evita su acumulación en espacios cerrados, con el consiguiente peligro de explosión y de incendio y se evita, por otra parte su

salida a la atmósfera, dado que el metano es uno de los principales gases causantes del efecto invernadero.

La captación de gases se realiza mediante una red de pozos verticales y/o zanjas horizontales distribuidos por toda la superficie del vertedero. El diseño de la red de captación de gas en un vertedero se realiza mediante ensayos en campo que permiten calcular el radio de influencia de un pozo (Figura 5.6). En función de la zona del vertedero, varía la tasa de generación de biogás, la permeabilidad al paso del mismo y la profundidad del vaso del vertedero, lo que hace necesario en algunos casos acercar los pozos, y permite en otros separarlos (Martín, 1997). Aunque el espaciado entre pozos es muy variable, se considera habitual un radio de influencia de 20 m (Brown y Maunder, 1994).



Fuente: Tchobanoglous, 1996

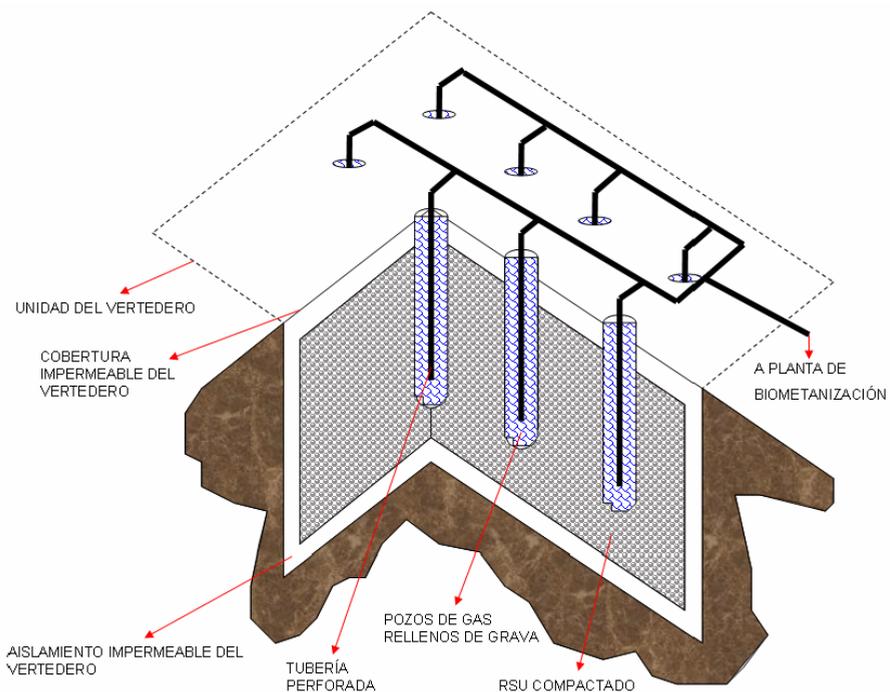
Figura 5.6.- Esquema de distribución de chimeneas de desgasificación

Una vez realizados los pozos se introducen en ellos unas tuberías (normalmente de polietileno) ranuradas en un 20-30% de su longitud, con objeto de que penetre el gas, y una parte ciega en lo más alto. En los últimos metros, donde la tubería es ciega, y para evitar la entrada de oxígeno al pozo, se rellena con un material aislante, incluyendo algún tipo de material de separación entre ambas capas, como puede ser una junta de plástico, caucho, etc., con el objetivo de impedir la entrada de oxígeno a los conductos de transporte de biogás.

Una vez captado el gas hay que trasladarlo desde la superficie de los pozos hasta los colectores. Para ello, se disponen una serie de tuberías, habitualmente de polietileno,

donde se ubica la valvulería de medición y control de los caudales aportados por cada pozo con el objetivo de mantener constante el porcentaje de metano en el biogás que llega a la combustión, controlando los niveles de oxígeno presentes en el gas, mediante la presión de aspiración de modo que no exista posibilidad de que la mezcla metano-oxígeno se vuelva explosiva.

El transporte del biogás hasta la estación de aspiración se realiza mediante colectores de mayor diámetro a los que se conectan los ramales de conducción. En cualquier caso, no existe ningún método ni normativa que regule el diseño de estas instalaciones, por lo que es fácil encontrar una gran variedad de diseños.



Fuente: Elaboración propia a partir de Tchobanoglous, 1996

Figura 5.7.- Sistema de recuperación del gas del vertedero mediante chimeneas verticales

5.7.- Sellado y restauración ambiental de vertederos

Una vez que el vertedero se ha llenado completamente y se ha alcanzado la configuración final, es necesario proceder a su clausura y sellado. Esta fase está compuesta por un conjunto de operaciones necesarias para adecuar el depósito a su uso posterior definitivo. Estas operaciones son las siguientes:

- Compactación y cubrición de la capa final de residuos
- Colocación de los elementos finales de la red de captación de biogás
- Disposición del paquete de sellado, compuesto por varias capas (Figuras 5.8 y 5.9)
- Restauración vegetal

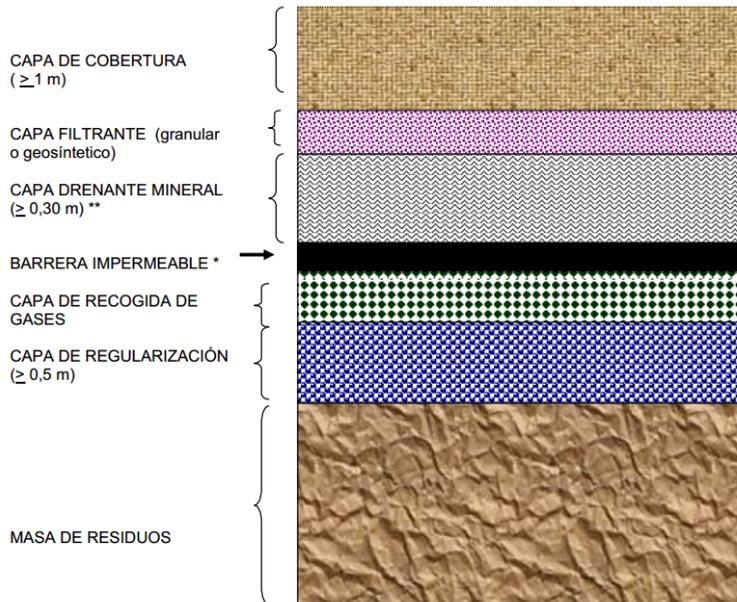
Los objetivos perseguidos por la capa de sellado son los siguientes:

- Limitación de la percolación profunda del agua de lluvia, reduciendo la producción de lixiviados.
- Soporte al desarrollo de la vegetación, para lo que deberá tener una textura y estructura adecuada.
- Espesor suficiente para dar soporte al enraizamiento de la vegetación.
- Porosidad para permitir la infiltración de la escorrentía superficial.

Uno de los requisitos ambientales perseguidos a la hora de clausurar un vertedero de RSU es conseguir una correcta restauración ambiental. Ésta puede abordarse con el fin de dotar al emplazamiento de unos usos futuros o simplemente pretendiendo una integración de un lugar degradado en el entorno natural de forma armoniosa.

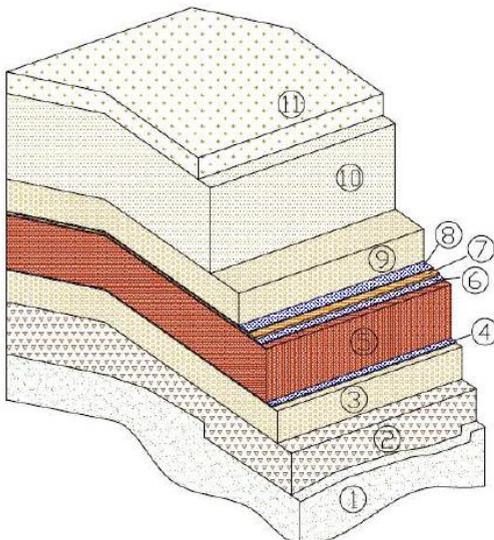
La vegetación a introducir serán especies arbóreas de rápido crecimiento y que sean poco exigentes, para asegurar resultados óptimos y necesarios de cara a mejorar la estabilidad del suelo, así como especies autóctonas y que se encuentran representadas en el entorno.

Según el Real Decreto 1481/2001, las capas mínimas a disponer en el sellado de un vertedero de RSU se muestran en la Figura 5.8.



Fuente: Real Decreto 1481/2001

Figura 5.8.- Capa de sellado de un vertedero de residuos no peligrosos



- 1.- Residuos
- 2.- Capa de regularización
- 3.- Gravas para drenaje de gases (30 cm)
- 4.- Geotextil no tejido (300 g/m²)
- 5.- Capa de arcilla (50 cm)
- 6.- Geotextil no tejido (300 g/m²)
- 7.- lámina PEAD (2 mm)
- 8.- Geotextil no tejido (300 g/m²)
- 9.- Gravas para drenaje de pluviales (30 cm)
- 10.- Tierra
- 11.- Tierra con fertilizantes

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.9.- Ejemplo de capas de sellado en un vertedero de RSU

Capítulo 6

Determinación de los costes de gestión de los RSU

6.1.- Introducción

A continuación se desarrolla una metodología para calcular los cánones de las instalaciones de gestión de residuos. Una vez establecidas las bases de cálculo, se realizará un ejercicio práctico en el que determinarán los cánones de un conjunto de instalaciones de tratamiento de residuos, así como sus variantes, fórmulas de revisión de precios y posibles compensaciones municipales.

Esta información se presenta adecuadamente justificada, detallando el procedimiento de determinación de los datos y señalando las hipótesis y estimaciones utilizadas así como los cálculos realizados para su obtención.

El cálculo de los cánones debe basarse en la totalidad de las instalaciones de gestión de residuos consideradas, teniendo en cuenta en particular:

- Los parámetros relativos a toneladas a tratar de los distintos tipos residuos.
- Periodo de concesión de las instalaciones, vida útil y periodos de amortización de obra civil, instalaciones y equipos, ingresos accesorios, compensaciones mínimas municipales, costes de desmantelamiento final, y de mantenimiento post-clausura si procede y otros muchos aspectos.
- Los anteproyectos de las instalaciones y otras las inversiones necesarias.
- El plan de gestión y modelización del servicio ofrecido.
- Las estimaciones sobre necesidades de personal y sus costes para el adecuado funcionamiento de los servicios.

- Los costes necesarios de mantenimiento y funcionamiento de ordinario de las instalaciones y equipo, así como las posibles compensaciones a municipios.

Por tanto, la estructura de los siguientes apartados es la siguiente:

- En el apartado segundo se recogen los parámetros y estimaciones generales sobre las que se basarán los cálculos efectuados.
- En el apartado tercero se establece la necesidad de definir un modelo para la determinación de los costes de las actividades objeto de canon.
- En el apartado cuatro se describen las previsiones relativas a inversiones y costes por amortizaciones, personal y su imputación a los diferentes centros de actividad.
- En el apartado quinto se establecen los costes comunes.
- En el último apartado se realiza un ejercicio práctico.

6.2.- Parámetros y estimaciones generales

En función del caso de análisis concreto, la determinación del canon puede deberse a determinarse en función del tipo de residuos y de la metodología en su gestión. De esta forma, este cálculo puede desarrollarse mediante el establecimiento justificado de una serie de parámetros que pueden o no concurrir en función del modelo de costes elegido.

De forma general, podemos decir que los parámetros que intervienen en la determinación del canon de gestión de RSU son los mostrados en la Tabla 6.1:

Tabla 6.1.- Parámetros a considerar en la determinación del canon de gestión de RSU

Parámetros a considerar en la determinación del canon de gestión de RSU	
1.	Tipo de interés aplicado para el cálculo de amortizaciones financieras
2.	Parámetros generales
3.	Porcentajes de recuperación de subproductos y residuos
4.	Coste de eliminación de residuos por gestores externos
5.	Ingresos unitarios por subproductos recuperados
6.	Parámetros y estimaciones relativas al personal
7.	Cantidades de residuos a tratar
8.	Parámetros y estimaciones relativas al equipamiento móvil

Fuente: Elaboración propia

1. Tipo de interés aplicado para el cálculo de amortizaciones financieras

El tipo de interés a aplicar para el cálculo de las amortizaciones financieras es el EURIBOR. Ha de considerarse un valor a fecha. Este tipo de interés se considera que es una buena estimación del coste de financiación medio de las inversiones a realizar.

2. Parámetros generales

Los parámetros generales tanto monetarios como no monetarios que deben ser utilizados en la determinación del canon son, entre otros, los siguientes:

- Porcentaje aplicado de costes generales (%)
- Porcentaje aplicado de beneficio industrial (%)
- Porcentaje aplicado de IVA (%)
- Coste electricidad, término potencia (€/kw/año)
- Coste electricidad, término consumo (€/kw/h)
- Coste gasóleo A (€/l)
- Coste gasóleo B (€/l)
- Coste gasóleo C (€/l)
- Vida útil por defecto de inversiones en terrenos y obra civil (años)
- Vida útil por defecto de inversiones en equipamientos (años)
- Vida útil por defecto de inversiones en equipo móvil (años)
- Mantenimiento post-clausura de vertederos (años)
- % por reparaciones y mantenimiento de terrenos por defecto
- % por reparaciones y mantenimiento de obra civil (planta)
- % por reparaciones y mantenimiento de equipo fijo (planta)
- % por reparaciones y mantenimiento de obra civil (vertedero)
- % por reparaciones y mantenimiento de equipo fijo (vertedero)
- % por reparaciones y mantenimiento de obra civil (resto instalaciones)
- % por reparaciones y mantenimiento de equipo fijo (resto instalaciones)
- % por reparaciones y mantenimiento de equipo móvil
- Coste vestuario y equipo de seguridad (€/persona)

3. Porcentajes de recuperación de subproductos y residuos

Los porcentajes de recuperación de subproductos y residuos dependen del tipo de material de origen y de la eficiencia del tratamiento a efectuar. Deberán estimarse los porcentajes de recuperación de subproductos (vidrio, papel, PET, voluminosos...) en

las instalaciones de tratamiento consideradas (planta de tratamiento de RSU, de RCD...)

Hay que tener en cuenta la posibilidad de que determinados residuos sean recuperados por gestores externos. En este caso, no se tendrían en cuenta

4. Coste de eliminación de residuos por gestores externos

No se considera necesario estimar ningún coste de eliminación de residuos (pilas, pilas botón, fluorescentes y otros peligrosos) por gestores externos, puesto que en la actualidad dicha eliminación es gratuita al estar subvencionada por la Generalitat Valenciana.

5. Ingresos unitarios por subproductos recuperados

Es necesario tener en cuenta los ingresos previstos por tonelada de subproducto recuperado. Los precios de venta pueden considerarse a partir de estimaciones propias sobre precios de venta a recuperadores, y la compensación de ECOEMBES se obtendrá de las publicaciones de los Diarios Oficiales.

6. Parámetros y estimaciones relativas al personal

Los costes de personal que se pueden utilizar parten de dos estimaciones:

- Parte relativa a costes estimados por categoría laboral
- Parte relativa al tiempo de trabajo anual efectivo de un empleado

Se considerarían las distintas categorías laborales del personal adscrito a los distintos servicios que se pueden contemplar, así como los costes anuales de seguridad social y seguros.

El coste anual se calculará teniendo en cuenta el convenio regulador correspondiente y la posibilidad de que el personal trabaje en horario o turno nocturno.

A efectos del cálculo de costes de personal, el estudio económico se puede basar en el número de personas equivalentes necesarias por cada puesto de trabajo, teniendo en cuenta datos como los días realmente trabajados, las horas de trabajo a la semana y el número de empleados necesario por puesto de trabajo.

7. Cantidades de residuos a tratar

Para poder estimar los cánones a repercutir en el tratamiento de los residuos es necesario considerar las cantidades de residuos sobre las que se calculan dichos cánones (RSU en masa, RCD, poda y restos de jardinería, entrada a vertedero...)

8. Parámetros y estimaciones relativas al equipamiento móvil

Para completar este apartado, se estimarían los costes de adquisición y seguros anuales de los vehículos a utilizar para la realización de las distintas actividades de gestión y tratamiento de residuos.

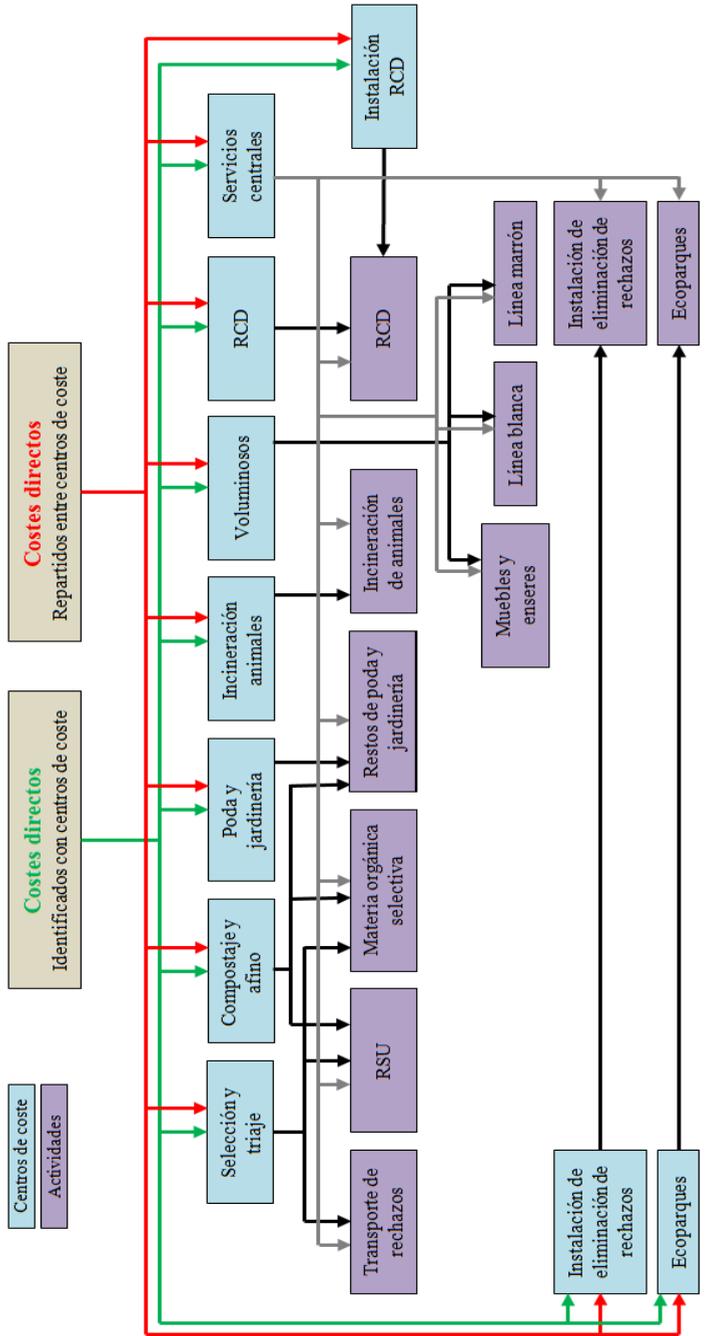
También se tendría en cuenta la previsión sobre costes anuales de mantenimiento y reparación de dicho equipamiento móvil suponiendo un coste anual del 10% del valor de adquisición. Y un coste por hora de utilización, en el caso de costes variables, para aquéllos de utilización variable. Finalmente, también habría que tener en cuenta las estimaciones de consumo de litros de gasóleo por km y por hora de utilización (cuando proceda) del distinto equipamiento móvil.

6.3.- El modelo de costes

El cálculo del canon debe realizarse a la vista del modelo de costes decidido. Este modelo de costes debe plasmar la realidad física de las instalaciones y de la metodología de gestión de RSU, pudiendo incluir, en su caso, el proceso completo desde la producción del residuo hasta su eliminación final.

- Producción
- Recogida
- Transporte
- Tratamiento
- Valorización
- Reutilización y reciclado
- Eliminación
- Otros

El modelo de costes, debe considerar asimismo los posibles ingresos derivados de la venta de subproductos para su reciclado o reutilización posterior. La Figura 6.1 muestra un ejemplo de modelo de costes, considerando todas las actividades necesarias para el tratamiento y gestión de residuos urbanos, desde su recogida a su eliminación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.1.- Ejemplo de modelo de costes

6.4.- Costes asociados a las instalaciones de gestión de RSU

Para calcular los cánones a repercutir es necesario conocer las estimaciones de inversiones y costes de amortización de las instalaciones, así como los parámetros y estimaciones específicas realizadas en relación al personal y sus costes y al resto de costes de funcionamiento de cada instalación.

Dentro de cada una de las instalaciones se pueden incluir diferentes centros de gestión, en función de los tipos de residuos tratados. También se incluyen las inversiones en servicios centrales y las comunes a todas las instalaciones consideradas.

Una vez determinadas las actividades que se realizan en cada instalación, y que repercuten en cada uno de los cánones de residuos a calcular, los costes incurridos en estas instalaciones deberán ser objeto de asignación entre las distintas actividades realizadas en las mismas al efecto de poder calcular de forma correcta los cánones para la recuperación de los costes.

Tabla 6.2.- Costes asociados a las instalaciones de gestión de RSU

Costes asociados a las instalaciones de gestión de RSU	
1.	Inversiones y amortizaciones
2.	Personal
3.	Costes de funcionamiento e ingresos
4.	Imputación de costes a actividades objeto de canon

Fuente: Elaboración propia

1. Inversiones y amortizaciones

Para cada una de las instalaciones, se determinarán las inversiones previstas, clasificadas por naturaleza y uso, con indicación del año de inversión y vida útil de las mismas. Se tendrán en cuenta igualmente los años en que se procederá a las inversiones o reinversiones, las amortizaciones y el tipo de interés, ya comentado en apartados anteriores.

Las inversiones previstas pueden ser las relativas a terrenos, obra civil y equipamiento fijo y móvil.

2. Personal

En relación al personal, se diferenciarán las áreas de trabajo en función de los residuos a tratar. Será necesario distinguir entre el personal fijo y el variable, según si el número de horas de trabajo de personal depende o no de las toneladas de residuos a tratar.

Así pues, el coste del personal fijo se calculará en función de la categoría del empleado, los turnos de trabajo, el número de personas necesarias por puesto y el coste anual de cada uno de ellos, como se ha comentado en un apartado anterior.

En relación al personal variable, el coste por hora de trabajo se ha calculado teniendo en cuenta:

- El número de puestos de trabajo por hora y por función necesarios
- Las horas efectivas de trabajo anual por empleado, y en consecuencia los trabajadores equivalentes, y
- El coste por persona de cada categoría laboral

Los costes variables totales de personal serán diferentes cada año según la cantidad de residuos tratados, dado que son éstos los que determinan el tiempo de trabajo de las instalaciones, de acuerdo a las estimaciones de capacidad en t/hora consideradas y, por tanto, al personal equivalente necesario para tratarlas.

3. Costes de funcionamiento e ingresos

En relación a los costes, se distinguirán entre fijos (no dependientes de las toneladas tratadas) y variables (dependientes de las toneladas tratadas), para cada una de las instalaciones consideradas.

Costes fijos de funcionamiento

En este apartado, se establecerían los costes fijos de funcionamiento de las instalaciones consideradas, como reparaciones y mantenimiento, seguros de vehículos, costes fijos de suministros, seguros...

Estos costes pueden estar relacionados directamente con una actividad concreta o pueden ser comunes a varias de ellas, por lo que se precisa aplicar criterios de asignación a los mismos.

En algunos casos, los costes asociados se determinarán aplicando los porcentajes establecidos en el apartado de parámetros generales.

Costes variables de funcionamiento

En el cálculo de estos costes, se aplicarán criterios particulares en función de cada instalación, además de los considerados en el apartado de parámetros generales.

Los costes de funcionamiento variables totales serán distintos cada año según la cantidad de residuos a tratar u horas de trabajo y teniendo en cuenta las estimaciones de capacidad de trabajo de las instalaciones.

Ingresos

El tratamiento y valorización de residuos no genera ingresos fijos, sino que todos ellos serán variables. Además de los cánones correspondientes, se deben estimar los ingresos provenientes de la venta de subproductos.

Por ejemplo, la selección y triaje de los residuos sólidos urbanos permite obtener distintos subproductos, tal y como se ha indicado en el apartado de parámetros generales, algunos de los cuales son susceptibles de producir ingresos. La estimación de los ingresos por tonelada se basa en los precios de venta y compensaciones de ECOEMBES.

Dada la incertidumbre existente en cuanto a los precios aplicables, así como en las condiciones y características del subproducto obtenido, se puede considerar que un 80% del total de subproductos obtenidos será susceptible de producir ingresos.

4. Imputación de costes a actividades objeto de canon

El procedimiento y criterios para el cálculo de costes correspondientes a cada actividad objeto de canon, se basa en las estimaciones de costes por centro de actividad, realizadas en los epígrafes anteriores, y teniendo en cuenta la identificación de los costes por actividades realizadas en dichos centros.

Lógicamente, aquellos costes directamente relacionados con una actividad concreta se imputarán íntegramente a la misma, tanto si son fijos como variables.

A cada uno de los centros de costes se imputará un porcentaje de cada uno de los residuos tratados en función de las inversiones requeridas en las instalaciones y equipamiento fijo destinado a este fin, a la cantidad de toneladas tratadas cada año y a la propia composición de los residuos y sus necesidades de tratamiento.

6.5.- Servicios centrales y/o comunes

En este apartado se detalla el tratamiento a efectos de costes y, de acuerdo con el modelo de costes considerado anteriormente, de aquellos costes incurridos en el centro de Servicios Centrales y Comunes.

Los costes considerados como Servicios Centrales y Comunes podrían corresponder a los siguientes:

- Costes de terrenos ocupados y obra civil construida destinada a actividades o usos de carácter general tales como urbanización del conjunto, viales, aparcamientos, etc.
- Obra civil de construcciones tales como el vestuario y comedor de empleados, el aula medioambiental, las oficinas administrativas y comerciales, báscula de pesaje, etc.
- También se puede incluir el Servicio de Mantenimiento en la consideración de su uso en las distintas actividades de todos los centros de coste.

Estos costes no corresponden a la realización de ninguna actividad objeto de canon concreta, sino que posibilitan todas ellas. Se trata de costes tanto por amortizaciones de inversiones, como de personal y gastos de funcionamiento cuyo objetivo es permitir la realización del conjunto de actividades objeto de la concesión. Nos referimos a actividades tales como mantenimiento general, gestión administrativa, financiera y comercial, etc.

También se podrían incluir dentro de esta categoría los gastos de constitución y primer establecimiento de la sociedad que, de resultar elegida en un proceso de concesión, se encargaría de la gestión, las campañas de concienciación medioambiental, tasas y tributos, servicios bancarios, auditorías medioambientales, etc.

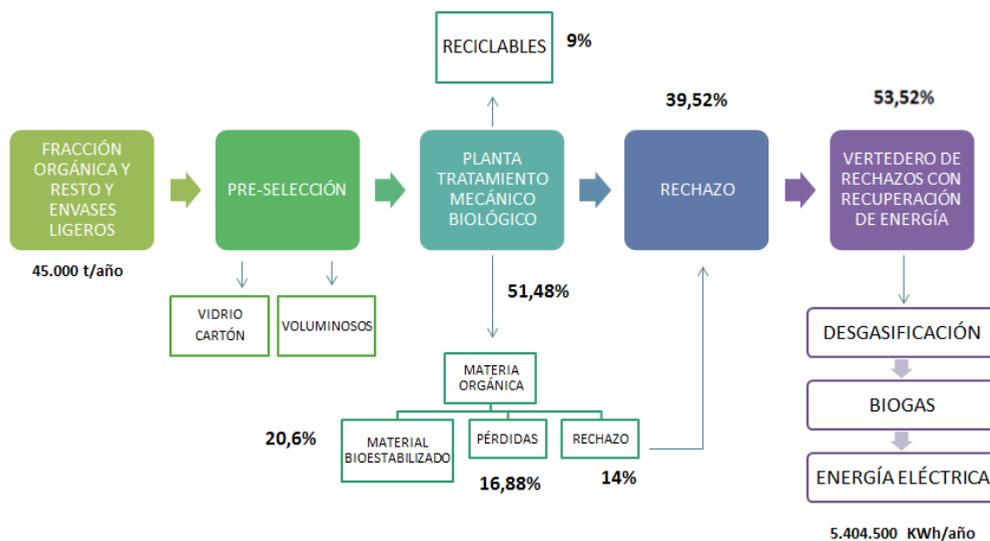
Imputación de costes a actividades objeto de canon

El coste anual medio correspondiente a Servicios Centrales será distribuido entre todas las actividades objeto de canon utilizando porcentajes basados en una estimación sobre los requerimientos de recursos comunes que conlleva cada una de dichas actividades, teniendo en cuenta la naturaleza de las mismas y su complejidad, número de instalaciones a gestionar, tonelajes a tratar, el personal dedicado a cada una de ellas, las tareas de mantenimiento necesarias, las labores de gestión administrativa o de control, etc.

6.6.- Ejemplos de estudios económicos para nuevos servicios

6.6.1.- Planta de tratamiento mecánico-biológico y vertedero de rechazos con recuperación energética

Esquema de proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.2.- Procesos y balance de masas en una planta MBT y vertedero

Costes

Las Tablas 6.3, 6.4 y 6.5 reflejan los costes asociados a las plantas de tratamiento mecánico, tratamiento biológico y al vertedero con recuperación de energía.

Ingresos

Las Tablas 6.6, 6.7 y 6.8 muestran los ingresos generados en estas instalaciones por la venta de elementos valorizables, material bioestabilizado y energía obtenida.

Balance económico

La Tabla 6.9 recoge el balance económico de esta instalación y el canon de tratamiento que se repercutiría a cada tonelada de residuo tratado.

Tabla 6.3.- Costes de la planta de tratamiento mecánico

		PLANTA DE TRATAMIENTO MECÁNICO DE RSU Y ENVASES LIGEROS		COSTES PARCIALES		
ENTRADAS		DATOS GENERALES				
		TOTALES		1/año	€/t	
OBSERVACIONES		Instalación para el tratamiento de RSUY Envases Ligeros. Vida útil mínima de los equipos de 20 años. Trabajos: 7 h/día y 260 días/año				-
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA	3.566.455,00	€	3.566	€/t	
	OBRA CIVIL	2.640.000,00	€	2.938	€/t	
COSTES EXPLOTACIÓN	SUPERFICIE MÍNIMA NECESARIA DE TERRENO					
	PERSONAL	10.000m ² (Incluyendo Planta de Bioestabilizado y Afino)	€	10.93	€/t	
	Nº OPERARIOS	Total	491.561,04	€/año		
		1 Responsable planta (compartido con Planta de Bioestabilizado y Afino)	45.137,76	€/año		
		1 Alimentador línea pre- tratamiento	36.192,33	€/año		
		1 Carretillero/prensado de balas	36.192,33	€/año		
		8 Operarios para la selección de voluminosos, limpieza subproductos y recuperación de valorizables cabina de triaje.	289.538,64	€/año		
		1 Responsable mecánico y 1 eléctrico para tareas de mantenimiento con correspondiente equipo técnico (compartido con Planta de Bioestabilizado y Afino)	84.899,98	€/año		
		4% sobre el valor de los equipos				
		Cósts	142.658,20	€/año	3.17	€/t
	52.000,00	€/año	1.16	€/t		
	375,00	Kw				
	34.125,00	€/año	0,76	€/t		
	Potencia total instalada					
	Cósts					
	GASTOS ELECTRICIDAD					
	MAQUINARIA	300.000,00	€	0,33	€/t	
	GASTOS AGUA	12.000,00	€/año	0,27	€/t	
	SEGUROS	2.500,00	€/año	0,06	€/t	
	ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00	€/año	1,33	€/t	
	OTROS	10.000,00	€/año	0,22	€/t	
	GASTOS FINANCIEROS (5%)	16.266,14	€/año	0,36	€/t	
	GASTOS GENERALES (16%)	183.493,30	€/año	4,08	€/t	
	IVA (10%)	133.032,64	€/año	2,96	€/t	
COSTE TOTAL PLANTA				32,52	€/t	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.6.- Ingresos por ventas de elementos valorizables

PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y ENVASES LIGEROS					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% RECUPERADO	t/año RECUPERADAS	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
ENVASES	71,00	2.875,50	200,00	575.100,00	12,78
PAPEL Y CARTÓN	27,00	1.093,50	30,00	32.805,00	0,73
VIDRIO	2,00	81,00	45,00	3.645,00	0,08
SUBTOTAL	100,00	4.050,00	275,00	611.550,00	13,59
INGRESO ANUAL (€/t)					13,59

Tabla 6.7.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado

PLANTA DE ESTABILIZACIÓN Y FINO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RSU					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% ESTABILIZADO	t/año	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
MATERIAL BIOESTABILIZADO	20,60	9.270,00	10,00	92.700,00	2,06
INGRESO ANUAL (€/t)					2,06

Tabla 6.8.- Ingresos por ventas de energía obtenida

VERTEDERO CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA			
BIOGÁS GENERADO (Nm³)	TONELADAS VERTIDAS	ENERGÍA (kWh/año)	PRECIO (€/kWh)
15.413.760,00	481.680,00	5.240.678,40	0,055
INGRESO ANUAL (€/t)			6,41
			288.237,31
			6,41

Fuente: Elaboración propia

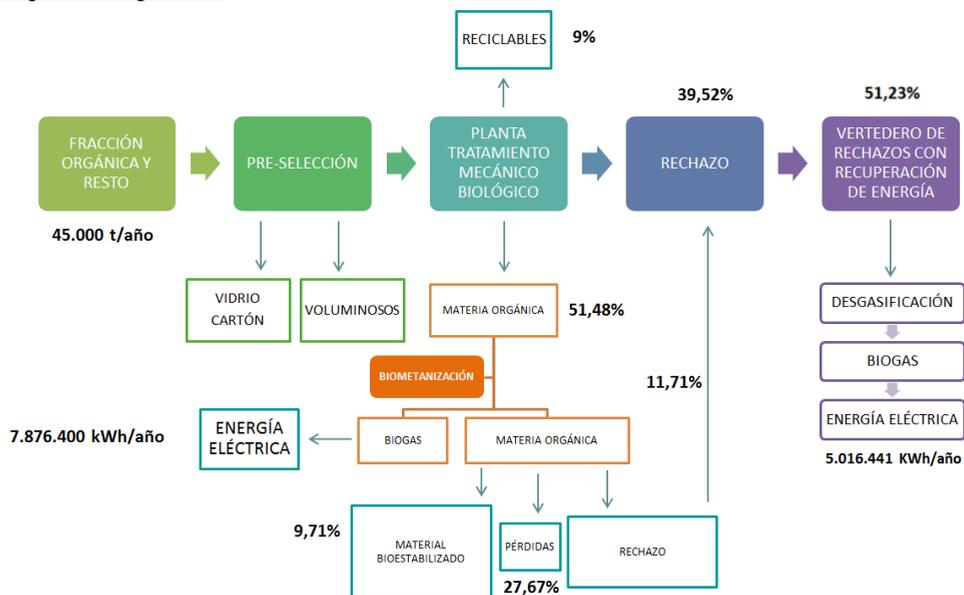
Tabla 6.9.- Balance económico de la planta MBT y vertedero con recuperación

COSTES TOTALES	€	INGRESOS TOTALES	€	CANON	€
2.752.301,07		992.487,31		1.759.813,76	
COSTES TOTALES	€/t	INGRESOS TOTALES	€/t	CANON	€/t
62,76		22,06		40,70	

Fuente: Elaboración propia

6.6.2.- Planta de tratamiento mecánico-biológico con tecnología de biometanización para obtención de biogás a partir de la fracción orgánica y vertedero de rechazos con recuperación energética

Esquema de proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.3.- Procesos y balance de masas en una planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación energética

Costes

Las Tablas 6.10, 6.11 y 6.12 reflejan los costes asociados a las plantas de tratamiento mecánico, biometanización y al vertedero con recuperación de energía.

Ingresos

Las Tablas 6.13 a 6.16 muestran los ingresos generados en estas instalaciones por la venta de elementos valorizables, material bioestabilizado y energía obtenida.

Balance económico

La Tabla 6.17 recoge el balance económico de esta instalación y el canon de tratamiento que se repercutiría a cada tonelada de residuo tratado.

Tabla 6.10.- Costes de la planta de tratamiento mecánico

ENTRADAS		DATOS GENERALES		COSTES PARCIALES		
		TOTALES	V/año			
OBSERVACIONES		45.000,00				
Instalación para el tratamiento de RSU y Envases Ligeros. Vida útil mínima de los equipos de 20 años. Trabajos: 7 h/día y 260 días/año						
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA	3.566.465,00	€	3,96	€/t	
	OBRA CIVIL	2.640.000,00	€	2,93	€/t	
	SUPERFICIE MÍNIMA NECESARIA DE TERRENO PERSONAL	10.000 m ² (Incluyendo Planta de Biometanización y Estabilización)				
		Total	491.961,04	10,93	€/t	
COSTES EXPLOTACIÓN	Nº OPERARIOS	1 Responsable planta (compartido con Planta de Bioestabilizado y Afino)	45.137,76	€/año		
		1 Alimentador línea pre-tratamiento	36.192,33	€/año		
		1 Corredor/prensado de ballas	36.192,33	€/año		
		8 Operarios para la selección de voluminosos, limpieza subproductos y recuperación de valorizables cabina de triaje.	289.538,64	€/año		
		1 Responsable mecánico y 1 eléctrico para tareas de mantenimiento con correspondiente equipo técnico (compartido con Planta de Bioestabilizado y Afino)	84.899,98	€/año		
			4% sobre el valor de los equipos			
			142.658,20	€/año	3,17	€/t
			52.000,00	€/año	1,16	€/t
			Potencia total instalada	375,00	Kw	
			34.125,00	€/año	0,76	€/t
	MAQUINARIA	300.000,00	€	0,33	€/t	
	GASTOS AGUA	12.000,00	€/año	0,27	€/t	
	SEGUROS	2.500,00	€/año	0,06	€/t	
	ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00	€/año	1,33	€/t	
	OTROS	10.000,00	€/año	0,22	€/t	
		16.266,14	€/año	0,36	€/t	
GASTOS FINANCIEROS (5%)		183.493,30	€/año	4,08	€/t	
GASTOS GENERALES (16%)		133.032,64	€/año	2,96	€/t	
IVA (10%)						
COSTE TOTAL PLANTA		32,52			€/t	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.11.- Costes de la planta biometanización con aprovechamiento biogás

		PLANTA DE BIOMETANIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO BIOGÁS	
		DATOS GENERALES	
SALIDAS	ENTRADAS	ENERGÍA GENERADA	t/año kWh/año
			23.166,00
			7.876.440,00
OBSERVACIONES		Supuestos Vida útil 20 años Producción energética ~ 500 Nm ³ /t Tasa de recuperación 10%	
INVERSIÓN TOTAL		NOTA: Este coste INCLUYE Tto biológico y Tto del gas	
		11.000.000,00	
GASTOS FINANCIEROS (5%)		11.825,00	
GASTOS GENERALES (16%)		89.892,00	
IVA (10%)		65.171,70	
COSTE TOTAL PLANTA		15,93	
		€/t	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.12.- Costes del vertedero con recuperación energética

		VERTEDERO CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA		
		DATOS GENERALES		
ENTRADAS		23.053,50		t/año
CAPACIDAD VERTEDERO		700.000,00		m ³
SALIDAS	BIOGÁS GENERADO	14.754.240,00		Nm ³ (en 20 años)
	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA	Promedio	5.016.441,60	kWh/año
OBSERVACIONES		Supuestos Vida útil de vertedero: 20 años 1 m ³ biogás --> 6000 Kcal --> 6 kWh de electricidad Este coste incluye proyecto ejecución de vertedero y sistema de desgasificación del mismo.		
INVERSIÓN TOTAL		11.632.000,00		€
GASTOS FINANCIEROS (5%)		23.991,00		€/año
GASTOS GENERALES (16%)		96.894,56		€/año
IVA (10%)		70.248,56		€/año
COSTE TOTAL PLANTA		17,17		€/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.13.- Ingresos por ventas de elementos valorizables

PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y ENVASES LIGEROS					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% RECUPERADO	1/año RECUPERADAS	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
ENVASES	71,00	2.875,50	200,00	575.100,00	12,78
PAPEL Y CARTÓN	27,00	1.093,50	30,00	32.805,00	0,73
VIDRIO	2,00	81,00	45,00	3.645,00	0,08
SUBTOTAL	100,00	4.050,00	275,00	611.550,00	13,59
INGRESO ANUAL (€/t)					13,59

Tabla 6.14.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado

PLANTA DE ESTABILIZACIÓN Y AFINO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RSU					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% ESTABILIZADO	1/año	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
MATERIAL BIOESTABILIZADO	9,71	3.884,00	10,00	38.840,00	0,971
INGRESO ANUAL (€/t)					0,971

Tabla 6.15.- Ingresos por ventas de energía obtenida en biometanización

RECUPERACIÓN ENERGÉTICA BIOMETANIZACIÓN					
BIOGÁS GENERADO (Nm³)	ENERGÍA (kWh/año)	PRECIO (€/kWh)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)	
1.158.300,00	7.876.440,00	0,055	433.204,20	10,83	
INGRESO ANUAL (€/t)				10,83	

Tabla 6.16.- Ingresos por ventas de energía obtenida en vertedero

VERTEDERO CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA					
BIOGÁS GENERADO (Nm³)	TONELADAS VERTIDAS	ENERGÍA (kWh/año)	PRECIO (€/kWh)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
14.754.240,00	461.070,00	5.016.441,60	0,055	275.904,29	6,90
INGRESO ANUAL (€/t)					6,90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.17.- Balance económico de la planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación

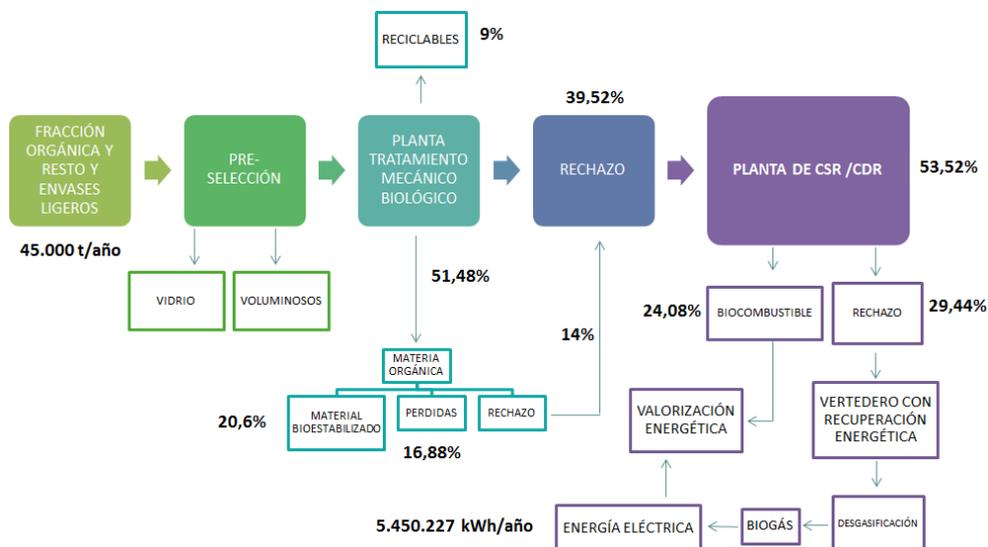
COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
2.952.981,89	1.359.498,49	1.593.483,40
€	€	€

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
65,62	32,29	33,33
€/t	€/t	€/t

Fuente: Elaboración propia

6.6.3.- Planta de tratamiento mecánico biológico y valorización del rechazo mediante tecnología de CSR/CDR

Esquema de proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.4.- Procesos y balance de masas en una planta MBT, planta de CSR/CDR y vertedero con recuperación energética

Costes

Las Tablas 6.18 a 6.21 reflejan los costes asociados a las plantas de tratamiento mecánico, biológico, planta de CSR/CDR y al vertedero con recuperación de energía.

Ingresos

Las Tablas 6.22 a 6.25 muestran los ingresos generados en estas instalaciones por la venta de elementos valorizables, material bioestabilizado, CSR/CDR y energía obtenida.

Balance económico

La Tabla 6.26 recoge el balance económico de esta instalación y el canon de tratamiento que se repercutiría a cada tonelada de residuo tratado.

Tabla 6.18.- Costes de la planta de tratamiento mecánico

		PLANTA DE TRATAMIENTO MECÁNICO DE RSU Y ENVASES LIGEROS	
ENTRADAS		DATOS GENERALES	
TOTALES		45.000,00	t/año
COSTES PARGIALES			
OBSERVACIONES		Instalación para el tratamiento de RSU y Envases Ligeros. Vida útil mínima de los equipos de 20 años. Trabajos: 7h/día y 260 días/año	
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA	3.566.455,00	€
	OBRA CIVIL	2.640.000,00	€
COSTES EXPLOTACIÓN	PERFICIE MÍNIMA NECESARIA DE TERRE PERSONAL	10.000 m ² (Incluyendo Planta de Bioestabilizado y Afino)	€
	Nº OPERARIOS	455.768,71	€/año
COSTES EXPLOTACIÓN	Total	45.137,76	€/año
	1 Responsable planta (compartido con Planta de Bioestabilizado y Afino)	36.192,33	€/año
	1 Alimentador línea pre-tratamiento	36.192,33	€/año
	1 Carretillero/prensado de balas	253.346,31	€/año
	7 Operarios para la selección de voluminosos; limpieza subproductos y recuperación de valorizables cabina de triaje.	84.899,98	€/año
	1 Responsable mecánico y 1 eléctrico para tareas de 4% sobre el valor de los equipos		
	Mantenimiento y conservación MAQUINARIA	142.658,20	€/año
	Mantenimiento y conservación OBRA CIVIL	52.000,00	€/año
	GASTOS ELECTRICIDAD	375,00	Kw
	GASTOS AGUA	34.125,00	€/año
MAQUINARIA	300.000,00	€	
GASTOS AGUA	12.000,00	€/año	
SEGUROS	2.500,00	€/año	
SISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS OTROS	60.000,00	€/año	
GASTOS FINANCIEROS (5%)	10.000,00	€/año	
GASTOS GENERALES (16%)	16.266,14	€/año	
IVA (10%)	177.702,53	€/año	
	128.834,33	€/año	
COSTE TOTAL PLANTA		31,49	€/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.19.- Costes de la planta de tratamiento biológico

		PLANTA DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA			
		DATOS GENERALES	COSTES PARCIALES		
ENTRADAS		TOTALES	45.000,00	€/año	-
OBSERVACIONES		Instalación para la estabilización y afino de la fracción orgánica. Vida útil mínima de los equipos de 20 años. Vida útil de las lonas de las trincheras de 4-5 años.			-
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA		1.154.000,00	€	1,28
	OBRA CIVIL		1.026.905,00	€	1,14
	PERFICIE MÍNIMA NECESARIA DE TERRE PERSONAL		-	€	-
		Total	144.769,32	€/año	3,22
COSTES EXPLOTACIÓN		1 Responsable planta (compartido con Planta de Tto de RSU y EELL)	0,00	€/año	
		1 Responsable mecánico y otro eléctrico para tareas de mantenimiento con correspondiente equipo técnico (compartido con Planta de Tto de RSU y EELL)	0,00	€/año	
		3 Operarios para trincheras	108.576,99	€/año	
		1 Operario para operaciones con pala cargadora de 6% sobre el valor de los equipos de Estabilización	36192,33	€/año	
		4% sobre el valor de los equipos de Afino	69.240,00	€/año	1,54
			41.076,20	€/año	0,91
			-		-
			-		-
		Potencia equipos Estabilización	52,00	kw	
		Potencia equipos Afino	176,00	kw	
	Potencia Total	228,00	kw		
	Costes	20.748,00	€/año	0,46	
		6.000,00	€/año	0,13	
		2.500,00	€/año	0,06	
SISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIO					
	OTROS				
		5.000,00	€/año	0,11	
		5.452,26	€/año	0,12	
GASTOS FINANCIEROS (5%)		64.612,97	€/año	1,44	
GASTOS GENERALES (16%)		46.844,40	€/año	1,04	
IVA (10%)					
COSTE TOTAL PLANTA		11,45			€/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.20.- Costes de la planta de CSR/CDR

PLANTA DE CSR/CDR		
DATOS GENERALES		
ENTRADAS		t/año
	24.084,00	t/año
SALIDAS	CSR	t/año
	CDR	t/año
	PCI	Kcal/kg
	3.500-4.000	
OBSERVACIONES		
Rendimiento de la planta: 45%		
Vida útil: 15 años		
INVERSIÓN TOTAL		€
		2.125.134,00
GASTOS FINANCIEROS (5%)		€/año
		5.667,02
GASTOS GENERALES (16%)		€/año
		23.574,82
IVA (10%)		€/año
		17.091,74
COSTE TOTAL PLANTA		€/t
		4,18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.21.- Costes del vertedero con recuperación energética

VERTEDERO CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA		DATOS GENERALES	
ENTRADAS		13.248,00	t/año
CAPACIDAD VERTEDERO		350.000,00	m ³
SALIDAS	BIOGÁS GENERADO	16.030.080,00	Nm ³ (en 20 años)
	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA	Promedio	5.450.227,20 kWh/año
OBSERVACIONES		<p><u>Supuestos</u></p> Vida útil de vertedero: 20 años 1t residuos ---> 110 Nm ³ de biogás hasta su degradación Tasa recuperación: 55% 1 m3 biogás ---> 6000 Kcal ---> 6,8 kWh de electricidad Este coste incluye proyecto ejecución de vertedero y sistema de desgasificación del mismo.	
INVERSIÓN TOTAL		11.632.000,00	€
GASTOS FINANCIEROS (5%)		23.991,00	€/año
GASTOS GENERALES (16%)		96.894,56	€/año
IWA (10%)		70.248,56	€/año
COSTE TOTAL PLANTA		18,79	€/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.22.- Ingresos por ventas de elementos valorizables

PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y ENVASES LIGEROS					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% RECUPERADO	t/año RECUPERADAS	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
ENVASES	71,00	2.875,50	200,00	575.100,00	12,78
PAPEL Y CARTÓN	27,00	1.093,50	30,00	32.805,00	0,73
VIDRIO	2,00	81,00	45,00	3.645,00	0,08
SUBTOTAL	100,00	4.050,00	275,00	611.550,00	13,59
INGRESO ANUAL (€/t)					13,59

Tabla 6.23.- Ingresos por ventas de material bioestabilizado

PLANTA DE ESTABILIZACIÓN Y AFINO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RSU					
RECUPERACIÓN MATERIAL	% ESTABILIZADO	t/año	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
MATERIAL BIOESTABILIZADO	20,60	9.270,00	10,00	92.700,00	2,06
INGRESO ANUAL (€/t)					2,06

Tabla 6.24.- Ingresos por ventas de CSR/CDR

CSR_CDR			
t/año TRATADAS	PRODUCCIÓN t/año	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)
24.084,00	10.837,80	25,00	270.945,00
INGRESO ANUAL (€/t)			6,02

Tabla 6.25.- Ingresos por ventas de energía obtenida en vertedero

VERTEDERO CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA					
BIOGÁS GENERADO (Nm³)	TONELADAS VERTIDAS	ENERGÍA (kWh/año)	PRECIO (€/kWh)	INGRESO ANUAL (€)	INGRESO ANUAL (€/t)
16.030.080,00	264.960,00	5.450.227,20	0,055	299.762,50	6,66
INGRESO ANUAL (€/t)					6,66

Fuente: Elaboración propia

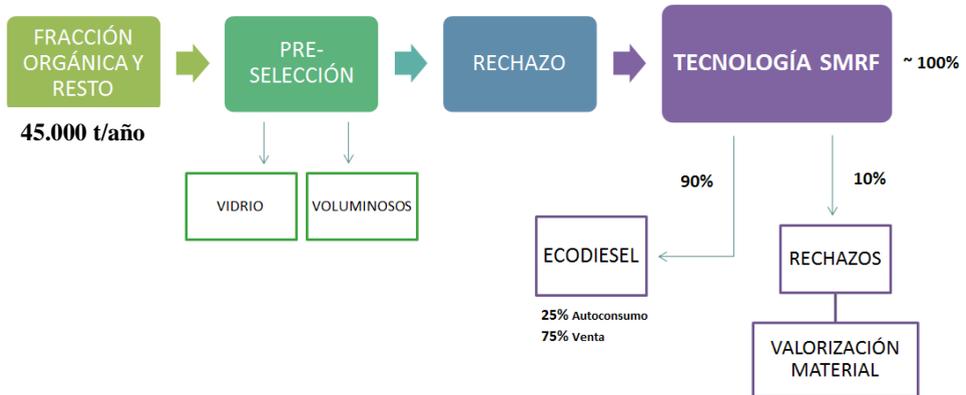
Tabla 6.26.- Balance económico de la planta MBT, planta de CSR/CDR y vertedero con recuperación

COSTES TOTALES	€	INGRESOS TOTALES	€	CANON	€
2.893.209,36		1.274.957,50		1.618.251,86	
COSTES TOTALES	€/t	INGRESOS TOTALES	€/t	CANON	€/t
64,29		28,33		35,96	

Fuente: Elaboración propia

6.6.4.- Planta de Ecodiesel o diesel sintético y valorización material del rechazo

Esquema de proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.5.- Procesos y balance de masas en una planta de Ecodiesel

Costes

La Tabla 6.27 refleja los costes asociados a la planta de Ecodiesel

Ingresos

Las Tablas 6.28 y 6.29 muestran los ingresos generados en esta instalación por la venta de elementos valorizables y diesel sintético

Balance económico

La Tabla 6.30 recoge el balance económico de esta instalación y el canon de tratamiento que se repercutiría a cada tonelada de residuo tratado.

Tabla 6.27.- Costes de la planta de Ecodiesel o diesel sintético

		PLANTA DE ECODIESEL O DIESEL SINTÉTICO PARA EL CVSE		
		DATOS GENERALES		COSTES PARCIALES
ENTRADAS	Rechazos	6,80	t/h	-
	Rechazos	45.000,00	t/año	-
SALIDAS	PRODUCCIÓN DE ECODIESEL	1.000,00	L/h	-
		4.380.000,00	L/año	-
OBSERVACIONES		Carga de Trabajo: 365 días/año y 16 horas/día con un rendimiento del 70%. Vida útil de los equipos de 15 años		
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA	5.250.000,00	€	7,78
	OBRA CIVIL, INSTALACIONES, PRE-TRATAMIENTO, ALMACENAJE Y SECADO	2.000.000,00	€	2,96
	PERSONAL		€/año	18,00
	Nº OPERARIOS		€/año	-
			€/año	-
			€/año	-
COSTES EXPLOTACIÓN	MATERIALES VARIOS (REACTIVOS, CORTANTES)	650.000,00	€/año	14,44
	GASTOS GENERALES	120.000,00	€/año	2,67
	IMPREVISTOS	162.000,00	€/año	3,60
	CONSUMO ENERGÉTICO	1.168.000,00	L	0,00
	MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN	262.500,00	€/año	5,83
	SEGUROS	2.500,00	€/año	0,06
	ASISTENCIA TÉCNICA	60.000,00	€/año	1,33
	GASTOS FINANCIEROS (5%)	24.166,67	€/año	0,54
	GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)	411.920,00	€/año	9,15
	IVA (10%)	298.642,00	€/año	6,64
COSTE TOTAL PLANTA		73,00		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.28.- Ingresos por ventas de elementos valorizables

PRODUCCIÓN DE ECODIESEL O DIESEL SINTÉTICO			
t/año TRATADAS	PRODUCCIÓN (L/año)	PRECIO (€/L)	INGRESO ANUAL (€/t)
45.000,00	4.380.000,00	0,50	2.190.000,00
INGRESO ANUAL (€/t)			48,67
			48,67

Tabla 6.29.- Ingresos por ventas de Ecodiesel

MATERIAL VALORIZABLE		
t/año	PRECIO (€/t)	INGRESO ANUAL (€)
4.500,00	22,22	100.000,00
INGRESO ANUAL (€/t)		2,22
		2,22

Fuente: Elaboración propia

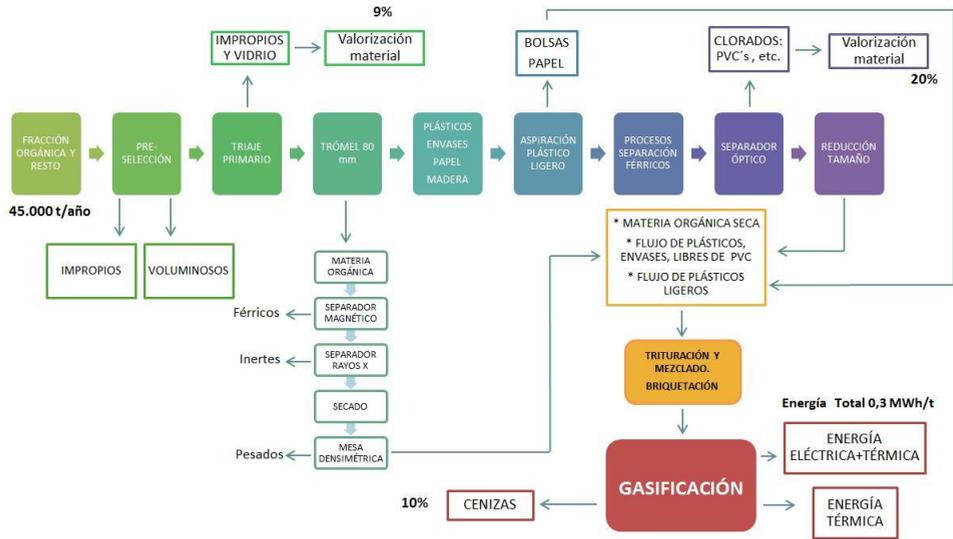
Tabla 6.30.- Balance económico de la planta de Ecosiesel o diesel sintético

COSTES TOTALES	€/t	INGRESOS TOTALES	€/t	CANON	€/t
73,00		50,89		22,11	
COSTES TOTALES	€	INGRESOS TOTALES	€	CANON	€
3.285.062,00		2.290.000,00		995.062,00	

Fuente: Elaboración propia

6.6.5.- Planta de tratamiento mecánico y valorización con tecnología de gasificación

Esquema de proceso



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.6.- Procesos con planta de tratamiento y gasificación

Costes

La Tabla 6.31 refleja los costes asociados a la planta de tratamiento mecánico y gasificación

Ingresos

La Tabla 6.32 muestra los ingresos generados en esta instalación por la venta de energía.

Balance económico

La Tabla 6.33 recoge el balance económico de esta instalación y el canon de tratamiento que se repercutiría a cada tonelada de residuo tratado.

Tabla 6.31.-Costes de la planta de tratamiento mecánico y gasificación

		PLANTA DE TRATAMIENTO MECÁNICO Y GASIFICACIÓN	
ENTRADAS		DATOS GENERALES	COSTES PARCIALES
		TOTALES	€/año
OBSERVACIONES		Vida útil mínima de los equipos de 20 años. Potencia instalada 1,5 MW	-
COSTES INVERSIÓN	MAQUINARIA OBRA CIVIL	13.956.903,86 2.000.000,00	€ €
	SUPERFICIE MÍNIMA NECESARIA DE TERRENO	10.000 m ²	€/t
	PERSONAL	230.400,00	€/año
Nº OPERARIOS			€/año €/año €/año €/año €/año
COSTES EXPLOTACIÓN	MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA PLANTA	750.000,00	€/año
	MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	0,00	€/año
	MAQUINARIA	0,00	€
	CONSUMO ENERGÉTICO	879.000,00	€/año
	GASTOS AGUA	0,00	€/año
	SEGUROS	0,00	€/año
	ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00	€/año
	OTROS	6.000,00	€/año
	GASTOS FINANCIEROS (5%)	39.892,26	€/año
	GASTOS GENERALES (16%)	442.101,99	€/año
IVA (10%)	320.523,94	€/año	
COSTE TOTAL PLANTA		78,35	€/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.32.- Ingresos por ventas de energía

PLANTA DE GASIFICACIÓN			
Producción MWh/año	PRECIO (€/MWh)	INGRESOS ANUALES (€)	INGRESOS ANUALES (€/t)
20.631,38	120,00	2.475.765,60	55,02

Tabla 6.33.- Balance económico de la planta de gasificación

COSTES TOTALES		INGRESOS TOTALES		CANON	
3.525.763,39	€	2.475.765,60	€	1.049.997,79	€
COSTES TOTALES		INGRESOS TOTALES		CANON	
78,35	€/t	55,02	€/t	23,33	€/t

Fuente: Elaboración propia

6.6.6.- Canon de explotación del servicio según tecnología

Planta de tratamiento mecánico-biológico y vertedero de rechazos con recuperación energética

Tabla 6.34.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico-biológico y vertedero de rechazos con recuperación energética

RESUMEN COSTES ANUAL			
CONCEPTO		IMPORTE (€)	
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA PLANTA		461.848,00	
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN		30.000,00	
AMORTIZACIÓN OBRA CIVIL		422.800,00	
PERSONAL		636.730,36	
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA PLANTA		282.054,40	
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN		104.000,00	
CONSUMO ENERGÉTICO		54.873,00	
AGUA		18.000,00	
SEGUROS		5.000,00	
ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS		60.000,00	
OTROS		35.937,60	
GASTOS FINANCIEROS (5%)		45.732,40	
GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)		345.116,12	
IVA (10%)		250.209,19	
TOTAL €		2.752.301,07	
TOTAL €/Tn		62,76	

RESUMEN INGRESOS ANUAL			
CONCEPTO		IMPORTE (€)	
VENTA DE MATERIALES RECUPERABLES		611.550,00	
VENTA DE MATERIAL BIOESTABILIZADO		92.700,00	
VENTA DE ENERGÍA DESGASIFICACIÓN VERTEDERO		288.237,31	
TOTAL €		992.487,31	
TOTAL €/Tn		22,06	

BALANCE AÑO TIPO (€)			
COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON	
2.752.301,07	992.487,31	1.759.813,76	€

BALANCE AÑO TIPO (€/t)			
COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON	
62,76	22,06	40,70	€/t

Fuente: Elaboración propia

Planta de tratamiento mecánico-biológico con tecnología de biometanización para obtención de biogás a partir de la fracción orgánica y vertedero de rechazos con recuperación energética

Tabla 6.35.- Canon de explotación de una planta MBT, planta de biometanización y vertedero con recuperación energética

RESUMEN COSTES ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE (€)
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA PLANTA	589.302,75
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	29.540,00
AMORTIZACIÓN OBRA CIVIL	422.800,00
PERSONAL	651.461,04
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA PLANTA	204.738,20
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	103.762,40
CONSUMO ENERGÉTICO	56.125,00
AGUA	23.000,00
SEGUROS	5.250,00
ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00
OTROS	116.187,60
GASTOS FINANCIEROS (5%)	52.082,14
GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)	370.279,86
IVA (10%)	268.452,90
TOTAL €	2.952.981,89
TOTAL €/Tn	65,62

RESUMEN INGRESOS ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE (€)
VENTA DE MATERIALES RECUPERABLES	611.550,00
VENTA DE MATERIAL BIOESTABILIZADO	38.840,00
VENTA ENERGÍA BIOMETANIZACIÓN	433.204,20
VENTA DE ENERGÍA DESGASIFICACIÓN VERTEDERO	275.904,29
TOTAL €	1.359.498,49
TOTAL €/Tn	32,29

BALANCE AÑO TIPO (€)

COSTES TOTALES		INGRESOS TOTALES		CANON	
2.952.981,89	€	1.359.498,49	€	1.593.483,40	€

BALANCE AÑO TIPO (€/t)

COSTES TOTALES		INGRESOS TOTALES		CANON	
65,62	€/t	32,29	€/t	33,33	€/t

Fuente: Elaboración propia

Planta de tratamiento mecánico-biológico y valorización del rechazo mediante tecnología de CSR/CDR

Tabla 6.36.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico-biológico y valorización del rechazo mediante tecnología de CSR/CDR

RESUMEN COSTES ANUAL	
CONCEPTO	IMPORTE (€)
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA PLANTA	532.685,80
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	39.457,29
AMORTIZACIÓN OBRA CIVIL	455.385,39
PERSONAL	600.538,03
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA PLANTA	284.887,91
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	104.187,43
CONSUMO ENERGÉTICO	71.123,19
AGUA	20.025,96
SEGUROS	5.000,00
ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00
OTROS	42.738,03
GASTOS FINANCIEROS (5%)	51.376,42
GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)	362.784,87
IVA (10%)	263.019,03
TOTAL €	2.893.209,36
TOTAL €/Tn	64,29

RESUMEN INGRESOS ANUAL	
CONCEPTO	IMPORTE (€)
VENTA DE MATERIALES RECUPERABLES	611.550,00
VENTA DE MATERIAL BIOESTABILIZADO	92.700,00
CSR_CDR	270.945,00
VENTA DE ENERGÍA DESGASIFICACIÓN VERTEDERO	299.762,50
TOTAL €	1.274.957,50
TOTAL €/Tn	28,33

BALANCE AÑO TIPO (€)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
2.893.209,36 €	1.274.957,50 €	1.618.251,86 €

BALANCE AÑO TIPO (€/t)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
64,29 €/t	28,33 €/t	35,96 €/t

Fuente: Elaboración propia

Planta de Ecodiesel o diesel sintético y valorización material del rechazo

Tabla 6.37.- Canon de explotación de una planta de Ecodiesel o diesel sintético y valorización material del rechazo

RESUMEN COSTES ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE (€)
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA PLANTA	350.000,00
AMORTIZACIÓN OBRA CIVIL	133.333,33
PERSONAL	810.000,00
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA PLANTA	262500
GASTOS GENERALES	120.000,00
CONSUMO ENERGÉTICO	-
MATERIALES VARIOS (REACTIVOS, CORTANTES)	650.000,00
SEGUROS	2.500,00
ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00
IMPREVISTOS	162.000,00
GASTOS FINANCIEROS (5%)	24166,66667
GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)	411.920,00
IVA (10%)	298642
TOTAL €	3.285.062,00

TOTAL €/Tn 73,00

RESUMEN INGRESOS ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE (€)
VENTA ECODIESEL	2.190.000,00
VENTA MATERIAL VALORIZABLE	100.000,00
TOTAL	2.290.000,00

TOTAL €/Tn 50,89

BALANCE AÑO TIPO (€)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
3.285.062,00 €	2.290.000,00 €	995.062,00 €

BALANCE AÑO TIPO (€/t)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
73,00 €/t	50,89 €/t	22,11 €/t

Fuente: Elaboración propia

Planta de tratamiento mecánico y valorización con tecnología de gasificación
Tabla 6.38.- Canon de explotación de una planta de tratamiento mecánico y valorización con tecnología de gasificación

RESUMEN COSTES ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA PLANTA	697.845,19
AMORTIZACIÓN MAQUINARIA EXPLOTACIÓN	0,00
AMORTIZACIÓN OBRA CIVIL	100.000,00
PERSONAL	230.400,00
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN	750.000,00
MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN MAQUINARIA	0,00
CONSUMO ENERGÉTICO	879.000,00
AGUA	0,00
SEGUROS	0,00
ASISTENCIA TÉCNICA EXTERNA Y ESTUDIOS	60.000,00
OTROS	6.000,00
GASTOS FINANCIEROS (5%)	39.892,26
GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL (16%)	442.101,99
IVA (10%)	320.523,94
TOTAL	3.525.763,39

TOTAL €/Tn

78,35

RESUMEN INGRESOS ANUAL

CONCEPTO	IMPORTE (€)
VENTA DE ENERGÍA	2.475.765,60
TOTAL	2.475.765,60

TOTAL €/Tn

55,02

BALANCE ANUAL (€)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
3.525.763,39 €	2.475.765,60 €	1.049.997,79 €

BALANCE ANUAL (€/t)

COSTES TOTALES	INGRESOS TOTALES	CANON
78,35 €/t	55,02 €/t	23,33 €/t

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.39.- Resumen canon de explotación según tecnología

TIPOLOGÍA PLANTA	CANON (€/t)
TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO Y VERTEDERO DE RECHAZOS CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA	40,70
TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO CON TECNOLOGÍA DE BIOMETANIZACIÓN PARA OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA Y VERTEDERO DE RECHAZOS CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA	33,33
TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO Y VALORIZACIÓN DEL RECHAZO MEDIANTE TECNOLOGÍA DE CSR/CDR	35,96
ECODIESEL O DIESEL SINTÉTICO Y VALORIZACIÓN MATERIAL DEL RECHAZO	22,11
TRATAMIENTO MECÁNICO Y VALORIZACIÓN CON TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN	23,33

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 7

Bibliografía

7.1.- Compostaje

De Bertoldi M.; Vallini G.; Pera A. y Zucconi F. 1982. “*Comparison of three windrow compost systems*”. Rev. Biocycle 23.

Diaz, L.F.; Savage, G.M. 2007. “*Factors that affect the process. Compost Science and Technology*”. Elsevier, Amsterdam,

Eweis, J.; Ergas S.; Chang D. y Schroeder E. 1999. “*Principios de Biorrecuperación*”. 1ª Edición. McGraw Hill. España.

Fitzpatrick, G.E.; Worden, E.C.; Vendrame, W.A. 2005. “*Historical development of composting technology during the 20th century*”. Horttechnology, 15.

Gasser J.K.R. 1985. “*Composting of Agricultural and Other Wastes*”. Elsevier Applied Science; London, U.K.

Haug, R.T. 1993. “*The practical handbook of compost engineering*”. Lewis Publishers.

Helynen S. 2004. “*Overview of European Policies and Directives aimed at promoting energy from wood biomass*”. Future Issues for Forest Industries in Europe, 28 April - 1 May, Dublin, Ireland.

- Hoitink, H.A.J.; Keener, Hm.; Marugg, C.; Hansen, R.C. 1993. “*Optimizing the efficiency of the composting process*”. Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects. Renaissance Publications, Ohio.
- Holgado, A.; Columela, L.J.M. 1988. “*De los trabajos de campo. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación*”. Ed. Siglo XXI de España, Madrid.
- Jeris, J.S.; Regan, R.W. 1973. “*Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting. Part II*”. Compost Sci, 14.
- Jhorar, B.S.; Phogat, V., Malik E. 1991. “*Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment*”. Arid Soil Rest. Rehabil., 5
- Kiehl, F.J. 1985. “*Fertilizantes orgánicos*”. Editora Agronómica Ceres Ltda. Sao Paulo
- Madejón, E.; Díaz, M.J.; López, R.; Cabrera, F. 2001. “*Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used*”. Biores. Technol., 76
- Miyatake F.; Iwabuchi K, 2006. “*Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure*”. Biores. Technol.,97
- Moreno Casco, J.; Moral Herrero, R. (2008). “*Compostaje*”. Mundi Prensa, España.
- Mustin, M. 1987. “*Le compost. Gestion de la matière organique*”. Editions François Dubusc. Paris.
- Poincelot, R.P. 1975. “*The biochemistry and methodology of composting*”. The Connecticut Agricultural Experimental Station. Bull 754.
- Rynk, R. y Richard, T. 2004. “*Sistemas de producción comercial de compost*”. Utilización de compost en sistemas de cultivo agrícola. Mundi-Prensa. Madrid.
- Rynk, R.; van de Kamp M.; Willson G.B.; Singley M.E.; Richard T.L.; Kolega J.J.; Gouin, L.; Laliberty Jr.; Kay D.; Murphy D.W.; Hoitink H.A.J. and Brinton W.F. 1992. “*On-Farm composting handbook*”. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, N.Y.
- Saña, J. y Soliva, M. 1987. “*El compostatge: procés, sistemes i aplicacions*”. Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona. Quaderns d'ecologia aplicada nº 11.

Sánchez-Monedero M. A.; Roig A.; Paredes C.; Bernal M. P. 2001. “*Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures*”. *Biores. Technol.*, 78

Stoffella P.J. and Kahn, B.A. 2001. “*Compost utilization in horticultural cropping systems*”. Lewis Publishers, New York, USA

Suler, D.J.; Finstein, S. 1977. “*Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO₂ Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste*”. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33

Tchobanoglous G.; Theisen, H.; Vigil, S. 1996. “*Gestión integral de residuos sólidos*”. Mc GrawHill.

Wilson, G.B. y Dalmat, D. 1983. “*Sewage sludge composting in U.S.A*”. *BioCycle* 24

Zhu, N.W. 2006. “*Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system*”. *Biores. Technol.* 97

7.2.- Biometanización

Cabildo, M.P.; Claramunt, R.M.; Cornago, M.P.; et al. 2008. “*Reciclado y tratamiento de residuos*”. *Ciencias Ambientales. UNED.*

Carreras, N.; Dorronsoro, J.L. 1999. “*Aprovechamiento energético del biogás generado a partir de residuos sólidos urbanos*”. *TecnoAmbiente*, 71.

Chugh, S.; Chynoweth, D.P.; Clarke, W.; Pullammanappallil, P.; Rudolph, V. 1999. “*Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach-bed process*”. *Bioresource Technology*, 69.

Clark, R.H. y Speece, R.E. 1989. “*The pH tolerance of anaerobic digestion*”. *Advanced water pollution research Int. Conf* 5th.

De Baere, L. 2000. “*Anaerobic digestion of solid waste: state of the art*”. *Water Science & Technology*, 41.

El-Fadel, M.; Massoud, M. 2001. “*Methane emissions from wastewater management*”. *Environmental Pollution*, 114.

Flotats, X.; Bonmatí, A.; Campos, E.; Teira, M.R. 2000. “*El proceso de secado de purines en el marco de gestión integral de residuos ganaderos*”. *Residuos*, 53.

- Jarabo, F. 1999. “*La energía de la biomasa*”. 2º ed. Madrid: S.A.P.T publicaciones técnicas, S.L.
- Lay, J.J.; Li, Y.Y. y Noike, T. 1997. “*The influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion*”. Water Resources. 31.
- Levasseur, J.-P. 1999. “*Anaerobic digestion of organic waste: from theory to industrial practice*”. II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste. Barcelona, Junio 15-17, vol. 2.
- Lissens, G.; Vandevivere, P.; De Baere, L.; Bley, E.M. and Verstraete, W. 2001. “*Solid waste digesters: process performance and practice for municipal solid waste digestion*”. Water Science Technology, 44.
- Massé D.I.; Droste R.L. 2000. “*Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor*”. Water Research, 34-12.
- Mata-Álvarez, J (ed.). 2002. “*Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*”. IWA Publishing.
- Mata-Álvarez, J.; Macé, S.; Llabrés, P. 2000. “*Anaerobic of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*”. Bioresource Technology.
- Milán, Z.; Sánchez, E.; Weiland, P.; Borja, R.; Martín, A.; Llangovan, K. 2001. “*Influence of different natural zeolite concentrations on the anaerobic digestion of piggery waste*”. Bioresource Technology, 80.
- Nopharatana, A.; Pullammanappallil, P.C.; Clarke, W. 2003. “*A dynamic mathematical model for sequential leach bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*”. Biochemical Engineering Journal, 13.
- Ouedraogo, A. 1999. “*Pilot-scale two-phase anaerobic digestion of the biodegradable organic fraction of Bamako district municipal solid waste*”. Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes, Barcelona, vol. 2.
- Polanco, F.F.; Encina, A.G. 2000. “*Procesos Biológicos Anaerobios. Jornadas sobre tratamientos biológicos de residuos orgánicos*”. Universidad de Valladolid.
- Speece, R.E. 1987. “*Nutrient requirements of anaerobic digestion of biomass*”. Elsevier Applied Science LTD.
- Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, SA. 1993. “*Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*”. McGraw-Hill, New York, USA.

- Turner, C.; Burton, C.H. 1997. “*The inactivation of viruses in pig slurries: a review*”. Bioresource Technology, 61.
- Van der Berg, L.; Kennedy, K.L. 1981. “*Potential use of anaerobic process for industrial waste treatment*”. Seminar of anaerobic waste water treatment and energy recovery, Pittsburgh-Pennsylvania.
- Van Lier, J.B.; Tilche, A.; Ahring, B.K.; Macarie, H.; Moletta, R.; Dohanyos, M.; Hulshoff Pol, L.W.; Lens, P. y Verstraete W. 2001. “*New perspectives in anaerobic digestion*”. Water Science & Technology, 43.
- Varnero Moreno, M.T. 2011. “*Manual de Biogás*”. Proyecto CHI/00/G32, Ministerio de Energía. Chile.
- Vélez-Sánchez-Verín, C.E.; Pinedo-Álvarez, C.; Viramontes-Olivas, O.A.; Ortega Ochoa C.; Melgoza-Castillo, A. 2008. “*Environmental biotechnologies for livestock manure treatment*”. Tecnociencia. Creatividad y desarrollo tecnológico, II.
- Vogt, G.M.; Liu, H.W.; Kennedy, K.J.; Vogt, H.S.; Holbein B.E. 2002. “*Super blue box recycling (SUBBOR) enhanced two-stage. Anaerobic digestion process for recycling municipal solid waste: laboratory pilot studies*”. Bioresource Technology.
- Weiland, P. 1992. “*One- and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues*”. International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. Abril 14–17. Venecia.

7.3.- Otras técnicas de valorización energética

- Alonso A. 2009. “*Estudio de viabilidad de una planta de producción de CSR en el Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz*”.
- Caruso, W.; Sorenson, D.; Mossa, A. 2008. “*Alternative energy technologies: Hitech solutions for urban carbon*”. London Borough of Merton Council.
- Castañeda, R; Coll, C. 2008. “*Biocarburos de segunda generación. Obtención de Bioetanol a partir de RSU y de residuos de cítricos*”.
- Davis, H.; Cornwell, A. 2008. “*Introduction to Environmental Engineering*”, fourth ed. McGraw Hill.
- Demirbas, A. 2008. “*Producing bio-oil from olive cake by fast pyrolysis*”. Energy Sources Part A. Science Direct.

- Dinis Vicente, A.C.. 2012. “*Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite vegetales: nuevos métodos de síntesis*”. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura
- Gómez Barea, A. 2013. “*Fundamentos del proceso de gasificación*”. Universidad de Sevilla
- Higman, C.; van der Burgt, M. 2008. “*Gasification*”, second ed. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing.
- J. Lupa, C. et al. 2012. “*Experimental analysis of biomass pyrolysis using microwave-induced plasma*”. Science Direct.
- Johnke, B. 2012. “*Emissions from Waste Incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, IPCC*”.
- Martínez, A; Cuenca, I. 2014. “*Diseño de un vertedero de RSU con aprovechamiento energético de biogás*”.
- Relea F. 2009. “*Calidad del CSR a partir de residuos y su impacto en los usuarios finales. CESP*”.
- Rodríguez Mendiola A. 2012. “*Conversión de residuos sólidos urbanos en biocombustibles*”
- Sarc, R.; Lorber, K. 2013. “*Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs)*”. Science Direct, 1825.
- Tchobanoglous, G.; Burton, F.; Stensel, H. 2004. “*Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*”, fourth ed. New York, NY, USA: McGraw Hill.
- Treviño, M. 2003. “*Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC*”
“*El proceso de gasificación y vitrificación de residuos por plasma con optimización de la producción eléctrica*”. ACCIONA
“*Alternativas de gestión en el Ecovertedero de Zaragoza*”
“*Guía de valorización energética de residuos*”. FENERCOM.
“*Valorización energética de residuos urbanos*”. SIRUSA
Planta de Biometanización y Compostaje de Jundiz (Vitoria-Gasteiz).

7.4.- Vertederos de RSU

Brown, K.A., Maunder, D.H. 1994. “*Explotation of Landfill Gas: a UK Perspective*” Water Science & Technology, 30

Cabildo, M.P.; Claramunt, R.M.; Cornago, M.P.; et al. 2008. “*Reciclado y tratamiento de residuos*”. Ciencias Ambientales. UNED.

Carreras, N., Dorronsoro J.L. 2006. “*Generación de energía a través del biogás extraído de los vertederos españoles*”. Residuos, 89.

Cuesta M.J.; Martín, F.; Vicente, G. y Vilar, S. 2009. “*Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*”. CEIM Confederación Empresarial de Madrid.

DoE. 1994. “*Guidance on Good practice for landfill engineering*”. Department of the Environment Research report.

DoE. 1995. “*Landfill design, construction and operational practices, waste management paper*”. Department of the Environment HMSO, Norwich.

Garrido, E. 2008. “*Metodología de Diagnóstico Ambiental de Vertedero, adaptación para su informatización utilizando técnicas difusas y su aplicación en vertederos en Andalucía*”. Universidad de Granada.

Glysson, E.A. 2003. “*Residuos sólidos*”. Mc GrawHill.

Hontoria, E.; Zamorano, M. 2000. “*Fundamento del manejo de los residuos urbanos*”. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Granada.

Jessberger, HL; Stone, K. 1991. “*Subsidence effects on clay barriers*”. Geotechnique.

Jones D.L.; Williamson K.L.; Owen A.G. 2005. “*Phytoremediation of landfill leachate*” Waste Management.

Kiely, G.1999. “*Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*”. Mc Graw Hill.

Leton T.G.; Omotosho O. 2003. “*Landfill operations in the Niger delta region of Nigeria*”. Engineering Geology.

Martín González, S. 1997. “*Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización*”. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.

McBean, E.; Rovers, F.; Farquhar, G. 1995. “*Solid Waste Landfill Engineering and Design*” Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Oman, C.; Rosqvist, H.1999. "*Transport fate of organic compounds with water through landfills*", Water Research, 33(10).

Sener, B.; Süzen, ML.; Doyuran, V. 2006. “*Landfill site selection by using geographic information systems*”. Environmental Geology, 2006, vol. 49.

Slack R.J.; Gronow J.R.; Voulvoulis N. 2005. “*Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate*”. Science of the total environment 337.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, SA. 1993. “*Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues*”. McGraw-Hill, New York, USA.

Vaillancourt K.; Waaub J.P. 2002. “*Environmental site evaluation of waste management facilities embedded into EUG_EENE model: A multicriteria approach*”. European Journal of Operational Research 139.

Vaquero Díaz, I. 2004. “*Manual de diseño y construcción de vertederos de residuos sólidos urbanos*”. Universidad Politécnica de Madrid.

Wells, A.N.; Crooks, M.E. 1987. “*Solid Waste Landfill Design Manual*”. Parametrix, Inc. Washington State Department of Ecology. GTS Section. Olympia. Washington.

Wu, J.J.; Wu, C.C.; Ma, H.W.; Chang, C.C. 2004. “*Treatment of landfill leachate by ozone based advanced oxidation process*”. Chemosphere 54.