



Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación

Autor: Ismael Sánchez López

Institución: Universidad Jaume I de Castelló

Otros autores: Antonio Gallardo Izquierdo (Universidad Jaume I de Castelló);
Natalia Edo Alcón (Universidad Jaume I de Castelló)

Resumen

España, al igual que una cantidad importante de países, padece una alta dependencia energética. Por lo tanto, la economía española es bastante vulnerable a los volátiles cambios en los precios internacionales del petróleo y el gas. Las perspectivas para el futuro sugieren que el escenario energético se complicará más a medio y largo plazo, por eso, España debe considerar el reto de diversificar su mezcla energética y reducir su dependencia de los hidrocarburos como una prioridad nacional.

En la actualidad, la mayoría de los tratamientos aplicados a los residuos sólidos urbanos generan una gran cantidad de rechazos al final del proceso, que en su gran parte se destinan a vertedero. Sin embargo, estos rechazos son una potencial fuente de energía desaprovechada.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el potencial de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación, y compararlas entre sí estimando la capacidad de aprovechamiento de diferentes tipos de rechazos, y el valor económico en el mercado del syngas generado por cada una de ellas. El estudio se centra en este tipo de tecnologías, por un lado por la gran eficiencia teórica de las mismas, ya que el poder calorífico del syngas obtenido después de haber llevado a cabo el proceso es bastante elevado, sin ser excesivo el consumo de energía para elevar la temperatura, y por otro, por el reducido impacto ambiental que genera, ya que las emisiones son muy reducidas debido a que prácticamente son disociadas todas las moléculas en otras más simples, así como los elementos más contaminantes quedan fijados en un residuo vítrico

Palabras clave: Syngas; gasificación; residuos sólidos urbanos; biomasa

Análisis de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación

Autores: Ismael Sánchez López, Antonio Gallardo Izquierdo y Natalia Edo Alcón

Institución: Universitat Jaume I de Castellón

Resumen

Según el Plan de Energías Renovables actualmente vigente en España (PER 2011-2020), acorde con la Directiva 2009/28/CE, se establece como objetivo vinculante para el conjunto de la Unión Europea y para cada uno de los estados miembros, conseguir una cuota mínima del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía. Ante la situación energética de España, donde sus principales fuentes son a partir de combustibles fósiles, es importante considerar otras fuentes de energía renovables.

En la actualidad, la mayoría de los tratamientos aplicados a los residuos sólidos urbanos (RSU) generan una gran cantidad de rechazos al final del proceso, que en su gran parte se destinan a vertedero. Sin embargo, estos rechazos son una potencial fuente renovable de energía desaprovechada.

El objetivo principal de este artículo es determinar el potencial de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación y el estudio de las distintas variables que influyen en el proceso, estimando la capacidad de aprovechamiento de diferentes tipos de rechazos de plantas de tratamiento de RSU. El estudio se centra en este tipo de tecnologías por la gran eficiencia teórica de las mismas, ya que el poder calorífico del syngas obtenido después de haber llevado a cabo el proceso es bastante elevado, sin ser excesivo el consumo de energía para elevar la temperatura.

Palabras clave: Energía de los residuos, Syngas, gasificación, residuos sólidos urbanos, Combustibles Sólidos Recuperables.

1. Introducción

La Comisión Europea para el Medio Ambiente plantea una jerarquía en cuanto a la gestión de residuos. En primera instancia busca reducir la generación de residuos en origen. Una vez generados los residuos, la sociedad debe tratar de reciclar la mayor cantidad de materiales posibles. Solamente cuando los materiales no puedan ser reciclados, se considera como mejor opción alguna estrategia de recuperación o, como opción menos deseada, la disposición final en vertederos.

Como alternativas para la recuperación de los mismos se encuentra la digestión anaerobia y el compostaje aerobio para la fracción orgánica biodegradable y las plantas de selección de envases. Además, en cuanto al aprovechamiento energético las tecnologías existentes se basan en la incineración, pirólisis y gasificación. La más habitual de estas técnicas es la incineración en masa, aunque ya se aplican otras tecnologías, como la gasificación y la pirólisis. Éstas, a pesar de encontrarse relativamente extendidas en el tratamiento de la biomasa fundamentalmente y otro tipo

de residuos, en el campo de los RSU, todavía no existen demasiadas experiencias a gran escala.

Finalmente, el material no valorizable se dispone en los vertederos. En función de las características propias del material presente en los mismos, se puede llevar a cabo una la desgasificación y posterior aprovechamiento energético.

El presente artículo se centra en la gasificación. Esta es una tecnología de proceso diseñada para obtener un gas de síntesis o *syngas* es decir, un producto gaseoso que puede ser empleado para producir combustibles, productos químicos y/o energía. Puede definirse por tanto, como un proceso optimizado por el que una sustancia sólida o líquida con alto contenido en carbono es transformada en una mezcla combustible gaseosa mediante oxidación parcial con aplicación de calor. Como materia prima pueden ser usados en el proceso los rechazos de las plantas de tratamiento de RSU. Estos rechazos representan el 50,65% del residuo que llega a vertedero (MAGRAMA, 2013) y están compuestos principalmente por material combustible (plástico, papel y textil) (Gallardo y col., 2012), por lo que podrían ser transformados en combustibles sólidos recuperados (CSR) para su valorización energética, consiguiendo un mayor aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos y estar más cerca del objetivo de “vertido cero”.

El objetivo de este trabajo de investigación ha sido, por un lado, determinar el estado actual de las tecnologías de gasificación y el estudio de las distintas variables que influyen en el proceso de obtención del gas de síntesis. Por otro lado, su aplicación para valorización de residuos, profundizando en el aprovechamiento energético de los rechazos de las plantas de tratamiento de RSU en España.

2. Los residuos sólidos urbanos como recurso energético

En España la cantidad de RSU recogidos en el año 2011 fue de 21,9 millones de toneladas (MAGRAMA, 2013), de los cuales el 83% corresponden a residuos mezclados, y el resto a aquellos recogidos selectivamente. Un 66% fue tratado en diferentes instalaciones de tratamiento de RSU, un 27% se vertió a vertedero y un 7% se incineró.

Sin embargo, del total de RSU que entraron en las diferentes instalaciones de tratamiento de RSU una gran parte acaba como material rechazado, siendo su destino final su deposición en vertedero o la incineración. En relación al material entrante a las plantas de tratamiento, la fracción rechazo supone el 73,27% para las plantas de recuperación y compostaje (PRC), un 75,01% para las plantas de biometanización y compostaje (PBC), del 30,63% para las plantas de compostaje de la fracción orgánica recogida selectivamente (PCFORS) y del 42,33% para las plantas de selección de envases (PSE). En el año 2011 las instalaciones de tratamiento de RSU generaron 8,3 millones de toneladas de rechazo y fueron las PRC las que generaron mayor cantidad (Figura 1) (Gallardo y col., 2014).

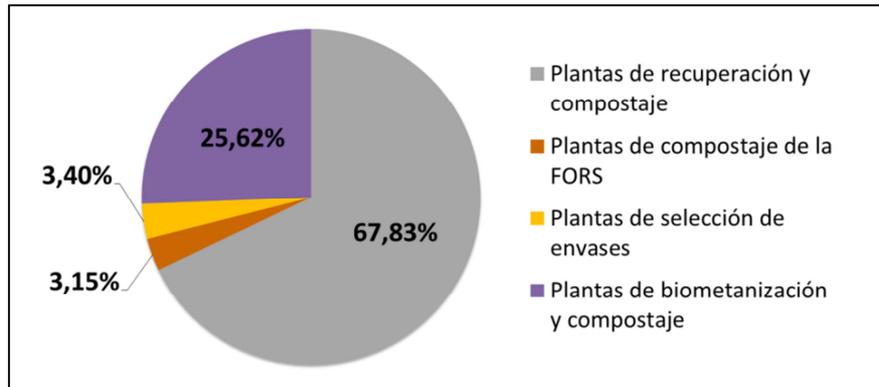


Figura 1. Procedencia de los rechazos de las plantas de tratamiento de RSU, 2011 (Gallardo y col., 2014).

Del total del rechazo generado, tan solo el 7,78% se valoriza energéticamente en plantas de incineración de RSU, representando un 28,31% del material entrante a estas plantas. El resto, un 92,22%, tuvo como destino final el depósito en vertedero. Lo que supone 7,6 millones de toneladas de material desaprovechado energéticamente. Este material puede ser transformado en un CSR (Norma UNE EN 15359:2002) y ser aprovechado como combustible en distintas instalaciones térmicas.

Gallardo y col. (2014) realizaron el cálculo de poder calorífico de distintos tipos de rechazos en plantas de tratamiento de RSU españolas. Tanto el poder calorífico como la calidad vienen determinados por el tipo de residuo, las características y la etapa del proceso de tratamiento donde se genera este rechazo. En la tabla 1 se pueden observar el Poder Calorífico Inferior sobre materia húmeda (PCI), el contenido en Cloro (Cl) y el contenido en Mercurio (Hg) de 7 rechazos diferentes de distintas etapas del proceso para una Planta de Recuperación y Compostaje (PRC), Planta de Compostaje de la Fracción Orgánica Recogida Selectivamente (PCFORS) y Planta de Selección de Envases (PSE).

	PRC				PCFORS		PSE
RECHAZO	1	2	3	4	5	6	7
PCI (MJ/kg)	12,85	7,98	7,36	7,58	13,31	6,65	18,72
Cl (%)	≤1	≤1	≤0,6	≤1,5	≤3	≤1	≤1
Hg (mg/MJ)	≤0,02	≤0,08	≤0,15	≤0,08	≤0,02	≤0,02	≤0,02

Tabla 1: Valores de PCI, Cl y Hg de rechazos de plantas de tratamiento RSU sobre materia seca.

En función del PCI se puede observar como los rechazos procedentes de las PSE (rechazo 7) son los que presenta un valor más alto, con 18,72MJ/Kg, en sentido descendente le sigue el rechazo 5 de las PCFORS con 13,31 MJ/Kg, el rechazo 1 procedente de las PRC con 12,85 MJ/Kg, y así hasta el valor más bajo procedente al rechazo 6 de las PCFORS con 6,65 MJ/Kg.

Si comparamos estos valores con el PCI del Lignito (28,4 MJ/Kg), combustible de calidad intermedia entre el carbón de turba y el carbón bituminoso o con el PCI de la Haya con corteza (18,4 MJ/Kg) o madera de coníferas (19,2 MJ/Kg), se puede afirmar que el poder calorífico contenido en estos materiales es bastante considerable como para poder ser aprovechados energéticamente.

Es importante controlar las proporciones tanto de cloro como de mercurio, ya que pueden tener un impacto negativo en la propia operación de las instalaciones como en sus emisiones al medio ambiente.

3. Descripción del proceso de gasificación

La gasificación es uno de los procesos que aporta mayor valor añadido en el aprovechamiento energético de los RSU, al permitir la obtención de un gas que puede ser utilizado tanto para la generación de energía térmica como eléctrica, incluyendo la combinación de ambos procesos (mediante sistemas de cogeneración).

La diferencia entre la incineración y el proceso de gasificación, radica en la presencia de oxígeno. En la incineración, el proceso es de combustión completa en presencia de oxígeno, mientras que en la gasificación y pirólisis, la reducción se realiza en ausencia o en presencia de baja concentración de oxígeno (Tabla 2). A pesar de esta diferencia notable, la legislación Europea, hasta el momento, cataloga este tipo de procesos como incineración.

	Incineración	Gasificación
Temperatura de operación	Desde los 300°C hasta 1200°C, para los distintos tipos de residuos	Superior a 1400°C
Eficiencia en la destrucción	Alta, sujeta a un control estricto	Completa
Humedad	Una humedad alta del residuo afecta a los requerimientos de energía	El proceso no se ve afectado por el contenido de humedad del residuo, ya que se inyecta vapor de agua durante el proceso
Dioxinas y furanos	Requiere un estricto control para la remoción de dioxinas y furanos, contenidos en los residuos o formados en la destrucción de residuos clorados	La atmósfera reductora evita la formación de dioxinas y furanos, y por la alta temperatura son destruidos totalmente
Productos finales	Los productos finales son gases de combustión, escorias y cenizas	Los productos finales son gases combustibles, vapor de agua, ácidos inorgánicos en forma vítrea
Cenizas	Consideradas como residuos peligrosos	Los inorgánicos en forma vítrea tienen utilidad en construcción
Emisiones	Se vierten gases de combustión a la atmósfera (previo tratamiento)	No existe descarga de gases a la atmósfera
Finalidad	Supone un tratamiento finalista	El tratamiento no es finalista

Tabla 2: Parámetros diferenciadores entre incineración y gasificación (Lleó, A., VAERSA, 2008).

La gasificación supone la oxidación parcial de un sustrato carbonoso en condiciones subestequiométricas de aire, oxígeno o en presencia de otros agentes gasificantes como el dióxido de carbono o el vapor de agua (Dogru y col., 2005). Esta reacción genera una

mezcla de gases que recibe el nombre de gas de síntesis o *syngas*, en función de su composición y del sistema de reacción empleado. El gas de síntesis contiene concentraciones variables de CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂, así como de otros hidrocarburos ligeros.

Los rendimientos obtenidos y las características de los gases producidos en la gasificación dependen, principalmente, de las condiciones presentes en la reacción (temperatura, presión, agente gasificante, tiempo de reacción), del tipo de reactor utilizado (lecho fijo *updraft* y *downdraft*, lecho fluido, arrastre de gas) y de la aplicación de distintos sistemas de tratamiento y limpieza de los gases producidos (*water-gas shift*, craqueo catalítico de alquitrans, etc.).

En base a su composición, poder calorífico y presencia de sustancias contaminantes (alquitrans, azufre, cenizas), los gases de síntesis pueden emplearse como combustibles en turbinas, motores de combustión interna o calderas. El empleo de gas de síntesis para la producción de metanol, amoníaco y combustibles líquidos (Fischer-Tropsch) también es otro uso bastante frecuente. Actualmente, se busca aumentar la proporción de hidrógeno y reducir la presencia de monóxido de carbono para que el *syngas* pueda utilizarse como alimentación en pilas de combustibles.

Se puede afirmar que no existe una estequiometría exacta del proceso de gasificación, ya que varía de forma evidente según distintos parámetros como la velocidad de calentamiento, el tiempo de permanencia de los gases en los reactores y la temperatura que se alcance en el proceso, pudiendo alcanzar finalmente un gas de composición estable, que más tarde será empleado en alguna aplicación externa al reactor para la producción de energía en procesos de combustión de manera independiente, en combinación con gas natural en calderas comerciales para producir energía térmica, en motores de combustión interna para producir energía eléctrica y térmica y, en turbinas de gas en ciclos simples o combinados para producir energía eléctrica.

En diversos estudios son descritas las reacciones que ocurren durante el proceso de gasificación (EEA, 1997; EC, 2001; Dayton, 2002; Dogru y col., 2002 Hackett y col., 2004; Elías, 2005; Knoef, 2005). Un proceso de gasificación puede ser optimizado para maximizar la conversión del carbono. El carbono es oxidado térmicamente para proporcionar calor al proceso. Las posibles reacciones de oxidación de carbono en presencia de oxígeno o aire son descritas en las reacciones (a) y (b):



Estas reacciones exotérmicas proporcionan el calor necesario para mantener la temperatura del reactor a pesar de la disipación energética que suponen las reacciones endotérmicas que tienen lugar en el secado, pirólisis y zona de reducción. El ajuste estequiométrico del contenido de oxígeno es fundamental para conseguir que la reacción de gasificación sea prioritaria a la de combustión y se favorezca la formación de monóxido de carbono.

El vapor de agua presente como agente gasificante permite aumentar la proporción de hidrógeno generado. Este vapor de agua puede ser añadido directamente al reactor, o puede generarse en las fases de secado y/o pirólisis del material combustible empleado. A la reacción entre el vapor de agua y el carbono se le da el nombre de reacción de vapor de agua (*water gas reaction*) y se describe como:



En presencia de dióxido de carbono, el carbono de la materia orgánica reacciona para producir monóxido de carbono, en base a la reacción de Boudouard (d). La reacción de *water gas reaction* y la de Boudouard son endotérmicas:



Son de gran importancia en los procesos de gasificación las reacciones de metanización (e) y (f). Si el objetivo es la producción de hidrógeno, la producción de metano puede no ser deseable. En el caso de que el objetivo sea el uso directo del gas como combustible, la producción de metano puede ser interesante:



Del mismo modo que la reacción de *water gas reaction* (c), la reacción de *water gas shift reaction* (g) se da cuando hay presencia de vapor de agua en el medio de gasificación. Esta reacción favorece la formación de hidrógeno y reduce la de monóxido de carbono, por lo que se tiene en cuenta que tenga lugar en procesos donde el gas de síntesis va a ser usado para alimentación de pilas de combustible:



Aún en condiciones subestequiométricas, tanto el hidrógeno como el monóxido de carbono pueden reaccionar con el oxígeno en función de las reacciones exotérmicas (h) e (i):



Las cantidades de CO, CO₂, H₂O, H₂, y de hidrocarburos (HC) van a depender de la estequiometría del proceso de gasificación y de la oxidación parcial de los productos volátiles:



En el reformado de los HC ligeros y de los alquitrans formados durante la gasificación también se produce H₂. El reformado tiene la ventaja de mantener el contenido de energía química del gas de síntesis, ya que los alquitrans son transformados a H₂ y CO. Por su parte, el reformado con vapor de agua, y el reformado con CO₂ (reformado en seco), tienen lugar según las reacciones (k) y (l) favorecidas por el uso de catalizadores:



Con las reacciones de craqueo térmico, se produce la deshidrogenación de alquitranes, lo que puede hacer que el carbono asociado se deposite en los centros activos de los catalizadores (m):



La gasificación del carbonizado producido genera CO adicional a través de las reacciones anteriormente descritas (b) a (d) manteniendo la actividad del catalizador.

El predominio de alguna de las reacciones anteriormente mencionadas depende de numerosos factores tales como: el tipo de contacto con el reactor, la concentración de las distintas especies dentro del mismo, la temperatura y presión de operación y la presencia de catalizadores, entre otros. De este modo, el resultado final del proceso de gasificación es, aunque predecible, difícilmente modelable (Gómez-Barea, 2009).

4. Variables de funcionamiento en el proceso de gasificación

A parte de la procedencia y tipo de material combustible empleado el proceso de gasificación, existe una serie de variables que pueden ser modificadas para determinar de una forma más predecible las características de los productos obtenidos. A continuación se describen las variables más influyentes.

4.1 Tipos de reactores operacionales

La gasificación de los materiales combustibles empleados se puede realizar en diferentes reactores. El tipo de gasificador condiciona la cinética de reacción, los rendimientos, la composición de los productos y la formación de especies contaminantes (Elías, 2005; Good y col., 2005; Knoef, 2005). Existen diversas posibilidades para clasificar los distintos tipos de gasificadores, en función de: tipo de agente gasificante, tipo de contacto gas-sólido, dirección y velocidad relativa gas-sólido, presión de trabajo y forma de aportar el calor al reactor. Según esta última, los gasificadores se pueden dividir en dos grupos:

- Directos: Son aquellos en los que el calor necesario se consigue mediante combustión parcial de parte del combustible.
- Indirectos: Aquellos en los que el calor suministrado al reactor se aporta desde el exterior.

En cuanto al tipo de contacto existen tres categorías:

- Gasificador de lecho fijo:

Se caracterizan por un lecho de combustible que se mueve lentamente hacia abajo por acción de la gravedad mientras se gasifica, alimentándose el gas en sentido descendente (isocorriente o *Downdraft*) o ascendente (contracorriente o *Updraft*). Ambos tipos presentan el inconveniente de unos requisitos exigentes para el combustible (distribución

de tamaño de partículas, humedad, etc.) (Kurkela, 2004). Además, existe otro tipo de gasificador de lecho fijo llamado *Crossdraft*.

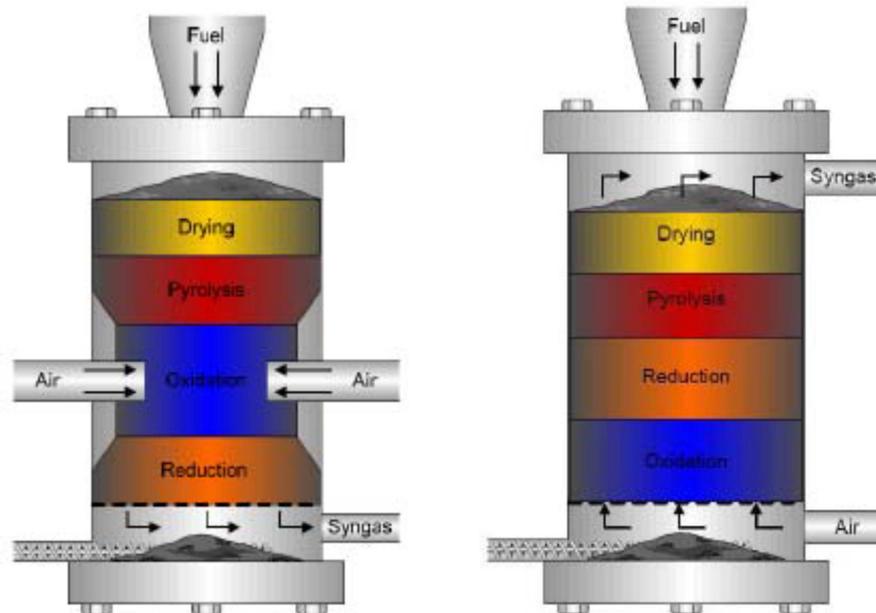


Figura 2. Gasificador de lecho fijo “downdraft” (izquierda) y “updraft” (derecha) (Bull, D., 2008).

- Los gasificadores en isocorriente (Downdraft) (Figura 2) se caracterizan por generar un gas relativamente limpio de alquitranes y con una conversión de carbono elevada. La temperatura de salida es alta, debido a que el gas atraviesa la zona de oxidación antes de salir del reactor. Sin embargo, su capacidad específica es baja y su potencial de escalado, muy limitado. En estos gasificadores, sólido y gas se mueven en el mismo sentido, normalmente descendente. Este gasificador es de fácil construcción y operación. La tendencia actual es a unir las zonas de pirólisis y oxidación en una sola, de forma que los productos de pirólisis se forman y se queman simultáneamente, por lo que en una zona inferior se produce la reducción de forma análoga al Downdraft tradicional. La principal ventaja de este tipo de gasificador es la de producir un gas relativamente limpio de alquitranes, aunque a una temperatura más alta que mediante el Updraft. Sin embargo, no es muy apto para trabajar con sólidos de humedad elevada, y la experiencia que se tiene de estos tipos de gasificadores acoplados a plantas de cierta potencia es escasa.
- Los gasificadores en contracorriente (Updraft) (Figura 2) presentan una eficiencia térmica más elevada, al ser la temperatura de salida baja, pero con el inconveniente de la elevada carga de alquitranes en el gas producto, lo que obligaría a una exhaustiva limpieza del gas para su uso en determinadas aplicaciones. Aunque sustancialmente mayores que en el caso de los gasificadores en isocorriente, el potencial de escalado y la capacidad

específica siguen siendo bajos. En el gasificador *Updraft*, sólido y gas se mueven en sentidos contrarios, donde el sólido normalmente va en sentido descendente y el gas ascendente.

Este gasificador es de fácil construcción y operación, y su eficacia térmica es alta. La baja temperatura de salida del gas, adecuada para combustión directa, es otra ventaja. El principal inconveniente es que el gas producido contiene los alquitranes y condensables producidos en el proceso de pirólisis inicial de las partículas, por lo que el proceso de limpieza del gas puede volverse tecnológicamente complejo y económicamente costoso. Esta clase de gasificador ha sido probado principalmente en plantas de poca potencia.

- o Los gasificadores *Crossdraft* se diferencian de los anteriores en que el agente oxidante se introduce por un lateral del reactor y el syngas sale por el lateral contrario. En este caso, las etapas de gasificación suceden de manera concéntrica a la zona de entrada del agente oxidante. Esto hace que se pueda funcionar con reactores a pequeña escala. En cuanto a la principal desventaja, es su alto contenido en alquitranes.

- Gasificador de lecho fluidizado:

Son aquellos en los que el agente gasificante circula por el interior de los mismos a una velocidad ascensional tal que un lecho de sólido inerte, que se añade a su interior, se encuentra en estado de fluidización, existiendo en el interior del gasificador una retromezcla que favorece la transferencia de materia y energía entre el combustible y el gas. Por tanto, el sólido pulverizado es mantenido en suspensión mediante el gas. En estas condiciones, el contacto sólido-gas, la uniformidad en temperatura y conversión son mayores que en los reactores de lecho fijo. Se reduce a sí mismo la tendencia de las partículas a aglomerarse pudiendo adicionarse agentes gasificantes a diferentes niveles. Sin embargo, la complejidad de los equipos aumenta, produciéndose mayor desgaste debido a las mayores velocidades de los sólidos. En este tipo de gasificador, el carburante es fluidizado en una mezcla de vapor de agua y oxígeno o en el aire. Las partículas minerales se recuperan como cenizas. Tiene una alta capacidad específica frente a otros tipos de reactores, aunque el material usado como materia prima debe tener un tamaño de partícula muy reducido.

Debido a la mejor transferencia de calor, los lechos fluidos permiten el procesamiento de una mayor cantidad de material combustíbel y una mayor producción de gases de reacción. Al ser la temperatura uniforme en todo el lecho, la reacción de gasificación tiene lugar, igualmente, de forma uniforme, lo que favorece la calidad de los gases generados (Warnecke, 2000).

La mayoría de los gasificadores en desarrollo utilizan una de las dos configuraciones de lecho fluido existentes, el burbujeante y el circulante (Figura 3) (van der Drift y col., 2001; Harris y col., 2003; Saiga y col., 2004; Gómez-Barea y col., 2006; Tatsumi y col., 2007; Gómez-Barea y col., 2008). Por lo tanto, existen dos categorías dentro de este tipo de gasificadores:

- Lechos fluidizados burbujeantes: la velocidad del agente fluidizante-gasificante es suficientemente baja para que no haya una circulación significativa de sólido.
- Lechos fluidizados circulantes: la velocidad del agente es mucho más elevada, dando como resultado una circulación de sólidos. Este sólido es separado de la corriente gaseosa y recirculado al reactor por medio del uso de un ciclón y un sistema de retorno al gasificador (Grace, 1997).

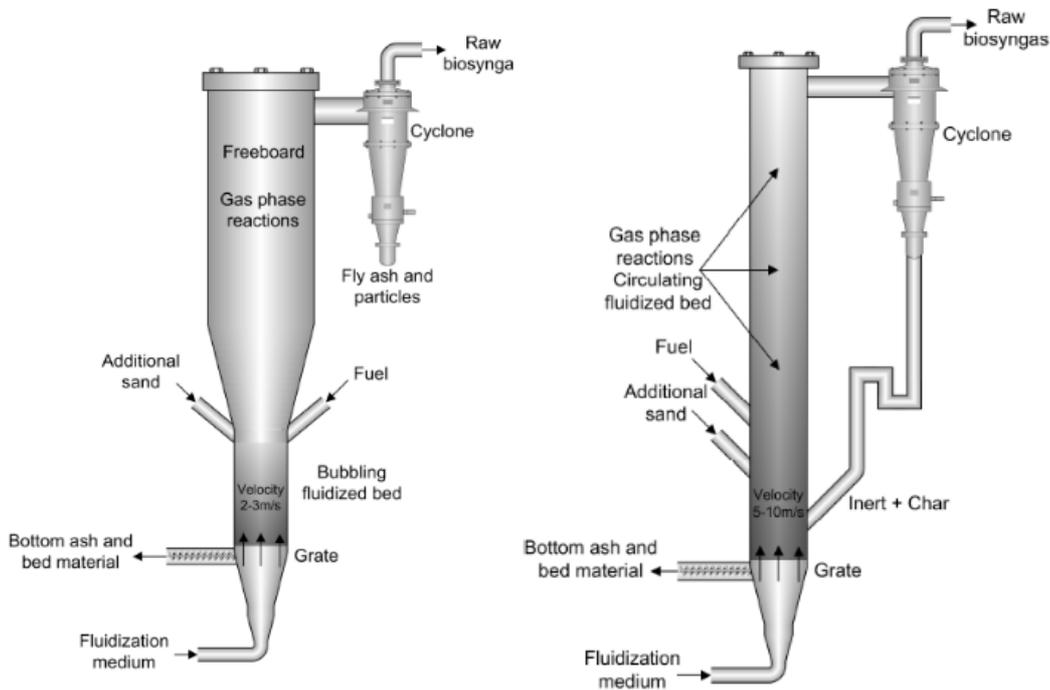


Figura 3. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante (izquierda) circulante (derecha) (Bull, D., 2008).

En cualquier caso, una característica común a los diversos tipos de lechos fluidos (junto con el buen contacto sólidos-gas, la alta capacidad específica, el excelente control de las condiciones como la temperatura y las velocidades de reacción, potencial de escalado a mayores tamaños y adaptación a cambios de combustible empleado como materia prima), es un contenido medio en alquitranes para el gas de salida, y como principal desventaja, un importante arrastre de sólidos y la conversión del combustible no es tan elevada como en los gasificadores de lecho fijo.

- Gasificador de lecho arrastrado:

Funcionan, de manera aproximada, como calderas de carbón pulverizado. Operan en isocorriente con un tamaño de partícula muy fino, ya que los tiempos de residencia en el reactor son muy bajos. Las altas temperaturas de operación dan como resultado conversiones muy elevadas y concentraciones de alquitrán en el gas de salida prácticamente nulas. Sin embargo, es una tecnología sobre la que existe poca experiencia para la gasificación de biomasa (Figura 4).

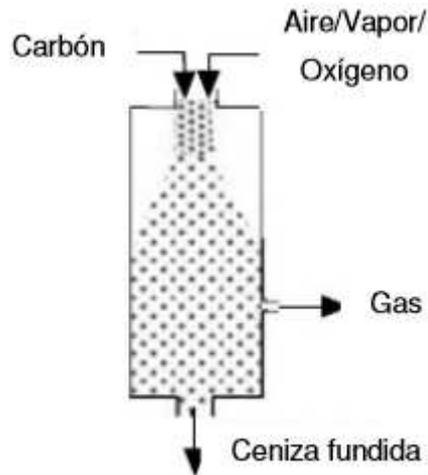


Figura 4. Gasificador de lecho arrastrado (Bull, D., 2008).

- Gasificador de horno rotativo

El funcionamiento de este tipo de reactor presenta similitudes con los gasificadores de lecho móvil pero tiene sus propias características. En lo que tiene que ver con la parte mecánica, facilita el desplazamiento de los sólidos, lo que hace más fácil el funcionamiento en continuo del sistema. Estos hornos están levemente inclinados y tienen una rotación lenta que permite el tránsito de la materia a gasificar. El gas puede circular en contracorriente o en corriente paralela con el sólido, teniendo en cada caso sus ventajas e inconvenientes, pudiendo establecerse en algunos casos una analogía con el *Updraft* y el *Downdraft*.

La totalidad del oxígeno del aire que entra por el extremo caliente del horno es consumido en el proceso de combustión. Esto permite que el gas que sale por el otro extremo del horno tenga una composición carente de oxígeno, y rica en gases combustibles. Otra consecuencia es que el volumen de gas combustible producido es mínimo, lo que facilita su tratamiento de cara a realizar una combustión más limpia.

- Gasificación por plasma

El plasma es la ionización de un flujo gaseoso, eléctricamente neutro, por medio de un campo electromagnético. Es un gas ionizado que contiene partículas eléctricamente cargadas (electrones e iones), neutras (átomos, moléculas y fotones), y átomos excitados. Conduce la electricidad y es sensible a los campos magnéticos. Las antorchas de plasma consiguen concentrar mucha energía (105 W/cm^2) en una zona reducida por medio de la ionización con arco eléctrico de un gas (generalmente aire). La temperatura que se alcanza es de 2.000 a 4.000°C por lo que se consigue vitrificar las cenizas y eliminar completamente la fracción orgánica (Hera Holding, 2009).

Un reactor con antorcha de plasma consiste en un recipiente en ausencia de oxígeno donde la altísima temperatura producida permite romper los enlaces moleculares, formando un gas de síntesis y una lava fundida que al enfriar se transforma en un

producto vítreo inerte. Por tanto, este tipo de reactor transforma los residuos en un material vitrificado más unos metales (corriente sólida), y un gas combustible más vapor de agua (corriente gaseosa), compuesto principalmente por H₂, CO y N, Cl, S. Siendo la reducción en peso y en volumen superior al 90%. El gas de síntesis generado contiene polvo (partículas) y otros elementos indeseables por lo que debe someterse a un proceso de limpieza para que pueda ser apto su aprovechamiento energético. Para el caso de los RSU, la limpieza del gas consiste en la eliminación de partículas, separación de azufre y mercurio y eliminación de metales pesados.

El plasma es una forma novedosa de gasificación de residuos (Nishikawa y col., 2004; Moustakas y col., 2005; Lemmens y col., 2007). Su aplicación a RSU no está bien documentada aunque empresas como BluePlasma Power (<http://www.blueplasmapower.com/>) comercializan esta tecnología. Desde el punto de vista técnico, el plasma es útil para residuos que contengan sustancias orgánicas e inorgánicas. Desde un punto de vista económico, interesan residuos que no tengan otro tipo de tratamiento o aprovechamiento por ser muy caro, inaccesible o inexistente y/o su destino final sea vertedero.

Las ventajas del uso de esta tecnología son: la obtención de un gas de síntesis con gran poder calorífico; la energía recuperada es superior al equivalente térmico de la electricidad consumida (excepto para residuos con PCI bajos); se consigue una fusión de los compuestos inorgánicos con la formación de una lava vítrea inerte; el empleo de material fluidizante mejora la viscosidad de la lava y proporciona la basicidad necesaria para garantizar la no lixiviabilidad de los metales pesados y sus óxidos; hay una producción mínima de rechazos; ausencia de dioxinas, furanos, cenizas y escorias; gas de síntesis libre de alquitranes; se obtiene una lava vitrificada y una torta de azufre, que son aprovechables; la transmisión de calor es muy efectiva; al ser un proceso pirolítico, no precisa de oxígeno; es un tratamiento muy rápido; flexibilidad de materia prima permitiendo mezclar distintos materiales residuales; se puede utilizar para producir electricidad, combustibles líquidos, calor o gas de síntesis para reemplazar los combustibles fósiles.

Los inconvenientes son los siguientes: las elevadas temperaturas dañan los refractarios; el funcionamiento del plasma es muy sensible a las alteraciones del voltaje; coste de instalación y de explotación relativamente caros; y falta de isoterminia (calor generado por un foco puntual).

En general, los reactores de lecho fijo son los que hasta ahora se han estado desarrollando a nivel comercial más rápidamente, aunque los de lecho fluidizado, debido a las ventajas que presentan en cuanto a flexibilidad y homogeneidad en la producción a gran escala, se espera que sean los más utilizados (Perales, J.F., 2002). En la tabla 3 se pueden observar algunos de los reactores más comercializados.

PROCESO		PRESIÓN	AGENTE GASIFICANTE	
Lecho descendente (fijo)	Sin fusión de cenizas	Lurgi	Atm – 85 bar	Aire u oxígeno
		Foster Wheeler Stoic	Atm	Aire
		De dos etapas (Babcock W-D)	Atm	Aire u oxígeno
	Con fusión de cenizas	Lurgi British Gas	25 bar	Oxígeno
Lecho fluidizado	Sin aglomeración	Winkler	Atm – 40 bar	Aire u oxígeno
	Con aglomeración	Westinghouse	30 bar	Aire u oxígeno
Lecho de arrastre	Alimentación seca	KBW	Atm	Oxígeno
		Shell	30 bar	Aire u oxígeno
		Combustión Engineering	Atm	Aire u oxígeno
	Alimentación slurry	Texaco	30 – 80 bar	Aire u oxígeno
	Medio de reacción fundido	Saaberg-Otto	25 bar	Aire u oxígeno
Reactor rotativo		KILnGAS	Atm – 8 bar	aire

Tabla 3. Tabla descriptiva de los tipos de gasificadores más comercializados (Perales, J.F., 2002).

4.2 Agentes gasificantes

La presencia de distintos agentes gasificantes influye en la composición de los gases de reacción (Hackett y col., 2004), lo que determinará su poder calorífico y sus aplicaciones potenciales como combustible o en procesos de síntesis química (EC, 2001; Fytily y Zabaniotou, 2008). Éstos se introducen para aportar calor y fluidizar el sólido. Es necesario que el agente gasificante escogido contenga el oxígeno necesario para la combustión parcial del residuo empleado.

4.2.1 Gasificación con aire

El oxígeno del aire permite una combustión parcial que aporta la energía para mantener la reacción de gasificación (procesos autotérmicos). Debido a la dilución del oxígeno por el nitrógeno atmosférico, el gas de síntesis resultante tiene un contenido energético bajo, que se estima entre 4 y 7 MJ/Nm³ (Delgado y col., 1997; Li y Col., 2004). Este gas puede emplearse como combustible en calderas, turbinas de gas o motores de combustión interna.

4.2.2 Gasificación con oxígeno

El gas de gasificación tiene un mayor contenido energético (10-15 MJ/Nm³) (Saxena y col., 2008) puesto que no se encuentra diluido en nitrógeno. Tiene el inconveniente del coste de la generación del oxígeno. Además de las aplicaciones descritas para la gasificación con aire, el gas de síntesis generado puede usarse, tras un tratamiento adecuado, en la producción de compuestos orgánicos (Ciferno y Marano, 2002).

4.2.3 Gasificación con aire/oxígeno + vapor de agua

La presencia de vapor de agua permite enriquecer el gas de síntesis en H_2 y CO (Lv y col., 2007) por lo que se puede aumentar ligeramente su contenido energético ($10-20 MJ/Nm^3$). Además de su empleo como combustible, puede utilizarse en la síntesis de metanol, amoníaco o combustibles líquidos (Ciferno y Marano, 2002).

4.2.4 Gasificación con presencia de hidrógeno

Otras opciones descritas en los estudios sobre gasificación pueden ser en presencia de hidrógeno o la gasificación en presencia de catalizadores. El gas de síntesis generado en presencia de hidrógeno tiene un contenido energético mayor ($>30 MJ/Nm^3$), ya que se favorece la formación de metano y olefinas.

4.2.5 Gasificación con aire/oxígeno + catalizadores

El uso de catalizadores aumenta el rendimiento de conversión y/o reduce la presencia de especies contaminantes como los alquitranes (Sutton y col., 2001; Bridgwater, 2003). Una de las alternativas más interesantes para la eliminación en caliente de los alquitranes es el reformado catalítico con vapor de agua (Corella y col., 2008). Esta técnica tiene una serie de ventajas como que la temperatura del reactor con catalizador pueda ser integrada térmicamente con la temperatura de salida del gasificador, que la composición del gas producido puede ser ajustada mediante el catalizador (Dalai y Sasaoka, 2003), y finalmente, que se pueda añadir vapor al reactor catalítico para asegurar el completo reformado de los alquitranes (Delgado y col., 1996).

Los catalizadores aplicados a los sistemas de gasificación pueden agruparse en función de su naturaleza química o en función de su posición y finalidad. En cuanto a su naturaleza química, se agrupan en: basados en metales alcalinos, óxidos metálicos, y metálicos en soporte (Dayton, 2002; Devi y col., 2003; Abu El-Rub y col., 2004). Por lo que se refiere a su posición y finalidad, puede hablarse de primarios, si se colocan en el gasificador para producir un gas lo más limpio posible, o secundarios, si se sitúan después del gasificador para limpiar el gas producido en el mismo (Abu El-Rub y col., 2004; Manyá y col., 2005).

4.3 Efecto de la temperatura en las reacciones de gasificación

La temperatura afecta a la termodinámica y cinética de las reacciones en el gasificador y con ello a la formación de alquitranes, de tal forma que debería ser lo más alta posible (Corella y col., 2008). Para que la cinética del proceso sea adecuada, la mayoría de los procesos de gasificación tienen lugar a temperaturas entre $700-900^\circ C$ (Dayton, 2002). Desde el punto de vista cinético, un incremento en la temperatura supone una mayor concentración de H_2 , CO y C_2H_m y con ello, un aumento del poder calorífico del gas producido (Narváez y col., 1996).

4.4 Efecto de la presión en las reacciones de gasificación

Presiones elevadas incrementan la concentración de metano y dióxido de carbono producidos, mientras que las concentraciones de H₂ y CO disminuyen (Higman y col, 2003; Klass, 1998). Muchos gasificadores operan a altas presiones. La razón por la que operan a elevadas presiones es debido a que los requerimientos de compresión de la energía son menores y los equipos pueden ser más pequeños, mejorando la viabilidad económica. La presión en el gasificador es generalmente seleccionada de acuerdo con los requerimientos de los procesos de flujos del equipo. Cuando presiones elevadas son necesarias, la compresión de los reactivos es energéticamente superior a la compresión del gas producido (Higman y col. 2003).

4.5 Efecto de la materia prima empleada

La materia prima en los procesos de gasificación es el carbonizado proveniente de los procesos de pirólisis. La porosidad y la distribución del tamaño de esos poros determinarán el área superficial que queda disponible para que tenga lugar la reacción y la facilidad con la cual los reactantes gaseosos y los productos pueden desplazarse por la superficie (Gómez, Ad., 2002). De este modo, una gran área superficial se obtiene cuando la pirólisis se lleva a cabo completamente y a altas temperaturas (Gómez, Ad., 2002).

Los compuestos inorgánicos que pueden estar presentes en el carbonizado pueden tener un efecto catalizador o inhibidor en las reacciones de pirólisis y gasificación (Bellais, M., 2007; Moilanen, A., 2006), lo que depende de la composición química y peso de las cenizas en el carbonizado. Las cuales a altas temperaturas y bajo ciertas condiciones, pueden sufrir aglomeraciones y quedar depositadas dentro del gasificador y bloquear el flujo de material combustible.

4.6 Efecto del tamaño de partícula

Con tamaños de partícula pequeños se reduce la formación de carbonizado (Di Blasi, C., 1996). Esto es debido a que la muestra se calienta homogéneamente y la materia volátil tiene mayor facilidad para abandonar la partícula, ya que la distancia que debe recorrer ésta desde el interior de la partícula hasta su superficie es menor que el recorrido que debería hacer en materiales con partículas de mayor tamaño. Esto provoca la minimización de las reacciones secundarias, por lo que hay una disminución en la formación de carbonizado conforme más pequeñas sean las partículas. Por el contrario, los tamaños pequeños de partículas dan lugar a una bajada importante de la presión en el interior del gasificador.

4.7 Efecto de la altura del lecho

El efecto de esta variable es similar al que se produce al variar el tamaño de partícula. Si aumenta la altura del lecho, el material que se encuentra en su interior no deja que los gases que se producen en las reacciones primarias abandonen fácilmente el lecho y sufren conversiones secundarias (reacciones secundarias). Esto provoca una mayor formación de carbonizado y una reducción en la formación de alquitranes. Al igual que ocurre con tamaños de partícula mayores, con alturas de lecho menores la formación de carbonizado y gas es más baja y la formación de alquitranes mayor.

4.8 Efecto del tiempo de residencia

El tiempo de residencia puede variar la composición química del gas de síntesis, ya que determina el tiempo de reacción entre el agente gasificante y el carbonizado producto de la pirólisis. En términos generales si aumenta el tiempo de residencia la cantidad de material sólido disminuye produciéndose una disminución a su vez, de los alquitranes al favorecerse las reacciones secundarias.

4.9 Otras variables que influyen en las reacciones de gasificación

- El estado de fluidización del lecho del reactor: se define como el cociente entre la velocidad superficial del gas y la velocidad mínima de fluidización. El estado de fluidización junto con el diámetro de la partícula define los distintos regímenes de fluidización. La influencia de una variación del estado de fluidización se traduce en la influencia que ejerce una variación de la velocidad superficial en el agente gasificante sobre el proceso. La influencia se puede relacionar con el contacto gas-sólido existente en las reacciones heterogéneas, la generación de las burbujas, la turbulencia generada y el tiempo de residencia del gas en el interior del reactor. Un aumento en el valor del estado de fluidización supone un incremento en el contenido de N_2 . Por otro lado, provoca una disminución en el tiempo de residencia de los distintos componentes en la zona de reacción y como consecuencia se espera una disminución en la conversión del residuo empleado (Moreno, F.J., 2010).
- Ratio equivalente: indica el estado del sistema en función a la concentración estequiométrica de oxígeno requerida para que tenga lugar una combustión completa. Si se da un aumento del ratio se favorece el rendimiento de las reacciones de oxidación, generando un mayor volumen de gases de reacción. Sin embargo, la proporción de gases combustibles es menor (H_2 , CO y CH_4) por lo que el poder calorífico del gas es reducido (Gil y col., 1999; Orío y col., 1997).
- Ratio H/C y S/B: El ratio H/C es el cociente entre los moles de hidrógeno y los de carbono que hay presentes en el interior del gasificador. El ratio S/B describe la relación entre la cantidad de agua y la cantidad de material a gasificar. Estos ratios pueden ser ajustados aumentando y disminuyendo la presencia de agua en el sistema. Un ratio H/C alto aumenta el contenido en H_2 y CO en los gases de reacción y reduce la cantidad de alquitranes generados (Narváez y col., 1996), mientras que aumentos del ratio S/B incrementan el contenido en H_2 y CO_2 , pero disminuyen el de CO , debido a la reacción de water gas shift (Gil y col., 1999). El aumento de estos ratios requiere un mayor consumo energético en el proceso.

5. Conclusiones

Del estado actual del tratamiento de los RSU en España en el año 2011, se ha determinado que se genera un porcentaje alto de material de rechazo que puede ser aprovechado energéticamente. Ante esta información, se puede decir que existe una vía, todavía en fase de desarrollo, de aprovechamiento de combustibles alternativos y altamente disponibles como son los combustibles sólidos recuperados mediante recuperación energética en procesos de gasificación.

Aunque no existe una estequiometría exacta del proceso de gasificación, existen una serie de ecuaciones que describen el proceso y deben ser tenidas en cuenta para maximizar la conversión del carbono. Es importante el estudio de estas ecuaciones, ya que el predominio de alguna de ellas favorecerá la formación de unos elementos u otros que darán lugar a un gas de síntesis con unas condiciones determinadas para ser usado con diferentes fines.

Existen numerosas variables que influyen de manera importante en la obtención de los productos del proceso, y principalmente en el poder calorífico del gas de síntesis y en su posterior uso. Por un lado, se tiene el tipo de reactor o dispositivo de contacto entre el combustible y el comburente (gasificador) escogido y que deben adaptarse a las necesidades de la materia prima empleada como combustible y del gas de síntesis a obtener. Entre estos podemos destacar la gasificación por plasma. Tecnología novedosa y que posibilita el aprovechamiento energético de residuos que actualmente es difícil de hacerlo a través de la gasificación convencional. Por otro lado, existen otra serie de variables operacionales influyentes en el proceso como son el empleo de agentes gasificantes; las modificaciones de temperatura y presión; el uso de distintos catalizadores; la altura del lecho; la materia prima empleada en el proceso; el tiempo de permanencia de los gases en los reactores, etc., Así, el proceso variará completamente según estos parámetros o variables.

6. Referencias

- Abu El-Rub, Z.; Bramer, E.A.; Brem, G. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004, 43, 6911-6919.
- Antal, M.J. and Várhegyi, G. (1995). "Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge", *Ind. Eng. Chem. Res.* 34, 703-717.
- Ballesteros, M. Curso de formación del profesorado en el área de las energías renovables: Biomasa. CIEMAT. 2001.
- Bellais, M.: Modelling of the pyrolysis of large wood particles. Stockholm, Suecia, Departamento de ingeniería química y tecnología. KTH - Royal Institute of Technology, Tesis de Doctorado, 2007.

- Bridgwater, A.V. (2003) Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91 (2-3), 87-102.
- Bull, D. Performance Improvements to a Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB) Biomass Gasifier for Combined Heat and Power Plants. University of Canterbury, 2008.
- Ciferno, J.P.; Marano, J.J. Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, June 2002.
- Corella, J.; Toledo, J.M.; Molina, G. Calculation of the Conditions to Get Less than 2 g/mn³ in a Fluidized Bed Biomass Gasifier. *Fuel Processing Technology* 2006, 87, 841-846.
- Corella, J.; Toledo, J.M. and Molina, G. (2008) Biomass gasification with pure steam in fluidised bed: 12 variables that affect the effectiveness of the biomass gasifier. *Int. J. Oil, Gas and Coal Technology*. 1, No. ½, 194-207.
- Dalai, A.K. and Sasaoka, E. (2003) Catalytic gasification of Sawdust Derived from Various Biomass. *Energy and Fuels*. 17, 1456-1463.
- Dayton, D. (2002), A review of the literatura on catalytic biomass tar destruction. Milestone Completion Report. National Renewable Energy Laboratory U.S, NREL/TP-510-32815.
- Delgado, J.; Aznar, M.P.; Corella, J. Calcined Dolomite, Magnesite, and Calcite for Cleaning Hot Gas from a Fluidized Bed Biomass Gasifier with Steam: Life and Usefulness. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996, 35, 3637-3643.
- Delgado, J.; Aznar, M.P.; Corella, J. Biomass Gasification with Steam in Fluidized Bed: Effectiveness of CaO, MgO, and CaO-MgO for Hot Raw Gas Cleaning. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 1535-1543.
- Devi, L; Ptasiński, K.J.; Janssen, F.J.J.G. A Review of the Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. *Biomass & Bioenergy* 2003, 24, 125-140.
- Di Blasi, C.: Kinetic and heat transfer control in the slow and flash pyrolysis of solids. *En: Industrial Eng. Chem.* 35 (1996), p. 37-46
- Dogru, M.; Midilli, A. and Howarth, C.R. (2002), Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology*, 75 (1), 55-82.

- Dogru, M.; Akay, G.; Midilli, A.; Calkan, O.F. and Howarth, C.R. (2005), Gasification of Biomass as a Source of Hydrogen Rich Syngas Production. International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005 Istanbul, Turkey, 13-15 July.
- EC (2001) Disposal and recycling routes for sewage sludge. Part 3 – Scientific and technical report ISBN 92-894-1800-1, European Commission, Luxembourg.
- EEA (1997) Sludge Treatment and Disposal. Management Approaches and Experiences. Environmental Issues Series, nº 7. European Environment Agency.
- Elías, X. (2005), Tratamiento y valorización energética de residuos. Editorial: Díaz de Santos.
- Eurostat Newsrelease. Municipal Waste Generated (2007-2010).
- Fytily, D. and Zabaniotou, A. (2008) Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (1) 116-140.
- Gallardo, A. Edo, N., Cuquerella, J. & Pascual P. (2012). Análisis del rendimiento de las plantas de clasificación de residuos de envases en España: Valorización de sus rechazos. *RETEMA*, 163, 44-54.
- Gallardo, A.; Edo, N.; Colomer F.J.; Gómez, A. Estudio comparativo de varios CSR procedentes de los rechazos de diferentes procesos de tratamiento de RSU, XVIII Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos, Julio 2014.
- Gil, J.; Corella, J.; Aznar, M.P.; Caballero, M.A. Biomass Gasification in Atmospheric and Bubbling Fluidized Bed: Effect of the Type of Gasifying Agent on the Product Distribution. *Biomass & Bioenergy* 1999, 17, 389-403.
- Gómez, Ad.: Investigación del Proceso de Gasificación de Biomasa en un Gasificador en Paralelo. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Grado, 2002.
- Gómez-Barea, A.; Campoy, M.; Ollero, P.; Fernández-Pereira, C. Pilot Plant Experiences with Fluidised Bed Gasification of Orujillo and MBM. *19th International Conference on Fluidised Bed Combustion*, Vienna, Austria, May 21 – 24, 2006; Paper 66.
- Gómez-Barea, A.; Campoy, M.; Nilsson, S.; Fuentes, D.; Plumed, M.J.; Villanueva, A.; Ollero, P. Valorisation of Dried Sewage Sludge via Gasification in Fluidised Bed. *16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, Spain*, June 2 – 6, 2008; Paper VP2.1.7.

- Good, J.; Ventress, L.; Knoef, H.; Zielke, U.; Lyck Hansen, P.; van de Kamp, W.; de Wild, P.; Coda, B.; van Pasen, S.; Kiel, J.; Sjostrom, K.; Lilledahl, T.; Unger, Ch.; Neeft, J.; Suomalainene, M.; Simell, P. Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. Technical Report. CEN BT/TF 143 "Organic contaminants ("tar") in biomass producer gases. July 2005.
- Gómez-Barea, A.; Vilches, L.F.; Leiva, C.; Campoy, M.; Fernández-Pereira, C. Plant Optimisation and Ash Recycling in Fluidised Bed Waste Gasification. *Chemical Engineering J.* 2009, 146, 227-236.
- Grace, J.R.; Knowlton, T.M.; Avidan, A.A. (Editores). *Circulating Fluidized Beds*, 1st Edition; Chapman & Hall: London (UK), 1997.
- Hackett, C.; Durbin, T. D.; Welch, W.; Pence, J.; Williams, R. B.; Jenkins, B. M.; Salour, D. and Aldas, R. (2004) Evaluation of Conversion Technology Processes and Products. Draft Final Report. Integrated Waste Management Board. State of California.
- Harris, A.T.; Scott, S.A.; Dennis, J.S.; Hayhurst, A.N.; Davidson, J.F. The Gasification of Sewage Sludge in Bubbling Fluidized Beds. *17th International Fluidized Bed Combustion Conference, Jacksonville (Florida), USA*, May 18 – 21, 2003; Paper 070.
- Higman, C. and Burgt, M. (2003). *Gasification*: Vulf Professional Publishing.
- Klass, D.L. (1998). *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals*: Academic Press.
- Knoef, H.A.M. (2005) *Handbook of Biomass Gasification*. Netherlands: BTG Biomass Technology Group.
- Kurkela, E.; Nieminen, M.; Simell, P. Development and Commercialisation of Biomass and Waste Gasification Technologies from Reliable and Robust co-Firing Plants Towards Synthesis Gas Production and Advanced Power Cycles. *2nd World Biomass Conference, Rome, Italy*, May 10 – 14, 2004; Paper PA1.4.
- Lemmens, B.; Elslander, V.; Vanderreydt, I.; Peys, K.; Diels, L.; Osterlinck, M. and Joos, M. (2007) Assessment of plasma gasification of high caloric Waste streams. *Waste Management*, In Press.
- Li, X.T.; Grace, J.R.; Lim, C.J.; Watkinson, A.P.; Chen, H.P.; Kim, J.R. (2004) Biomass gasification in a circulating fluidized bed. *Biomass and Bioenergy*. 26 (2) 171-193.
- Lv, P.M.; Chang, J.; Xiong, Z.; Huang, H.; Wu, C.; Chen, Y. Biomass Air-Steam Gasification in a Fluidized Bed to Produce Hydrogen-Rich Gas. *Energy & Fuels* 2003, 17, 677-682.

- MAGRAMA (2013). *Anuario de estadística 2012*. Madrid, MAGRAMA. Obtenido de: http://www.magrama.gob.es/estadistica/pags/anuario/2012/AE_2012_Completo.pdf.
- Manyá, J.J.; Sánchez, J.L.; Gonzalo, A.; Arauzo, J. Air Gasification of Dried Sewage Sludge in a Fluidized Bed: Effect of Operating Conditions and In-Bed Use of Alumina. *Energy & Fuels* 2005, 19, 629-636.
- Moilanen, A.: Thermogravimetric characterisations of biomass and waste for gasification processes. Vuorimiehentie, Finland, VTT Technical Research Centre of Finland, Tesis de Grado, 2006.
- Moratorio, D.; Rocco, I. Proyecto para la conversión de residuos en energía, Tesis de Grado, Universidad de Montevideo, Diciembre 2011.
- Moreno, F.J., Proyecto para la simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante, Tesis de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, Febrero 2010.
- Moustakas, K.; Fatta, D.; Malamis, S.; Haralambous, K. and Loizidou, M. (2005) Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous Waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 123 (1-3) 120-126.
- Narváez, I.; Corella, J.; Orío, A. Fresh Tar (from a Biomass Gasifier) Elimination over a Commercial Steam-Reforming Catalyst. Kinetics and Effect of Different Variables of Operation. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 317-327.
- Orío, A.; Corella, J.; Narváez, I. Performance of Different Dolomites on Hot Raw Gas Cleaning from Biomass Gasification with Air. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 3800-3808.
- Perales, J.F. Desulfuración de gas de síntesis a alta temperatura y presión por absorción en óxidos regenerables. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- Saiga A.; Ito, M.; Kataoka, S.; Takeya, R.; Amano, T. The Development of CFB Gasification System for Sewage Sludge (Part 1: Experiment At The Pilot Scale CFB Gasifier). *2nd World Biomass Conference, Rome, Italy, May 10 – 14, 2004*; Paper V2A.79.
- Saxena, R.C.; Seal, D.; Kumar, S. and Goyal, H.B. (2008) Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 12 (7) 1909-1927.
- Sutton, D.; Kelleher, B.; Ross, J.R.H. Review of Literature on Catalysts for Biomass Gasification. *Fuel Processing Technology* 2001, 73, 155-173.

- Tastsumi K.; Hayashi H.; Saiga, A.; Nogami H.; Hondo, M.; Saito, H.; Haneda, T.; Amano, T. The Demonstration of CFB Gasification for Sewage Sludge - Report No. 2. *15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany, May 7 – 11, 2007*; Paper V2.1.1.20.
- van der Drift A.; van Doorn J.; Vermeulen J.W. Ten Residual Biomass Fuels for Circulating Fluidized-bed Gasification. *Biomass & Bioenergy* 2001, 20, 45-56.
- Warnecke, R. (2000) Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 18 (6) 489-497.