



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea



ZTF-FCT  
Zientzia eta Teknologia Fakultatea  
Facultad de Ciencia y Tecnología



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. LEIOA

---

# TRABAJO FIN DE GRADO

## INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO COMPARATIVO DE  
TECNOLOGÍAS COMERCIALES DE  
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS  
SÓLIDOS URBANOS

---

**Alumno/a** *Cortázar Dueñas, María*

**Fecha** *Junio 2014*

**Director/a**

*Dr./a. Roberto Aguado*

**Curso Académico**

*2013/14*

## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>3. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE RSU.....</b>	<b>4</b>
<b>4. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES .....</b>	<b>7</b>
<b>5. GASIFICACIÓN .....</b>	<b>15</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	15
5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA GASIFICACIÓN.....	16
5.2.1. Gasificadores .....	21
5.2.2. Unidades de limpieza del gas de síntesis.....	26
5.2.3. Sistemas de recuperación de energía.....	28
5.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA GASIFICACIÓN.....	30
<b>6. PIRÓLISIS.....</b>	<b>33</b>
6.1. INTRODUCCIÓN.....	33
6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PIRÓLISIS .....	33
6.2.1. Reactores de pirólisis.....	36
6.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA PIRÓLISIS .....	38
<b>7. PLAN DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN Y UNA PLANTA DE PIRÓLISIS PARA TRATAR RSU CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>39</b>
7.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	39
7.2. VIABILIDAD ECONÓMICA DE LAS INSTALACIONES .....	42
7.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	43
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>9. GLOSARIO DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>50</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>
<b>11. ANEXOS .....</b>	<b>56</b>

## 1. OBJETIVOS

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es identificar y analizar las diferentes tecnologías comerciales de procesado de los residuos sólidos urbanos mediante tratamientos termoquímicos, analizar la situación mundial de éstas y estudiar la viabilidad de las plantas que operan con este tipo de tecnologías. Para ello se van a llevar a cabo las siguientes tareas:

- Realizar un estudio bibliográfico de las tecnologías comerciales de valorización termoquímica de los residuos, especialmente de la gasificación y pirólisis.
- Analizar la situación global de dichas tecnologías.
- Realizar un análisis económico preliminar a una planta de gasificación y a una planta de pirólisis, en base a los balances de materia y energía, incluyéndose el correspondiente análisis de sensibilidad.

Este Trabajo Fin de Grado surge debido al interés del grupo Lantec 3000 S.L. en las tecnologías termoquímicas para la valorización energética de los residuos sólidos urbanos. El grupo Lantec 3000 S.L. es una ingeniería que lleva a cabo proyectos de tratamiento de residuos mediante la valorización de éstos y tiene especial interés en conocer el grado de desarrollo de las nuevas tecnologías termoquímicas para la gestión de los residuos domésticos y valorar el interés y la viabilidad de la ejecución de este tipo de plantas.

## 2. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la demanda de combustibles, y al consiguiente aumento en el precio del petróleo, se plantea el uso de la biomasa como sustituto de los combustibles fósiles.

La biomasa está considerada como una fuente de energía renovable y cada vez se está apostando más por su uso ya que contribuye a la reducción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Como la biomasa proviene de fuentes naturales, se supone que todo el CO<sub>2</sub> que ha absorbido durante su ciclo de vida para desarrollarse es igual a la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite al utilizar la biomasa como combustible, por lo que el ciclo de carbono es neutro. Por otro lado, la biomasa contiene un bajo contenido, casi despreciable, de sulfuros, nitrógeno y cenizas, por lo que las emisiones producidas son menores.

El término biomasa involucra toda la materia orgánica existente en la naturaleza, por lo que utilizar ésta como combustible para la obtención de electricidad es una opción muy atractiva. Ahora bien, dado que el uso masivo de la biomasa para fines energéticos puede acarrear serios problemas medioambientales, hay que tener sumo cuidado a la hora de utilizarla, como por ejemplo en las calderas de pellets. Desde el punto de vista de la contaminación obtener calor a partir de esta fuente renovable es más ecológico, pero puede llegar a originar serios problemas de deforestación. Otro ejemplo sería el uso de cultivos energéticos para la obtención de biocombustibles. El uso de éstos supondría su escasez debido al aumento de la demanda de éstos para fines energéticos, por lo que el precio de dichos cultivos aumentaría. Por lo tanto, la solución ideal consistiría en buscar un equilibrio o el tipo de biomasa que menos repercusión tenga sobre el medio ambiente. Entre esta última opción se encuentran los residuos sólidos urbanos (RSU).

Según la ley 22/2011, del 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados, los residuos sólidos urbanos son aquellos que son generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Debido a que aproximadamente un 60% de su composición es materia orgánica, se pueden clasificar como biomasa, por lo que se puede decir que los residuos sólidos urbanos son un “tipo de biomasa” a los que sería interesante dar uso.

Debido a que los residuos constituyen un gran problema ambiental, social y económico, se requiere mayor esfuerzo para su reducción y prevención. El aumento de la calidad de vida de la población ha hecho que cada vez se generen más residuos, por lo que es necesario un sistema eficaz para la gestión de éstos.

La Directiva 2008/98/CE en su Artículo 4 establece el marco general para la prevención y gestión de los residuos de la Unión Europea. En la misma se introducen y se definen conceptos básicos y se establecen principios de gestión como la jerarquía de residuos, donde la prevención es la opción preferente. Sin embargo, hasta que no se llegue a situaciones de prevención más ambiciosas, la Unión Europea apuesta por la reutilización y reciclado.

Tradicionalmente se han usado los vertederos para eliminar los residuos generados, pero actualmente no hay suficiente espacio en los vertederos, por lo que es necesario gestionar los RSU de otra manera. Hoy en día está reconocido el potencial de los residuos sólidos urbanos como recurso, tal y como refleja la tendencia de los sistemas de gestión de residuos a sustituir la eliminación por el reciclado y la valorización.

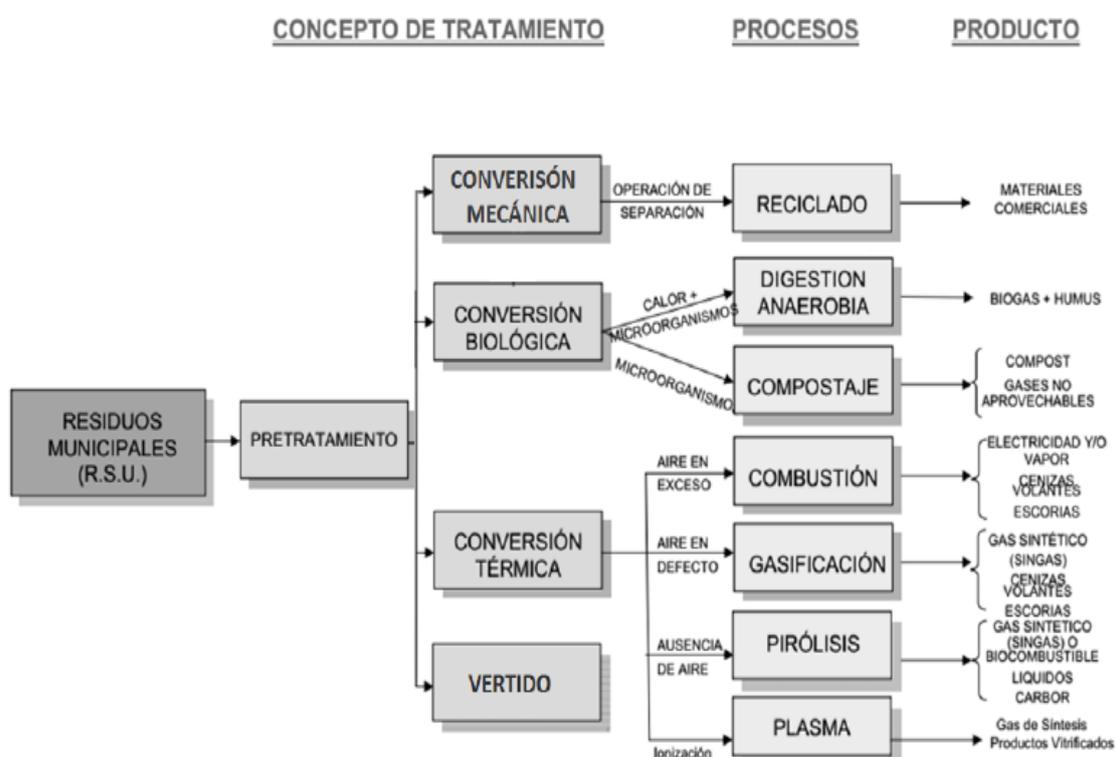
Según define la Directiva 2008/98/CE en su Artículo 3, la valorización es cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función, en la instalación o en la economía en general.

La valorización energética de los residuos sólidos urbanos consiste en gestionar éstos de tal forma que se consiga al mismo tiempo su eliminación casi completa y obtención de energía. Esa energía, posteriormente, se podrá convertir en electricidad y vender a la red eléctrica.

Existen diferentes tecnologías aplicables a la valorización energética de los residuos, consistiendo la mayoría de ellas en tratamientos termoquímicos como la incineración, la pirólisis y la gasificación convencional o la gasificación por plasma. Otro método adicional para aprovechar la energía que contienen los residuos es la digestión anaerobia, que en este caso forma parte de los métodos biológicos por los que se pueden tratar los RSU.

### 3. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE RSU

Hoy en día existen diferentes tecnologías en cuanto al tratamiento de los RSU. El método más utilizado tradicionalmente ha sido el uso de los vertederos, pero actualmente se prefieren otras técnicas medioambientalmente más favorables para gestionar dichos residuos. Entre éstas se encuentran el reciclado, los tratamientos biológicos y los tratamientos termoquímicos. De todas ellas, las tecnologías más usadas son aquellas que están basadas en métodos termoquímicos como la incineración. Existen dos métodos adicionales para poder valorizar energéticamente los RSU, la gasificación y la pirólisis, pero su grado de desarrollo no es comparable con el de la incineración. Por otro lado, los procesos de tratamiento biológico, como la biometanización y el compostaje, son menos utilizados que la incineración. En la Figura 1 se presenta un esquema de los diferentes procesos de tratamiento de los RSU.



**Figura 1.** Opciones para el tratamiento de los RSU (URBASER, 2009).

El compostaje es un proceso biológico que se basa en la descomposición de la materia orgánica presente en los RSU. El proceso se lleva a cabo bajo condiciones aerobias controladas que permiten transformar los residuos orgánicos biodegradables en un producto conocido como compost, que posteriormente se podrá utilizar como abono (Fernández, 2007). Todos los esfuerzos del proceso se centran en obtener un compost de calidad, para que posteriormente éste se pueda usar. Para conseguir dicho fin es necesario mantener las condiciones óptimas de operación para que los microorganismos responsables del proceso se puedan desarrollar de manera correcta (Bonmatí, 2008).

La biometanización es un proceso de conversión biológica que al igual que el compostaje se basa en la descomposición de la materia orgánica presente en los RSU mediante la actividad de los microorganismos. En este caso, el proceso se lleva a cabo

en ausencia de oxígeno (U.S. EPA, 2012). Como resultado de este proceso se obtiene un biogás rico en metano, que se puede quemar para la generación de calor y electricidad, y un producto sólido, que se puede utilizar como abono debido a su alto contenido en nutrientes (Fernández, 2007; U.S. EPA, 2012).

La incineración es un proceso de combustión que usa exceso de O<sub>2</sub> o de aire para quemar los RSU (Young, 2010). Como resultado del proceso de incineración se obtienen gases de combustión compuestos por CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> no reaccionado, N<sub>2</sub> en el caso de que se utilice aire como agente oxidante, y otros compuestos en menores proporciones, y un residuo sólido compuesto por escorias inertes y cenizas. Mediante este proceso, se convierte prácticamente toda la energía química contenida en los residuos en energía térmica, dejando una parte de la energía química sin convertir que estará presente en las cenizas obtenidas (IDAE, 2011).

La gasificación es un proceso de oxidación parcial de la materia, que se lleva a cabo en presencia de cantidades de oxígeno inferiores a las necesarias estequiométricamente. Una explicación más extensa de esta tecnología se desarrollará en el apartado 5.

La gasificación por plasma es un tipo de gasificación basada en la generación del cuarto estado de la materia, conocido como plasma. Para conseguir dicho estado es necesario alcanzar unos 5000 °C. A dicha temperatura, toda la materia se descompone en sus principales constituyentes. La materia orgánica se convierte en gas de síntesis mientras que la materia inorgánica se vitrifica, dando lugar a un residuo inerte (Leal-Quirós, 2004).

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica en ausencia de una atmósfera oxidante. Al no utilizar ni aire ni oxígeno, no se producen reacciones de combustión (Young, 2010; IDAE, 2011). Para llevar a cabo este proceso es necesario un rango de temperaturas comprendidas entre 400-800 °C. Como productos de este proceso se obtiene una sustancia sólida (char), un líquido y un gas. Una explicación más extensa de esta tecnología se desarrollará en el apartado 6.

Según Arena (2012) se ha confirmado mediante distintos análisis y estudios que los tratamientos termoquímicos son esenciales para una gestión de residuos sostenible. Éstos están caracterizados por una mayor conversión y temperatura que los procesos bioquímicos, por lo que permiten un tratamiento más eficiente de distintos residuos sólidos, sobre todo de residuos sólidos urbanos sin clasificar.

Diversos autores como Arena (2012) y Consonni et al. (2005) concluyen que las principales ventajas de los procesos termoquímicos son:

- Reducen los residuos un 70-80% en masa y un 80-90% en volumen.
- Gran ahorro de espacio.
- Necesitan menor espacio que los vertederos para tratar la misma cantidad de residuos.
- Se destruyen los contaminantes orgánicos.
- Posible reutilización de los metales que están en las cenizas y escoria.
- Evitan cargas medioambientales, ya que se realiza una regulación severa de las emisiones.

Por lo tanto, el mejor método para la gestión de los residuos sería aquel que no generase subproductos; es decir, aquel que eliminase por completo los RSU. Debido a que no existe ningún método que elimine por completo los residuos, ya que sólo consiguen reducirlos, eso sí, con una alta eficiencia, se plantea la opción de valorizar los subproductos obtenidos. Por lo tanto, y dicho esto, se supone que la mejor opción para la gestión de residuos es aquella mediante la cual se obtengan subproductos fácilmente aprovechables y utilizables.

A la hora de seleccionar una tecnología específica para el tratamiento de RSU se tienen en cuenta aspectos como (IDAE, 2011):

- El tipo de residuo o mezcla de residuos a valorizar energéticamente.
- La flexibilidad de la tecnología, es decir, su capacidad de respuesta ante las variaciones en las características de los residuos, los cuales presentan normalmente heterogeneidad en su composición.
- La experiencia y madurez de la tecnología.
- La viabilidad económica.

#### 4. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS EXISTENTES

Gestionar los residuos de forma eficaz y obtener beneficios energéticos de éstos forma parte del futuro más cercano. Las tecnologías que apoyan la valorización energética son la incineración, la pirólisis, la digestión anaerobia, la gasificación convencional y la gasificación por plasma. Cada una de ellas se encuentra en un estado de desarrollo diferente, siendo la incineración la más usada. Actualmente, existen más de 900 plantas de tratamiento térmico repartidas por todo el mundo (Unión Europea, Japón, Estados Unidos, China...) (Themelis, 2008). Durante la primera década del siglo XXI, 200 plantas de incineración con recuperación energética han sido construidas en Europa y Asia principalmente. En cuanto a las nuevas tecnologías, se encuentran con dificultades a la hora de ser implantadas, ya que no existe demasiada experiencia a nivel industrial y las inversiones de capital y los riesgos financieros son muy elevados (Themelis, 2012).

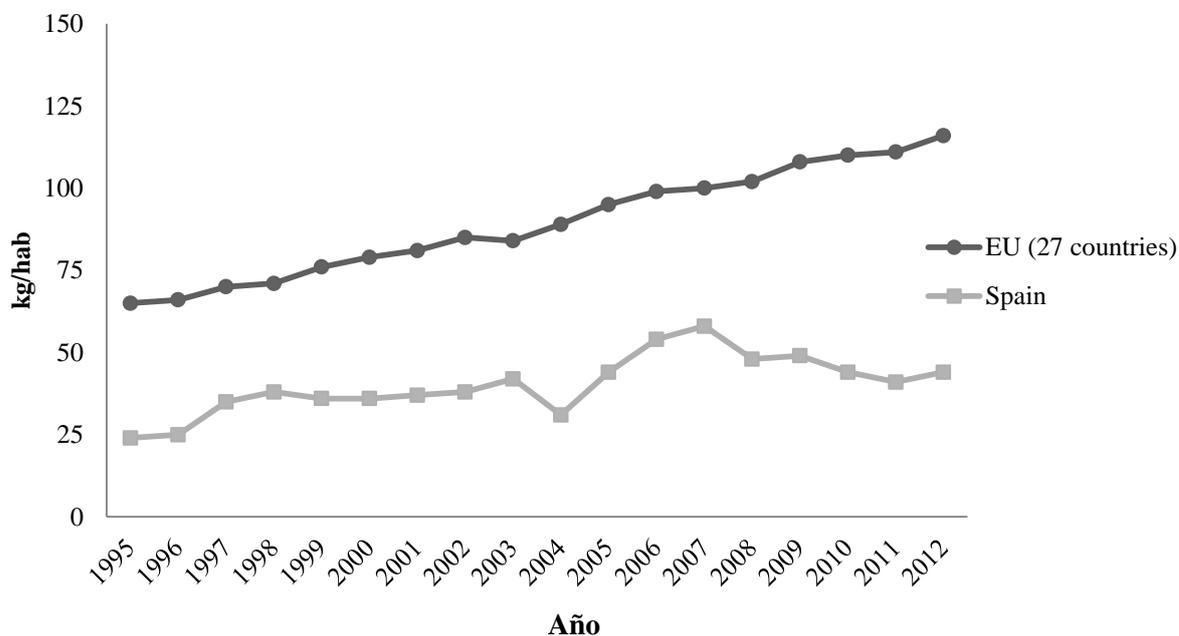
En Europa, las plantas de incineración con recuperación de energía operan gracias a compañías privadas aunque están patrocinadas en gran medida por sus respectivos gobiernos municipales. En dichas plantas se prioriza la generación de calor y electricidad, ya que el principal objetivo es tener el máximo de ingresos posibles (Nagayama, 2011).

El número total de plantas incineradoras en Europa en el año 2011 era de 454 como se puede ver en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Plantas de incineración de residuos en los países de la Unión Europea en 2011 (CEWEP, 2011).

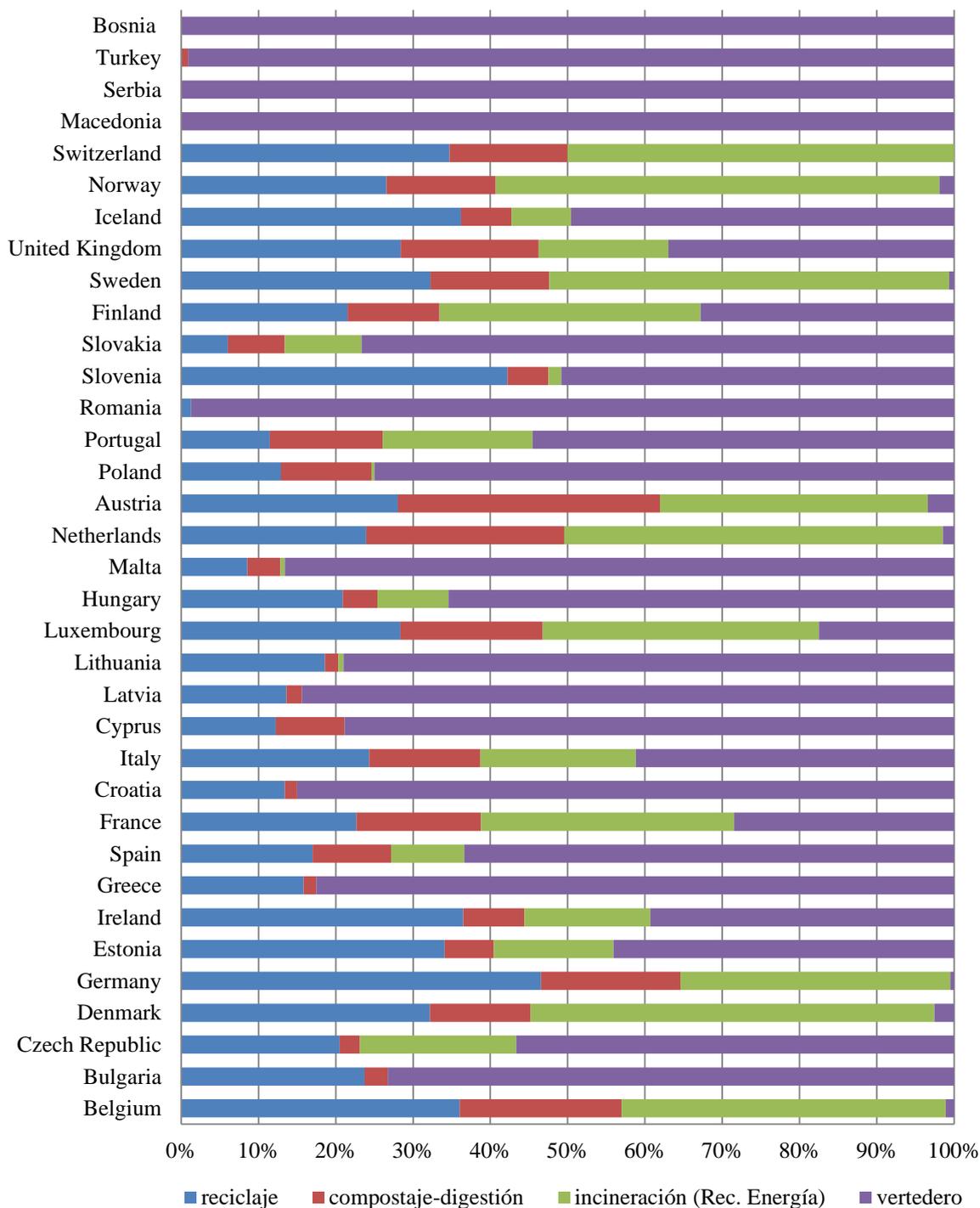
Países	Número de plantas	Países	Número de plantas
Alemania	75	Holanda	12
Andorra	1	Hungría	1
Austria	13	Irlanda	1
Bélgica	18	Italia	46
Dinamarca	29	Luxemburgo	1
Eslovaquia	2	Noruega	18
Eslovenia	1	Polonia	1
España	10	Portugal	3
Finlandia	3	República Checa	3
Francia	129	Suecia	32
Gran Bretaña	25	Suiza	30

En Europa, la cantidad de residuos que son tratados mediante incineración y utilizados para la producción de energía está creciendo constantemente. La tendencia del uso de la incineración para tratar residuos se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Tendencia de la incineración en los últimos años (EUROSTAT, 2012).

Aun así, la cantidad de residuos incinerados es muy dispar entre los distintos países europeos. Mientras que algunos de ellos practican la incineración a gran escala y la promueven con sus políticas de gestión y tratamiento de residuos, como es el caso de Holanda, Suecia, Suiza o Dinamarca por ejemplo, existen países en los que no se usa apenas la incineración, como es el caso de Grecia o Bulgaria y otros donde se utiliza mayoritariamente los vertederos, como es el caso de Chipre o Rumania. En general, el vertido de residuos en depositos controlados es aun la opción predominante para la gestión de los residuos en la Unión Europea, como se puede ver en la Figura 3, aunque hay que destacar que esta tendencia es decreciente.



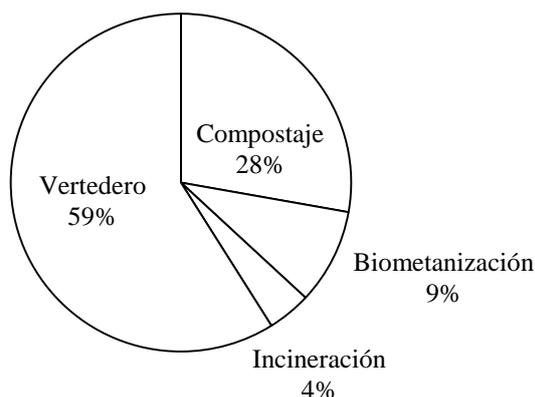
**Figura 3.** Tratamiento de residuos en Europa en 2012 por habitante (EUROSTAT, 2012)

Según IDAE-PER (2011) el hecho de que el uso de los vertederos como método para gestionar los residuos sea la opción predominante en Europa, se debe a la reciente incorporación de los países del Este a la Unión Europea, ya que aún no han podido desarrollar plenamente las políticas comunitarias de gestión de residuos.

Analizando la gestión de residuos europea, Figura 3, se puede observar que los países que presentan las mayores tasas de reciclado son también los que mayores tasas de

incineración tienen. A su vez, también se concluye que los países que combinan altas tasas de reciclado y altas tasas de incineración son los que menos residuos gestionan mediante vertederos.

En el caso de España, el método más utilizado para gestionar los residuos sólidos urbanos es el vertido. La incineración, como se puede ver en la Figura 4, es el método menos usado. En los próximos años se espera que la incineración siga una tendencia creciente, mientras que la del vertido sea decreciente.



**Figura 4.** Tratamiento de RSU en España (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011).

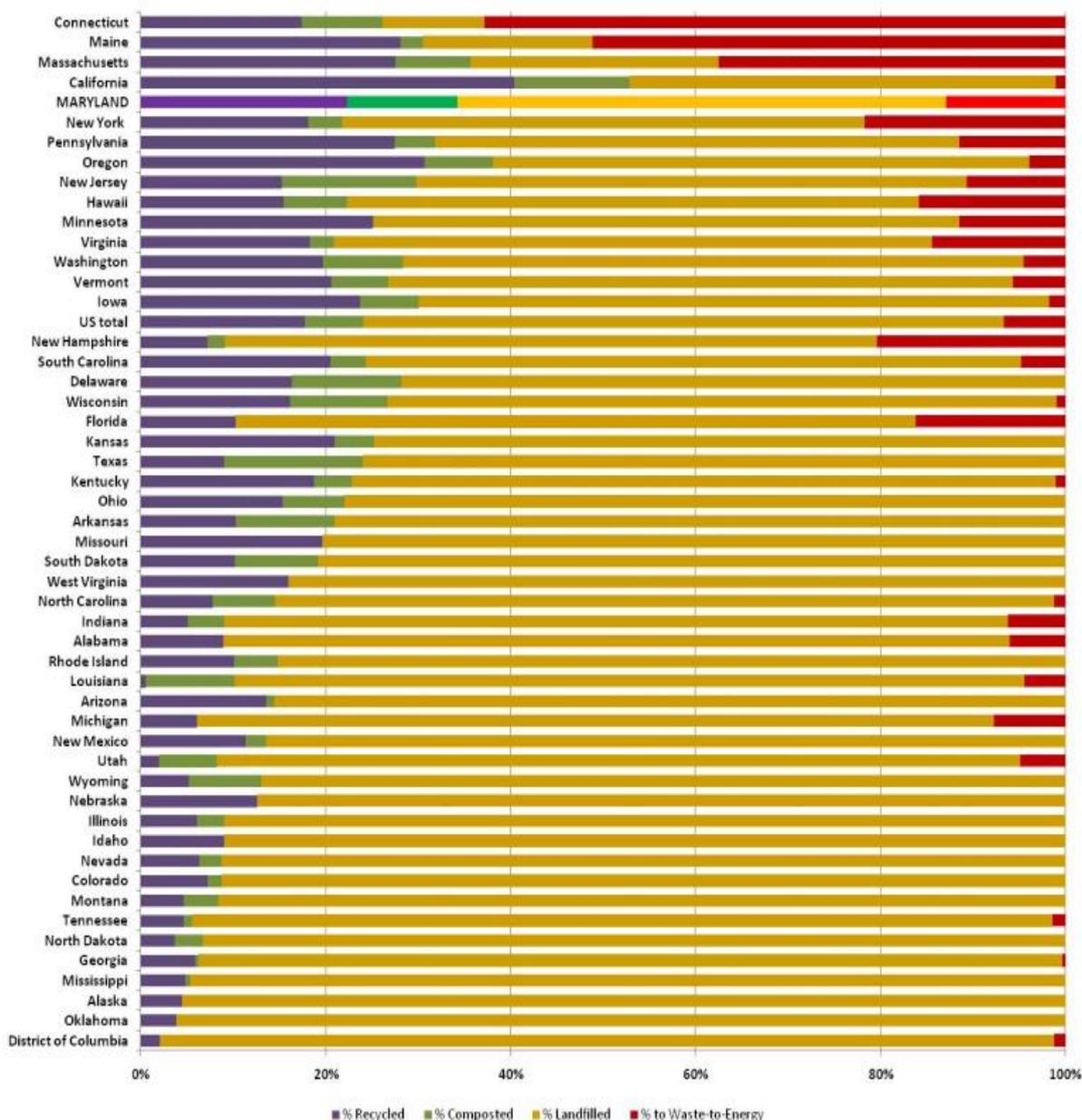
En las diez incineradoras de residuos domésticos que operan actualmente en España intervienen desde grandes grupos (Urbaser, Endesa, FCC, Sener, etc) a Mancomunidades de Ayuntamientos y empresas públicas. Estas incineradoras están agrupadas bajo la Asociación de Empresas de Valorización Energética de los RSU (AEVERSU), que a su vez también forma parte de la Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) (IDAE-PER, 2011).

Estados Unidos es el país que más RSU genera, pero solo un 8% de esos residuos son tratados en plantas de incineración con recuperación energética. El resto de los residuos son eliminados en vertederos (63%) o mediante compostaje y reciclaje (25%) (Themelis y Mussche, 2013). En la Tabla 2 se puede ver las plantas de incineración existentes en Estados Unidos por cada región.

**Tabla 2.** Plantas de incineración de residuos en los Estados Unidos en 2007 (Psomopolos et al., 2009).

<b>País</b>	<b>Número de plantas</b>
Washington	1
Oregón	1
California	3
Utah	1
Alaska	1
Hawaii	1
Minnesota	9
Wisconsin	2
Indiana	1
Michigan	3
Alabama	1
Georgia	1
Florida	11
Carolina del Norte	1
Carolina del sur	1
Virginia	5
Maryland	3
Pennsylvania	6
New Jersey	5
New York	10
Connecticut	6
Massachussets	7
New Hampshire	2
Maine	4

Aun así, cada estado tiene diferentes sistemas de gestión de residuos, debido a que ésta no está coordinada a nivel federal. En la Figura 5 se pueden observar grandes variaciones a la hora de gestionar los residuos (Themelis y Mussche, 2013).



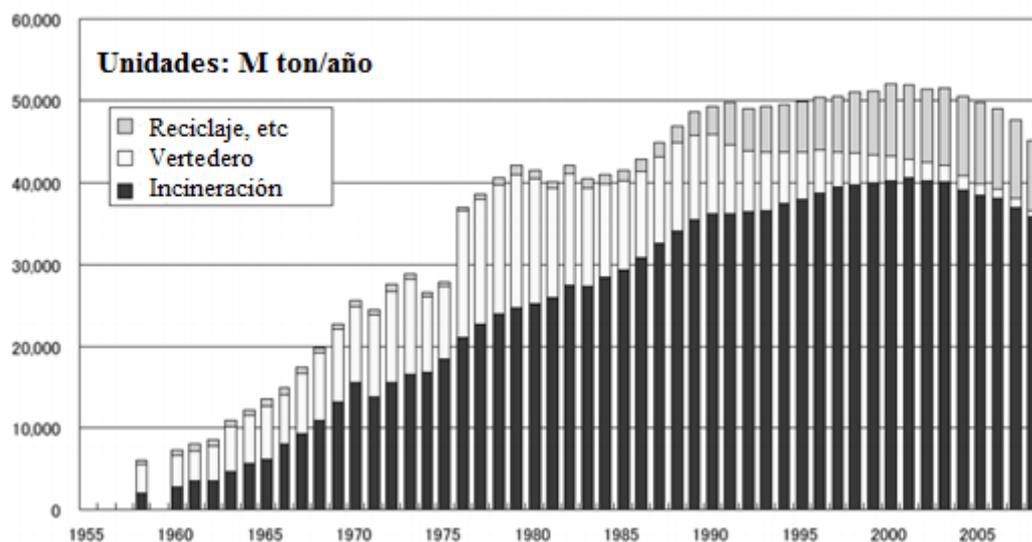
**Figura 5.** Tratamiento de residuos en Estados Unidos en 2008 (Themelis y Mussche, 2013)

Como se puede ver en la Figura 5, la mayoría de los estados eliminan sus residuos en vertederos. Aun así, estados como Connecticut, Maine y Massachusetts son los que llevan una gestión de residuos más sostenible, ya que prefieren tratar los residuos mediante incineración con recuperación energética. Según Themelis y Mussche (2013) estos estados están muy poblados, por lo que el espacio para la construcción de vertederos es reducido. Por este motivo resulta más barato construir plantas de incineración con recuperación energética que vertederos.

En el año 2012 había construidas 86 incineradoras, de las cuales 83 ya estaban construidas para el año 1996, por lo que solo 3 de ellas fueron construidas después de ese año. La construcción de tan pocas plantas de incineración en los últimos años se debe a la falta de incentivación por parte del Estado y a la oposición de los habitantes.

En el futuro no parece que se vaya a retomar el desarrollo de nuevos proyectos (Themelis y Mussche, 2013).

Japón, en cambio, es el país que tiene el sistema de gestión de residuos más sostenible. A nivel mundial, está considerado como un país líder en el desarrollo y en la implementación de tecnologías de tratamiento térmico. El 62% de los residuos que se generan en Japón son eliminados mediante tratamientos térmicos y solo el 2% de los residuos es eliminado en vertederos. El resto de los residuos se recicla (Themelis y Mussche, 2013). Como se puede observar en la Figura 6, la incineración es el tratamiento más usado debido a la escasez de espacio para construir vertederos.



**Figura 6.** Transición en el tratamiento de residuos en Japón (1990-2008) (JASE-World, 2012)

Observando la evolución de los métodos de gestión de residuos usados, en los próximos años se espera que el porcentaje de residuos reciclados aumente, mientras que el porcentaje de residuos eliminados en vertedero sea prácticamente nulo. El número de residuos incinerados tiende a disminuir, debido al uso de nuevas tecnologías como la gasificación.

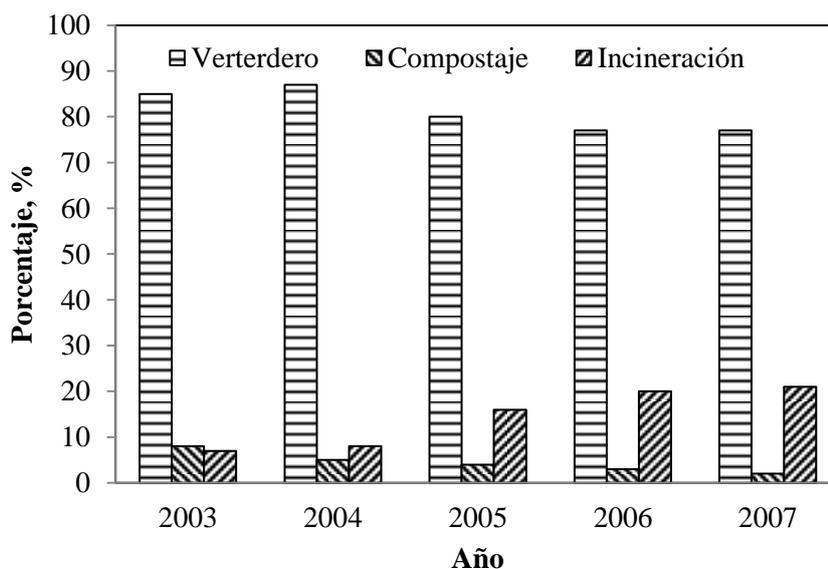
Según Nagayama (2011), los gobiernos municipales japoneses poseen y operan las plantas de incineración con recuperación energética. Esto es debido a que según las leyes japonesas, están obligados a tratar los residuos en su propio territorio. Le dan máxima prioridad al tratamiento de residuos y no a la generación de electricidad. En el futuro se espera que cambien su política de tratamiento de residuos, aumenten su capacidad de operación y obtengan ingresos de la venta de electricidad obtenida de los residuos.

China ha experimentado en la última década un gran crecimiento económico que ha originado un aumento en la generación de los RSU (Qiu et al., 2012). Este aumento ha hecho que muchas ciudades tengan problemas para eliminar los residuos domésticos. Según Cheng et al. (2007), la generación de RSU es uno de los principales problemas de China que afecta a la calidad y al desarrollo sostenible de sus ciudades.

El sistema de gestión de residuos más utilizado son los vertederos y se calcula que aproximadamente un 80% de los residuos se tratan mediante este método. Debido a que los vertederos ubicados cerca de las grandes ciudades de China están llegando o han llegado a su máxima capacidad, el gobierno ha propuesto como alternativa la incineración con recuperación de energía. Existen 93 plantas de este tipo cuya tecnología está basada en parrillas de combustión o lechos de fluidización (Cheng et al., 2007). Se espera que el número de plantas de incineración aumente año a año y que, a su vez, aumente la cantidad de residuos que se traten mediante estas tecnologías. Hoy en día, se tratan mediante incineración un 25% de todos los RSU generados en China.

Aun así, las plantas de incineración con recuperación energética presentan problemas de operación. Dichos equipos son importados de Norte América y Europa del Este donde el contenido de humedad de los residuos es menor que el de China, por lo que existen dificultades a la hora de quemar los residuos, ya que suele ser necesario el uso de un combustible adicional que supondría mayores costes de operación (Cheng et al., 2007; Cheng y Hu, 2010). Para hacer frente a dichos problemas, existen grupos de investigación locales que están desarrollando equipos que se adapten a las características de los residuos de China. Ejemplo de ello es el trabajo realizado por el Instituto de Ingeniería Térmica de la Universidad de Zhejiang y el Instituto de Ingeniería Termofísica de la Academia de Ciencias China, ya que han conseguido desarrollar lechos fluidizados circulantes para usarlos en la incineración de los RSU. Se estima que unas 40 plantas de incineración usan esta técnica (Themelis, 2008).

En los años 90 se impulsó el compostaje de los RSU en China. Sin embargo, debido a que no había clasificación ni separación previa de los residuos antes de ser compostados, la calidad del compost obtenido era muy baja. Debido a las características de éste, muchas de las instalaciones fueron cerradas, ya que apenas existía demanda de este producto (Cheng y Hu, 2010). Hoy en día, solo el 2% de los residuos se tratan mediante compostaje (Dong, 2011). La evolución del uso de estos tres métodos principales de tratamiento de residuos en China se puede ver en la Figura 7.



**Figura 7.** Capacidad de vertedero, compostaje e incineración para el tratamiento de RSU (Qiu et al., 2012).

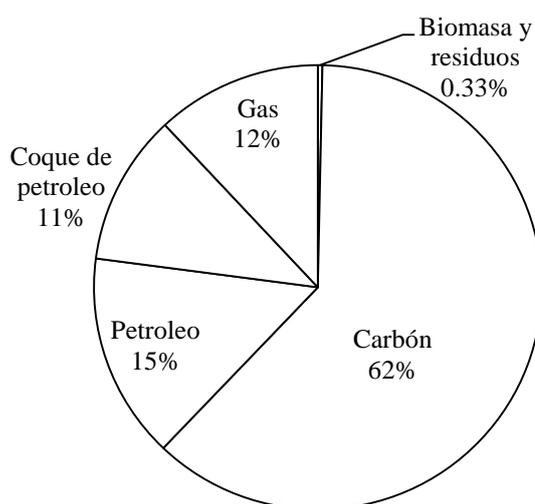
## 5. GASIFICACIÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN

La gasificación es el proceso mediante el cual los residuos son convertidos en gas de síntesis (Arena, 2012). Es una oxidación parcial que se realiza en defecto de  $O_2$ , utilizando un 25-30% del  $O_2$  necesario para una oxidación completa (Elias Castells, 2005). Como resultado del proceso de gasificación se obtiene un gas de síntesis, compuesto principalmente por  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  (en el caso de que se utilice aire como agente gasificante), y  $CH_4$ , y un residuo sólido, compuesto por materiales no combustibles e inertes presentes en el residuo alimentado (IDAE, 2011).

La gasificación es una vieja tecnología con grandes perspectivas de futuro. Fue utilizada para la producción de gas de ciudad durante los siglos XIX y XX a partir del carbón. Su progresivo desarrollo la ha convertido en una tecnología más competitiva, más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente. El mayor impulso lo sufrió en la Segunda Guerra Mundial, donde se utilizó en equipos que gasificaban madera para la obtención de combustible. El fin de la Segunda Guerra Mundial trajo consigo el olvido de los gasificadores para su uso de la automoción. Hoy en día, la gasificación es una tecnología de conversión energética que ofrece simultáneamente flexibilidad y ventajas tanto en la alimentación como en la tipología del producto, ya que todas las materias primas que contienen carbono pueden ser gasificadas (Elias Castells, 2005).

Por otra parte, la gasificación es una tecnología fácilmente disponible en todo el mundo. La industria donde más aplicación tiene la gasificación es la industria del carbón. La gasificación de biomasa y de residuos solo constituye 0.33% de todos los procesos de gasificación mundial como se puede observar en la Figura 8 (Arafat y Jijakli, 2013). En los últimos años ha incrementado el uso de la gasificación para recuperar energía de residuos (Lombardi et al., 2012; Arafat y Jijakli, 2013).



**Figura 8.** Uso mundial de la gasificación (Arafat y Jijakli, 2013).

## 5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA GASIFICACIÓN

En la gasificación la temperatura de operación es superior a 600 °C, aunque la temperatura exacta del proceso depende del tipo de reactor y de las características de los residuos sólidos obtenidos, en particular de la temperatura de fusión de las cenizas (Arena, 2012). Dependiendo de la temperatura de operación se distingue:

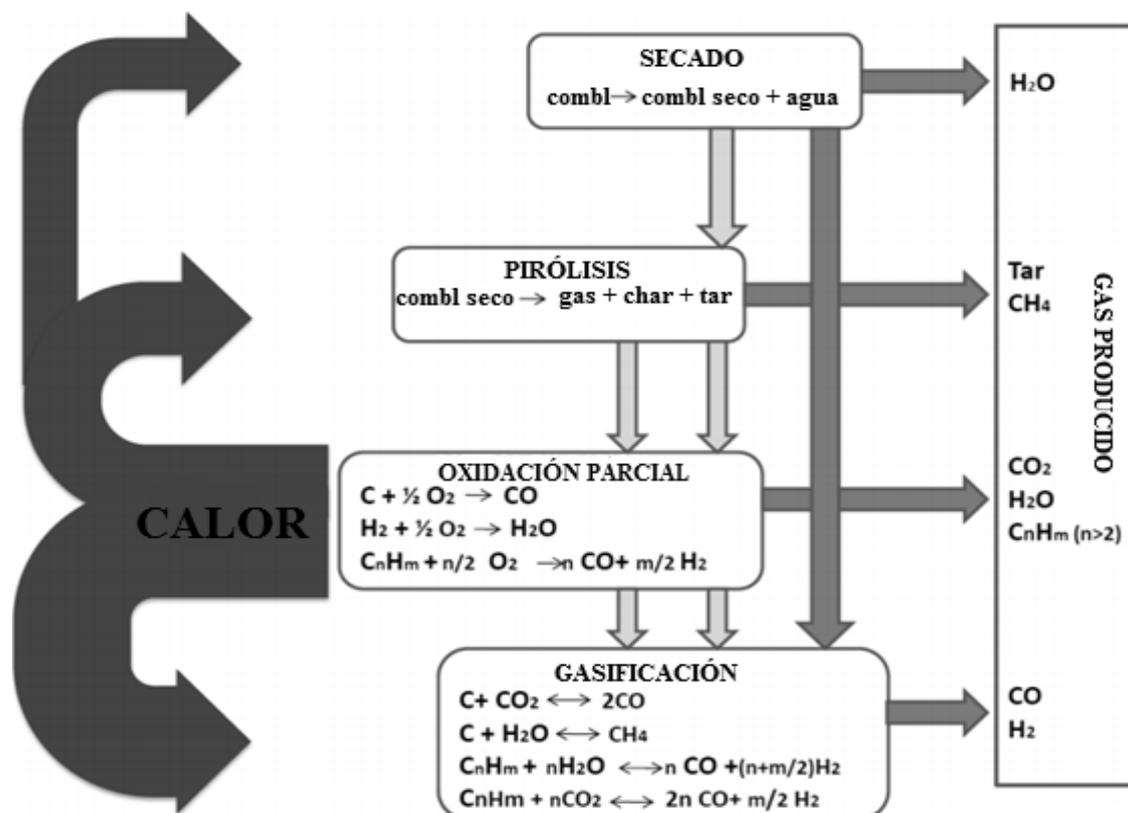
- **Gasificación de baja temperatura**, alrededor de 600-900 °C. Esta tecnología requiere que la alimentación tenga un contenido en humedad inferior al 5%, por lo que requiere de un proceso previo de secado (U.S. EPA, 2012).
- **Gasificación de alta temperatura**, que puede alcanzar los 1200 °C. Esta tecnología se suele usar para tratar mezclas de residuos carbonosos que incluyen papel, plástico y residuos orgánicos con un contenido en humedad de hasta un 30% (U.S. EPA, 2012).
- **Gasificación por plasma**, se lleva a cabo a altas temperaturas, alrededor de unos 5000 °C. Se pueden tratar cualquier tipo de residuos, excepto residuos nucleares, ya que a dicha temperatura, toda la materia se descompone en sus principales constituyentes. La materia orgánica se convierte en gas de síntesis mientras que la materia inorgánica, se vitrifica, dando lugar a un residuo inerte. El gas de síntesis generado contiene menos contaminantes, ya que debido a las altas temperaturas y a la casi ausencia de oxígeno en el reactor, no se pueden formar compuestos tóxicos como furanos, dioxinas, NO<sub>x</sub> o SO<sub>x</sub> (Leal-Quirós, 2004).

El medio de oxidación puede variar dependiendo si se usa aire, oxígeno o vapor como fuente de oxígeno (Arena, 2012).

- **Oxidación con aire**: Es necesario emplear temperaturas comprendidas entre 900 y 1100 °C. Es la tecnología más utilizada. Aunque sea barata, produce un gas de síntesis diluido en N<sub>2</sub> que tiene un poder calorífico bajo, alrededor de 4-7 MJ/m<sup>3</sup>N (Puig-Arnavat et al., 2010; Arena, 2012; WSP, 2013).
- **Oxidación con aire enriquecido**: Produce un gas de síntesis de mayor poder calorífico debido al bajo contenido en N<sub>2</sub> (Arena, 2012).
- **Oxidación con O<sub>2</sub>**: Es necesario emplear temperaturas superiores a las usadas en la oxidación con aire (1000-1400 °C). Se obtiene un gas de síntesis sin N<sub>2</sub> que tiene mayor poder calorífico (10-15 MJ/m<sup>3</sup>N), pero requiere de un suministro de O<sub>2</sub>. Los costes de separación del O<sub>2</sub> del aire están justificados con el aumento del poder calorífico, la reducción del contenido en alquitrán y la producción de cenizas vitrificadas (McKendry, 2002; Puig-Arnavat et al., 2010; Arena, 2012; WSP, 2013).
- **Oxidación con vapor**: Se obtiene un gas de síntesis sin N<sub>2</sub>, con alta concentración en H<sub>2</sub>. El poder calorífico es de 15-20 MJ/m<sup>3</sup>N (Puig-Arnavat et al. 2010; Arena, 2012).

La química de la gasificación de los RSU es compleja. En la Figura 11 se muestra los procesos que se producen durante la gasificación de los residuos sólidos urbanos. La

gasificación de este tipo de residuos está compuesta por las siguientes etapas (Arena y Mastellone, 2005; Puig-Arnabat et al., 2010; Arena, 2012):



**Figura 9.** Esquema de las etapas de gasificación (Arena and Mastellone, 2005).

- **Secado:** En esta etapa se reduce el contenido de humedad de los residuos. Ocurre a 100-200 °C y se consigue reducir el contenido de humedad hasta alrededor de un 5% (Puig-Arnabat et al., 2010).
- **Desvolatilización:** Es la etapa donde ocurre la descomposición de los residuos en ausencia de oxígeno o aire mediante reacciones de craqueo a unos 700 °C (Puig-Arnabat et al., 2010; Arena, 2012).
- **Oxidación:** En esta etapa se produce la reacción entre los residuos carbonizados de la etapa anterior y el oxígeno del aire (Puig-Arnabat et al., 2010).
- **Reducción:** Debido que el proceso se lleva a cabo en defecto de oxígeno a temperaturas comprendidas entre 800 y 1000 °C ocurren las reacciones de reducción, siendo la mayoría de éstas endotérmicas. Se puede considerar que las principales reacciones del proceso son las siguientes (Puig-Arnabat et al., 2010; Arena, 2012):
  - Water gas reaction:  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$  (-131.4 KJ/gmol) (1)
  - Bounded reaction:  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$  (-172.6 KJ/gmol) (2)
  - Shift reaction:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$  (-42 KJ/gmol) (3)
  - Methane reaction:  $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$  (+75 KJ/gmol) (4)

Como ya se ha comentado previamente, como productos del proceso de gasificación se obtienen un gas de síntesis y un residuo sólido, ambos con diversas aplicaciones.

El gas de síntesis se puede utilizar (IDAE, 2011):

- Como materia prima para la producción de compuestos orgánicos.
- En la síntesis directa de metanol, amoníaco, o para la obtención de hidrogeno mediante un reformado con vapor o reformado catalítico.
- Como combustible en calderas tradicionales.
- Como combustible en los procesos de producción de energía eléctrica mediante ciclos térmicos distintos a los de vapor de agua, ya sean ciclos combinados o simples, en turbinas de gas o motores de combustión interna.

En cambio, las cenizas obtenidas pueden tener ocho aplicaciones diferentes divididas en cuatro categorías: Materiales de construcción, aplicaciones geotécnicas, agricultura y otros. En Tabla 3 se muestra la clasificación realizada por Ferreira et al. (2003).

**Tabla 3.** Comparación de las diferentes opciones disponibles para la aplicación de las cenizas de residuos sólidos urbanos (Ferreira et al. 2003)

		<b>Materiales de construcción</b>					
<b>Aplicación</b>	<b>Estado Actual</b>	<b>Nivel de aplicación</b>	<b>Pre-tratamiento</b>	<b>Valorización</b>	<b>Posibles usos</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Producción de cementos</b>	No probado	Alto	Aconsejado	Media	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción de cementos de aluminosilicatos</li> <li>- Producción de otros cementos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de residuos para eliminar</li> <li>- Ahorro de energía</li> <li>- Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub></li> <li>- Fácil de implementar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Possible corrosión debido a emisiones de cloruro durante la producción de cemento</li> </ul>
<b>Hormigón</b>	En investigación	Alto	Aconsejado	Media/baja	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Protección costera</li> <li>-Construcción de casas y aislamiento</li> <li>-Hormigones de baja densidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de residuos para eliminar</li> <li>-Conservación de materias primas</li> <li>-Mejora de las características del hormigón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Altos tiempos de fraguado</li> <li>-Posible reducción de la resistencia del hormigón</li> </ul>
<b>Cerámicas</b>	Bajo investigación	Alto	-	Media	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ladrillos de construcción</li> <li>-Azulejos de pared</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de residuos para eliminar</li> <li>-Conservación de materias primas</li> </ul>	-
<b>Vidrio</b>	Bajo investigación	Medio	No requerido	Baja	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materiales decorativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reducción de residuos para eliminar</li> <li>-Conservación de materias primas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Emisiones durante la vitrificación</li> <li>-Alto coste</li> </ul>

Tabla 3. Continuación

Aplicación	Estado Actual	Nivel de aplicación	Pre-tratamiento	Valorización	Posibles usos	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones geotécnicas	Agricultura	Varios	
Asfaltos	Probado	Media	Requerido	Baja	Relleno/cemento	Más barato que la eliminación	-				
Terraplenes	Probado	Baja	Aconsejado	Alto	Relleno/cemento	-Fácil de implementar - Asentamiento de tierra baja	El lixiviado supera los estándares del agua				
Enmienda de suelos	Probado	Bajo	Aconsejado	Alto	Fertilizante	-Reducción de residuos para eliminar -Conservación de materias primas	Solo una pequeña cantidad de cenizas puede usarse				
Absorbentes	Bajo investigación	Media	No requerido	Alto	-Tratamiento de aguas residuales -Limpiador de gases ácidos	- Reducción de residuos para eliminar -Conservación de materias primas	-Baja calidad del producto -Comparado con los absorbentes comerciales -El resto del líquido tiene que ser tratado				
Acondicionamiento de lodos	Probado	Bajo	No requerido	Alto	Acondicionador químico	Fácil de implementar	Posible aumento de metales pesados en las aguas residuales				

Habitualmente, un planta de gasificación consta de tres instalaciones fundamentales (Belgiorno et al., 2003):

1. Gasificador
2. Unidades de limpieza del gas
3. Sistemas de recuperación de energía

### 5.2.1. Gasificadores

La selección del tipo de gasificador y de su diseño depende de la influencia de las propiedades de la alimentación, de las características del gas de síntesis que se quiera obtener y de las variables operacionales. A la hora de escoger un gasificador u otro, hay que tener en cuenta también aspectos económicos, como el coste de capital, operación y mantenimiento (Belgiorno et al., 2003).

Como se muestra en la Tabla 4, existen diferentes tipos de gasificadores que se pueden clasificar en base a diferentes criterios.

**Tabla 4.** Clasificación de los gasificadores (Arena, 2012; Tremel et al., 2013)

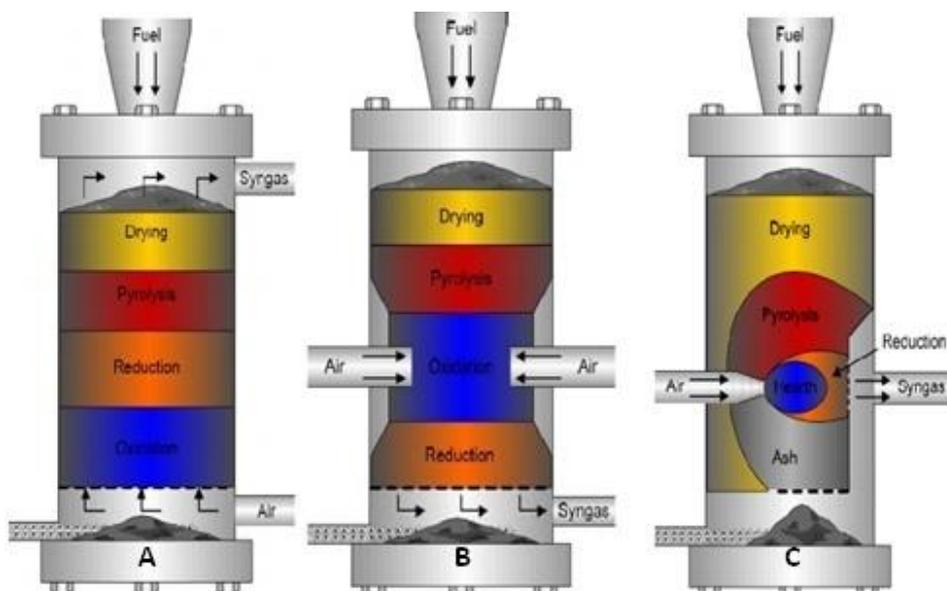
	<b>Tipos</b>
<b>Suministro de calor</b>	-Directo → gasificadores autotérmicos -Indirecto → gasificadores alotérmicos
<b>Presión</b>	-Gasificadores atmosféricos -Gasificadores a presión
<b>Agente gasificante</b>	-Gasificadores de aire -Gasificadores de aire enriquecido con oxígeno -Gasificadores de oxígeno -Gasificadores de vapor -Gasificadores de plasma
<b>Diseño del reactor</b>	-Gasificadores de lecho fijo <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo ascendente en contracorriente</li> <li>• Flujo descendente en corrientes paralelas</li> <li>• Flujo cruzado</li> </ul> -Gasificadores de lecho fluidizado <ul style="list-style-type: none"> <li>• Burbujeante</li> <li>• Circulante</li> <li>• Circulante interno</li> <li>• Lecho fluidizado doble</li> </ul> -Gasificadores de flujo entrante -Gasificadores de parrilla móvil -Gasificadores de plasma
<b>Temperatura</b>	-Gasificadores de baja temperatura (alrededor de 900 °C) -Gasificadores de alta temperatura (alrededor de 1200 °C)
<b>Estado de las cenizas</b>	-Gasificadores de cenizas secas -Gasificadores de escoria vitrificada

A continuación se va a explicar los siguientes tipos de gasificadores: Gasificadores de lecho fijo, gasificadores de lecho fluidizado, gasificadores de flujo entrante, gasificadores de parrilla móvil y gasificadores de plasma.

En los gasificadores de lecho fijo el agente gasificante atraviesa el lecho fijo formado por los residuos poniéndose en contacto con éstos.

Existen tres tipos de gasificadores de lecho fijo:

- **Lecho fijo de flujo ascendente en contracorriente** (Figura 10.A): Es una tecnología simple y muy usada (Puig-Arnabat et al., 2010). El sólido que es introducido por la parte superior, desciende lentamente en contracorriente con la corriente del agente gasificante (Elias Castells, 2005). A medida que la alimentación desciende por el reactor, ésta se va convirtiendo en un gas de síntesis de poder calorífico medio, con un alto contenido en alquitrán (10-20%), pero con bajo contenido en partículas (McKendry, 2002; Belgiorno et al., 2003; Puig-Arnabat et al., 2010). Debido al alto contenido en alquitrán del gas de síntesis obtenido, se requiere una limpieza exhaustiva de éste para poder utilizarlo en equipos de recuperación energética (Puig-Arnabat et al., 2010). La temperatura de operación del reactor está condicionada por la temperatura de fusión de las cenizas y la regulación de la temperatura del lecho se realiza mediante la inyección de vapor.
- **Lecho fijo de flujo descendente en equicorriente o en corrientes paralelas** (Figura 10.B): Al igual que los gasificadores de lecho fijo de flujo ascendente en contracorriente, éstos también son una tecnología simple y muy usada (Puig-Arnabat et al., 2010). En este caso el agente gasificante y los RSU se mueven en la misma dirección. Se obtiene un gas de síntesis de poder calorífico moderado, con bajo contenido en alquitrán (0.1%) a 900-1000 °C, pero con alto contenido en partículas (McKendry, 2002; Elias Castells, 2005; Fabry et al., 2013). Este tipo de reactor es adecuado para la obtención de un gas de síntesis relativamente limpio, por lo que requerirá menor tratamiento de limpieza.

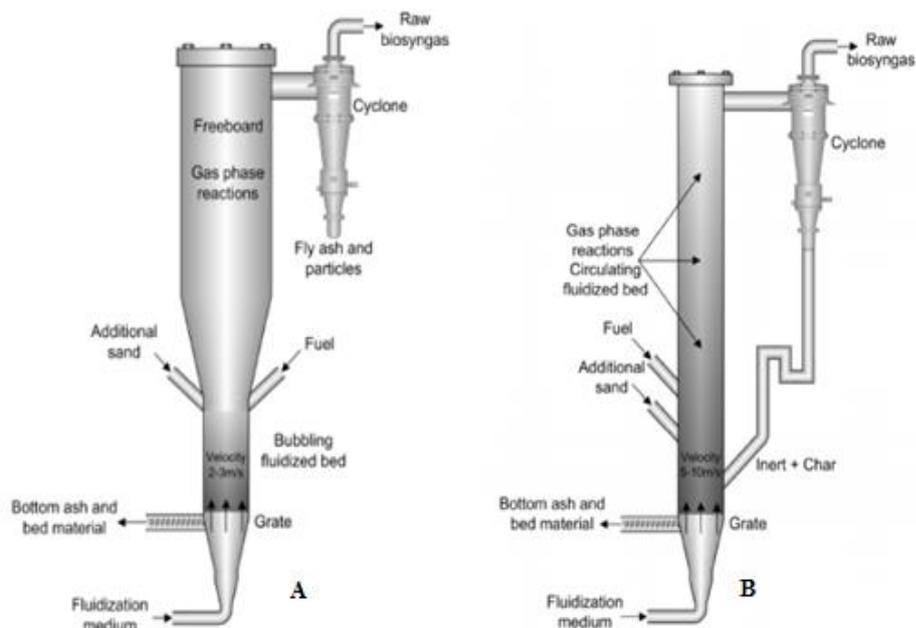


**Figura 10.** A) Gasificador de lecho fijo de flujo ascendente en contracorriente. B) Lecho fijo de flujo descendente en equicorriente o en corrientes paralelas. C) Gasificador de lecho fijo en corrientes cruzadas (SGC, 2011).

- **Lecho fijo en corrientes cruzadas** (Figura 10.C): Combina las ventajas e inconvenientes de los dos modelos anteriores. Mientras que la alimentación se mueve en flujo descendente, el agente oxidante se mueve de lado a lado del gasificador. Se obtiene un gas de síntesis con alto contenido en alquitrán a 800-900 °C (McKendry, 2002).

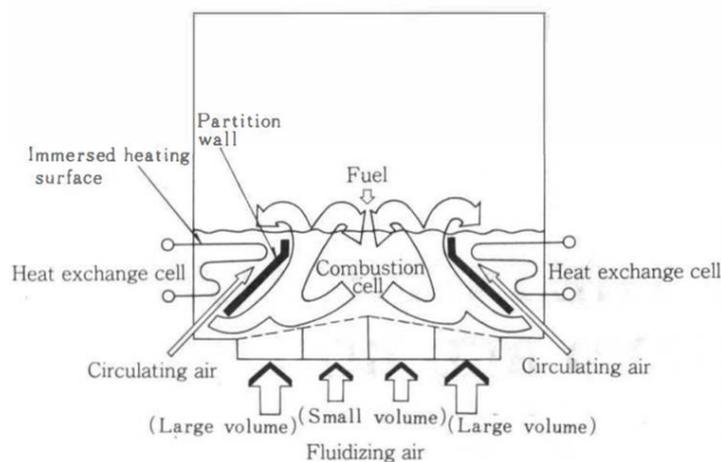
Los gasificadores de lecho fluidizado fueron desarrollados para arreglar los problemas operacionales de los reactores de lecho fijo, ya que éstos tenían problemas cuando trataban alimentaciones con alto contenido en cenizas. Según Belgiorno et al. 2003, los lechos fluidizados son cinco veces más eficientes que los lechos fijos. A diferencia de los lechos fijos, éstos necesitan un material inerte que conforme el lecho, siendo el material más utilizado la arena de sílice. Se diferencian cuatro tipos de gasificadores de lecho fluidizado:

- **Lecho fluidizado burbujeante** (Figura 11.A): Es una tecnología de gran flexibilidad, admite materias primas variadas y de distintos tamaños, y de fácil operación (Puig-Arnabat et al., 2010). La temperatura permanece uniforme a lo largo del reactor y depende de las características del sólido a gasificar (Elias Castells, 2005). Habitualmente operan aproximadamente a 900 °C para evitar la fusión y sinterización de cenizas que pueden perjudicar la fluidización (Puig-Arnabat et al., 2010; Arena, 2012). La velocidad del oxidante tiene que ser superior a la velocidad mínima de fluidización del lecho y suele ser de 1-3 m/s (Belgiorno et al., 2003; Arena, 2012). En este tipo de lechos la transferencia de calor y de materia es buena, obteniéndose un gas de síntesis de poder calorífico moderado con bajo contenido en alquitrán pero con muchas partículas (Puig-Arnabat et al., 2010).
- **Lecho fluidizado circulante** (Figura 11.B): Al igual que los lechos fluidizados burbujeantes, ésta es una tecnología de gran flexibilidad, admite materias primas variadas y de distintos tamaños, y de fácil operación (Puig-Arnabat et al., 2010). Esta configuración mejora el mezclado entre el oxidante y los RSU. El concepto de flujo circulante hace referencia a la separación de las partículas del lecho mediante el uso de un ciclón y el retorno de éstas al reactor (Arena, 2012). La temperatura permanece uniforme a lo largo del reactor, alcanzando como mucho los 900 °C. La velocidad del agente gasificante es superior a la de los lechos fluidizados burbujeantes (5-10 m/s), obteniéndose una mayor eficiencia (Belgiorno et al., 2003; Elias Castells, 2005). El gas de síntesis obtenido tiene pocas partículas, pero alto contenido en alquitrán (Puig-Arnabat et al., 2010).



**Figura 11.** A) Lecho fluidizado burbujeante. B) Lecho fluidizado circulante (SGC, 2011).

- **Lecho fluidizado circulante interno** (Figura 12): Es una versión de los lechos fluidizados burbujeantes. Tienen un distribuidor de gas de fluidización especial, lo que hace que se mejore el mezclado entre los RSU y el gas (McKendry, 2002; Arena, 2012). Lo que diferencia este método de los lechos fluidizados burbujeantes es un tabique inclinado añadido entre la celda de combustión y la celda de intercambio de calor. Se forma un flujo circulante dentro de la celda de combustión, y a su vez, también existe un flujo secundario entre la celda de combustión y la celda de intercambio de calor. Este último flujo es debido al retorno del material del lecho (Hirota et al., 1990).

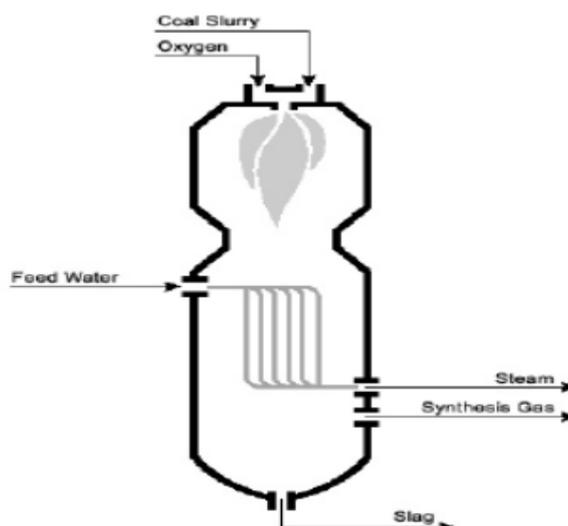


**Figura 12.** Lecho fluidizado circulante interno (Hirota et al., 1990)

- **Lecho fluidizado doble:** Es una tecnología de operación compleja que usa dos reactores de lecho fluidizado. La alimentación se introduce al primer reactor, donde se gasifica con vapor, y el alquitrán formado es transportado al segundo

reactor, donde es quemado con aire para producir calor. El gas de síntesis producido tiene un moderado poder calorífico debido a su contenido en alquitrán, por lo que para que el gas sea usado en motores o turbinas, se requiere previa limpieza de éste (Puig-Arnavat et al., 2010).

Otro tipo de gasificadores son los de flujo arrastrado. Éstos están aún en desarrollo y su operación es compleja. Se están intentando adaptar estos reactores para poder usarlos con RSU (Tremel et al., 2013). Tienen poca flexibilidad a la hora de operar, no admiten cualquier tamaño de partícula, por lo que es necesario pretratar previamente la alimentación (Arena, 2012; Tremel et al., 2013). Habitualmente este tipo de gasificadores se utilizan para tratar carbón, residuos de refinería o residuos plásticos (Puig-Arnavat et al., 2010; Arena, 2012; Tremel et al., 2013). En cuanto a las condiciones de operación hay que destacar lo severas que son, siendo la temperatura de unos 1200-1500 °C y la presión de aproximadamente 25 bares, por lo que se tienen problemas con los materiales de construcción del reactor. El gas de síntesis obtenido es de poder calorífico moderado, ya que su contenido en alquitrán es bajo (Puig-Arnavat et al., 2010). Su esquema se puede ver en la Figura 13.



**Figura 13.** Gasificador de flujo arrastrado (SCG, 2011).

Los gasificadores de parrilla móvil son similares a las parrillas de incineración. Las parrillas son tecnologías muy utilizadas en plantas de incineración con recuperación de energía que recientemente se han empezado a aplicar en procesos de gasificación. La conversión ocurre en dos etapas: primero se gasifican los RSU y posteriormente se oxidan a alta temperatura los gases formados en la cámara de gasificación (Arena, 2012).

Los gasificadores de plasma son recipientes que trabajan con muy poco oxígeno, por lo que la materia prima introducida al reactor no se quema sino que se descompone debido a las altas temperatura que soporta. El calor es suministrado mediante antorchas generando temperaturas próximas a los 5000 °C (Westinghouse Plasma Corporation, 2013). La función de las antorchas es la creación del “arco de plasma”. El arco se produce en el espacio situado entre dos electrodos conductivos que al llenar dicho espacio con un gas que se pueda ionizar (argón o helio), es capaz de descomponer la

alimentación introducida al reactor (Monje, 2012). Un esquema representativo de este tipo de gasificador se puede ver en la Figura 14.



**Figura 14.** Reactor de gasificación por plasma Westinghouse (Westinghouse Plasma Corporation, 2013).

### 5.2.2. Unidades de limpieza del gas de síntesis

En la gasificación de los RSU se genera un gas de síntesis que contiene cenizas, alquitrán,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  (Anis y Zainal, 2011). Éstos pueden causar erosión y corrosión en los equipos de recuperación de energía (Belgiorno et al., 2003), por lo que previamente se realiza la limpieza del gas de síntesis.

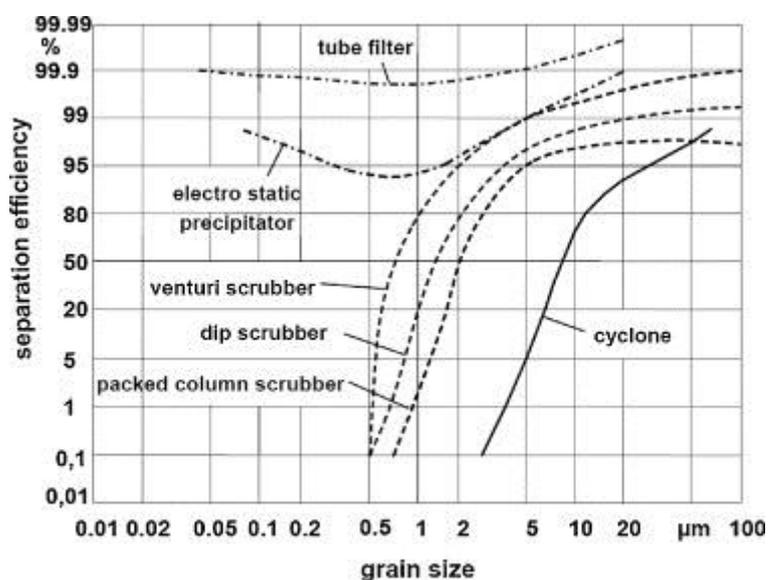
Existen diversos métodos para el tratamiento del gas de síntesis: Métodos mecánico-físicos, craqueo catalítico y tratamientos térmicos.

Los métodos mecánico-físicos eliminan partículas y alquitrán. Éstos se pueden clasificar en dos tipos: Limpieza de gases en seco y limpieza de gases en húmedo. En la Tabla 5 se muestran los equipos correspondientes a cada uno de los métodos.

**Tabla 5.** Clasificación de sistemas mecánico-físicos de limpieza del gas de síntesis (Anis y Zainal, 2011)

Tipo	Equipos
<b>Seco</b>	-Ciclón -Separador de partículas rotatorio -Precipitadores electroestáticos -Filtros de mangas -Filtros cerámicos -Adsorbentes basados en carbón activo -Filtros de lecho de arena -Filtros de tela
<b>Húmedo</b>	-Precipitadores electroestáticos húmedos -Ciclones húmedos -Torres de pulverizado -Lavador venturi -Lavador de lecho empacado -Torres de platos

A la hora de elegir qué tipo de equipo usar para el tratamiento del gas de síntesis, hay que tener en cuenta el tamaño de las partículas y el grado de eliminación de éstas que se quiere obtener. Para ello se puede usar a modo de orientación la Figura 15.



**Figura 15.** Típicas eficiencias mediante el método mecánico-físico de limpieza del gas de síntesis (Hasler y Nussbaumer, 1999).

En la Tabla 6, se muestra la reducción de partículas y de alquitrán que se puede obtener en el gas de síntesis mediante tratamientos mecánico-físicos.

**Tabla 6.** Reducción de partículas y de alquitrán en distintos equipos (Hasler y Nussbaumer, 1999).

	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Reducción del contenido en partículas (%)</b>	<b>Reducción del contenido en alquitrán (%)</b>
<b>Filtros de lechos de arena</b>	10-20	70-99	50-97
<b>Lavador de lecho empacado</b>	50-60	60-98	10-25
<b>Lavador venturi</b>	-	-	50-90
<b>Precipitador electroestático húmedo</b>	40-50	>99	0-60
<b>Separador de partículas rotatorio</b>	130	85-90	30-70
<b>Filtro de tela</b>	130	70-95	0-50

Los procesos de craqueo catalíticos para la conversión del alquitrán se llevan a cabo a temperaturas alrededor de 800-900 °C, consiguiéndose eficiencias entorno del 90-95% (Belgiorno et al., 2003) mediante el uso de diferentes tipos de catalizadores (Hasler y Nussbaumer, 1999):

- Catalizadores de base níquel
- Catalizadores metálicos sin níquel
- Catalizadores de metal alcalino
- Catalizadores ácidos
- Catalizadores básicos
- Catalizadores de carbón activo

Por último se pueden realizar también tratamientos térmicos. Para ello se necesitan temperaturas alrededor de 1000-1300 °C, ya que hay que craquear el alquitrán (Belgiorno et al., 2003). Según Hasler y Nussbaumer (1999) se diferencian dos tipos de tratamiento: Craqueo térmico y craqueo por plasma.

### **5.2.3. Sistemas de recuperación de energía**

Los sistemas de recuperación de energía tienen como objetivo convertir el gas de síntesis en electricidad. En la Tabla 7 se mencionan las ventajas y desventajas que tienen los equipos de recuperación de energía que se utilizan en plantas de grande o mediana escala, junto con la eficiencia eléctrica total obtenida (Arena, 2012).

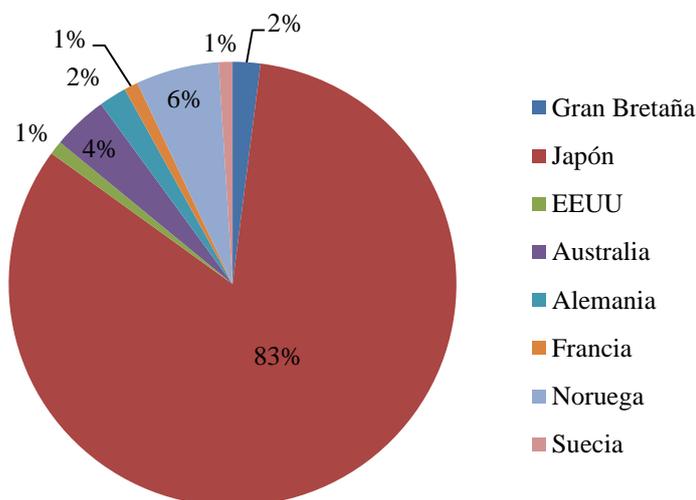
**Tabla 7.** Comparación entre los principales equipos para la recuperación de energía en plantas de gasificación (Arena et al., 2010; Arena, 2012)

<b>Equipo</b>	<b>Eficiencia eléctrica (%)</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Turbina de vapor</b>	10-20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las piezas de la turbina están aislados de los productos de combustión</li> <li>• Largos intervalos de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caro</li> <li>• La eficiencia eléctrica es baja a pequeña escala</li> <li>• La planta tiene que ser suficientemente grande debido al gran espacio que ocupan el hervidor y el condensador.</li> </ul>
<b>Turbina de gas</b>	15-25	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La eficiencia eléctrica es adecuada incluso a pequeña escala</li> <li>• Largos intervalos de mantenimiento</li> <li>• Ideal para plantas de cogeneración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las piezas de la turbina están expuestas a los gases de combustión</li> <li>• Las pérdidas de carga disminuyen la eficiencia</li> <li>• Moderadamente caro</li> </ul>
<b>Turbina de gas calentada internamente</b>	10-20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las piezas de la turbina están aisladas de los productos de combustión</li> <li>• La eficiencia eléctrica es adecuada incluso a pequeña escala</li> <li>• Largos intervalos de mantenimiento</li> <li>• Ideal para plantas de cogeneración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caro</li> <li>• El cambiador de calor está expuesto a altas temperaturas, los gases de combustión son muy agresivos</li> <li>• Las pérdidas de carga disminuyen la eficiencia</li> </ul>
<b>Motor de gas</b>	13-34	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La eficiencia eléctrica es adecuada incluso a pequeña escala</li> <li>• No es caro</li> <li>• De larga duración y alta fiabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las piezas de la turbina están expuestas a los gases de combustión</li> <li>• Cortos pero caros intervalos de mantenimiento</li> </ul>

### 5.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA GASIFICACIÓN

Según Consonni y Viganò (2012), muchos de los conceptos aplicados a la combustión de los combustibles fósiles o de la biomasa son aplicables en un principio a la combustión de los residuos sólidos urbanos. Sin embargo, las peculiares y variables características de los RSU, como su contenido en humedad, heterogeneidad, contenido de cenizas, etc., hacen que la gasificación sea problemática y no se pueda considerar como una opción comercial para el tratamiento de residuos. La experiencia operativa es muy limitada y los datos sobre los rendimientos reales, la fiabilidad y los costes son incompletos, haciendo que la comparación con las tecnologías convencionales sea difícil. Aun así, la gasificación de residuos sólidos puede convertirse en una buena alternativa para el tratamiento de residuos domésticos. En un principio, se espera que la gasificación supere las reticencias que tienen las tecnologías convencionales y que se considere como alternativa a las plantas de incineración.

Hoy en día existen países que ya han puesto en práctica la gasificación de residuos sólidos urbanos. El uso de la gasificación para el tratamiento de RSU no está implantado de igual manera en todo el mundo como se puede ver en la Figura 16.



**Figura 16.** Plantas de gasificación en operación por países (PBA).

En cuanto a la gasificación por plasma, no hay plantas a escala comercial que operen con esta tecnología y que solo gestionen RSU, aunque se espera poder usarla en un futuro no muy lejano. Según WSP (2013), existen nuevos proyectos a escala de demostración en operación y recientemente se han anunciado proyectos a escala comercial que actualmente se encuentran en construcción. Esta tecnología es cada vez más atractiva y numerosos municipios de Europa, Norte de América y Asia están considerando la idea de implantar instalaciones de 1 MMT/año. Al igual que otras tecnologías que están siendo fomentadas para el tratamiento de los residuos, la tecnología de plasma no es nueva, se ha aplicado exitosamente en la industria química y metalúrgica. Lo que es relativamente nuevo, es que algunos desarrolladores de esta tecnología busquen aplicarla a cada vez más amplia gama de residuos. Hoy en día existen 50 proveedores de esta tecnología, pero muchas de estas compañías aún no han

completado su proyecto a escala comercial. En la Tabla 8 se puede ver alguna de esas compañías y el estado actual de su tecnología

**Tabla 8.** Compañías con tecnología de plasma para el tratamiento de RSU (WSP, 2012).

Compañía	Estado del proceso	
	Residuos peligrosos	RSU
Advanced plasma power	-	Demostración
Westinghouse	-	Comercial
EnvironmentalEnergyResources	-	Demostración
Europlasma	Comercial	Demostración
InEnTec	Comercial	Demostración
Plasco	-	Demostración
Pyrogenesis	-	Piloto
Solena	-	-

Hasta el momento todas las plantas han operado a pequeña escala. Recientemente algunas compañías han establecido un record de operación para un cierto tipo de residuos peligrosos e industriales en Estados Unidos y en Japón. En este último país, varias tecnologías han sido comercialmente probadas para la vitrificación de cenizas procedentes de la incineración, pero la gasificación por plasma para el tratamiento de residuos sólidos urbanos y de residuos no peligrosos derivados de industrias y comercios no está totalmente probada a escala relevante; solo hay dos plantas, ambas en Japón, gestionando este tipo de residuos a escala comercial (WSP, 2013).

Esta tecnología es atractiva debido a que se pueden tratar residuos con bajo poder calorífico (alto contenido de humedad) o residuos líquidos con un alto contenido en agua que no son adecuados para tratar mediante otras tecnologías.

En Europa la gasificación avanza poco a poco, debido a que los costes de inversión son altos y existe cierta incertidumbre. Aun así existe mucho interés en esta tecnología, ya que se quiere evitar el uso de la incineración y de los vertederos. A día de hoy hay varias plantas operando a escala de demostración. Los países donde más se ha desarrollado esta tecnología son Noruega y Reino Unido (Juniper, 2003). Noruega cuenta con 5 plantas de gasificación en las que se tratan RSU junto con residuos comerciales. El Reino Unido, en cambio, tiene una planta puesta en marcha desde 2009, y otras seis más están en construcción. Todas ellas cuentan con la tecnología Energos. En Alemania opera la primera planta que usó la tecnología Thermoselect (pirólisis + gasificación) que lleva en operación desde 1999.

En cuanto a la gasificación por plasma, existen dos plantas de este tipo que operan a escala de demostración en Europa, una bajo la tecnología de Advanced Plasma Power ubicada en el Reino Unido y otra bajo la tecnología Europlasma ubicada en Francia. Hay que añadir que la compañía Westinghouse Plasma está construyendo dos plantas de este tipo en el Reino Unido.

Según U.S. EPA (2013), solo existe una planta de gasificación de RSU operando a escala comercial en los Estados Unidos, aunque existen hasta veinte instalaciones de gasificación que procesan residuos de alimentos pre-secados y otros materiales selectos recuperados de los RSU. Está prevista la construcción de ocho instalaciones de

gasificación y cada una de esas instalaciones se encuentra en diferentes fases del proyecto de construcción.

Japón es considerado líder en el desarrollo de los tratamientos térmicos tradicionales como innovadores y hoy en día es el país que mayor uso hace de la gasificación de RSU a nivel mundial (Themelis y Mussche, 2013). El éxito de la gasificación en Japón se debe al elevado coste del vertido de residuos y al interés del país por desarrollar tecnologías líderes en el mundo, realizando grandes inversiones en este tipo de infraestructuras (PBA).

Según Themelis y Mussche (2013), este tipo de plantas están basadas en procesos innovadores como la fusión directa (JFE, Nippon Steel), procesos de fluidización (Ebara) y procesos de gasificación y fusión directa (Thermoselect). Estos procesos tienen bajas emisiones y producen ceniza vitrificada que se puede usar beneficiosamente en vertederos.

En Japón hay unas 106 plantas de gasificación distribuidas por todo el país. Las principales compañías que poseen tecnologías de gasificación, así como el número de plantas existentes se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Revisión de las tecnologías de usadas en Japón (Arena, 2012; WSP, 2013).

<b>Tecnología</b>	<b>Número de plantas</b>
Nippon Steel Engineering	34+ (5)
JFE Thermoselect	7
Ebara	12
JFE Directmelting	14
Hitachi Zosen	8 + (1)
Kobelco	13+ (2)

En cuanto a la gasificación por plasma, Japón es el único país donde existen instalaciones de este tipo operando a escala comercial. Hay dos plantas que llevan operando desde 2002-2003 que usan la tecnología Westinghouse Plasma. Aun así, la alimentación de estas plantas no es 100% RSU, la planta ubicada en Mihama-Mikata opera junto con lodos mientras que la de Utashinai opera junto con residuos de automóviles (ASR).

## 6. PIRÓLISIS

### 6.1. INTRODUCCIÓN

La pirólisis es el proceso mediante el cual los residuos son convertidos en una mezcla líquida de hidrocarburos (bio-oil), gases combustibles y un residuo sólido (char) (Velghe et al., 2011; SEDESOL). A diferencia de la gasificación y la combustión, la pirólisis se basa en la degradación térmica de la materia, no ocurre la oxidación de los residuos, dado que el proceso se lleva a cabo en una atmósfera sin oxígeno. Mediante este proceso se puede procesar un amplio rango de materiales con base de carbono, por lo que en un principio todo compuesto orgánico o material que se degrade térmicamente puede ser procesado mediante este método (DEFRA, 2013).

Según CH2M HILL (2009), antiguamente la pirólisis fue utilizada para producir carbón (charcoal) de la madera, por lo que este método tiene una larga historia en la industria. Fue un proceso utilizado para la producción de negro de carbón, el cual se utilizó para la fabricación de compuestos químicos y de electrodos de carbono. Hoy en día se está utilizando para producir carbón activo a partir de cáscaras de coco o de madera. Si se procesa una alimentación homogénea, se pueden conseguir productos de alta calidad.

### 6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA PIRÓLISIS

Los residuos sólidos municipales, en cambio, son muy heterogéneos, por lo que a priori no son adecuados para el tratamiento por pirólisis. Según CH2M HILL (2009), esto es debido a que los RSU contienen materiales inorgánicos como metales y vidrio que no participan en las reacciones de degradación, por lo que se malgasta energía calentando dichos materiales, reduciendo así la eficiencia global del proceso. Para que la pirólisis de residuos sólidos municipales sea más eficiente, conviene pretratar la alimentación, de modo que se eliminen los metales y vidrio que contengan éstos con anterioridad. Puede que también sea necesaria una previa separación, reducción de tamaño o densificación. Habitualmente los residuos sólidos municipales tienen un alto contenido de humedad, por lo que es necesario secar dichos residuos antes de someterlos a pirólisis, ya que cuanto menor sea la humedad de los RSU a tratar, mayor será el poder calorífico de éstos.

La temperatura de operación habitual en un proceso de pirólisis es de 350-850 °C. Este proceso requiere de una fuente de calor externa para mantener la temperatura de operación adecuada. Dependiendo de dicha temperatura y del tiempo de residencia en el reactor, se distinguen tres tipos de pirólisis (Urien, 2013). En la Tabla 10 se pueden ver la magnitud de los parámetros de operación de los distintos tipos de pirólisis.

- **Pirólisis lenta:** Es el proceso convencional de pirólisis. Se lleva a cabo a unos 300-600 °C y el tiempo de residencia del sólido suele ser de unos 450-550 s (Balat et al. 2009). La velocidad de calentamiento de la alimentación es muy lenta, por lo que se produce más cantidad de char que de bio-oil o de gas combustible. Este tipo de pirólisis se ha utilizado durante cientos de años para la producción de carbón o carbón activo (CH2M HILL, 2009; Tamil Nadu Agricultural University, 2011).
- **Pirólisis rápida:** Es la única tecnología industrial para la producción de bio-oil (Zhang et al., 2010). La velocidad de calentamiento del gas es mayor que la de la

pirólisis lenta, al igual que la temperatura de operación (600-1000 °C). El tiempo de residencia en cambio, es mucho menor, suele ser de 0.5-10 s (Balat et al., 2009).

- **Pirólisis flash:** Cuando la temperatura del proceso es más elevada, alrededor de unos 1200 °C, y los tiempos de residencia son muchos más cortos, se habla de pirólisis flash. Mediante este tipo de pirólisis se quiere maximizar la producción de gas combustible (Urien, 2013).

**Tabla 10.** Parámetros de operación de los procesos de pirólisis (Balat et al., 2009).

Tecnología de pirólisis	Tiempo de residencia del sólido, s	Velocidad de calentamiento, K/s	Tamaño de partícula, mm	Temperatura, °C
Lenta	450 – 550 s	0.1 – 1	5-50	550 – 950
Rápida	0.5 – 10 s	10 - 200	<1	850 – 1250
Flash	<0.5 s	>1000	<0.2	1050 – 1300

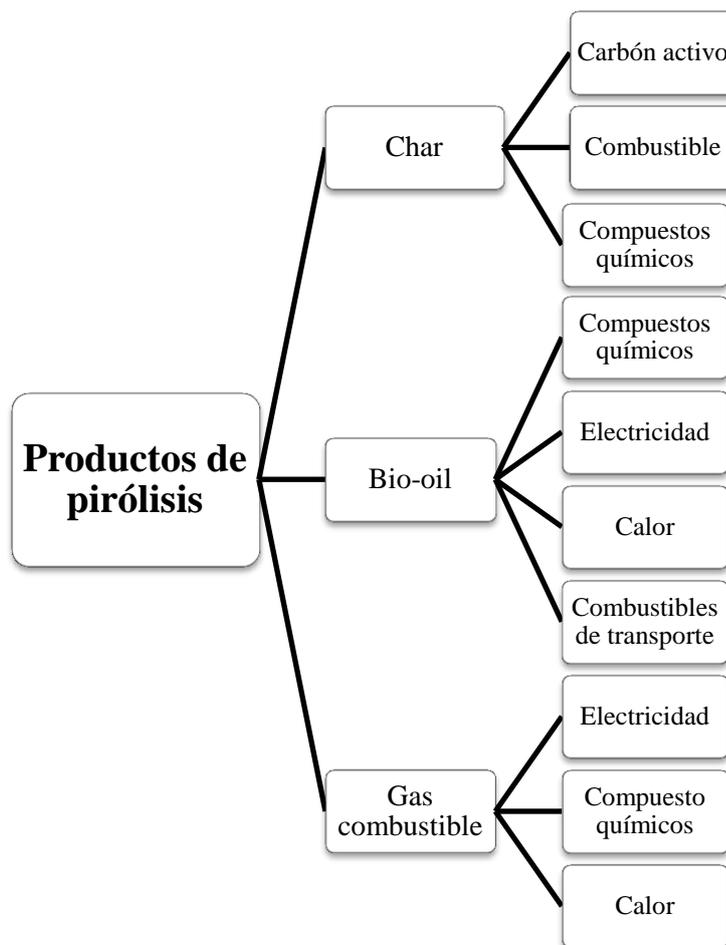
Dependiendo de la composición de los residuos sólidos municipales a tratar y de la tecnología de pirólisis usada, la cantidad de productos obtenida será diferente. La Tabla 11 compara los rendimientos aproximados de las fracciones obtenidas en las diferentes tecnologías de pirólisis.

**Tabla 11.** Comparación de rendimientos de las fracciones obtenidas en función del tipo de pirólisis (Balat et al., 2009).

Proceso	Rendimiento (%)		
	Líquidos	Char	Gas
Pirólisis lenta	40 – 50	10 – 20	20 – 30
Pirólisis rápida	60 – 75	15 – 25	10 – 20
Pirólisis flash	<10	<10	>80

Actualmente la pirólisis catalítica de la biomasa está considerada como una opción muy atractiva debido a que reduce los problemas asociados a los productos líquidos, como pueden ser la corrosividad, polimerización y alta viscosidad. En el caso de los RSU, se podría hacer uso de la catálisis para mejorar la calidad del bio-oil obtenido, pero debido a que los RSU están compuestos por cantidades significativas de S y N, los catalizadores se desactivan, ya que estos compuestos actúan como venenos.

En cuanto a las diversas aplicaciones que podrían tener los productos obtenidos en el proceso de pirólisis, ésta claro que la opción más interesante sería la obtención de energía, ya sea como energía mecánica o energía térmica. En la Figura 17 se resume el uso de los productos de la pirólisis.



**Figura 17.** Aplicaciones principales de los productos obtenidos en la pirólisis.

El bio-oil al ser un producto líquido resulta fácil de almacenar y transportar. Debido a su procedencia, está considerado como un combustible renovable que se puede usar para producir electricidad o calor, como combustible en vehículos o para obtener compuestos químicos (Balat et al., 2009).

Según Czernik y Bridgwater (2004), las características del bio-oil hacen que existan diversos problemas a la hora de usarlo como combustible en turbinas y en motores construidos para combustibles fósiles. El hecho de que el bio-oil sea poco volátil, muy denso y muy corrosivo hace que las aplicaciones de éste se reduzcan. Actualmente no es un producto comercial, ya que no tiene la calidad suficiente como para dicho uso. De todas formas, parece que el bio-oil puede ser adecuado para usarlo en calderas. Varias compañías han mostrado interés en su uso, sobre todo para “district heating” con el fin de reemplazar los combustibles fósiles. Aun así, para un mejor uso de éste, es conveniente realizar modificaciones bien en calderas como en turbinas o motores para la producción de electricidad. Una alternativa atractiva puede ser la co-combustión del bio-oil junto con combustibles fósiles para la producción de electricidad y calor.

El uso más simple del bio-oil aparentemente parece ser combinarlo con combustibles fósiles para usarlo como combustible de transporte, aunque previamente sería necesario mejorar las características de éste. Para ello se recurre a la catálisis, bien mediante

hidrogenación o mediante el uso de zeolitas (Balat et al., 2009). Aun así, convertir el bio-oil en un combustible de calidad no es a día de hoy atractivo económicamente.

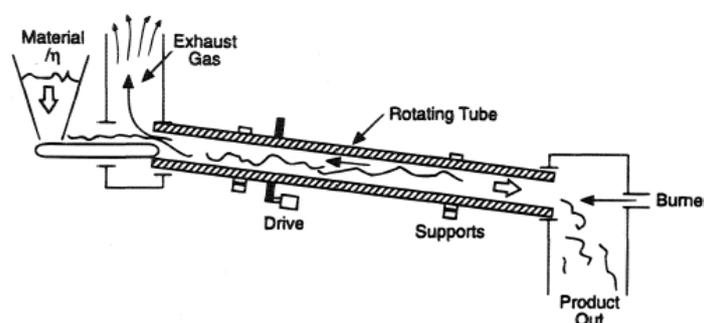
Por otro lado, el char puede utilizarse para la producción de compuestos químicos (Zhang et al., 2010), producción de hidrogeno, producción de gas de síntesis mediante un reformado con vapor o para la obtención carbón activo que se puede usar como adsorbente comercial (Balat et al., 2009).

En el caso de las posibles aplicaciones que podría tener el gas de combustible, serían las mismas que las del gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación. Dichas aplicaciones se pueden ver en la página 18.

### 6.2.1. Reactores de pirólisis

La elección del tipo de reactor de pirólisis depende de los productos que se quieran obtener. Este tipo de reactores se pueden clasificar dependiendo del tipo de pirólisis para el cual son adecuados.

El reactor más adecuado para realizar una pirólisis lenta es un horno rotatorio. Éste es básicamente un cilindro fabricado de acero que gira y que suele tener cierta inclinación ( $1 - 10^\circ$ ) para favorecer el avance de los residuos. A medida que los residuos pasan por dentro, se secan y se descomponen. El hecho de que el reactor gire, hace que los residuos se mezclen y que por lo tanto, el intercambio de calor sea eficiente. En la Figura 18 se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.

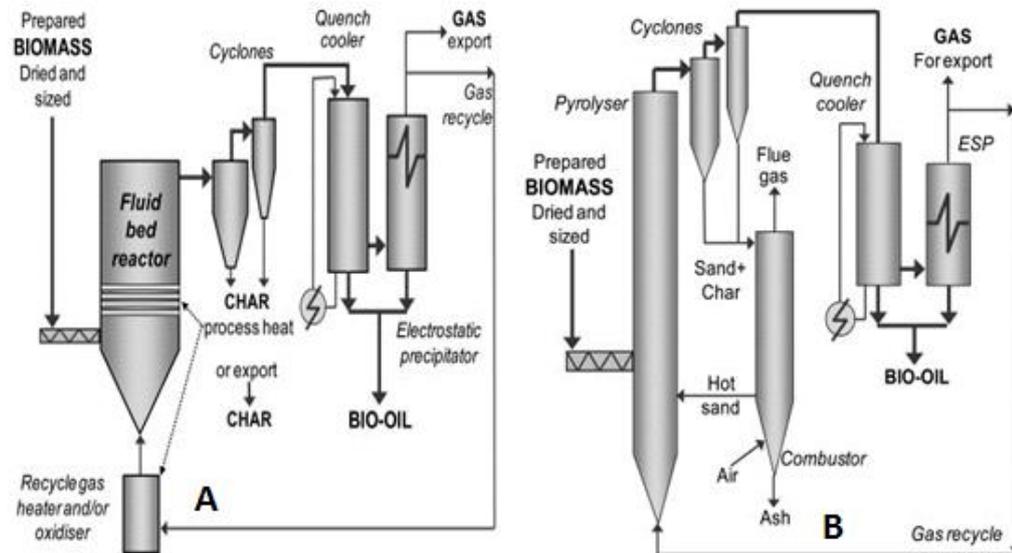


**Figura 18.** Horno rotatorio (Thermopedia, 2011).

En el caso de que se utilice la pirólisis rápida o flash, se usan los siguientes reactores:

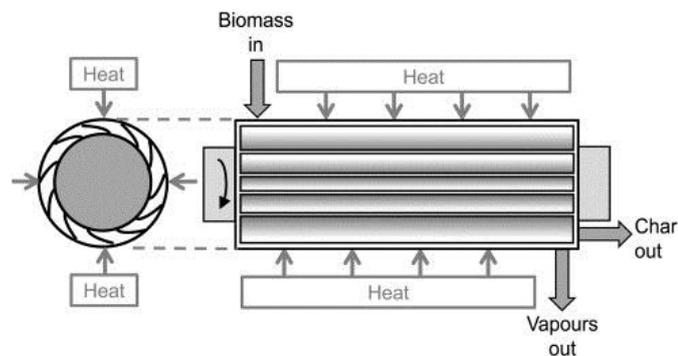
- **Reactor de lecho burbujeante:** Es una tecnología ampliamente conocida y usada. Debido a sus características, se consigue obtener un buen control de la temperatura, por lo que se consigue que la transferencia de calor sea muy eficiente. Los reactores con lechos de arena producen un bio-oil de buena calidad. El tiempo de residencia del vapor y del sólido está controlado por el agente de fluidización, siendo habitualmente gas recirculado del sistema, por lo que el tiempo de residencia del char es mucho mayor que el de los vapores (Bridgwater, 2012). En la Figura 19. A se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.
- **Reactor fluidizado circulante:** Tiene características similares a las de un reactor de lecho burbujeante. En este caso, el tiempo de residencia del char y de

los vapores es el mismo. En cuanto a la forma de operar, el suministro de calor se lleva a cabo mediante la recirculación de arena desde el combustor donde se quema todo el char producido. Es necesario quemar el char debido a que sino habría que hacer uso de una fuente externa para suministrar calor a la arena que vuelve al lecho. La velocidad de transferencia de calor no es muy alta (Bridgwater, 2012). En la Figura 19.B se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.



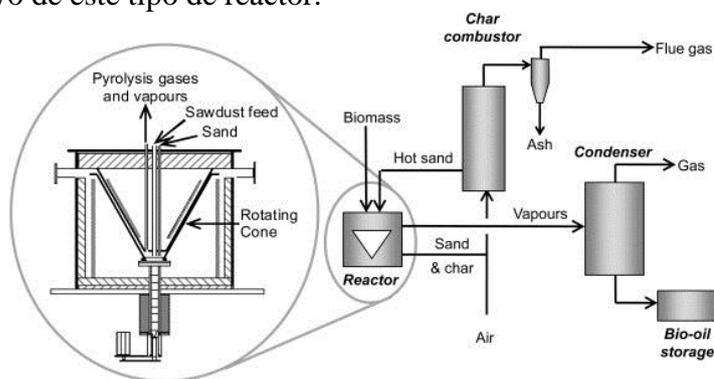
**Figura 19.** A) Reactor de lecho burbujeante con un precipitador electroestático. B) Reactor de lecho circulante (Bridgwater, 2012).

- **Reactor ablativo:** Es un reactor de alta complejidad que está caracterizado por la alta velocidad de impacto de las partículas contra la pared del reactor. Para alcanzar tan altas velocidades es necesario el uso de una fuerza centrífuga. Debido a los choques entre las partículas y la pared del reactor, se consigue que la transferencia de calor entre la alimentación y la pared sea buena. Como consecuencia de dicho efecto y del corto tiempo de residencia del gas, se obtiene un 80% de producto líquido (Basu, 2010; Tamil Nadu Agricultural University, 2011). En la Figura 20 se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.



**Figura 20.** Reactor ablativo (Bridgwater, 2012).

- Reactor cónico rotatorio:** Es una tecnología relativamente nueva que no está implementada a escala comercial todavía. Al igual que en el reactor ablativo, se utiliza la fuerza centrífuga para que la alimentación golpee la pared del reactor. Debido al excelente mezclado de los componentes del reactor, se calientan rápidamente, por lo que el tiempo de residencia del gas es bajo. Esto hace que la producción de char en este tipo de reactores sea despreciable (Basu, 2010; Tamil Nadu Agricultural University, 2011). En la Figura 21 se muestra un esquema representativo de este tipo de reactor.



**Figura 21.** Reactor cónico giratorio con el proceso integrado (Bridgwater, 2012).

### 6.3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA PIRÓLISIS

La pirólisis al igual que la gasificación es una tecnología novedosa para la gestión de los RSU. A día de hoy la implantación de las plantas de pirólisis es muy escasa a nivel mundial. Japón es pionero en el uso de éstas, teniendo actualmente 12 plantas en operación bajo la tecnología desarrollada por Mitsui Engineering and Shipbuilding y Takuma Co. Ltd. Hay que destacar que el historial de operación de estas plantas es muy limitado aún. En Alemania existen dos plantas de este tipo que operan bajo la tecnología de WasteGen y en el Reino Unido existe una planta de éstas pero a escala de demostración aún, operada por Compact Power Limited.

## 7. PLAN DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE GASIFICACIÓN Y UNA PLANTA DE PIRÓLISIS PARA TRATAR RSU CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

A continuación se va a llevar a cabo un análisis económico con el fin de determinar si la implantación de este tipo de plantas sería viable o no. La evaluación de este tipo de plantas se debe a que actualmente la implantación éstas es muy escasa, casi nula en el caso de plantas de pirólisis, por lo que antes de llevar a cabo este tipo de proyectos es necesario realizar un análisis económico exhaustivo para poder determinar si a lo largo de la vida útil de la planta se obtendría cierta rentabilidad.

En este trabajo el análisis económico realizado es orientativo, estimándose que el grado de error en los resultados obtenidos podría llegar a ser de  $\pm 50\%$ .

### 7.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA

Para realizar el pertinente estudio económico se han tomado diversas hipótesis de partida que se van a explicar a continuación.

Teniendo en cuenta las últimas estadísticas generales, se ha establecido la siguiente composición elemental de los residuos. En las plantas en las que se va a realizar el estudio se van a tratar RSU con la composición media establecida en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Composición media de los residuos domésticos.

<b>Materiales</b>	<b>%</b>
Metales	4.11
Vidrio	6.93
Papel	15.89
Cartón	5.29
Madera	0.96
Plásticos	10.59
Gomas y cueros	0.4
Textiles	4.1
Residuos orgánicos	51.73

En base a datos bibliográficos (Universidad de Extremadura) referentes al análisis elemental e inmediato de los RSU, se han obtenido los datos de la Tabla 13.

**Tabla 13.** Exposición del análisis químico de los componentes de los RSU.

	%C	%H <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>	%S	% inertes	% Humedad
Metales	4.54	0.63	4.28	0.05	0.01	90.49	-
Vidrio	-	-	-	-	-	100	-
Papel	44	6.15	41.65	0.42	0.12	7.66	-
Cartón	45.51	6	44.53	0,16	0.13	3.67	-
Madera	49	6	42	-	-	3	-
Plásticos	78	9	13	-	-	-	-
Gomas y cueros	47.6	6,2	15.8	3.2	1.2	26	4
Textiles	46.19	6.41	41.85	2.18	0.2	3.17	24
Residuos orgánicos	52	6.62	37.55	1.63	0.2	2	72

Para saber cuánta electricidad se va a poder vender a la red, es necesario conocer la composición del gas obtenido. En la Tabla 14, se muestra la composición media que suele tener el gas de síntesis obtenido en procesos de gasificación de residuos municipales según URBASER (2009).

**Tabla 14.** Composición del gas de síntesis que se espera obtener en la planta de gasificación.

Componentes	% en volumen
H <sub>2</sub> %	13%
CH <sub>4</sub> %	4%
CO %	18%
H <sub>2</sub> O %	7%
N <sub>2</sub> %	46%
CO <sub>2</sub> %	12%

En la Tabla 15, se muestra la composición media que suele tener el gas obtenido en procesos pirolíticos de residuos municipales extrapolando los dos datos experimentales conseguidos por He et al., (2010).

**Tabla 15.** Composición del gas que se espera obtener en la planta de pirólisis.

Componentes	% en volumen
H <sub>2</sub> %	10%
CH <sub>4</sub> %	16%
CO %	30%
CO <sub>2</sub> %	11%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> %	16.5%
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> %	16.5%

Debido a la escasez de datos que existe sobre el rendimiento que se puede obtener en la pirólisis flash de residuos municipales, se ha estimado dicho valor en base a procesos de pirólisis llevados a cabo con biomasa por He et al., (2010).

**Tabla 16.** Rendimientos que se esperan obtener en la planta de pirólisis.

	<b>Rendimientos</b>
Gas	80%
Bio-oil	10%
Char	10%

Tanto para la planta de gasificación como para la planta de pirólisis, se ha concluido que ambas van a poseer ingresos derivados de la venta de la electricidad producida y de la recepción de los residuos sólidos urbanos (canon).

El precio de venta de la electricidad está establecido en el Real Decreto 661/2007, del 25 de Mayo, por la que se regula la actividad de producción de la energía eléctrica en régimen general. En su artículo 42 establece las tarifas y primas correspondientes para este tipo de instalaciones. La actividad de este tipo de plantas se encuadra dentro de la “categoría c): residuos”, y dentro de ella en el “grupo c.1; centrales que utilicen como combustible principal residuos sólidos urbanos”. De esta manera, atendiendo a la tarifación establecida por dicho decreto, se obtiene que el precio de venta de electricidad está fijado en:

- Venta de electricidad, €/kWh=  $0.0553 + 0.023 = 0.0776$  €/kWh

El canon de residuos es la cantidad fija que grabarán dichas plantas a los municipios para los que se lleve a cabo la recogida y valorización de residuos. Dicho valor se ha establecido teniendo en cuenta los cánones existentes dependiendo cada comunidad.

- Canon, €/t: 80 €/t

Como se ha visto en el apartado 5.2.3, existen diversos equipos que permiten recuperar la energía presente en el gas obtenido de dichos procesos. Debido a los buenos rendimientos que se están obteniendo en plantas similares usando motores de gas, llegando a eficiencias de hasta el 34%, se plantea recuperar la energía mediante este tipo de motores en estas plantas también.

El autoconsumo de la planta varía dependiendo de la instalación que se vaya a construir. En el caso de plantas de gasificación, se estima que el autoconsumo de la planta es del 10% de la potencia instalada, mientras que para plantas de pirólisis es de un 20%.

Debido a que ambas plantas operan con equipos novedosos, existe cierta incertidumbre a la hora de determinar la operatividad de la planta. Teniendo en cuenta que en ambas plantas usan tecnologías poco probadas y que pueden surgir problemas operacionales debido a la heterogeneidad de los RSU, se va a determinar que estas plantas operan 7000 h/año.

## 7.2. VIABILIDAD ECONÓMICA DE LAS INSTALACIONES

Se van a considerar los siguientes parámetros comunes para las dos plantas:

- Precio de venta de electricidad: 0.076 €/kWh
- Canon de residuos: 80 €/t
- TAE Deuda largo Plazo: 7%
- Inflación tarifa generación eléctrica: 4%
- Inflación de gastos: 4%
- Plazo de amortización de la deuda: 15 años
- Plazo de amortización de la planta: 15 años
- Tiempo de vida útil de la planta: 25 años
- Estructura de la financiación:
  - Fondos propios: 30%
  - Fondos ajenos: 70%

La estimación de la inversión y los gastos anuales de cada planta no son iguales como se puede ver en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Inversión y gastos anuales estimados para cada planta a ejecutar.

	<b>Planta de gasificación</b>	<b>Planta de pirólisis</b>
<b>Inversión, MM€</b>	50	60
<b>Gastos anuales, MM€</b>	3	5
<b>Importe financiación, MM€</b>	35	42

La inversión y los gastos anuales de cada instalación se han estimado en base a proyectos similares. La diferencia existente entre la inversión necesaria para una planta de gasificación y la necesaria para una de pirólisis es debido a que los equipos existentes en una planta de pirólisis son más novedosos que los de una planta de gasificación. En cambio, la diferencia en los gastos anuales se debe a que es necesario aportar calor al reactor de pirólisis e introducir en éste un agente pirolizante, como puede ser gas propano, durante la degradación térmica de los RSU.

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores se va a evaluar la viabilidad de ambos proyectos. Tanto para el caso de la instalación de gasificación como para la instalación de pirólisis, se concluye que ambos proyectos son viables. Al final de los 15 años durante los cuales se espera haber amortizado la planta, en la planta de gasificación se obtendrían unas ganancias de unos 39 MM€, mientras que en la planta de pirólisis esta cantidad sería superior, alcanzando los 77 MM€. En el caso de que la vida total de la planta pudiese alargarse hasta los 25 años, estas ganancias aumentarían, siendo de 94 MM€ en la planta de gasificación y de 164 MM€ en la planta de pirólisis.

En cuanto al TIR del proyecto, en ambos casos se ha obtenido un valor superior al esperado. En el caso de la planta de gasificación el TIR es de 26.67%, mientras que en la planta de pirólisis es de 38.85%.

### 7.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el fin de determinar que parámetros influyen más a la hora de determinar la viabilidad de cada proyecto, se ha realizado el correspondiente análisis de sensibilidad a cada planta.

En ambas instalaciones, se van a realizar variaciones del +30% al -15% en la inversión, en los costes anuales y en los ingresos por venta de electricidad y canon de residuos, obteniendo la relación de plusvalías mostrada en la Tablas 18 y 19.

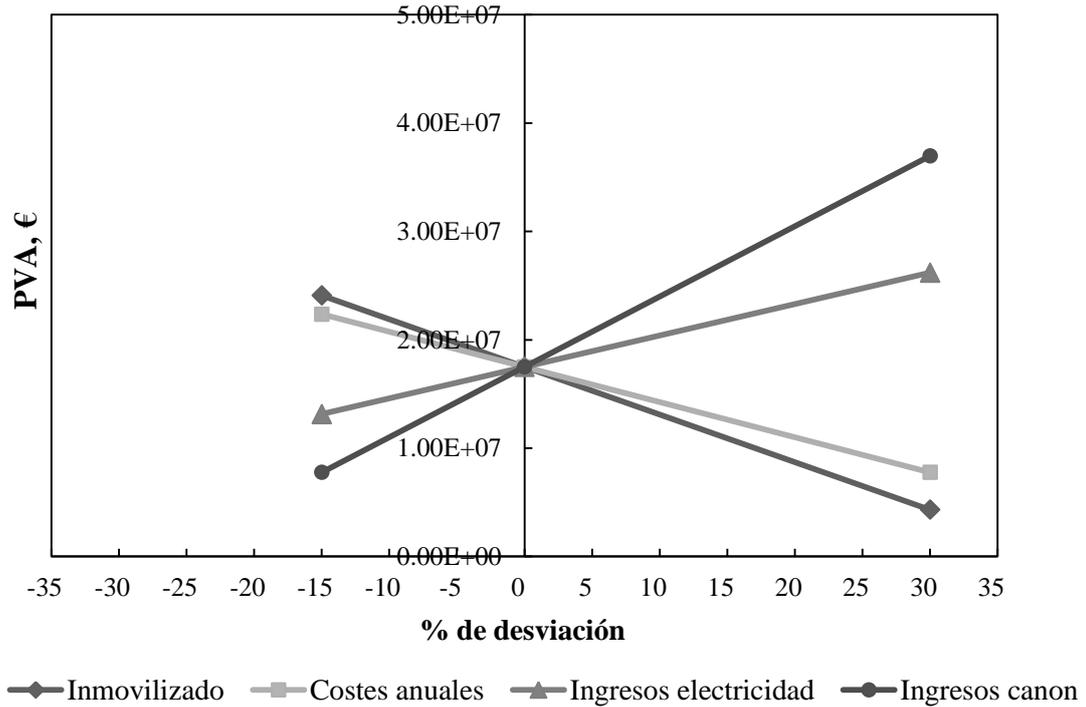
**Tabla 18.** Plusvalías estimadas, en un rango de variación del +30% al -15% para cada parámetro económico en la planta de gasificación.

	<b>PVA<sup>+</sup> (+30%)</b>	<b>PVA (0%)</b>	<b>PVA<sup>-</sup> (-15%)</b>
<b>Inmovilizado, MM€</b>	26	39	46
<b>Costes anuales, MM€</b>	29	39	44
<b>Ingresos electricidad, MM€</b>	48	39	35
<b>Ingresos canon, MM€</b>	65	39	26

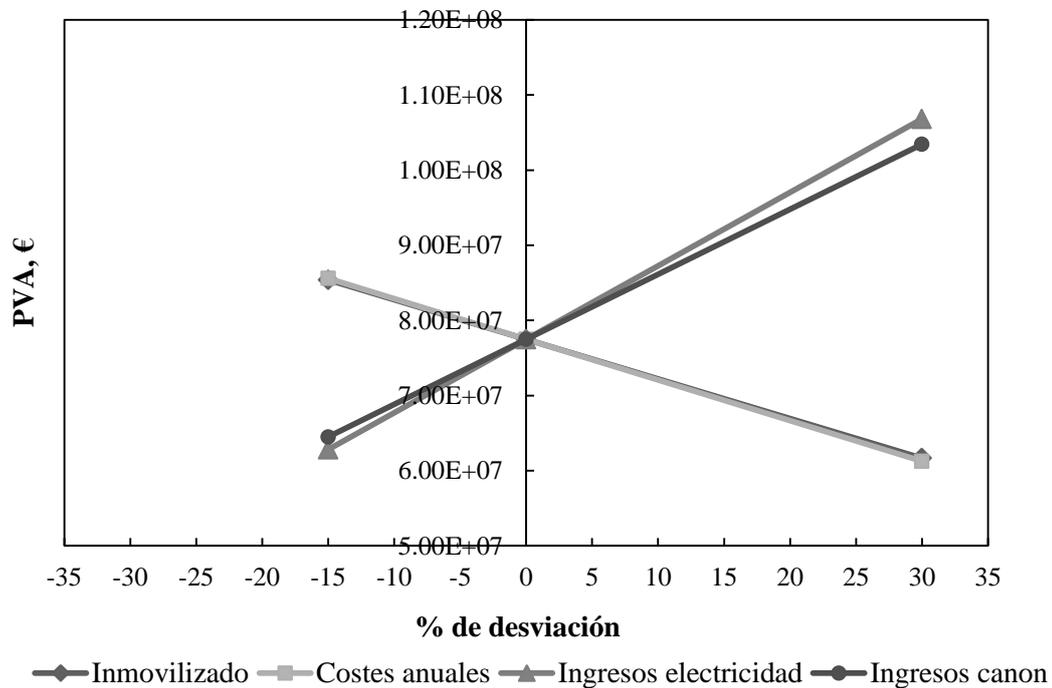
**Tabla 19.** Plusvalías estimadas, en un rango de variación del +30% al -15% para cada parámetro económico en la planta de pirólisis.

	<b>PVA<sup>+</sup> (+30%)</b>	<b>PVA (0%)</b>	<b>PVA<sup>-</sup> (-15%)</b>
<b>Inmovilizado, MM€</b>	62	77	85
<b>Costes anuales, MM€</b>	61	77	85
<b>Ingresos electricidad, MM€</b>	107	77	63
<b>Ingresos canon, MM€</b>	103	77	64

Representando los valores de las Tabla 18 y 19, se obtiene un gráfico de sensibilidad para cada instalación que se muestran en las Figura 22 y 23.



**Figura 22.** Gráfico de sensibilidad en un intervalo de incertidumbre del +30% al -15% de las variables a estudiar en la planta de gasificación.

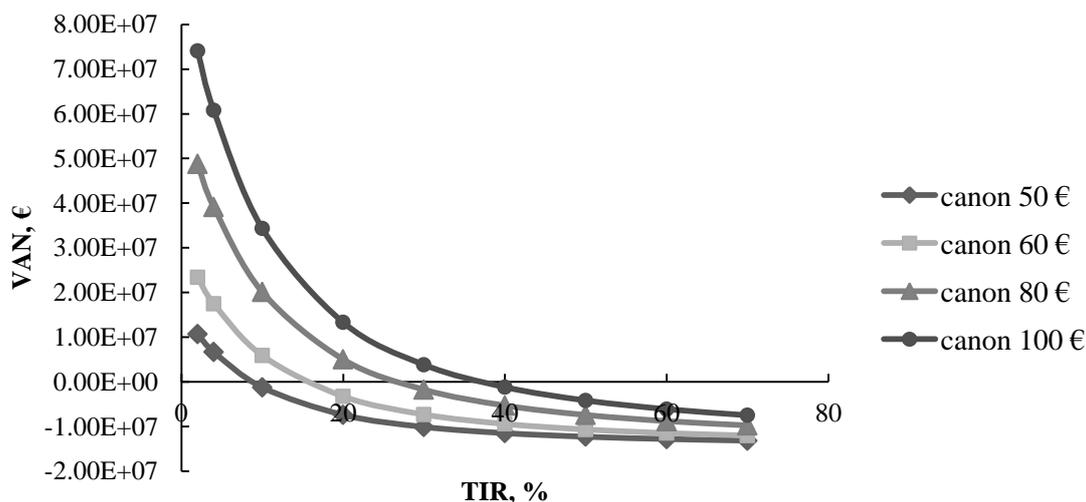


**Figura 23.** Gráfico de sensibilidad un intervalo de incertidumbre del +30% al -15% de las variables a estudiar en la planta de pirólisis.

Como se puede ver los parámetros que más influyen en la viabilidad de la planta de gasificación planteada son el inmovilizado y el canon de residuos, mientras que para el caso de la planta de pirólisis son los costes anuales y el precio de venta de electricidad.

Por este motivo se va a analizar el efecto de estos parámetros respecto al interés mínimo a partir del cual el proyecto es viable en cada caso.

En el caso de la planta de gasificación, como ya se ha mencionado previamente, se evalúan el canon y el inmovilizado de la planta.

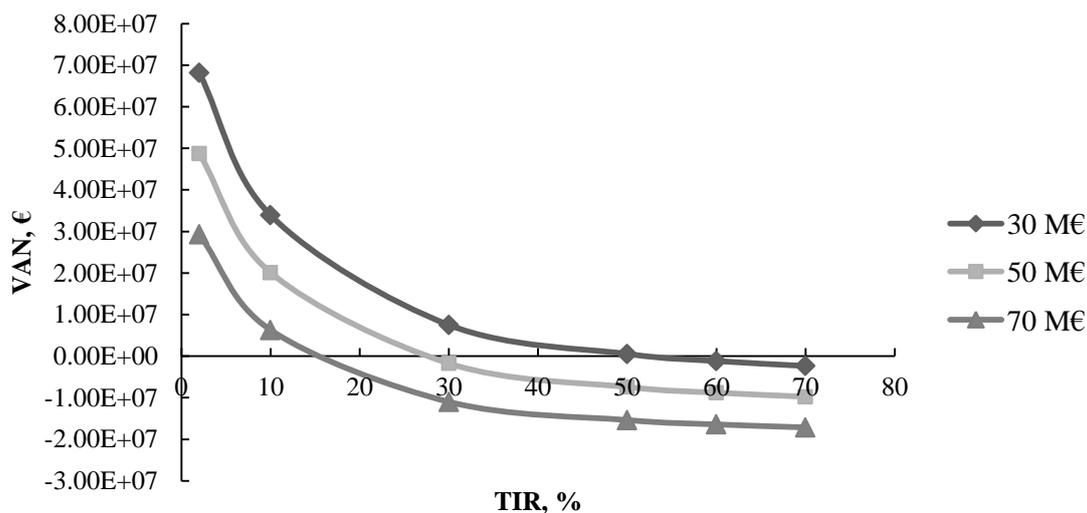


**Figura 24.** TIR para diferentes cánones de la planta de gasificación.

Como se puede ver en la Figura 24, cuanto mayor es el canon de residuos mayor es la rentabilidad del proyecto.

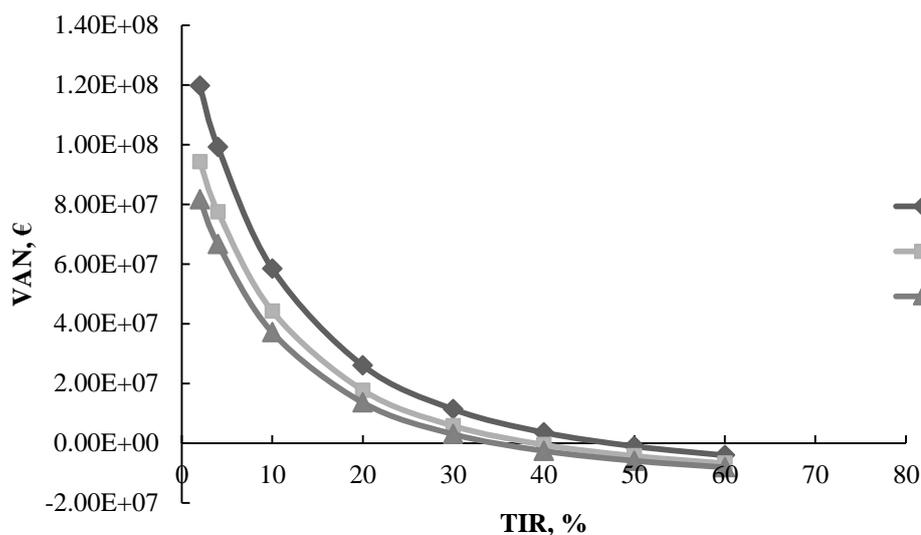
Debido a que el canon de residuos puede variar de un país a otro, se va a estimar el canon de residuos a partir del cual este proyecto sería rentable en las condiciones de partida preestablecidas previamente. Se concluye por lo tanto que el canon de residuos a partir del cual el proyecto empezaría a ser rentable sería de 43,82 €/t.

En el caso del inmovilizado, en cambio, cuanto mayor es el inmovilizado menos rentable es el proyecto como se puede observar en la Figura 25.



**Figura 25.** TIR para diversos inmovilizados de la planta de gasificación.

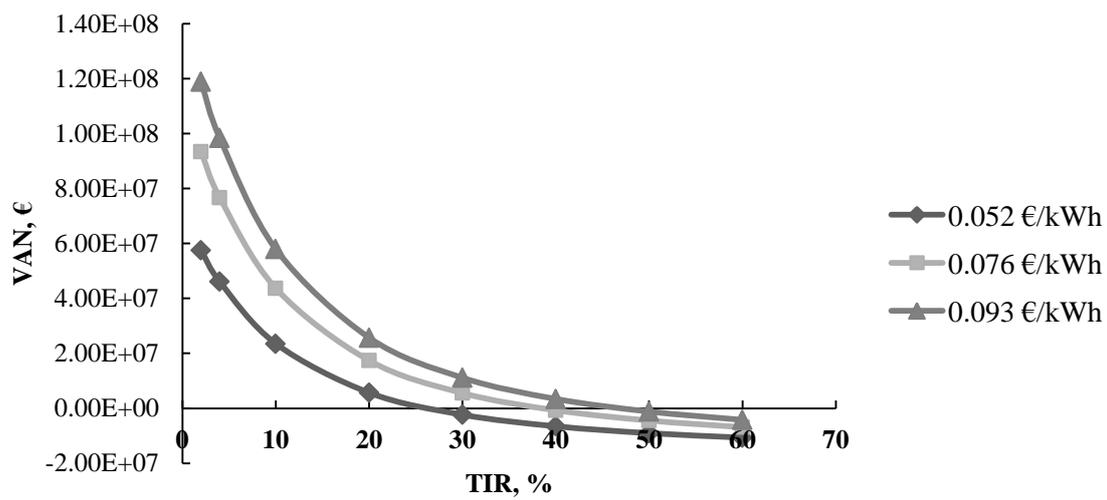
Como ya se ha mencionado anteriormente, los parámetros que más influyen en la viabilidad de esta planta de pirólisis son los costes anuales y los ingresos por venta de electricidad.



**Figura 26.** TIR para distintos costes anuales de la planta de pirólisis.

Como se puede ver en la Figura 26, cuantos mayores son los costes anuales, menor es la rentabilidad del proyecto.

En el caso de los ingresos por venta de electricidad, en cambio, cuanto mayor es el precio de venta de la electricidad, más rentable es el proyecto como se puede observar en la Figura 27.



**Figura 27.** TIR para diferentes precio de venta de electricidad de la planta de pirólisis.

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo se concluye que los residuos sólidos urbanos contienen energía que se puede aprovechar para la posterior producción de electricidad. Obtener electricidad a partir de los residuos municipales hace que se contribuya a la reducción de gases de efecto invernadero, ya que se produce menor cantidad de estos gases si se compara con la que se produce cuando se obtiene electricidad a partir del petróleo y sus derivados.

En cuanto a las alternativas para gestionar los RSU, se deduce que los métodos termoquímicos presentan mayor eficiencia que los métodos biológicos, ya que consiguen reducir la cantidad de residuos que se envía al vertedero. Debido a las características de cada tecnología, se utiliza una u otra dependiendo la composición de los RSU. En el caso de los métodos de tratamiento biológico, éstos sólo pueden tratar la materia orgánica presente en los RSU, por lo que habría que someter a los residuos a un tratamiento mecánico previamente. Algo similar ocurre con la gasificación y pirólisis. Mediante el uso de estos métodos también es necesario pretratar la alimentación, ya que hay que separar el material no degradable, como vidrio y metal, del resto. En cambio mediante incineración y gasificación por plasma sí que se podría tratar cualquier composición de los RSU.

A la hora de tratar los RSU mediante métodos termoquímicos de menor implantación, la heterogeneidad y el contenido de humedad de éstos generan problemas de operación. Cuanto mayor sea la humedad que contienen, menor será el poder calorífico de éstos y menor será también la eficiencia del proceso. Por lo tanto, los equipos de gasificación y pirólisis no admiten residuos sólidos urbanos con grandes cantidades de humedad. Si dicho contenido es alto, es necesario secarlos previamente, lo que supone un aumento en la inversión de dichas instalaciones. Por otra parte, si se intentan pirolizar residuos con alto contenido en humedad, esa agua contribuiría a la gasificación del char, y no se estaría pirolizando sino que se estaría gasificando. En cambio, los equipos de incineración no tienen los problemas operacionales relacionados con el contenido de humedad.

Aunque en muchos países todavía se tenga un concepto erróneo respecto a los métodos termoquímicos para tratar los RSU, mediante este trabajo queda claro que los países que mayor cantidad de residuos tratan por métodos termoquímicos son los que mayores tasas de reciclado tienen, y los que consecuentemente tienen una gestión de residuos más sostenible.

La gasificación de residuos es una opción prometedora para la gestión de éstos y se ha desarrollado mucho en los últimos años, ya que genera menos contaminación que las incineradoras, por lo que se necesitan equipos más pequeños para limpiar el gas. En un futuro no muy lejano, cuando se consiga solucionar los problemas operacionales existentes en las plantas de gasificación, se espera que se impulse el uso de la gasificación, debido a la reducción de la contaminación generada.

A día de hoy la gasificación tiene mayor implantación a escala comercial que la pirólisis, debido a que los productos obtenidos de dicho proceso no son de buena calidad. Cabe destacar que aunque la pirólisis de RSU esté poco desarrollada aún, existen otras corrientes de residuos, como neumáticos y plásticos, para los que sí que está completamente desarrollada.

Respecto a los resultados obtenidos en los planes de viabilidad realizados, se obtiene que la planta de pirólisis es más rentable que la de gasificación. Este resultado se debe a la incertidumbre existente en la composición del gas obtenido en la planta de pirólisis. A la hora de llevar a cabo dicho análisis económico se ha considerado que el gas pirólítico iba a tener la composición establecida en la Tabla 15, pero a la hora de estimar su PCI se ha visto que éste está sobreestimado, por lo que afecta mucho a la rentabilidad del proyecto. Por ese motivo se ha obtenido que la planta de pirólisis es más rentable. Para obtener un resultado más coherente, sería necesario realizar en un laboratorio la pirólisis de RSU para poder determinar de esa manera la composición exacta del gas pirólítico obtenido.

## **9. GLOSARIO DE ABREVIATURAS**

US EPA: United States Environmental Protection Agency

AEVERSU: Asociación de Empresas de Valorización Energética de los RSU

ASR: Automotive Shredder Residue

CEWEP: Confederation of European Waste-to-Energy Plants

CH2M HILL: Cornell, Howland, Hayes and Merryfield

DEFRA: Department of Environment, Food & Rural Affairs

EUROSTAT: European Statistics

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía

JASE – World: Japanese Business Alliance for Smart Energy World

PBA: Peter Brett Associates

PCI: Poder Calorífico Inferior (MJ/kg – kcal/kg)

PVA: Plusvalía Actual (€)

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social

SGC: Svenskt Gastekniskt Center AB

TIR: Tasa Interna de Retorno (%)

VAN: Valor actual neto (€)

WSP: William Sale Partnership

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Anis, S., and Z. A. Zainal. (2011). 'Tar Reduction in Biomass Producer Gas Via Mechanical, Catalytic and Thermal Methods: A Review', *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **Vol. 15, No. 5**, 2355-2377.

Arafat, H. A., and K. Jijakli. (2013). 'Modeling and Comparative Assessment of Municipal Solid Waste Gasification for Energy Production', *Waste Management* **Vol. 33, No. 8**, 1704-1713,

Arena, U. (2012). 'Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification. A Review', *Waste Management* **Vol. 32, No. 4**, 625-639.

Arena, U., F. Di Gregorio, and M. Santonastasi. (2012). 'A Techno-Economic Comparison between Two Design Configurations for a Small Scale, Biomass-to-Energy Gasification Based System', *Chemical Engineering Journal* **Vol. 162, No. 2**, 580-590.

Arena, U. and L. Mastellone. (2005). Pyrolysis and Gasification of Solid Wastes in Fluidized Bed Reactors. Disponible en [http://www.amrcenter.com/doc/publicazioni/IFSA\\_2005\\_Arena\\_presentation.pdf](http://www.amrcenter.com/doc/publicazioni/IFSA_2005_Arena_presentation.pdf) (último acceso 17 de Junio, 2014)

Balat, M., E. Kirtay, and H. Balat. (2009). 'Main Routes for the Thermo-Conversion of Biomass into Fuels and Chemicals. Part 1: Pyrolysis Systems', *Energy Conversion and Management* **Vol. 50, No. 12**, 3147-3157.

Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis. Disponible en <http://spe.num.edu.mn/tsendsuren/wp-content/uploads/2013/04/Prabir-Basu-Biomass-Gasification-and-Pyrolysis-Practical-Design-and-Theory-2010.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)

Belgiorno, V., G. De Feo, C. Della Rocca, and R. M. A. Napoli. (2003). 'Energy from Gasification of Solid Wastes', *Waste Management* **Vol. 23, No. 1**, 1-15.

Bonmatí, A. (2008). 'Gestión Y Tratamiento De Residuos Sólidos Urbanos', Pilar Andrés and Ramona Rodríguez (Eds.), *Evaluación Y Prevención De Riesgos Ambientales En Centroamérica*.

Bridgwater, A. V. (2012). 'Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading', *Biomass & Bioenergy* **Vol. 38**, 68-94.

CEWEP. (2011). Waste-to-energy-in-Europe. Disponible en [http://www.cewep.eu/information/data/studies/m\\_1224](http://www.cewep.eu/information/data/studies/m_1224) (último acceso 29 de Mayo, 2014)

CH2M HILL. (2009). Waste to energy. Review of alternatives. Disponible en <http://www.durhamenvironmentwatch.org/Incinerator%20Solutions/WastetoEnergyReviewofAlternativesBC.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)

Cheng, H. F., and Y. N. Hu. (2010). 'Municipal Solid Waste (Msw) as a Renewable Source of Energy: Current and Future Practices in China', *Bioresource Technology* **Vol. 101, No. 11**, 3816-3824.

Cheng, H. F., Y. G. Zhang, A. H. Meng, and Q. H. Li. (2007). 'Municipal Solid Waste Fueled Power Generation in China: A Case Study of Waste-to-Energy in Changchun City', *Environmental Science & Technology* **Vol. 41, No. 21**, 7509-7515.

Consonni, S., M. Giugliano, and M. Grosso. (2005). 'Alternative Strategies for Energy Recovery from Municipal Solid Waste - Part A: Mass and Energy Balances', *Waste Management* **Vol. 25, No. 2**, 123-135.

Consonni, S., and F. Vigano. (2012). 'Waste Gasification Vs. Conventional Waste-to-Energy: A Comparative Evaluation of Two Commercial Technologies', *Waste Management* **Vol. 32, No. 4**, 653-666.

Czernik, S., and A. V. Bridgwater. (2004). 'Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil', *Energy & Fuels* **Vol. 18, No. 2**, 590-598.

DEFRA. (2013). Advanced thermal treatment. Disponible en [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/221035/pb13888-thermal-treatment-waste.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/221035/pb13888-thermal-treatment-waste.pdf) (último acceso 30 de Mayo, 2014)

Dong, Yani. (2011). 'Development of Waste to Energy in China and Case Study of the Guangzhou Likeng Wte Plant', Earth Engineering Center, Columbia University. Disponible en [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Dong\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Dong_thesis.pdf) (último acceso 17 de Mayo, 2014)

Elias Castells, X. (2005). 'Tratamiento Y Valorización Energética De Residuos', Ediciones Diaz Santos.

EUROSTAT. (2012). Base de datos. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=tsdpc240> (último acceso 29 de Mayo, 2014)

Fabry, F., Rehmet, C., Rohani, V., and Fulcheri, L. (2013). 'Waste Gasification by Thermal Plasma: A Review', *Waste and biomass valorization*, **Vol. 4**, 421-439.

Fernández, A. (2007). 'Planta De Incineración De Residuos Sólidos Urbanos Con Tecnología De Parrilla Y Recuperación Energética', Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Pontificia de Comillas. Disponible en <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/46e81ca3a8e0a.pdf> (último acceso 29 de Mayo, 2014)

Ferreira, C., A. Ribeiro, and L. Ottosen. (2003). 'Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash', *Journal of Hazardous Materials* **Vol. 96, No. 2-3**, 201-216.

Hasler, P., and T. Nussbaumer. (1999). 'Gas Cleaning for Ic Engine Applications from Fixed Bed Biomass Gasification', *Biomass & Bioenergy* **Vol. 16, No. 6**, 385-395.

He, M. Y., B. Xiao, S. M. Liu, Z. Q. Hu, X. J. Guo, S. Y. Luo, and F. Yang. (2010). 'Syngas Production from Pyrolysis of Municipal Solid Waste (Msw) with Dolomite as Downstream Catalysts', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **Vol. 87, No. 2**, 181-187.

Hirota, T., T. Ohshita, S. Kosugi, S. Nagato, T. Higo, and N. Inumaru. (1990). 'Characteristics of the Internally Circulating Fluidized Bed Bioler', Plant Engineering Division, Ebara Corporation.

IDAE. (2011). Situación y potencial de valorización energética directa de residuos.

Disponible en:

[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e15\\_residuos\\_c3ead071.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf) (último acceso 29 de Mayo, 2014)

IDAE - PER. (2011). Plan de energías renovables 2011-2020. Disponible en [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_11227\\_per\\_2011-2020\\_def\\_93c624ab.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_per_2011-2020_def_93c624ab.pdf) (último acceso 12 de Junio, 2014)

JASE-World. (2012). Presentation of Japanese technology of waste to energy. Disponible en [http://www.mofa.go.jp/region/latin/fealac/pdfs/4-9\\_jase.pdf](http://www.mofa.go.jp/region/latin/fealac/pdfs/4-9_jase.pdf) (último acceso 12 de Junio, 2014)

Juniper. (2003). Progress towards commercialising waste gasification. A worldwide status report. Disponible en

<http://www.dnrec.delaware.gov/SWMTWG/Documents/543cc8907ca54de6827039a0ddc16dc0ProgresstowardsCommercializingWasteGasification200.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)

Leal-Quirós, E. (2004). 'Plasma Processing of Municipal Solid Waste'. *Brazilian Journal of Physics* **Vol. 34, No. 4B**, 1587-1593.

Lombardi, L., E. Carnevale, and A. Corti. (2012). 'Analysis of Energy Recovery Potential Using Innovative Technologies of Waste Gasification', *Waste Management* **Vol. 32, No. 4**, 640-652.

McKendry, P. (2002). 'Energy Production from Biomass (Part 3): Gasification Technologies', *Bioresource Technology* **Vol. 83, No. 1**, 55-63.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2011). Anuario de estadística 2011. Disponible en

<http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2011/default.aspx?parte=2&capitulo=08> (último acceso 29 de Mayo, 2014)

Monje, B. (2012). 'Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma'. Ediciones Universidad Pontificia de Comillas. Disponible en:

<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4fc5e7a807b17.pdf> (último acceso 29 de Mayo, 2014)

Nagayama, Shinnosuke. (2011). 'High Energy Efficiency Thermal Wte Plant for Msw Recycling ', JFE Engineering Corporation. Disponible en

[http://www.iswa.org/uploads/tx\\_iswaknowledgebase/Nagayama.pdf](http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Nagayama.pdf) (último acceso 12 de Junio, 2014)

- PBA. Gasification of waste. Disponible en <https://www.whatdotheyknow.com/request/195357/response/487241/attach/3/Darley%20presentation%20on%20Gasification%20of%20MSW.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)
- Psomopolos, C. S., A. Bourka, and N. J. Themelis. (2009). 'Waste-to-Energy: A Review of the Status and Benefits in Usa', *Waste Management* **Vol. 29, No. 5**, 1718-1724.
- Puig-Arnabat, M., J. C. Bruno, and A. Coronas. (2010). 'Review and Analysis of Biomass Gasification Models', *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **Vol. 14, No. 9**, 2841-2851.
- Qiu, L., Y. N. Dong, and N. J. Themelis. (2012). 'Rapid Growth of Wte in China, Current Performance and Impediments to Future Growth', *Proceedings of the 20th Annual North American Waste to Energy Conference, Nawtec20 2012*, 167-175.
- SEDESOL. Pirólisis. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap6.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)
- SGC. (2011). Biomass gasifier database for computer simulation purpose. Disponible en <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC234.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)
- Tamil Nadu Agricultral University. (2011). Lecture 10. 'Principles of Pyrolysis'. Disponible en <http://tnau.ac.in/eagri/eagri50/AENG352/lec10.pdf> (último acceso 29 de Mayo, 2014)
- Themelis, N. J. (2008). 'Developments in Thermal Treatment Technologies', *16th Annual North American Waster to Energy Conference Nawtec16*, 85-92.
- Themelis, N.J. (2012). 'Current Status of Global Wte', *Proceedings of the 20th Annual North American Waste to Energy Conference, Nawtec20 2012*, 49-55.
- Themelis, Nickolas, and Charles Mussche. (2013). 'Municipal Solid Waste Management and Waste-to-Energy in the United States, China and Japan', Earth Engineering Center, Columbia University. Disponible en [http://www.elfm.eu/Uploads/ELFM/FILE\\_73D907E9-8225-4B93-91F8-10F71F59B793.PDF](http://www.elfm.eu/Uploads/ELFM/FILE_73D907E9-8225-4B93-91F8-10F71F59B793.PDF) (último acceso 12 de Junio, 2014)
- Thermopedia. (2011). Kilns. Disponible en <http://www.thermopedia.com/content/906/> (último acceso 17 de Junio, 2014)
- Tremel, A., D. Becherer, S. Fendt, M. Gaderer, and H. Spliethoff. (2013). 'Performance of Entrained Flow and Fluidised Bed Biomass Gasifiers on Different Scales', *Energy Conversion and Management* **Vol. 69**, 95-106.
- Universidad de Extremadura. Gestión de residuos sólidos. Disponible en <http://fjriivas.eu5.org/archivos/PDF.pdf> (último acceso 30 de Mayo, 2014)

- URBASER. (2009). La tecnología de la gasificación aplicada a los residuos sólidos urbanos. Disponible en [http://www.cresidusvoc.cat/recursos/crvo/recursos/s020203\\_\\_\\_p\\_a\\_maillo.pdf](http://www.cresidusvoc.cat/recursos/crvo/recursos/s020203___p_a_maillo.pdf) (último acceso 13 de Junio, 2014)
- Urien Pinedo, Andrea. (2013). 'Obtención De Biocarbones Y Biocombustibles Mediante Pirolisis De Biomasa Residual'. Disponible en [http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES\\_CENIM\\_CSIC.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf) (último acceso 29 de Mayo, 2014)
- U.S. EPA. (2012). State of practice for emerging waste conversion technologies. Disponible en <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FBUS.pdf> (último acceso 29 de Mayo, 2014)
- U.S. EPA. (2013). U.S. Municipal solid waste sector action plan. Disponible en [https://www.globalmethane.org/documents/landfills\\_cap\\_usa.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/landfills_cap_usa.pdf) (último acceso 30 de Mayo, 2014)
- Velghe, I., R. Carleer, J. Yperman, and S. Schreurs. (2011). 'Study of the Pyrolysis of Municipal Solid Waste for the Production of Valuable Products', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **Vol. 92, No. 2**, 366-375.
- Westinghouse Plasma Corporation. (2013). Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse. Disponible en [http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2013/09/WPC-SoQ-August-2013-NDA-Not-Required-Final\\_Spanish.pdf](http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2013/09/WPC-SoQ-August-2013-NDA-Not-Required-Final_Spanish.pdf) (último acceso 17 de Junio, 2014)
- WSP. (2012). Presentation to WtE industry event in Perth, Australia. Disponible en [http://www.wasteauthority.wa.gov.au/media/files/documents/WtE\\_presentation\\_Dec\\_2012.pdf](http://www.wasteauthority.wa.gov.au/media/files/documents/WtE_presentation_Dec_2012.pdf) (último acceso 17 de Junio, 2014)
- WSP. (2013). Review of state of art waste to energy technologies. Disponible en [http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias\\_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf](http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf) (último acceso 30 de Mayo, 2014)
- Young, Gary C. (2010). 'Municipal Solid Waste to Energy conversion Processes: Economic, Technical, and Renewable Comparisons', John Wiley & Sons, Inc.
- Zhang, L. H., C. B. Xu, and P. Champagne. (2010). 'Overview of Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass', *Energy Conversion and Management* **Vol. 51, No. 5**, 969-982.

## 11. ANEXOS

### 11.1 . CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LOS RSU

Se va a estimar la composición elemental de los RSU que se van a gasificar. Debido a que el metal y el vidrio no gasifican, éstos no se introducen al reactor, por lo que se retiraran previamente. Por lo tanto, al gasificador entran unas 88960 t/año de RSU.

Es necesario integrar la humedad de los distintos componentes de los RSU en su composición elemental.

Se va a realizar el cálculo a modo de ejemplo para el caso de la materia orgánica presente en los residuos.

$$\text{masa total} = 52 + 6.62 + 37.55 + 1.63 + 0.2 + 2 + 72 = 172 \text{ kg}$$

La composición de la materia orgánica de los RSU sería la siguiente:

$$\% C = \frac{52}{172} \cdot 100 = 30.23 \%$$

$$\% H_2 = \frac{6.62}{172} \cdot 100 = 3.85 \%$$

$$\% O_2 = \frac{37.55}{172} \cdot 100 = 21.83 \%$$

$$\% N_2 = \frac{1.63}{172} \cdot 100 = 0.95 \%$$

$$\% S = \frac{0.2}{172} \cdot 100 = 0.12 \%$$

$$\% \text{inertes} = \frac{2}{172} \cdot 100 = 1.16 \%$$

$$\% \text{humedad} = \frac{72}{172} \cdot 100 = 41.86 \%$$

Realizando el mismo procedimiento se obtienen los siguientes resultados para los demás componentes. Como el metal y el vidrio se habrán retirado previamente de los RSU, no se realizará el cálculo para estos compuestos.

**Tabla A.1.**

	<b>%C</b>	<b>%H<sub>2</sub></b>	<b>%O<sub>2</sub></b>	<b>%N<sub>2</sub></b>	<b>%S</b>	<b>% Inertes</b>	<b>% Humedad</b>
Papel	44.00	6.15	41.65	0.42	0.12	7.66	-
Cartón	45.51	6.00	44.53	0.16	0.13	3.67	-
Madera	49.00	6.00	42.00	-	-	3.00	-
Plásticos	78.00	9.00	13.00	-	-	-	-
Gomas y cueros	45.77	5.96	15.19	3.08	1.15	25.00	3.85
Textiles	37.25	5.17	33.75	1.76	0.16	2.56	19.35
Residuos orgánicos	30.23	3.85	21.83	0.95	0.12	1.16	41.86

Conociendo la cantidad de materia orgánica presente en 100000 t de RSU, se puede estimar cuanto de C, H, O, N, S, inertes y humedad existe en ésta.

$$100000 \cdot \frac{51.73}{100} = 51730 \text{ t de materia orgánica}$$

$$51730 \cdot \frac{30.23}{100} = 15639 \text{ t de C}$$

$$51730 \cdot \frac{3.85}{100} = 1991 \text{ t de H}_2$$

$$51730 \cdot \frac{21.83}{100} = 11293 \text{ t de O}_2$$

$$51730 \cdot \frac{0.95}{100} = 490 \text{ t de N}_2$$

$$51730 \cdot \frac{0.12}{100} = 60 \text{ t de S}$$

$$51730 \cdot \frac{1.16}{100} = 602 \text{ t de inertes}$$

$$51730 \cdot \frac{41.86}{100} = 21654 \text{ t de humedad}$$

De la misma manera se obtienen los resultados para los otros componentes como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla A.2.

	t de C	t de H <sub>2</sub>	t de O <sub>2</sub>	t de N <sub>2</sub>	t de S	t de Inertes	t de Humedad
Papel	6992	977	6618	67	19	1217	-
Cartón	2407	317	2356	8	7	194	-
Madera	470	58	403	0	0	29	0
Plásticos	8260	953	1377	0	0	0	0
Gomas y cueros	183	24	61	12	5	100	15
Textiles	1527	212	1384	72	7	105	794
Residuos orgánicos	15639	1991	11293	490	60	602	21654

Sumando la cantidad de C, H, O, N, S, inertes y humedad de cada uno de los elementos que componen los residuos, se obtiene la cantidad total presente en los RSU.

$$C \text{ total} = 6992 + 2407 + 470 + 8260 + 183 + 1527 + 15639 = 35479 \text{ t}$$

$$H_2 \text{ total} = 977 + 317 + 58 + 953 + 24 + 212 + 1991 = 4532 \text{ t}$$

$$O_2 \text{ total} = 6618 + 2356 + 403 + 1377 + 61 + 1384 + 11293 = 23492 \text{ t}$$

$$N_2 \text{ total} = 67 + 8 + 12 + 72 + 490 = 650 \text{ t}$$

$$S \text{ total} = 19 + 7 + 5 + 7 + 60 = 97 \text{ t}$$

$$\text{Inertes total} = 1217 + 194 + 29 + 100 + 105 + 602 = 2246 \text{ t}$$

$$\text{Humedad total} = 15 + 794 + 21654 = 22463 \text{ t}$$

A partir de los resultados anteriores, se obtiene el siguiente análisis elemental global de los RSU.

$$\% C = \frac{35479}{88960} \cdot 100 = 39.88 \% C$$

$$\% H_2 = \frac{4532}{88960} \cdot 100 = 5.09 \% H_2$$

$$\% O_2 = \frac{23492}{88960} \cdot 100 = 26.41 \% O_2$$

$$\% N_2 = \frac{650}{88960} \cdot 100 = 0.73 \% N_2$$

$$\% S = \frac{97}{88960} \cdot 100 = 0.11 \% S$$

$$\% \text{Inertes} = \frac{2246}{88.960} \cdot 100 = 2.53 \% \text{ inertes}$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{22463}{88960} \cdot 100 = 25.25 \% \text{ Humedad}$$

## 11.2. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR DE LOS RSU

Existen diferentes métodos para determinar el poder calorífico de los residuos:

- *Fórmula de Milne; tomada para el ECN (EnergyResearch Center of theNetherlands)*

$$PCS = 0.341 \cdot C\% + 1.322 \cdot H_2\% - 0.12 \cdot O_2\% - 0.12 \cdot N_2\% + 0.0686 \cdot S\% - 0.0153 \cdot \% \text{ ceniza}$$

$$PCI = PCS - 5068 \cdot H_2\%$$

$$PCS = 17.05 \frac{MJ}{kg} = 4078 \frac{kcal}{kg}$$

$$PCI = 15.97 \frac{MJ}{kg} = 3820 \frac{kcal}{kg}$$

- *Fórmula considerada por la unidad RDC (Research, Development and Consultancy) para combustibles de la biomasa*

$$PCS = 0.3491 \cdot C\% + 1.1783 \cdot H_2\% - 0.1034 \cdot O_2\% - 0.0151 \cdot N_2\% + 0.1005 \cdot S\% - 0.0211 \cdot \% \text{ cenizas}$$

$$PCI = PCS - 5068 \cdot H_2\%$$

$$PCS = 17.14 \frac{MJ}{kg} = 4101 \frac{kcal}{kg}$$

$$PCI = 16 \frac{MJ}{kg} = 3843 \frac{kcal}{kg}$$

- *Formula de Dulong, tomada por Taftan Data, para combustibles fósiles*

$$PCS = 0.337 \cdot C\% + 1.442 \cdot H_2\% - \frac{1.442}{8} \cdot O_2\% + 0.093 \cdot S\%$$

$$PCI = 232.6 \left[ 0.146 \cdot C\% + 0.621 \cdot \left( H_2\% - \frac{O_2\%}{8} \right) - 0.0112 \cdot (9 \cdot H_2\% + \% \text{ Humedad}) \right]$$

$$PCS = 16 \frac{MJ}{kg} = 3837 \frac{kcal}{kg}$$

$$PCI = 14.28 \frac{MJ}{kg} = 3055 \frac{kcal}{kg}$$

Se va a tomar como resultado los obtenidos mediante la fórmula de Dulong ya que ofrece valores más restrictivos de PCI.

### 11.3. CÁLCULO DEL PCI DEL GAS DE SÍNTESIS

$$PCS = \sum v_i PC_i$$

$$PCI = PCS - 5068 w_H$$

Tabla A.3.

Gas	kcal/mol	kcal/m <sup>3</sup> (*)
CO	66,2	2775
H <sub>2</sub>	68,3	2860
CH <sub>4</sub>	212,8	8910
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	310	13020
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	158,1n+54,7	6625n+2290
C <sub>a</sub> H <sub>b</sub>	98,2a+28,2b+28,8	4115a+1180b+1210

$$PCS = 0.13 \cdot 2860 + 0.04 \cdot 8910 + 0.18 \cdot 2775 = 1228 \text{ kcal/m}^3$$

Dado que la formula a partir de la cual se estima el PCI se aplica sobre el porcentaje de hidrogeno en peso y no en volumen, es necesario determinar la cantidad de masa correspondiente a dicha composición del gas de síntesis.

$$13 \text{ m}^3 \text{H}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{H}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol H}_2} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 1.16 \text{ kg H}$$

$$4 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{CH}_4} \cdot \frac{4 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol CH}_4} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 0.71 \text{ kg H}$$

$$4 \text{ m}^3 \text{CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{CH}_4} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CH}_4} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 2.14 \text{ kg C}$$

$$18 \text{ m}^3 \text{CO} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}}{22.4 \text{ m}^3 \text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CO}} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 9.64 \text{ kg C}$$

$$18 \text{ m}^3 \text{CO} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}}{22.4 \text{ m}^3 \text{CO}} \cdot \frac{1 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol CO}} \cdot \frac{16 \text{ kg O}}{1 \text{ kmol O}} = 12.86 \text{ kg O}$$

$$7 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{22.4 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{2 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \cdot \frac{16 \text{ kg O}}{1 \text{ kmol O}} = 5 \text{ kg O}$$

$$7 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2\text{O}}{22.4 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{1 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 0.625 \text{ kg H}$$

$$46 \text{ m}^3 \text{N}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol N}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{N}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol N}_2} \cdot \frac{14 \text{ kg N}}{1 \text{ kmol N}} = 57.5 \text{ kg N}$$

$$12 \text{ m}^3 \text{CO}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{CO}_2} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CO}_2} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 6.43 \text{ kg C}$$

$$12 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{ CO}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol CO}_2} \cdot \frac{16 \text{ kg O}}{1 \text{ kmol O}} = 17.14 \text{ kg O}$$

$$\text{masa total} = 113.205 \text{ kg}$$

$$w_H = \frac{0.71 + 0.625 + 1.16}{113.205} = 0.022$$

Una vez calculado el porcentaje en peso del hidrogeno presente en el gas de síntesis, se puede estimar el PCI.

$$PCI = PCS - 5068 w_H = 1228 - 5068 \cdot 0.022$$

$$PCI = 1116 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} = 4.65 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

#### 11.4. CÁLCULO DEL PCI DEL GAS DE PIRÓLISIS

$$PCS = \sum v_i PC_i$$

$$PCI = PCS - 5068 w_H$$

Tabla A.4.

Gas	kcal/mol	kcal/m <sup>3</sup> (*)
CO	66,2	2775
H <sub>2</sub>	68,3	2860
CH <sub>4</sub>	212,8	8910
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	310	13020
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	158,1n+54,7	6625n+2290
C <sub>a</sub> H <sub>b</sub>	98,2a+28,2b+28,8	4115a+1180b+1210

$$\begin{aligned}
 PCS &= 0.1 \cdot 2860 + 0.16 \cdot 8910 + 0.3 \cdot 2775 + 0.165 \\
 &\quad \cdot (4115 \cdot 2 + 1180 \cdot 4 + 1210) + 0.165 \cdot (6625 \cdot 2 + 2290) \\
 &= 7444.6 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

Dado que la formula a partir de la cual se estima el PCI se aplica sobre el porcentaje de hidrogeno en peso y no en volumen, es necesario determinar la cantidad de masa correspondiente a dicha composición del gas de síntesis.

$$10 \text{ m}^3 \text{ H}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{2 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol H}_2} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 0.89 \text{ kg H}$$

$$16 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{4 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol CH}_4} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 2.86 \text{ kg H}$$

$$16 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol CH}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CH}_4} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 8.57 \text{ kg C}$$

$$30 \text{ m}^3 \text{ CO} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CO}} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 16.1 \text{ kg C}$$

$$30 \text{ m}^3 \text{ CO} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{1 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol CO}} \cdot \frac{16 \text{ kg O}}{1 \text{ kmol O}} = 21.43 \text{ kg O}$$

$$11 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol CO}_2} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 5.9 \text{ kg C}$$

$$11 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{2 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol CO}_2} \cdot \frac{16 \text{ kg O}}{1 \text{ kmol O}} = 15.7 \text{ kg O}$$

$$16.5 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{4 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 2.95 \text{ kg H}$$

$$16.5 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_4 \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_4}{22.4 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{2 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_4} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 17.68 \text{ kg O}$$

$$16.5 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6}{22.4 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_6} \cdot \frac{6 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6} \cdot \frac{1 \text{ kg H}}{1 \text{ kmol H}} = 4.42 \text{ kg H}$$

$$16.5 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_6 \cdot \frac{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6}{22.4 \text{ m}^3 \text{C}_2\text{H}_6} \cdot \frac{2 \text{ kmol C}}{1 \text{ kmol C}_2\text{H}_6} \cdot \frac{12 \text{ kg C}}{1 \text{ kmol C}} = 17.68 \text{ kg C}$$

$$\text{masa total} = 114.18 \text{ kg}$$

$$w_H = \frac{0.89 + 2.86 + 2.95 + 4.42}{114.18} = 0.097$$

Una vez calculado el porcentaje en peso del hidrogeno presente en el gas de síntesis, se puede estimar el PCI.

$$PCI = PCS - 5068 w_H = 7444.6 - 5068 \cdot 0.097$$

$$PCI = 6951 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} = 29 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

## 11.5. CÁLCULO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN

Como se estima que el aire que se va a utilizar en el proceso de gasificación será un 30% del aire estequiométrico necesario para que la combustión sea completa, se va a calcular el aire necesario para llevar a cabo una oxidación completa.

Para ello es necesario conocer la composición de los residuos en unidades de moles.

$$39.88 \text{ kg C} \cdot \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} = 3.32 \text{ kmol C}$$

$$5.09 \text{ kg H}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol H}_2}{2 \text{ kg H}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol H}}{1 \text{ kmol H}_2} = 5.09 \text{ kmol H}$$

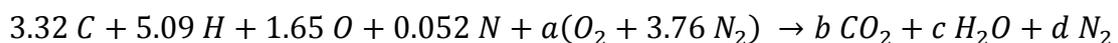
$$26.41 \text{ kg O}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol O}_2}{32 \text{ kg O}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol O}}{1 \text{ kmol O}_2} = 1.65 \text{ kmol O}$$

$$0.73 \text{ kg N}_2 \cdot \frac{1 \text{ kmol N}_2}{28 \text{ kg N}_2} \cdot \frac{2 \text{ kmol N}}{1 \text{ kmol N}_2} = 0.052 \text{ kmol N}$$

$$0.11 \text{ kg S} \cdot \frac{1 \text{ kmol S}}{32 \text{ kg S}} = 0.003 \text{ kmol S}$$

Debido al bajo contenido molar del azufre, se va a despreciar dicha cantidad.

La reacción de combustión ideal que tendría lugar si ésta fuese completa sería:



$$\text{C: } 3.32 = b$$

$$\text{H: } 5.09 = 2c \rightarrow c = 2.54$$

$$O: 1.65 + 2a = 2b + c \rightarrow a = 3.76$$

$$N: 0.052 + 3.76 \cdot a \cdot 2 = 2d \rightarrow d = 14.16$$

Por lo tanto, 3.76 kmoles de aire son necesarios para que la combustión sea completa.

$$3.76 \text{ kmol aire} \cdot \frac{28.84 \text{ kg aire}}{1 \text{ kmol aire}} = 108.44 \text{ kg aire}$$

Se concluye que por cada 100 kg de RSU que se quieran quemar, se necesitan 108.44 kg de aire. En este caso, como la cantidad de residuos que se va a introducir en el reactor es de 88960 t/año, serán necesarias 96468 t/año de aire.

En este caso la reacción se lleva a cabo en una atmosfera deficiente de oxígeno, con un 30% del aire total necesario para la combustión.

$$\text{Aire necesario} = 96468 \frac{t}{\text{año}} \cdot 0.3 = 28940 \frac{t}{\text{año}} = 22 \text{ Mm}^3 \text{ de aire}$$

## 11.6. BALANCE DE MATERIA GASIFICACIÓN

$$E = S$$

$$E = \dot{m}_{RSU} + \dot{m}_{aire}$$

$$E = 88960 + 28940 = 117900 \frac{t}{\text{año}}$$

$$S = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{residuo}$$

$$\dot{m}_{residuo} = 88960 \frac{t}{\text{año}} \cdot \frac{253}{100} = 2251 \frac{t}{\text{año}}$$

$$117900 = \dot{m}_{gas} + 2251$$

$$\dot{m}_{gas} = 115649 \frac{t}{\text{año}} \cong 116000 \frac{t}{\text{año}}$$

## 11.7. BALANCE DE ENERGÍA GASIFICACIÓN

$$Q_E = Q_S$$

$$Q_{RSU} = 3417 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot 88960 \frac{t}{\text{año}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} = 3.04 \cdot 10^{11} \frac{\text{kcal}}{\text{año}}$$

$$Q_{aire} = 28940 \frac{t}{\text{año}} \cdot 2513 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \cdot \frac{1 \text{ GJ}}{10^6 \text{ kJ}} = 728 \frac{\text{GJ}}{\text{año}}$$

$$Q_{gas} = 1116 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \cdot \left[ 116000 \frac{t}{\text{año}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{30.44 \text{ kg}} \cdot \frac{22.4 \text{ m}^3}{1 \text{ kmol}} \right]$$

$$= 9.53 \cdot 10^{10} \frac{\text{kcal}}{\text{año}}$$

$$3.04 \cdot 10^{11} \frac{kcal}{año} \cdot \frac{1 kWh}{860 kcal} = 11 \cdot 10^7 \frac{kWh}{año}$$

Suponiendo que se trabajan 7000 h/año

$$11 \cdot 10^7 \frac{kWh}{año} \cdot \frac{1 año}{7000 h} = 16000 kW = 16 MW$$

Suponiendo que el autoconsumo de la planta es de un 10% de la potencia instalada de la planta

$$16 \cdot 0.1 = 1.6 MW$$

Por lo tanto la cantidad de energía que se puede vender

$$16 - 1.6 = 14.4 MW$$

$$14.4 MW \cdot \frac{10^3 kW}{1 MW} \cdot \frac{7000 h}{1 año} = 10.1 \cdot 10^7 \frac{kWh}{año}$$

$$10.1 \cdot 10^7 \frac{kWh}{año} \cdot \frac{1 año}{7000 h} \cdot 0.34 \cong 5000 kW = 5 MW$$

$$5000 kW \cdot \frac{7000 h}{1 año} = 3.5 \cdot 10^7 \frac{kWh}{año}$$

## 11.8. BALANCE DE MATERIA PIRÓLISIS

$$E = S$$

$$E = \dot{m}_{RSU} + \dot{m}_{GN} = 88960 + 28940 = 117900 \frac{t}{año}$$

$$S = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{char} + \dot{m}_{bio-oil} + \dot{m}_{GN}$$

Teniendo en cuenta las hipótesis de partida establecidas en el apartado 7.1,

$$\dot{m}_{gas} = 0.8 \cdot \dot{m}_{RSU} = 71168 \frac{t}{año}$$

$$\dot{m}_{char} = 0.1 \cdot \dot{m}_{RSU} = 8896 \frac{t}{año}$$

$$\dot{m}_{bio-oil} = 0.1 \cdot \dot{m}_{RSU} = 8896 \frac{t}{año}$$

## 11.9. BALANCE DE ENERGÍA PIRÓLISIS

$$Q_{gas} = 6951 \frac{kcal}{m^3} \cdot \left[ 71168 \frac{t}{año} \cdot \frac{1000 kg}{1 t} \cdot \frac{1 kmol}{29.97 kg} \cdot \frac{22.4 m^3}{1 kmol} \right] = 3.7 \cdot 10^{11} \frac{kcal}{año}$$

Suponiendo que se trabajan 7000 h/año

$$3.7 \cdot 10^{11} \frac{kcal}{año} \cdot \frac{kWh}{860 kcal} \cdot \frac{1 año}{7000 h} = 61418.16 kW \cong 62 MW$$

Suponiendo que el autoconsumo de la planta es de un 20% de la potencia instalada de la planta

$$62 \cdot 0.2 = 12.4 MW$$

Por lo tanto la cantidad de energía que se puede vender

$$62 - 12.4 = 49.6 MW$$

$$49.6 MW \cdot \frac{10^3 kW}{1 MW} \cdot \frac{7000 h}{1 año} \cdot 0.34 = 1.18 \cdot 10^8 \frac{kWh}{año}$$

