

Aprovechamiento energético de rechazos de residuos sólidos urbanos

Montserrat Suárez Almeida¹, Celia García Arenas¹, Carlos Leiva Fernández¹, Fernando Vidal Barrero¹, José Caraballo Bello²

¹Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Universidad de Sevilla) | www.us.es

²EDIFESA | www.edifesamedioambiente.com

En este trabajo se realiza un análisis de las tecnologías disponibles y su potencial aplicación como método de valorización energética de los rechazos generados en las plantas de tratamiento de RSU en España. Para ello se ha realizado un estudio de las tecnologías termoquímicas ofrecidas comercialmente y, atendiendo a criterios de madurez tecnológica y de mercado potencial en España, se han seleccionado y estudiado de forma detallada las que se han considerado más prometedoras para po-

derse implementar en España a corto y medio plazo. El presente estudio se llevó a cabo dentro del proyecto "Análisis de Tecnologías para la Valorización Energética de RSU" realizado para Edifesa Ingeniería Medioambiental entre junio de 2016 y diciembre de 2017, donde se evaluó el desempeño de las tecnologías seleccionadas, aplicándolas al Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólido Urbanos de Montemarta Cónica (CITMC) del que es titular y gestiona la empresa Abonos Orgánicos Sevilla.

1. INTRODUCCIÓN

La eliminación de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante depósito en vertedero es un problema medioambiental grave que, dentro de Europa, afecta principalmente a países del sur, ya que en los países del norte predominan otros métodos de eliminación de RSU que permiten minimizar (incluso anular) el depósito en vertedero. El problema de espacio en los vertederos, el uso y la contaminación de los suelos, y el rechazo social que genera está lle-



vando a buscar y valorar alternativas para la minimización del volumen de residuos y de los problemas que acarrea. En España ya existen alternativas al depósito en vertedero como la incineración, la digestión anaerobia o el compostaje, aunque estos procesos aún no están consolidados en todo el territorio y no resuelven la problemática, ya que aún se depositan en vertedero en torno al 60% (media) de los RSU que se producen en España.

Junto a estos problemas de índole social y ambiental, existe la problemática energética de un país como España, donde la dependencia energética del exterior y la oposición social a la energía nuclear dificultan el desarrollo económico del país. La búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles ha llevado a España a ser un referente en el campo de la energía eólica. En general, España tiene un gran potencial en cuanto a energías renovables se refiere, pero aún queda mucho camino por recorrer para alcanzar a los países del norte de Europa, cuya concienciación ambiental está mucho más desarrollada y donde la gestión de los RSU parece haber encontrado soluciones más sostenibles.

El objetivo del proyecto ha consistido en realizar un análisis en profundidad de las tecnologías para la valorización energética de los RSU, con la aplicación práctica al caso particular del CITMC, donde se genera unos 470.000 t/año de RSU de fracción resto, que actualmente se lleva a vertedero controlado. La metodología seguida para alcanzar el objetivo ha consistido, en primer lugar, en realizar una caracterización de las distintas fracciones de RSU que actualmente se producen en el CITMC, haciendo especial énfasis en las corrientes de rechazo, ya que son las que más urgentemente se necesitarían valorizar. A continuación se ha realizado un estudio de amplio espectro para identificar las tecnologías que actualmente se ofrecen comercialmente en el mundo con potencial de va-



lorización de estas fracciones, incluyendo tanto tecnologías “consolidadas” como la incineración con aprovechamiento térmico, como otras que se consideran más innovadoras y por tanto con todavía menos implantación comercial (gasificación, pirólisis y derivadas de éstas). En segundo lugar se ha realizado un análisis crítico de dichas tecnologías, aplicando criterios tanto técnicos, económicos como ambientales. En tercer lugar, se han estudiado en profundidad aquellas tecnologías seleccionadas en la fase anterior, aplicándolas al caso práctico del CITMC. Por último, se ha realizado una comparación medioambiental de dichas tecnologías utilizando para ello herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta última fase no está aún concluida, por lo que queda fuera del alcance de este artículo.

2. MARCO NORMATIVO

La Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados recoge la jerarquía de residuos, según la cual, la fracción de residuos que debe destinarse a valorización energética es aquella que no

pueda ser reutilizada ni reciclada, entendiendo el compostaje como una forma de reciclaje de la materia orgánica. Por lo tanto, sólo se puede valorizar energéticamente la fracción de residuos que actualmente va a vertedero, es decir, la fracción rechazo. Sin embargo, el segundo punto del artículo 8 de dicha ley recoge la posibilidad de no cumplir con la jerarquía de residuos en determinados casos muy justificados. Por otro lado, en el artículo 5 del Real Decreto 1481/2001, de eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, se establecen los límites de deposición de residuos biodegradables en vertedero, lo que obliga a un replanteamiento del actual sistema de RSU.

El recientemente publicado Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) recoge los objetivos de reutilización, reciclaje, valorización y eliminación de los RSU en España para el periodo 2015-2020. En concreto, para el 2020 debe producirse un aumento de la valorización energética hasta llegar al 15%. Si se considera que ese aumento de la valorización irá en detrimento del depósito en vertedero, éste descendería

hasta el 35% para ese año, y la tasa de reciclaje consiguientemente se situaría en el 50%. Aun alcanzando estos objetivos, España aún se situaría lejos de otros países europeos como Alemania, Suecia o Dinamarca, que destinan a incineración más del 30% de los residuos gestionados y depositan en vertedero menos del 5% de los mismos. Además, el PEMAR apuesta por la recogida de la materia orgánica en origen para su posterior compostaje. Este sistema de gestión de la materia orgánica es sencillo y genera un compost que podría ser utilizado como enmienda orgánica, pero está en entredicho si hay mercado para un producto con la calidad actual de compost de RSU. Bien es cierto que con la separación en origen de la materia orgánica (5º contenedor) la producción de compost ganaría en calidad pero también en cantidad, por lo que no parece que el compostaje sea una opción suficiente para la gestión de la materia orgánica de los RSU. Por otro lado, los residuos plásticos presentan un alto contenido energético y salvo los envases, que son destinados a reciclaje, el resto quedaría disponible para su valorización. Las limitaciones asociadas al reciclaje de la materia orgánica y la necesidad de reducir el depósito en vertedero tanto de materia orgánica como del rechazo de las plantas en general, lleva a considerar la valorización energética como una opción que debe ser promovida, mejorada y potenciada en todo el territorio nacional.

Teniendo en cuenta todo lo anterior es claro que la opción de valorización energética, combinada con la valorización material y el reciclaje, va a tener un papel determinante para el desarrollo de un plan de gestión sostenible de RSU en nuestro país. Se hace necesario por tanto un estudio más profundo y actualizado que permita valorar las fracciones de residuos disponi-

bles para valorización energética, o cuya valorización conlleve un menor impacto global que su reciclaje.

3. MODELOS DE GESTIÓN DE RSU: EL MODELO ESPAÑOL

Según datos del Eurostat, en el año 2012 la media de residuos municipales generados en la UE-28 fue de 492 kg por habitante y año. En España la cantidad estimada fue de 464 kg por habitante y año. Si bien los datos medios

de producción no distan mucho el uno del otro, sí hay diferencias en el destino final de los RSU entre España y Europa. En Europa un 34% del total de los residuos se destinan a vertedero, un 42% se recicla y composta y el 24% restante es la fracción de residuos destinados a incineración. Estos datos se alejan de la situación en España donde se deposita en vertedero un 63% del total de los residuos que se producen, se recicla o composta un 27% y se incinera un 10% de los residuos.

Fracción	Tratamientos
Orgánica	- Instalación de compostaje - Instalación de biometanización
Resto	- Instalación de selección y clasificación - Instalación de tratamiento mecánico-biológico (TMB) • Triaje+bioestabilización • Triaje +biometanización+bioestabilización - Incineradora (valorización energética o eliminación) - Depósito controlado con recuperación energética - Depósito controlado sin recuperación energética
Envases ligeros	Instalación de selección y clasificación de envases
Vidrio	Instalación de separación y preparación de vidrio
Papel y cartón	Instalación de separación y preparación de papel y cartón

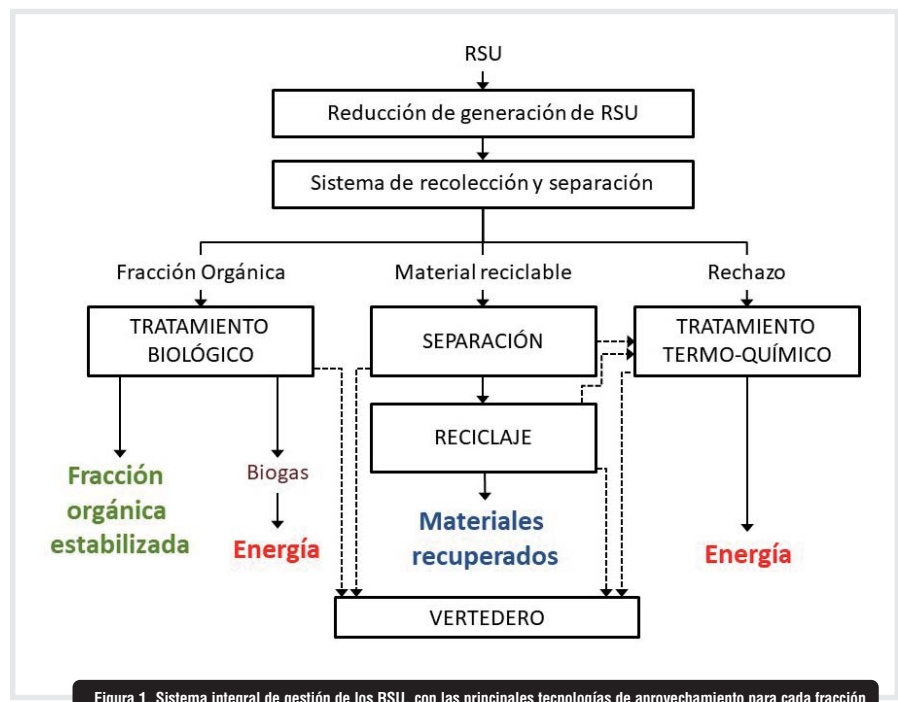


Figura 1. Sistema integral de gestión de los RSU, con las principales tecnologías de aprovechamiento para cada fracción

Tabla 2. Instalaciones de tratamiento de la fracción resto en España

Tipo de Instalación	Número de plantas en España
Instalación de selección y clasificación	94
Tratamiento Mecánico-Biológico (TMB)	91
Incineradora	10
Depósito controlado	134

El modelo de separación de RSU en origen va a ser determinante en la composición final de los RSU y en la capacidad del sistema de gestión para separar la fracción reciclable y compostable. Según el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), en España se han configurado seis modelos de separación de residuos de competencia municipal, atendiendo a las distintas fracciones principales separadas en origen. El esquema actual de tratamiento de RSU en Andalucía (Tipo 5) se resume en que un 80% de los RSU que se producen van a vertedero. Con este sistema de gestión se obtiene un 3,4% de compost de baja calidad y se produce electricidad a partir del biogás recuperado en el vertedero. La máxima producción eléctrica que se puede alcanzar es 2,22 kWh/m³ biogás, aunque

no es una producción en continuo ya que depende de la cantidad de materia orgánica que se vierte y de las condiciones climáticas.

Además, la calidad o cantidad del biogás no siempre justifica la producción de electricidad, por lo que una parte del biogás que se recupera se quema en la antorcha sin recuperación energética.

En la Figura 1 se ilustra un modelo de gestión racional de RSU, donde se incluyen las tecnologías apropiadas para cada tipo de residuo/rechazo generado en el sistema. Los tratamientos más habituales según la fracción recogida se muestran en la Tabla 1. Se observa que la fracción resto es la única que puede llevarse a valorización energética, por lo que es necesario conocer las distintas fracciones de rechazo que se producen en la instalación, sus cantidades y características. De todas las instalaciones citadas, la que presenta un mayor potencial en generación de rechazos susceptibles de ser valorizados energéticamente, es la instalación de tratamiento mecánico-biológico, que en

el sur suelen denominarse plantas de recuperación y compostaje.

Existen varios tipos de instalaciones a las que puede destinarse la fracción resto. La Tabla 2 recoge el número de instalaciones de cada tipo que hay en España, a continuación se describen cada uno de ellos:

- Depósito controlado con recuperación energética: vertedero con recuperación de biogás para la producción de electricidad.
- Depósito controlado sin recuperación energética: vertedero sin recuperación de biogás.
- Instalación de selección y clasificación: este tipo de tratamiento se aplica especialmente para la clasificación de los residuos de envases ligeros recogidos separadamente, aunque también se utiliza para la selección de estos materiales contenidos en la fracción resto en las instalaciones de TMB.
- Instalación TMB: los tratamiento mecánico-biológico, TMB, (o biológico-mecánico, TBM) son la combinación de procesos físicos y biológicos para el tratamiento de los residuos o fracciones de residuos con contenido significativo de materia orgánica, procedente de la

ECOPACK

EQUIPO DE SEPARACIÓN ÓPTICA MULTIFUNCIONAL, PARA CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS

- Visión artificial de amplio espectro.
- Versatilidad, rapidez y precisión en la identificación y separación de materiales y colores.
- Industria 4.0: autocontrol y conectividad.



(*) PICVISA tiene capacidad para realizar pruebas con material del cliente en un centro de pruebas propio en España.
Carrer Isaac Newton, 2 - 08280 Calaf (Barcelona) SPAIN Tel. +34 93 868 08 45 - WWW.PICVISA.COM



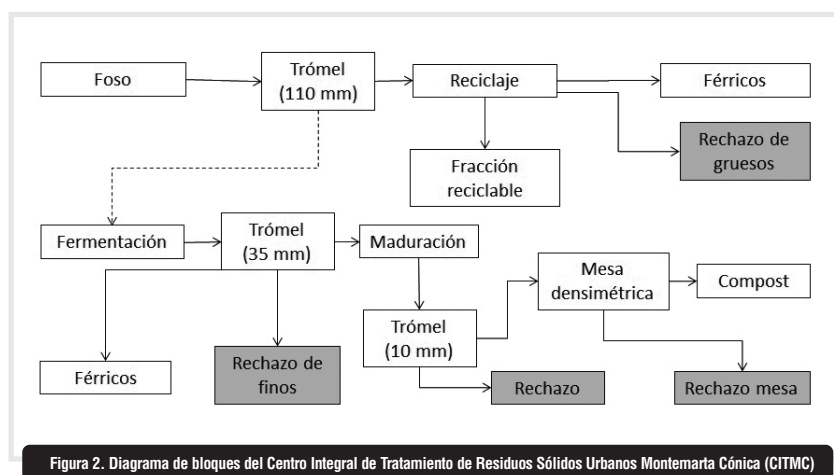


Figura 2. Diagrama de bloques del Centro Integral de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos Montemarta Cónica (CITMC)

fracción resto o la fracción inorgánica/seca (fracción resto y envases ligeros recogidos conjuntamente), si esta última presenta cantidades importantes de materia orgánica. Las instalaciones TMB/TBM pueden funcionar con diferentes líneas y tecnologías en función de las necesidades. En las instalaciones más comunes, la primera etapa está conformada por el tratamiento mecánico (aunque algunas instalaciones pueden invertir los procesos), que incluye además de la recuperación de materiales valorizables, la separación de la materia orgánica contenida en la fracción de entrada. Los procesos biológicos que integran pueden utilizar las distintas tecnologías existentes, con las siguientes posibles combinaciones:

- Tratamiento mecánico (+Acondicionamiento rechazo). No se da la segunda fase de tratamiento biológico.
- Tratamiento mecánico +Bioestabilización de la materia orgánica (compostaje) (+Acondicionamiento rechazo).
- Tratamiento mecánico +Biometanización de materia orgánica +Bioestabilización del digestato (+Acondicionamiento rechazo).
- Tratamiento mecánico + Biosecado de materia orgánica (+Acondicionamiento rechazo).
- Bioestabilización/Biosecado +Tratamiento mecánico (+Acondicionamiento rechazo).

Las plantas TMB de triaje y bioestabi-

lización (compostaje) gestionan en torno al 30% de la fracción resto de los RSU que se generan en España.

En la comunidad autónoma de Andalucía hay un total de 23 plantas de recuperación y compostaje. La media de producción de rechazos es del 76% según el Plan Director Territorial de RRNPP de Andalucía 2010/2019 y en la Región de Murcia es de un 64% (valor estimado a partir de datos del MAPAMA).

4. APROVECHAMIENTO DE RECHAZOS EN UN MODELO DE GESTIÓN BASADO EN UNA PLANTA TMB

En una planta de TMB típica como el CITMC (Figura 2), se producen 4 fracciones rechazo: el rechazo de la línea de triaje y clasificación o rechazo de gruesos, el rechazo del trómel de afino del compost y dos rechazos más pequeños, el de trómel de 10 mm y el de mesa densimétrica.

Las fracciones de rechazo con mayor cantidad de plásticos, textiles y papel cartón son las más interesantes para la valorización energética mediante tecnologías termoquímicas. Por contrapartida, las que presentan un mayor contenido en materia orgánica interesan menos, ya que cuentan con un menor

Tabla 3 Caracterización de los rechazos del CITMC

	Rechazo de gruesos	Rechazo de finos	Rechazo trómel 10 mm	Rechazo mesa densimétrica
PCS (MJ/kgbs)	21,19	12,40	8,14	6,80
PCI (MJ/kgbs)	19,80	11,62	7,58	6,20
Humedad (% p/p)	47,89	40,04	10,32	20,95
Cenizas (% p/p, bs)	12,13	53,52	66,92	71,46
Análisis elemental, bs, % p/p				
C	50,94	27,49	16,36	8,97
H	6,48	3,63	2,79	2,83
O	29,81	14,52	13,24	15,47
N	0,39	0,56	0,48	0,92
S	0,12	0,16	0,15	0,30
Cl	0,13	0,12	0,05	0,04

poder calorífico. Este hecho se ve reflejado en la Tabla 3, en la que se muestra la caracterización de los rechazos del CITMC. Se observa que la corriente con mayor potencial para valorización termoquímica es el rechazo de gruesos que, siendo el rechazo que se genera en mayor cantidad (45% del total de residuos alimentados), es la que cuenta con un mayor poder calorífico (debido a su alto contenido en plásticos, papel cartón y textiles), siendo además la corriente con menor fracción de inertes. Por su parte, el rechazo de finos, aunque también es apto para valorización, no presenta unas características tan favorables debido a su alto contenido en materia orgánica (superior al 20%).

El rechazo de mesa densimétrica junto con el de trómel de 10 mm, tan solo representan el 11% de los residuos alimentados a la planta y no suelen ser adecuado para valorización energética mediante tecnologías termoquímicas, ya que, como se observa en la Tabla 3, presentan una gran cantidad de material inerte que dificulta la operación en el reactor, al tiempo que disminuye su rendimiento debido al bajo poder calorífico.

Cabe destacar que esta caracterización de rechazos es representativa de las plantas TMBs alimentadas con RSU procedentes del sistema de recogida en 4 contenedores, que es el que está implantado actualmente en Andalucía (sin recogida selectiva de materia orgánica).

5. TECNOLOGÍAS PARA APROVECHAMIENTO DE RECHAZOS

Mecánicas: Producción de combustible

Este grupo engloba las técnicas más sencillas para el aprovechamiento de los rechazos de RSU, obteniéndose como producto un combustible denominado CSR (SRF en inglés) o CDR (RDF en inglés). El proceso consiste en elimi-



nar mecánicamente los elementos inertes, los materiales con cloro y metales pesados, así como reducir la humedad y el tamaño. El resultado es un combustible que puede ser utilizado para reducir el uso de combustibles fósiles en cementeras, centrales térmicas convencionales, plantas industriales, así como plantas de incineración, gasificación y pirólisis.

Biológicas

Los procesos biológicos están diseñados para tratar, principalmente, la fracción orgánica de los RSU; también pueden tratarse otros materiales como el papel y la madera, pero su degradación requiere un tiempo mayor. Dentro de este grupo destacan la digestión aerobia, que tiene lugar mediante la acción de microorganismos en presencia de oxígeno generándose CO_2 , calor y un residuo sólido denominado compost, utilizado como fertilizante en suelos; y la digestión anaerobia o fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, en la que se genera biogás además de una suspensión líquida conocida como digestato, que se utiliza como fertilizante.

Termoquímicas

Los procesos de conversión termoquímica son los que presentan un mayor potencial a corto y medio plazo para la valorización energética de los rechazos de RSU, ya que: (i) pueden complementar la acción de las plantas mecánicas utilizando los CSR/CDR como combustible; (ii) a diferencia de los procesos biológicos, permite la valorización de materiales no biodegradables; (iii) a diferencia de los procesos hidrotermales (ver abajo), cuentan con un desarrollo considerable.

Dentro de los tratamientos de conversión termoquímica están la incineración, que es el proceso con mayor grado de desarrollo e implantación, y los que se podrían clasificar como tratamientos térmicos avanzados (gasificación y pirólisis), que cuentan con un desarrollo mucho más limitado.

La incineración (combustión) de RSU se lleva a cabo con un exceso de agente oxidante (sobre el estequiométrico) que permita la oxidación del material, obteniéndose una corriente de gases de combustión (principalmente CO_2 y H_2O) a alta temperatura. El calor contenido en los gases de combustión se recupera en una caldera, generándose vapor que se puede destinar a la producción de energía térmica o eléctrica. Además de la corriente gaseosa se obtiene un residuo sólido, consecuencia de los materiales inertes presentes en el combustible de partida.

La gasificación consiste en una oxidación parcial de los residuos en presencia de una cantidad de oxidante inferior a la requerida para la combustión estequiométrica. En el proceso, parte del combustible se quema para proporcionar el calor necesario para gasificar el resto (gasificación autotérmica), como en el caso de la gasificación con aire, o se suministra energía calorífica a partir de una fuente externa (gasificación alotérmica), como en el caso de la gasificación con

plasma (plasma generado a partir de energía eléctrica) o gasificación solar (con vapor generado a partir de energía solar o radiación directa). El resultado es un gas de síntesis (formado principalmente por CO, CO₂, H₂, H₂O y CH₄) que puede ser utilizado para la generación de energía o para síntesis química. Además de la corriente gaseosa se obtiene un residuo sólido, compuesto por materiales no combustibles. La principal ventaja de esta tecnología es la posibilidad de limpiar el gas previa utilización.

En la pirólisis tiene lugar la degradación térmica del material en ausencia completa de oxígeno mediante un aporte externo de calor. Este proceso da lugar a tres productos: una corriente gaseosa, una corriente líquida (bio-oil) y una sólida (char), todas ellas con características combustibles. Generalmente a mayor temperatura, mayor es la fracción gaseosa, mientras que con temperaturas más bajas se puede maximizar la producción de bio-oil, que suele ser el producto deseado del proceso, debido a la facilidad que presenta en cuanto a transporte y almacenaje.

Hidrotermales

Aunque podrían englobarse dentro de las tecnologías termoquímicas, su clasificación suele hacerse por separado debido a que su principio se basa en el uso de agua (en condiciones sub- o super-críticas) como medio de reacción. Se pueden dividir a su vez en 3 procesos principales: carbonización hidrotermal (HTC), licuefacción hidrotermal (HTL) y gasificación hidrotermal (HTG). La principal ventaja de estos procesos es la posibilidad de utilizar residuos muy húmedos, por encima del 70% de humedad, sin necesidad de realizar una operación previa de secado, por lo que constituyen procesos muy interesantes para el tratamiento de la fracción orgánica, digestato/efluentes de tratamientos biológicos, líquidos de fermentación, etc. Sin em-

bargo, son procesos que no han alcanzado aún desarrollo comercial.

6. ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO

6.1. Tecnologías de Incineración

La incineración de RSU, o de sus diversas fracciones, con recuperación energética es una tecnología madura y comercial, contando con 460 plantas en 18 países europeos. En la Tabla 4 se muestra una relación de los tecnólogos a nivel mundial que ofrecen hornos de incineración. Todas las tecnologías de la tabla permiten la generación de electricidad a partir del calor obtenido en la incineración de RSU con eficiencias similares. Se puede observar que la tecnología “Reverse reciprocating grate” de Martin GmbH es la que presenta una capacidad por línea superior (1200 t/d), siendo la segunda “Forward acting reciprocating grate” de Hitachi Zosen Inova, esta última contando con más unidades instaladas que ninguna, ocupando la tecnología de Martin GmbH el segundo lu-

gar. La tecnología “Reverse reciprocating grate” presenta unos costes de capital menores y además cuenta con unas emisiones que son un 40% inferiores a los límites impuestos. En la Figura 3 puede observarse un diagrama básico de la planta de Incineración estudiada, con indicación de los principales procesos de limpieza del gas.

6.2. Tecnologías de Gasificación/Pirólisis

Dentro de las tecnologías de gasificación hay dos grupos bien diferenciados: la gasificación convencional y la gasificación con plasma. Las tecnologías comerciales de gasificación convencional con mayor desarrollo comercial y que representan la totalidad de modos de operación en gasificación son: Ebara TwinRec (gasificación en lecho fluidizado), Nippon Steel Direct Melting System (shaft furnace), Valmet/Metso Power (lecho fluidizado circulante con limpieza del gas de síntesis en caliente) y Energos (parrilla móvil). Dentro de las tecnologías de gasificación con plasma los procesos más desarrollados, y que representan las dos formas de generar el

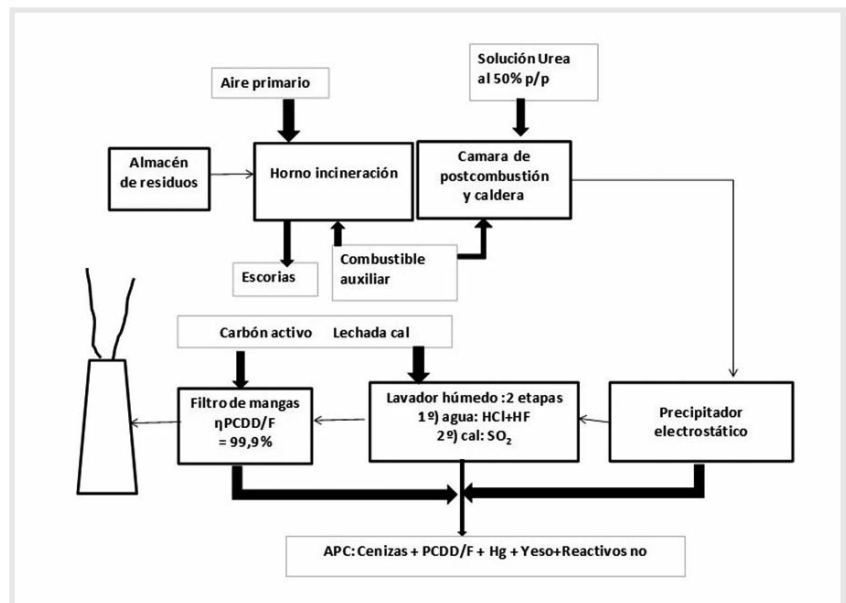


Figura 3. Diagrama básico de la planta de Incineración estudiada con indicación de los principales procesos de limpieza del gas

Tabla 4. Relación de los tecnólogos principales de tecnologías de hornos de incineración y sistemas de tratamiento de gases

Nombre	Tipo horno	Máx. capacidad por línea (t/día)	Número de plantas de referencia
Martin	Reversing acting grate	1200	389
Keppel Seghers	Multi-acting reciprocating grate (Dynagrate) and forward acting grate (Volund)	800	35
Fisia Babcock	Forward acting reciprocating (Steinmuller) and roller grate	960	59
Babcock & Wilcox Vølund	DynaGrate, Vølund grate	640	50
Hitachi Zosen Inova	Forward acting reciprocating grate (formerly Von Roll Inova, HZ was Japanese license)	920	480
Detroit Stoker	Detroit® Reciprograte Stoker	850	Sin datos
JFE	Horizontal stoker grate	450	120
Kawasaki Heavy Industries	Horizontal water-cooled grate ("advanced stoker system")	450	200-300 (Japón)
Martin	Horizontal grate:	600	63
Martin	Symcom	500	70

plasma en la gasificación de residuos, son: Alter NRG (el plasma incide directamente sobre los residuos) y Plasco Energy Group (el plasma se utiliza para refinar el gas de síntesis obtenido en una etapa previa de gasificación).

En cuanto a la pirólisis, a pesar de existir una gran cantidad de tecnologías, muy pocas han alcanzado un desarrollo comercial comparable con el de la gasificación; de hecho, ninguna de las plantas de pirólisis de RSU existentes produce combustibles líquidos, sino que éstas queman los gases producidos para la generación de energía, por lo que podrían ser consideradas tecnologías de gasificación con aplicación térmica. A su vez, se distinguen dos grupos de tecnologías: las que combinan gasificación con pirólisis y las que son únicamente de pirólisis. El primer grupo viene representado clásicamente por el proceso Thermoselect, al ser

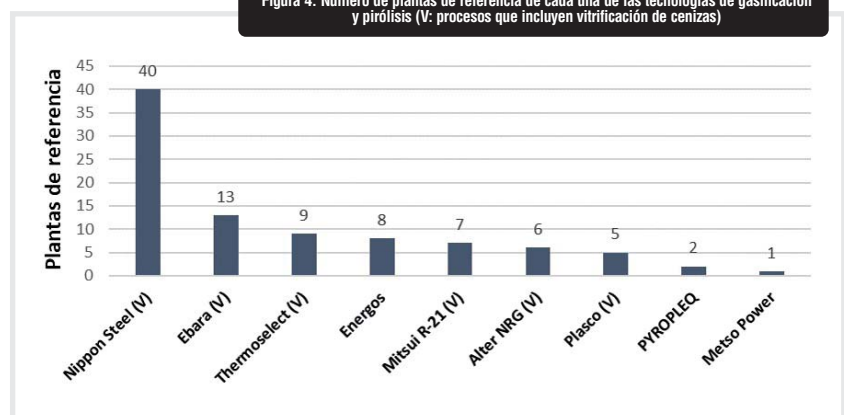
uno de los que cuenta con mayor implantación en el mundo; mientras que dentro de las tecnologías puramente de pirólisis destacan el proceso Mitsui R21 y PIROPLEQ, todas ellas contando con un reactor de horno rotatorio.

Para tratar de comparar el potencial de las diferentes tecnologías existentes, algunos de los aspectos a evaluar

son: el número de plantas con las que cuenta cada proceso (Figura 4), ya que marca su desarrollo, y la eficiencia eléctrica neta (Figura 5) que, representando el porcentaje de energía que se puede exportar a la red en relación a la energía introducida con los residuos, es un parámetro muy importante si el objetivo principal de la planta es la valorización energética. Este último aspecto es aún más importante en países del sur en los que los requerimientos de calor continuados (curva anual de demanda de calor) son escasos y una planta de estas características estaría destinada prácticamente a la producción de electricidad, viéndose de este modo disminuido su rendimiento (en comparación con las plantas destinadas a la producción de energía térmica).

En la Figura 4 se observa que Nippon Steel es, con diferencia, la tecnología más desarrollada con 40 instalaciones, la mayoría de ellas se encuentran en Japón, al igual que las de Ebara. Thermoselect cuenta con 9 plantas algunas de las cuales están ya cerradas al ser muy costosas de operar; de hecho hay indicios de que el proceso se ha dejado de comercializar. Energos tiene 8 plantas, todas ellas en Europa, y algunas fuentes afirman que hay 6 plantas en desarrollo en Reino Unido. Mitsui R21 cuenta con 7 plantas en Japón, aunque también hay indicios de que se ha dejado de comercializar. Alter NRG tiene 6

Figura 4. Número de plantas de referencia de cada una de las tecnologías de gasificación y pirólisis (V: procesos que incluyen vitrificación de cenizas)



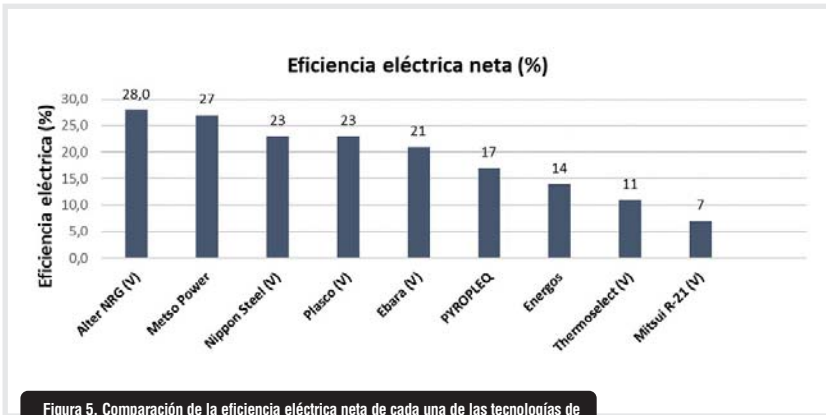


Figura 5. Comparación de la eficiencia eléctrica neta de cada una de las tecnologías de gasificación y pirólisis (V: procesos que incluyen vitrificación de cenizas)

instalaciones, una de ellas en Europa, concretamente en Reino Unido. Plasco Energy Group cuenta con 5, aunque realmente 2 están en proyecto aún, otras 2 son plantas de demostración y la última es una planta piloto situada en España. PYROPLEQ tan solo cuenta con 2 plantas en Alemania, una de las cuales no se sabe si sigue en operación en la actualidad. Y por último Metso Power (actualmente Valmet), que tan solo cuenta con una planta de gasificación de RSU en Finlandia operando desde el año 2012.

En cuanto a la eficiencia eléctrica se observa en la Figura 5 que las tecnologías Mitsui R21 y Thermostelect presentan las eficiencias más bajas, mientras que Alter NRG y Metso Power son las que cuentan con mayores eficiencias. Sin embargo, Alter NRG y, en general las tecnologías de gasificación con plasma, parecen no haber alcanzado aún la suficiente fiabilidad tecnológica como para tener un potencial de implantación considerable en la actualidad.

Es evidente que la gasificación cuenta con más potencial a corto y medio plazo que la pirólisis. Dentro de las tecnologías de gasificación tienen especial interés: Nippon Steel, por ser, con diferencia, la tecnología de gasificación con más experiencia en el mundo; y la tecnología comercializada por Valmet (Metso Power CFB) que, a pesar de tener una sola planta, es la mayor planta de tratamiento

de RSU del mundo y está implantada en Europa. Además, el proceso de Valmet está diseñado para la generación de energía eléctrica con una alta eficiencia (lo cual es un factor muy importante a valorar en España, dadas las condiciones climatológicas del país). Por su parte, la tecnología de Nippon Steel, a pesar de ser muy costosa, presenta la ventaja de producir cenizas vitrificadas, inertes y por

tanto aprovechables en aplicaciones de construcción, maximizando la recuperación energética y material y minimizando el depósito en vertedero.

7. ESTUDIO TECNO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS SELECCIONADAS

Para evaluar el potencial de aplicación de las tecnologías anteriormente analizadas que resultan más interesantes en España, se ha llevado a cabo una estimación económica, aplicada al caso práctico del CITMC, basada en plantas hipotéticas con capacidad suficiente para procesar los rechazos del CITMC. Los costes de capital presentados en este trabajo se han basado en estudios previos publicados en la literatura, mientras que los costes de operación se han calculado específicamente para este proyecto.

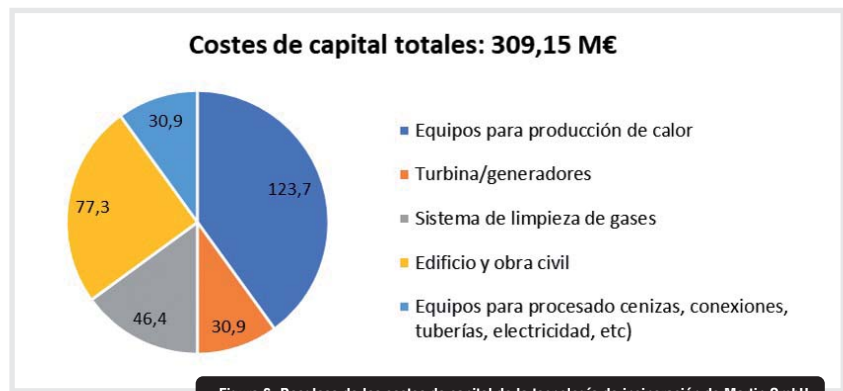


Figura 6. Desglose de los costes de capital de la tecnología de incineración de Martin GmbH

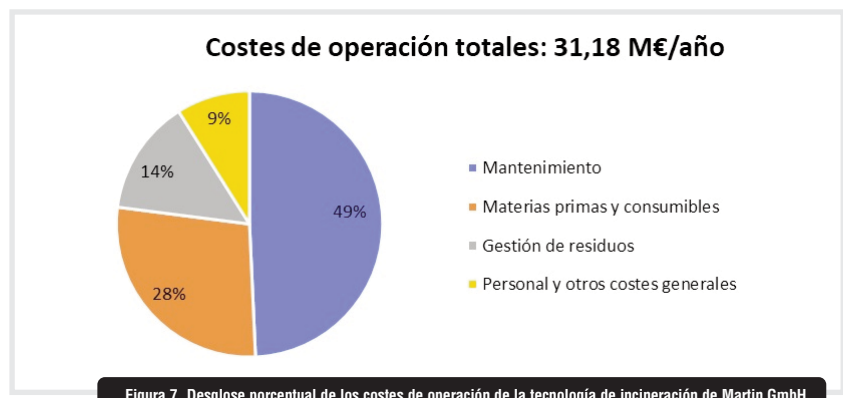


Figura 7. Desglose porcentual de los costes de operación de la tecnología de incineración de Martin GmbH

7.1. Tecnologías de incineración

Tras la comparativa de tecnologías y tecnologías existentes en el mercado se decidió optar por la empresa alemana Martin GmbH y en concreto la de parrilla tipo “Reversing acting grate” denominada Vario. Se realizó un estudio de detalle aplicando esta tecnología al tratamiento de los rechazos del CITMC. Los residuos no quemados (escorias) son recogidos por la parte inferior del horno parrilla y transportados hasta el punto de almacenamiento. El sistema de eliminación de NOx consiste en un sistema de reducción selectiva no catalítica utilizando una solución de urea al 5% en peso, que se adiciona directamente sobre la parte superior del horno, que opera entre 900 y 1050°C, con un exceso de urea del 25%. El sistema de eliminación de partículas consiste en un precipitador electrostático (que debe operar por debajo de 250°C) con eficacia de captura del 99%; este sistema está situado a la salida del horno, lo que permite obtener directamente un efluente de cenizas secas listo para su tratamiento y posterior reutilización. El sistema de reducción de gases ácidos, PCDD/F y Hg, consiste en un lavado húmedo con un exceso de cal operado entre 60 y 70°C. El calor de enfriamiento de la corriente de gas se utiliza para precalentar el aire de combustión. El control de dioxinas y furanos se realiza mediante inyección de carbón activo. El efluente líquido del lavador húmedo necesita tratamiento posterior. Por último, un sistema de filtros de mangas permite ajustar la concentración de partículas del gas a los límites de emisión impuestos por la normativa. El filtrado se realiza con inyección de carbón activo para generar una torta que realiza la función catalítica y permite disminuir al máximo las emisiones de dioxinas, furanos y Hg.

Para el procesamiento de los rechazos del CITMC se han de instalar 3 líneas

Martin GmbH	M€	M€/año	€/t	M€/MWe
Costes de capital	309,15	-	659,59	7,03
Costes de operación	-	31,18	66,53	-

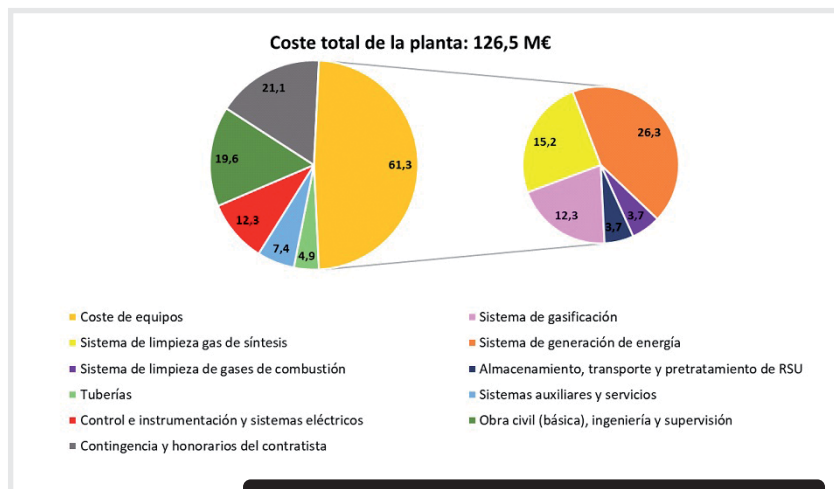


Figura 8. Desglose de los costes de capital de la tecnología de gasificación de Valmet

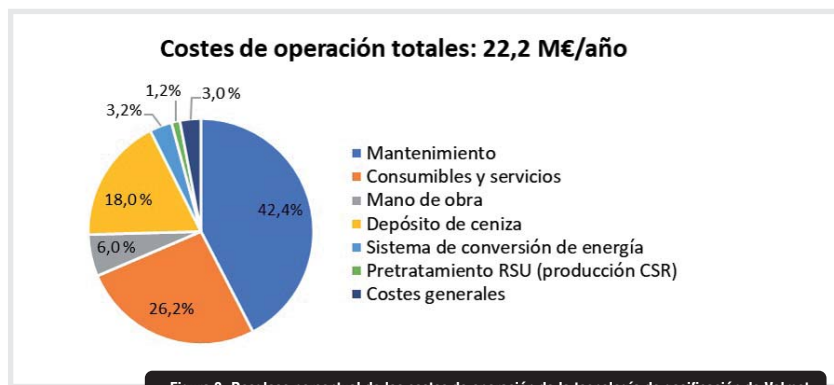


Figura 9. Desglose porcentual de los costes de operación de la tecnología de gasificación de Valmet

as de la tecnología de Martin. La energía eléctrica anual neta generada es de 106,31GWh por línea, con una eficiencia energética (según la definición de la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos del Parlamento Europeo) de 0,74. En la Tabla 5 se muestran los costes de operación y mantenimiento. De dichos resultados se puede concluir que:

- Los costes de capital de dicha tecnología están dentro del rango de otras incineradoras (637 €/t). Otras plantas como

Ámsterdam con la misma tecnología, pero realizada por fases, presenta costes de capital de 421 €/t, por los 625 €/t de Brescia en Italia de la misma tecnología, mientras que Lakeside (Inglaterra) con tecnología Viridor, presenta costes de capital de 687 €/t, o la planta de Issy les Moulineaux, (Paris, Francia) que alcanza los 1562 €/t. Los costes de capital desglosados se muestran en la Figura 6, observándose que las partidas más importantes corresponden a la propia parrilla (40% del coste de capital) y a

la obra civil (25%), seguido por el sistema de limpieza de gases (15%).

- Los costes de operación calculados (Figura 7) para la tecnología estudiada son de 66 €/t de residuo, dentro del rango de otras plantas europeas, que están comprendidos entre los 50 y 90 €/t, aunque hay que tener en cuenta que puede haber diferencias de costes entre pequeñas plantas (6 t/h) y grandes (35 t/h). Los costes de operación más importantes corresponden al mantenimiento, materias primas y consumibles, y a la gestión de residuos.

7.2. Tecnologías de gasificación/pirólisis

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado sobre las dos tecnologías de gasificación y pirólisis seleccionadas. Se concluye que:

- La implantación de Nippon Steel en España es muy complicada debido a que los costes de inversión son muy altos (806,8 €/t). Si bien es cierto, que esta tecnología permitiría tratar los residuos sin necesidad de llevar a cabo un pretratamiento exhaustivo como el que se ha de realizar en Valmet; de modo que no solo se ahorraría la fabricación de CDR (con un coste aproximado de 20€/t), sino que también se conseguiría valorizar una mayor cantidad de residuos. Sin embargo, al estar prohibida esta práctica por legislación actual (atendiendo a la jerarquía de residuos), se estaría pagando una tecnología muy cara, que estaría siendo de algún modo desaprovechada, al no poder valorizar la corriente bruta de RSU.
- Los costes de capital de Valmet son más asequibles (522,3 €/t), inferiores a los de incineración. Además, se espera que la planta de Valmet reduzca los costes entre un 15 y un 30% a partir de una tercera planta de referencia, ya que el proceso actualmente cuenta solo con una planta en operación (Lahti II).

Tabla 6. Comparación de costes de implantación de las tecnologías de Nippon Steel DMS y Valmet en el CITMC				
Nippon Steel DMS	M€	M€/año	€/t	M€/MWe
Costes de capital	378,13	-	806,76	12,43
Costes de operación	-	36,53	77,93	-
Valmet	M€	M€/año	€/t	M€/MWe
Costes de capital	127,47	-	522,28	3,31
Costes de operación	-	22,16	90,79	-

- Por otro lado, cabe destacar los costes de capital por MWe, en los que se pone de manifiesto la gran eficiencia eléctrica del proceso de Valmet (3,3 M€/MWe) frente al de Nippon Steel (12,4 M€/MWe). Sin embargo, este hecho en Nippon Steel está bastante en consonancia con la gestión de residuos en Japón, donde se prima el coste por unidad de residuo tratado y no por unidad eléctrica generada; siendo la energía eléctrica considerada, más bien, como un subproducto del proceso, que como el producto principal. Comparado con la incineración, el proceso Valmet sigue teniendo unos ratios más competitivos, ya que su eficiencia es del orden, o superior, a la de las más modernas plantas de incineración (30-32% energía eléctrica neta).

- Las partidas correspondientes a los costes de operación calculados para las dos tecnologías de gasificación son 468,7 t/año para Nippon Steel y 244,06 t/año para Valmet, aunque estos números deben manejarse con cautela dado que los residuos de partida son de muy diversa naturaleza. Este hecho hace que los costes de operación anuales sean superiores en Nippon Steel (36,5 M€/año frente a los 22,2 de Valmet), mientras que los referidos a tonelada de residuos tratado sean superiores en Valmet (90,8 €/t frente a 77,9 €/t). Este último aspecto deriva de que en los costes de operación de Valmet se incluyen procesos de limpieza del gas complejos, además de que se refina el rechazo de entrada para generar un CSR, con pro-

iedades mucho mejores para un tratamiento termoquímico posterior. En cualquier caso, los costes de operación de la gasificación, parecen ser un poco más altos que los de la incineración, especialmente los de la tecnología de Valmet, típicamente un 20-40% superiores.

En las Figuras 8 y 9 se muestra el desglose de los costes de capital, así como el reparto porcentual de los costes de operación resultado de la estimación de costes del proceso de Valmet, considerando su teórica implantación en el CITMC. Dentro de los costes de capital, la partida más importante es la de los equipos (61,3 M€), y dentro de estos llama la atención el sistema de limpieza del gas de síntesis, que es uno de los puntos fuertes de este proceso y tiene un coste incluso ligeramente superior al del sistema de gasificación (15,2 M€ frente a 12,3 M€).

8. CONCLUSIONES SOBRE EL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RECHAZOS DE RSU EN ESPAÑA

Del análisis realizado sobre las tecnologías disponibles y su potencial aplicación, a corto y medio plazo, como método de valorización energética de los rechazos generados en las plantas de tratamiento de RSU en España, se concluye que:

(I) La tecnología de incineración con caldera de parrilla, es por mucho, la tecnología más ampliamente aplicada

a la valorización de RSU, tanto para producción eléctrica como de calor. En concreto, la tecnología de Reversing acting grate de Martin GmbH constituye una excelente opción, compromiso entre madurez tecnológica y costes de inversión y operación.

(II) La gasificación está menos desarrollada que la incineración, aunque se ha mostrado que los costes de la tecnología de Valmet son competitivos frente a la incineración. Sin embargo, la falta de madurez tecnológica parece presentar un problema para la implantación a corto plazo de esta tecnología. Por el contrario, la tecnología de gasificación con vitrificación para estabilización de residuos (representada por Nippon Steel) presenta una gran fiabilidad, dada la alta implantación y experiencia adquirida en Japón durante dos décadas. Sin embargo, su implantación en España parece improbable debido a sus altísimos costes de capital.

La gasificación con limpieza a alta temperatura (Valmet) presenta adicionalmente un atractivo ambiental, ya que permite generar un gas "limpio" antes de quemarlo y, por tanto, estar exento de cumplir la Directiva 2010/75/EC. Probablemente el pretratamiento necesario del combustible en este tipo de plantas sería mayor que el necesario en incineración

directa aunque este punto no se ha investigado suficientemente.

(III) La valorización energética de la fracción de rechazo de gruesos de plantas TMB parece ser la mejor opción para abordar el aprovechamiento de los residuos a corto plazo, al constituir un combustible fácilmente adaptable a plantas de gasificación. El aprovechamiento del rechazo de finos como combustible requeriría de un proceso de acondicionamiento para retirar vidrio y otros inertes.

(IV) A pesar de las claras ventajas medioambientales que tiene el aprovechamiento energético de los rechazos de RSU (habría que matizar este aspecto, que no se ha tratado de forma explícita en este artículo), su tratamiento termoquímico no será competitivo en España hasta que la tasa de tratamiento (o "Gate Fee" según su terminología inglesa) sea, al menos, de 80-90 €/t. Por ejemplo en Andalucía, el depósito en vertedero controlado en algunos casos puede llegar a costar entre 15 y 20 €/t (cumpliendo con todas las garantías y normativa EU), mientras que la valorización energética tiene un coste de entre 80 y 90 €/t. A pesar de las incertidumbres asociadas a los cálculos realizados, cuyos valores numéricos deben tomarse a modo de referencia, la conclusión inmediata es que

los beneficios medioambientales del aprovechamiento energético de los residuos (frente a depósito en vertedero controlado) costarían adicionalmente en el entorno de 65-75 €/t, un coste que tiene que ser soportado para la implantación de este modelo.

Por último, habría que tener presente que la cantidad de rechazo de RSU disminuirá en los próximos años, al mismo tiempo que variará su composición, disminuyendo su parte orgánica y de plásticos, así como la cantidad de metales y otros inertes.

Las plantas que se realicen en el futuro deberán tener en cuenta estos factores, aunque no existen razones para pensar que las tecnologías indicadas no puedan hacer frente a tal situación. Podría ser interesante disponer y promover tecnologías modulares y adaptables a la evolución de las plantas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración y los consejos recibidos por parte del Profesor Alberto Gómez Barea durante todo el proyecto y durante la elaboración del artículo. Las fotos (1 y 2) del CITRSU Montemarta Cónica son cortesía de Abonos Orgánicos Sevilla.

<p style="text-align: center;">50 años de Reciclaje de Residuos en Sevilla</p>  <p style="text-align: center;">ABORGASE</p> <p style="text-align: center;">www.aborgase.com</p>	<p style="text-align: center;">Soluciones de Ingeniería y Medio Ambiente para la #economiacircular</p>  <p style="text-align: center;">EDIFESA Ingeniería y Medio Ambiente</p> <p style="text-align: center;">www.edifesamedioambiente.com</p>
--	---