

# **Análisis de la aportación al autoabastecimiento energético del Syngas obtenido a partir de la gasificación inicial de residuos**

Trabajo de Fin de Grado. Ingeniería Química Industrial

Curso 2020-2021

**Autor:**

Esther Edurne Acuña Ramírez

**Tutores:**

Luis Antonio González Mendoza

Laura Díaz Rodríguez

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

Escuela superior de Ingeniería y Tecnología

Universidad de La Laguna

## ÍNDICE

RESUMEN .....	4
SUMMARY .....	5
NOMENCLATURA .....	6
1. ANTECEDENTES .....	8
2. PROCESOS TERMOQUÍMICOS .....	9
3. ETAPAS DE LA GASIFICACIÓN.....	11
3.1. Secado.....	13
3.2. Pirólisis .....	14
3.3. Oxidación o combustión .....	14
3.4. Gasificación y reducción de los residuos carbonosos .....	16
4. VARIABLES DE OPERACIÓN .....	18
4.1. Temperatura .....	18
4.2. Presión.....	19
4.3. Relación agente gasificante/residuo.....	19
4.4. Relación de equivalencia .....	20
4.5. Relación H/C.....	20
4.6. Relación vapor – alimentación .....	21
4.7. Altura del lecho .....	21
4.8. Estado de fluidización del lecho del reactor.....	21
4.9. Tiempo de residencia en el reactor .....	22
5. GAS DE SÍNTESIS.....	22
6. AGENTES GASIFICANTES .....	24
7. MATERIAS PRIMAS PARA GASIFICACIÓN.....	25
8. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA GASIFICACIÓN.....	33
8.1. Gasificadores de parrilla.....	35
8.2. Gasificadores de lecho fijo .....	35

8.3. Gasificadores de lecho fluidizado .....	39
8.4. Gasificación por plasma: .....	44
9. LIMPIEZA O PURIFICACIÓN DEL SYNGAS .....	46
9.1. Eliminación de partículas: .....	50
9.2. Eliminación de gas ácido.....	52
9.3. Eliminación metales alcalinos .....	56
9.4. Eliminación de compuestos nitrogenados .....	57
9.5. Eliminación de haluros .....	57
9.6. Eliminación de alquitranes .....	59
10. MEJOR TECNOLOGÍA PARA LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS .....	64
11. CUANTIFICACIÓN EN CANARIAS DE LOS RESIDUOS QUE PODRÍAN SER SOMETIDOS A GASIFICACIÓN.....	67
12. CUANTIFICACIÓN DEL SYNGAS PRODUCIDO POR LOS RESIDUOS GENERADOS EN CANARIAS .....	69
13. CONCLUSIONES .....	71
14. CONCLUSIONS .....	73
15. BIBLIOGRAFÍA.....	75

## RESUMEN

La creciente contaminación del medio ambiente causada por los gases de efecto invernadero, generados especialmente por el uso masivo de combustibles fósiles, y el aumento del precio del petróleo, ha hecho que, a lo largo del tiempo, se incremente el interés por el desarrollo de sistemas de aprovechamiento de biomasa con fines energéticos. La generación y gestión de los residuos es uno de los problemas ambientales más graves de la sociedad, ya que estos provocan contaminación y graves impactos en el medio ambiente. Por ello, es necesaria la reducción de su generación y su correcta y eficiente gestión.

Los residuos locales no reciclables con poder combustible tales como telas, madera, caucho y plásticos también podrían ser usados como fuente de energía, reduciendo esa dependencia de combustibles fósiles, aumentando el control de las fuentes de energía y mejorando el medio ambiente. Estos residuos pueden ser sometidos a gasificación para obtener syngas. El proceso de gasificación permite convertir la energía química de los residuos en energía química, obteniendo el llamado gas de síntesis o syngas, el cual contiene CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y pequeñas cantidades de hidrocarburos más pesados y, puede ser utilizado como combustible para motores, turbinas o calentadores, o como materia prima en procesos químicos como la generación de metanol.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis del estado del arte de las tecnologías más avanzadas en el campo de la gasificación para la obtención de syngas, identificando la tecnología y condiciones de operación más adecuadas para la gasificación de residuos urbanos y biomasa. Por otra parte, se identificarán los flujos de residuos con potencial energético en Canarias y se analizarán las posibles rutas en la gestión actual de residuos a través de la cual se podrá generar este combustible de 3<sup>a</sup> generación. Por último, se realizará un estudio del efecto del posible producto obtenido para determinar su impacto en una mejora de la independencia energética exterior en las islas.

## SUMMARY

The growing environmental pollution caused by greenhouse gases, generated especially by the massive use of fossil fuels, and the increase in the price of oil, has led to a growing interest in the development of biomass utilization systems for energy purposes. The generation and management of waste is one of the most serious environmental problems in society, as it causes pollution and serious impacts on the environment. Therefore, it is necessary to reduce its generation and its correct and efficient management.

Local non-recyclable wastes with combustible power such as fabrics, wood, rubber and plastics could also be used as a source of energy, reducing dependence on fossil fuels, increasing control of energy sources and improving the environment. These wastes can be subjected to gasification to produce syngas. The gasification process converts the chemical energy of the waste into chemical energy, obtaining a gas called synthesis gas or syngas, which contains CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> and small amounts of heavier hydrocarbons. This fuel gas can be used as fuel for engines, turbines or heaters, or as a raw material in chemical processes such as methanol production.

The goal of this work is to analyze the state of the art of the most advanced technologies in the field of gasification to obtain syngas, identifying the most suitable technology and operating conditions for the gasification of urban waste and biomass. On the other hand, waste streams with energy potential in the Canary Islands will be identified and possible routes in the current waste management will be analyzed in order to generate this third-generation fuel. Finally, a study will be carried out to determine the impact of the product obtained in order to improve the external energy independence of the islands.

## NOMENCLATURA

RSU	Residuos sólidos urbanos
CDR	Combustibles derivados de residuos
TBM	Tratamientos biológico-mecánicos
TMB	Tratamientos mecánico-biológicos
PCI	Poder calorífico inferior
H/C	Relación hidrógeno-carbono
RE	Relación de equivalencia
A/B	Relación aire-alimentación
S/B	Relación vapor-alimentación
CO <sub>2</sub> /B	Relación CO <sub>2</sub> -alimentación
GR	Relación (Vapor + Oxígeno)-alimentación
COT	Carbono orgánico total
MEA	Monoetanol amina
DEA	Dietanol amina
MDEA	Metil-dietanol amina
FLEXSORB	Aminas impedidas
T	Temperatura
P	Presión
EERR	Energías renovables
$\eta_{GC}$	Eficiencia de gas caliente
$\eta_{GF}$	Eficiencia de gas frío
$\dot{V}_g$	Flujo volumétrico del gas procedente de la gasificación

$PCI_{\text{gas}}$	Poder calorífico inferior de gas de síntesis
$PCI_{\text{comb}}$	Poder calorífico inferior combustible
$\dot{m}_{\text{comb}}$	Flujo másico de combustible
$C_{p_g}$	Capacidad calorífica del gas
$T_g$	Temperatura del gas
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiente

## 1. ANTECEDENTES

La creciente contaminación del medioambiente y el cambio climático son unos de los problemas que más preocupan a la sociedad en la actualidad, es por ello que cada vez se están buscando más soluciones viables y renovables para poder lidiar contra estos fenómenos.

En concreto, la generación y gestión de los residuos es uno de los problemas ambientales más graves de la sociedad, ya que estos provocan contaminación y graves impactos en el medio ambiente que perjudican a los ecosistemas y a la salud humana. Por ello, es necesaria la reducción de su generación y su correcta y eficiente gestión, contribuyendo así al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales y, en definitiva, al desarrollo sostenible.

Por otra parte, la generación de gases efecto invernadero y el elevado precio de los combustibles fósiles debido a su uso masivo, ha hecho que se haya generado un gran interés por el desarrollo de fuentes de energía alternativas, como las energías renovables.

La situación energética y medioambiental mundial hace que la generación de energía mediante sistemas basados en energías renovables tome cada vez una mayor relevancia. Una de las vías de solución a estos problemas, es la búsqueda y el desarrollo de sistemas de aprovechamiento de biomasa con fines energéticos, es decir, sistemas que sean capaces de aprovechar la energía contenida en los residuos generados por la sociedad y convertirlos en combustibles renovables (Pérez et al, 2010; Vargas Salgado, 2012).

Estos sistemas tienen múltiples ventajas, ya que posibilitan la diversificación energética y reducen la dependencia del petróleo, a la vez que se disminuyen las emisiones globales de CO<sub>2</sub> y se contribuye a solucionar los problemas de tratamiento y valorización de residuos.

La biomasa es uno de los recursos energéticos con mayor potencial tanto en países desarrollados como emergentes, pero sigue sin sufrir el desarrollo esperado. Constituye una de las fuentes renovables de energía de mayores perspectivas a nivel mundial, por sus potencialidades y su menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles. Mediante diferentes



procesos y tecnologías de conversión energética es posible obtener combustibles en forma sólida, líquida y gaseosa a partir de cualquier tipo de biomasa (Lesme-Jaén et al, 2016).

La biomasa ha sido presentada como una alternativa promisoriosa de energía, no solo por su potencial mundial, sino porque es una fuente de CO<sub>2</sub> neutral, su conversión térmica genera bajas emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> y es la única fuente de energía renovable capaz de sustituir a los combustibles fósiles en todos sus mercados de energía. De la enorme cantidad de biomasa producida en el mundo, sólo el 5%, unos 13.500 millones de toneladas métricas, puede ser potencialmente utilizado para producir energía. Esta cantidad es suficiente para proporcionar alrededor del 26% del consumo mundial de energía, lo que equivale a 6.000 millones de toneladas de petróleo (IFP, 2007).

## 2. PROCESOS TERMOQUÍMICOS

Dentro de los sistemas de aprovechamiento energético, los procesos termoquímicos de conversión se han convertido en una opción muy interesante para la producción de energía, estos se basan en someter los residuos a la acción de altas temperaturas. Estos procesos han sido ampliamente estudiados y se pueden dividir en cuatro subcategorías en función de los parámetros de operación: combustión, pirólisis, gasificación y licuefacción (Jarabo y Fernández, 1983). Cada proceso de conversión conduce a unos productos finales e intermedios diferentes.

- **Combustión:** proceso mediante el cual los residuos se transforman en gases calientes, con temperaturas alrededor de 800-1000°C, al aplicar una energía térmica elevada en presencia de oxígeno. La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial, y a la producción de electricidad. La eficacia global del proceso, considerada en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%. Es por esto que la combustión no se considera un proceso de conversión adecuado, ya que no produce combustibles que

puedan ser posteriormente utilizados (bioaceites o biogás) (McKendry, 2002).

- **Gasificación:** es la oxidación parcial de residuos con aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas, dando lugar a un gas combustible llamado syngas o gas de síntesis. La utilización de altas temperaturas, por encima de los 800°C, permite desarrollar un proceso similar a la combustión, pero limitando la cantidad de comburente a un 10 - 50% del teóricamente necesario para una combustión completa, satisfaciendo solo las necesidades térmicas del proceso. Esta necesidad de calor es debida a que la generación de gases combustibles a partir de residuos es una transformación endotérmica. El poder calorífico del gas producido generalmente es de 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup> y puede ser quemado directamente o utilizado para diversos fines.
- **Pirólisis:** consiste en la descomposición de la materia orgánica por la acción del calor y en ausencia de oxígeno. El proceso genera tres productos: líquido (bioaceites), gas (biogás) y residuo carbonoso (biocarbón), por calentamiento de la biomasa, (alrededor de 500 °C) (Urien Pinedo, 2013).
- **Licuefacción:** proceso variante de la pirólisis, en el que se utiliza un gas reductor como comburente, que puede ser monóxido de carbono, hidrógeno o una mezcla de ambos, en presencia de catalizadores (carbonatos alcalinos) en solución acuosa, a alta presión y temperaturas entre 300 y 500 °C. El combustible obtenido tiene un poder calorífico de unos 33,5 MJ/kg (Jarabo y Fernández, 1983).

Comparando estos procesos termoquímicos, se puede decir que la gasificación y la combustión están estrechamente relacionados, pero hay una importante diferencia entre ellos; la gasificación incorpora energía en los enlaces químicos del gas producido, mientras que la combustión rompe esos enlaces para liberar la energía. El proceso de gasificación añade hidrógeno a la materia prima y le quita carbono de la materia prima para producir gases con una mayor relación hidrógeno/carbono (H/C), mientras que la combustión oxida el hidrógeno y el carbono en agua y dióxido de carbono, respectivamente. Por otro lado, la pirólisis

elimina parcialmente el carbono de la alimentación, pero no añade hidrógeno (Basu, 2010).

Los sistemas de gasificación se han convertido en una fuente de generación de energía muy prometedora, ya que ofrece entre otras ventajas, una mayor eficiencia de conversión en comparación con la pirólisis y la combustión. En la práctica, la gasificación puede convertir de un 60 % a un 90 % de la energía de la biomasa en energía (Pérez et al., 2010).

La quema de residuos y obtención de energía a través de la combustión puede equivaler a 550 kW-h por tonelada de residuos sólidos urbanos (RSU) mientras que, con la implementación de la tecnología de gasificación, con la misma cantidad de RSU se podría producir hasta 1000 kW-h (Gasification&Syngas Technologies Council, 2016).

Dependiendo del fin para el que vaya a ser usado el gas de síntesis, será necesario un tipo u otro de residuo para conseguir una mayor o menor calidad del mismo. Este gas renovable puede ser aprovechado en motores de combustión interna alternativos o en turbinas de gas como combustible (Lesme-Jaén et al., 2016; Arjan et al., 2011). Actualmente también se utiliza en procesos petroquímicos industriales, en la producción de fertilizantes y productos químicos o como sustituto del gas natural (Rusin y Stolecka, 2020).

### **3. ETAPAS DE LA GASIFICACIÓN**

El proceso está conformado por varios fenómenos complejos que van desde los mecanismos de transferencia de masa y energía en un sistema reactivo heterogéneo, derivando las etapas de secado y devolatilización del combustible, para dar paso a la oxidación de los volátiles y el carbón, con el consecuente cambio del diámetro de las partículas y las pérdidas de presión en el lecho (Pérez et al, 2010).

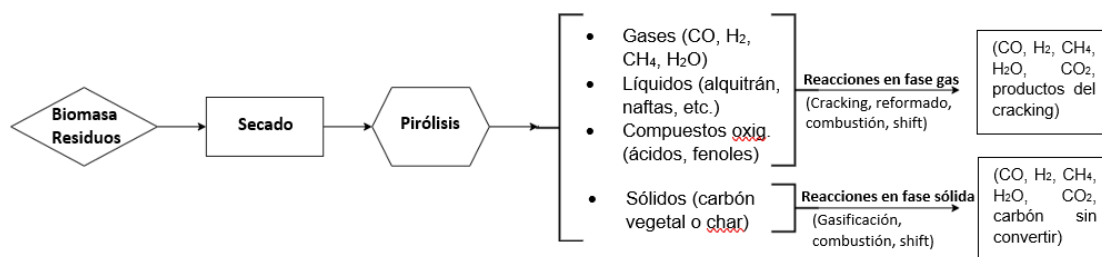
Las reacciones químicas que ocurren en el proceso de gasificación se pueden clasificar de forma global en dos tipos:

- Cracking molecular, causadas exclusivamente por la temperatura de operación, la cual hace que se rompan los enlaces moleculares más débiles de la alimentación y se creen moléculas de menor tamaño e hidrocarburos ligeros.
- Reformado de los gases producidos, en las que suele intervenir vapor de agua como reactivo.

En el proceso de gasificación ocurren simultáneamente diferentes etapas de transformación dependiendo principalmente de qué residuos se estén tratando y del contenido de oxígeno en el reactor.

Estas etapas generalmente se llevan a cabo en serie, no hay un límite claro entre ellas y es frecuente que se superpongan. Dependiendo del tipo de reactor con el que se esté trabajando, surgirán secuencialmente o no; en los reactores de lecho fijo la temperatura va aumentando progresivamente, por lo que las etapas suceden secuencialmente, al contrario ocurre en los reactores de lecho fluidizado, en los que el calentamiento ocurre rápidamente haciendo que las reacciones se produzcan de forma simultánea.

Por lo general, se comienza con una deshumidificación de los residuos alimentados al proceso, que luego se someten a una degradación térmica o pirólisis, absorbiendo el calor sensible de la alimentación y elevando la temperatura del proceso. Los productos generados en la pirólisis (gases, sólidos o líquidos) reaccionan entre sí y con el agente gasificante para generar el gas final. En los sistemas industriales de gasificación el calor necesario para realizar el secado de la alimentación, la pirólisis y las reacciones endotérmicas de reducción, generalmente, proviene de las reacciones exotérmicas producidas en la etapa de la combustión. Por último, se produce la gasificación de los compuestos obtenidos durante el proceso. A continuación, se describen de forma general las diferentes etapas del proceso, mostradas en el esquema de la figura 1:



**Figura 1.** Esquema de las etapas del proceso de gasificación (Basu, 2010).

### 3.1. Secado

En la primera etapa del proceso, se produce un calentamiento de los residuos hasta los 100°C, lo cual provoca la evaporación del agua contenida en los mismos, sin provocar ninguna reacción química, absorbiendo el calor sensible y elevando la temperatura del proceso.

Para poder obtener un gas combustible con un valor calorífico aceptable, la mayoría de los sistemas de gasificación usan biomasa seca con un contenido de humedad entre el 10 y el 15%, ya que cada kilogramo de humedad en la biomasa quita un mínimo de 2242 kJ de energía adicional del gasificador para vaporizar el agua, lo que también implica pérdidas económicas (Basu, 2010). Con este proceso se elimina la humedad superficial de la biomasa, ya que la humedad interna se encuentra dentro de la estructura celular y difícilmente puede ser eliminada.

Por encima de 100 °C el agua que está en la superficie de la biomasa es retirada definitivamente. A medida que aumenta la temperatura, los compuestos extraíbles de bajo peso molecular inician el proceso de volatilización que continúa hasta que se alcanza una temperatura aproximada de 200 °C (Basu, 2010). Hay casos en los que la humedad de la biomasa es tan alta que es necesario someterla antes a un pre-secado. Cabe destacar, que el agua eliminada en esta etapa puede servir como agente gasificante en etapas posteriores.

### 3.2. Pirólisis

Esta etapa ocurre cuando casi no hay oxígeno en el ambiente y la temperatura se encuentra entre los 300 y 500°C. Es un proceso de descomposición térmica en la que se desprenden los gases combustibles más volátiles, algunos de los cuales no se descomponen, sino que se condensan y se convierten en alquitranes debido a la ausencia de oxígeno. En el proceso se generan una especie de residuos sólidos carbonosos llamados char o carbón vegetal, además de los principales gases componentes del syngas.

En esta etapa, solo ocurren reacciones entre los componentes de los residuos, no existe ninguna reacción química importante con agentes externos, como los gasificantes.

La formación de los gases en esta etapa se ve favorecida por un tiempo de residencia en el reactor y la temperatura adecuada. La formación de los alquitranes y aceites contenidos en los hidrocarburos producidos aumenta conforme disminuyen estos dos parámetros.

En la figura 2 se muestra la reacción de devolatilización los residuos.



**Figura 2.** Proceso de devolatilización o pirólisis de los residuos.

Cabe destacar de esta descomposición, que los volátiles incluyen los gases no condensables, como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>, productos condensables, alquitranes, y agua.

### 3.3. Oxidación o combustión

Esta etapa es la única exotérmica del proceso, es decir, es la que puede aportar energía necesaria para el secado, la pirólisis y las reacciones de gasificación y reformado, por medio de la combustión parcial de los volátiles y el carbonizado generados en las etapas previas.

El residuo carbonoso producido anteriormente se mezcla con el agente gasificante presente en el proceso y reaccionan entre sí. Dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible, se producirá una oxidación en mayor o menor

grado. A mayor cantidad de oxígeno haya, mayor será el aumento de la temperatura del sistema. Sin embargo, si la cantidad de oxígeno es alta se producirá una oxidación completa de los gases, lo que influye de manera negativa en el rendimiento del proceso. El oxígeno ideal que se debe aportar al sistema es entre un 15 y 40% del teórico necesario para la combustión completa (Campoy Naranjo, 2009).

En la tabla 1 se describen las posibles reacciones de oxidación del carbón vegetal en presencia de oxígeno o aire.

**Tabla 1.** *Combustión del carbón vegetal o char*

Reacción	Entalpía	Nombre
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H^\circ = -393,8 \text{ kJ/mol}$	Combustión completa
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	$\Delta H^\circ = -123,1 \text{ kJ/mol}$	Combustión parcial

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 (Conama, 2014).

Por otro lado, también se produce la oxidación de los gases volátiles producidos en la pirólisis a través de las reacciones mostradas en la tabla 2.

**Tabla 2.** *Oxidación de los gases volátiles*

Reacción	Entalpía	Nombre
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H^\circ = -283 \text{ kJ/mol}$	Oxidación del CO
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$\Delta H^\circ = -242 \text{ kJ/mol}$	Oxidación del H <sub>2</sub>
$CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$	$\Delta H^\circ = -802 \text{ kJ/mol}$	Oxidación del metano
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H^\circ = -40,9 \text{ kJ/mol}$	Water gas shift reaction

Como se muestra en estas reacciones, los hidrocarburos ligeros y otros gases combustibles reaccionan con el oxígeno oxidándose. Estas reacciones son exotérmicas y aportan calor al proceso. Las reacciones de oxidación del CO y del H<sub>2</sub> son reacciones no deseadas, ya que reducen el contenido de estos

compuestos en el gas de síntesis. Por otro lado, la reacción “water gas shift”, favorece la generación 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 (Conama, 2014; Igado Gracia, 2013).

### 3.4. Gasificación y reducción de los residuos carbonosos

Esta etapa se lleva a cabo después de la pirólisis y las reacciones correspondientes se llevan a cabo en paralelo con la etapa de combustión, aunque el calor y los productos de la combustión (como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O) son requeridos en esta etapa. Es una etapa endotérmica en la que principalmente se forman los gases combustibles.

La reducción es la más compleja de todas las etapas, envuelve múltiples reacciones químicas entre los hidrocarburos en el combustible, vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno, así como entre los gases desarrollados durante el proceso. De entre todas ellas, las de gasificación del residuo carbonoso producido son las más importantes.

La gasificación del residuo carbonoso implica varias reacciones entre éste y el agente gasificante. En la tabla 3 se muestra una descripción de algunas de las reacciones del residuo sólido carbonoso (char) con los diferentes compuestos presentes en el proceso como el dióxido de carbono, el vapor de agua y el hidrógeno, en las que se obtienen gases de bajo peso molecular como el CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>.

**Tabla 3.** Gasificación del carbón vegetal o char

Reacción	Entalpía	Nombre
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$\Delta H^\circ = 118,5 \text{ kJ/mol}$	Water gas reaction
$C + CO_2 \rightarrow 2 CO$	$\Delta H^\circ = 159,9 \text{ kJ/mol}$	Reacción de Boudouard
$C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta H^\circ = -87,5 \text{ kJ/mol}$	Formación de metano

Las reacciones de Boudouard y Water gas favorecen la generación de CO y H<sub>2</sub>, aumentando su contenido en el gas, a altas temperaturas y bajas presiones; como se observa, estas reacciones son endotérmicas (Igado Gracia, 2013). La



formación de metano es la única reacción exotérmica, la cual es muy importante en el proceso de gasificación cuando el gas producido va a ser usado directamente como combustible. Podría ser perjudicial si el objetivo es la producción de hidrógeno, ya que en esta reacción se consume (Conama, 2014).

Por último, cabe destacar que, a lo largo del proceso, los alquitranes producidos en la etapa de la pirólisis reaccionarán de diversas formas, pudiendo oxidarse, reformarse o reaccionar por craqueo, como se muestra en la tabla 4. En estas reacciones pueden estar presentes catalizadores sólidos en el lecho, como la dolomita o la olivina, que favorezcan la transformación de los alquitranes, las cuales también se pueden ver favorecidas por las superficies carbonosas de algunas partículas sólidas desprendidas durante la etapa de pirólisis. Estas reacciones de transformación se caracterizan porque son altamente endotérmicas y dependerán de la estequiometría del proceso de gasificación y de la oxidación parcial de los productos volátiles (Conama, 2014; Igado Gracia, 2013).

**Tabla 4.** *Reacciones de los alquitranes*

Reacción	Entalpía
$C_nH_m + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow nCO + (m/2) H_2$	Muy endotérmicas (200 – 300 kJ/mol)
$C_nH_m + n CO_2 \rightarrow (2n) CO_2 + (m/2) H_2$	
$C_nH_m + n H_2O \rightarrow n CO_2 + (m/2 + n) H_2$	
$C_nH_m + (2n - m/2) H_2 \rightarrow n CH_4$	
$C_nH_m \rightarrow (m/4) CH_4 + (n - m/4) C$	

El reformado de los hidrocarburos ligeros y los alquitranes tiene la ventaja de mantener el contenido de energía química del gas de síntesis, ya que los alquitranes son transformados a H<sub>2</sub> y CO. Por otra parte, el reformado con vapor de agua, y el reformado con CO<sub>2</sub>, reformado en seco, se ven favorecidas por el uso de catalizadores (Conama, 2014).

## 4. VARIABLES DE OPERACIÓN

La gasificación es una combinación muy compleja de diversas reacciones, ya que se ve influenciada por un gran número de parámetros, muchos de los cuales dependen del tipo de biomasa alimentada al reactor, pero, otros, dependen de la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, la relación agente gasificante/biomasa dentro del reactor o, en general, del tipo de tecnología de gasificación que se vaya a emplear.

Es por esta razón que, durante el proceso de gasificación, es importante tener cierto control sobre los siguientes parámetros característicos:

### 4.1. Temperatura

A lo largo del proceso de gasificación intervienen prácticamente los mismos componentes en todas las reacciones que suceden, por lo que el grado de extensión de cada una de ellas viene determinado por las concentraciones de los compuestos, en especial de los compuestos añadidos externamente como los agentes gasificantes, y de las constantes de equilibrio de cada una de ellas, las cuales dependen principalmente de la temperatura de reacción. Por esta razón, la temperatura juega un papel muy importante en el proceso de gasificación.

Por un lado, todas las reacciones que se producen a lo largo del proceso, a excepción de las reacciones de combustión parcial o total, son reacciones endotérmicas, lo que significa que se requiere un aporte de calor externo para que se puedan llevar a cabo. Estas temperaturas de reacción son bastante elevadas, rondan los 700-900°C y, además, es necesario también el aporte de energía para elevar la temperatura de los componentes externos que formen parte del proceso como el vapor de agua o el oxígeno, así como de los residuos que conviene eliminar, desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de reacción. Solo las reacciones de combustión parcial o total aportan energía térmica al proceso; esta energía debe proporcionarse de forma controlada en áreas muy localizadas de la masa de reacción. Cabe destacar, que el dióxido de carbono también es un importante aportador de calor en el sistema, calienta los compuestos presentes en el proceso, como por ejemplo el vapor de agua

añadido, hasta la temperatura de transformación para que las reacciones de descomposición y transformación tengan lugar.

Por otro, la temperatura también influye en la eliminación de residuos del gas, ya que una mayor temperatura implica una reducción en la generación de alquitranes y una mayor conversión del carbono, lo que reduce el material carbonoso en las escorias del reactor. Además, al operar con temperaturas altas también se reduce el contenido de amoníaco en el gas. Cabe destacar que esto presenta una desventaja ya que, al aumentar la presencia de compuestos ligeros, con una mayor proporción molecular H/C, el poder calorífico inferior (PCI) del gas disminuye.

#### **4.2. Presión**

En general, el aumento de la presión desfavorece las reacciones de gasificación, aumentando las proporciones de hidrocarburos y alquitranes. Aumenta también las concentraciones de metano y dióxido de carbono y disminuye las de hidrógeno y monóxido de carbono. Muchos gasificadores operan a altas presiones, esto se debe a que los requerimientos de compresión de la energía son menores y los equipos pueden ser más pequeños, mejorando la viabilidad económica (Bull, 2008). Los gasificadores de lecho móvil suelen trabajar a presión atmosférica y los de lecho fluidizado suelen alcanzar hasta los 30 bar en algunos casos (Ilie Ionut, 2019).

#### **4.3. Relación agente gasificante/residuo**

La relación equivalente entre el agente gasificante utilizado y la alimentación es un parámetro muy importante a determinar, especialmente cuando el proceso se autoabastece energéticamente mediante la oxidación parcial del residuo tratado. Valores excesivamente bajos de esta relación pueden no generar la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas, produciéndose una disminución del rendimiento (Ilie Ionut, 2019). Este parámetro influye de manera directa sobre los productos de la gasificación, como, por ejemplo, la conversión y formación de los alquitranes (Vargas Salgado, 2012). En la tabla 5 se muestran los parámetros característicos a tener en cuenta según el agente gasificante usado durante el proceso.

**Tabla 5.** *Parámetros característicos de los agentes gasificantes (Basu, 2010).*

<b>Agente gasificante</b>	<b>Parámetros característicos</b>
<b>Aire</b>	RE (Relación equivalente) A/B (Relación aire – alimentación)
<b>Vapor de agua</b>	S/B (Relación vapor – alimentación)
<b>Dióxido de carbono</b>	CO <sub>2</sub> /B (Relación CO <sub>2</sub> – alimentación)
<b>Vapor de agua y oxígeno</b>	GR (Relación Vapor+ O <sub>2</sub> – alimentación)

#### **4.4. Relación de equivalencia**

La relación de equivalencia (RE) es un parámetro muy importante en el diseño del gasificador, ya que indica el estado del sistema en función a la concentración estequiométrica de oxígeno requerida para que tenga lugar una combustión completa, es decir, es el cociente entre la relación real de aire-combustible y la relación estequiométrica aire-combustible. Este término se utiliza generalmente para situaciones de deficiencia de aire, como las que se encuentran en un gasificador (Basu, 2010).

Esta relación puede variar entre 0,2 y 0,4. Un aumento de la RE supone una mayor disponibilidad de oxígeno en el medio de reacción, lo que facilita la combustión de la materia volátil y la disminución del contenido de alquitrán en el gas, mejorando la producción de gas y la conversión del sólido (Kinosita et al., 1994; Narváez et al., 1996). Sin embargo, si se utiliza aire como agente gasificante, el aumento de esta relación puede suponer una disminución del poder calorífico del gas, ya que significaría un aumento de las fracciones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. La influencia de la RE en la concentración de H<sub>2</sub>, CO o CH<sub>4</sub> puede mostrar diversas tendencias en función de otros factores como el tipo de biomasa, el intervalo de temperatura o la presencia de vapor de agua en el medio (Kumar et al., 2009).

#### **4.5. Relación H/C**

La relación H/C es el cociente molar de hidrógeno y carbono existente en el interior del gasificador. Este parámetro se puede ajustar aumentando o disminuyendo la presencia de agua en el sistema. Es conveniente un valor alto,

ya que aumenta el contenido de  $H_2$  y  $CO$  en el gas producto y disminuye la producción de alquitranes; no obstante, el aumento de esta relación conlleva un mayor consumo energético en el proceso (Narváez et al., 1996).

#### **4.6. Relación vapor – alimentación**

Este parámetro describe la relación entre la cantidad de agua en el proceso y la cantidad de materia a gasificar (relación S/B). Al igual que la relación H/C, esta se puede controlar ajustando la cantidad de agua en el sistema. Sin embargo, en este caso, debido a la presencia de la reacción de water gas shift explicada anteriormente, una alta relación S/B provoca un incremento en la producción de  $H_2$  y  $CO_2$ , disminuyendo a su vez el de  $CO$  (Gil et al., 1999).

#### **4.7. Altura del lecho**

La altura del lecho es otro de los factores que afecta al proceso de gasificación. 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 reacciones secundarias. Esto provoca una mayor formación de carbonizado y una reducción en la formación de alquitranes. Con alturas de lecho menores, la formación de carbonizado y gas es más baja y la formación de alquitranes mayor (Conama 2014).

#### **4.8. Estado de fluidización del lecho del reactor**

Este parámetro se define como el cociente entre la velocidad superficial del gas y la velocidad mínima de fluidización, y es la influencia que ejerce una variación de la velocidad superficial en el agente gasificante sobre el proceso. Esto 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 (Ilie Ionut, 2019).

#### **4.9. Tiempo de residencia en el reactor**

La composición química del gas producto de la gasificación y la proximidad del proceso al equilibrio dependerán de manera directa del tiempo de residencia de los residuos en el reactor, ya que este determina el tiempo de reacción entre el agente gasificante y el carbonizado generado en la etapa pirolítica. Estas reacciones suelen ser las que determinan la velocidad del proceso de gasificación, al ser más lentas que las reacciones que ocurren en fase gaseosa. De forma general, si se aumenta el tiempo de residencia, la cantidad de material sólido disminuye, favoreciendo así las reacciones secundarias y provocando también la disminución de alquitranes. A pesar de la importancia del tiempo de residencia, se han encontrado pocas fuentes de información, lo que probablemente se deba a que esta variable es difícil de cambiar en un gasificador sin modificar su diseño (Bull, 2008).

### **5. GAS DE SÍNTESIS**

Tal y como se ha comentado, la producción de syngas, o gas de síntesis, se considera una alternativa muy prometedora para la generación de calor, productos químicos o electricidad, entre otros. El syngas es generado a partir de la gasificación de diversas materias primas como el carbón vegetal, el gas natural, los hidrocarburos pesados procedentes de las refinerías de petróleo, los residuos plásticos, los residuos orgánicos, los residuos agrícolas, los residuos de madera y la biomasa virgen (Ephraim et al., 2020).

Desde el punto de vista analítico, aunque dependiendo de la materia prima y el agente gasificante utilizado, la composición del gas puede variar. De forma general el syngas obtenido de la gasificación de residuos está compuesto principalmente por hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ) e hidrocarburos ligeros ( $C_1-C_4$ ). Además, el gas de síntesis también contiene productos secundarios como hidrocarburos más pesados, nitrógeno ( $N_2$ , cuando se utiliza aire como agente gasificante) y diversos compuestos no deseados como alquitranes, pequeñas partículas carbonosas, cenizas, azufre o compuestos de cloro. El poder calorífico del gas viene determinado principalmente por el  $CO$ , el  $H_2$  y el  $CH_4$ .

La cantidad, composición y poder calorífico de los gases producidos dependerá de la composición de los residuos, de la temperatura y de las cantidades de aire y vapor utilizadas. El poder calorífico inferior (PCI) típico está en torno a 6.500 KJ/Nm<sup>3</sup>, que es del orden del 25% del PCI del gas natural, que es el combustible gaseoso de referencia (Fundación para la Economía Circular, 2014).

En general, el gas de síntesis posee un bajo poder calorífico y puede ser utilizado para diversos fines:

- Como materias primas para la producción de determinados compuestos orgánicos (como la síntesis de metanol, amoníaco, etc.), o para su transformación en hidrógeno mediante procesos de reformado.
- Como combustibles sustitutivos de gas natural en los procesos de producción de energía eléctrica mediante ciclos térmicos distintos a los de vapor de agua, en turbinas de gas o motores de combustión interna.
- Como combustibles en calderas tradicionales o en hornos, en sustitución de gas-oil, fuel-oil o de otros combustibles.

En la gasificación pueden estar presentes los llamados agentes gasificantes, que favorecen el proceso aportando calor para iniciar las reacciones, como, por ejemplo, el vapor de agua, que permite la gasificación de las fracciones carbonizadas reduciendo así los residuos carbonosos, el oxígeno o el aire. Este es uno de los elementos diferenciadores del proceso de gasificación con respecto a la incineración y la pirólisis, ya que provocan la existencia de reacciones en fase heterogénea con el carbón, produciendo, en ambientes de altas temperaturas, la gasificación del carbono presente en los residuos (Fundación para la Economía Circular, 2014).

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, del combustible y del agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. Por ejemplo, cuando se emplea aire como agente gasificante, el gas de síntesis obtenido tiene un PCI equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural (IDAE, 2010). Dependiendo del fin para el que vaya a ser utilizado, se requerirán unas condiciones determinadas de mayor o menor pureza y unos procedimientos de acondicionamiento más o menos estrictos.

Si el gas va a ser utilizado para la síntesis de productos químicos o combustibles como el metanol requerirá un mayor grado de pureza que si, por ejemplo, fuera a ser utilizado para la generación de calor o electricidad, para lo cual no se necesita un grado de pureza tan alto. Su uso para combustión externa en centrales eléctricas de vapor es la aplicación menos exigente en cuanto a pureza, los requisitos empiezan a ser más estrictos en sistemas de combustión interna como turbinas o motores de gas. Las especificaciones más restrictivas son las aplicadas para la síntesis de productos químicos o combustibles.

## 6. AGENTES GASIFICANTES

Los agentes gasificantes reaccionan con el carbono sólido y los hidrocarburos más pesados para convertirlos en gases de bajo peso molecular como el CO y el H<sub>2</sub> (Basu 2010). Existen diversos componentes que se pueden usar como agentes gasificantes en el proceso de gasificación de residuos, la elección de este dependerá de las características de composición y poder calorífico del producto final, syngas, que se quieran obtener. Entre los agentes gasificantes más empleados destacan:

- **Aire:** parte de la biomasa utilizada se quema con el oxígeno presente y el resto se reduce. En este caso, el syngas obtenido constaría de un 50% de nitrógeno, ya que el aire está compuesto mayoritariamente de este elemento, con un poder calorífico que ronda los 5,5 MJ/Nm<sup>3</sup>. El resultado es un gas pobre, de baja pureza válido tan solo para su uso en motores de combustión interna convencionales (IDAE, 2010).
- **Vapor de agua:** mejora el rendimiento global y aumenta la cantidad de hidrógeno en el gas de síntesis. Es el sistema más adecuado para la producción de syngas destinado a la síntesis de metanol u otros combustibles, ya que produce un gas de alta pureza. La aportación de agua suele realizarse a partir de vapor recalentado, siempre que se pueda generar fácilmente en la instalación a partir de energía residual. Si se utiliza vapor como agente de gasificación, el gas producto contiene más hidrógeno por unidad de carbono, lo que da lugar a una mayor relación H/C (Basu 2010).



- **Oxígeno:** al igual que el vapor de agua, mejora el rendimiento del proceso de gasificación y se obtiene un gas de alta pureza, sin embargo, la producción de oxígeno conlleva unos gastos energéticos y económicos importantes.
- **Hidrógeno:** con este agente gasificante se obtiene un gas de síntesis equivalente al gas natural, con un poder calorífico de 30 MJ/kg, ya que se favorece la formación de metano y olefinas. Sin embargo, es el menos recomendado y usado a escala industrial, ya que es uno de los mejores combustibles y se suele usar directamente.

En la tabla 6 se indica el poder calorífico del gas producto de la gasificación según el agente utilizado.

**Tabla 6.** Poder calorífico del gas de síntesis según el agente gasificante usado (Basu, 2010).

Agente Gasificante	Poder calorífico (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Aire	4 - 7
Vapor de agua	10 - 18
Oxígeno	12 - 28

Como se observa, la utilización de oxígeno como agente gasificante produce el gas con mayor poder calorífico, este es seguido por el vapor de agua, siendo el último el aire, debido a su alto contenido en nitrógeno. Además, en los sistemas de producción de syngas a partir de residuos sólidos se suele utilizar vapor de agua junto con oxígeno como agente gasificante del proceso.

## 7. MATERIAS PRIMAS PARA GASIFICACIÓN

La elección de la materia prima es determinante a la hora de escoger la tecnología de gasificación adecuada. Son susceptibles de ser gasificados aquellas materias con un alto contenido en carbono, ya sea el carbón, el coque, residuos del petróleo pesado, gas natural, biomasa, residuos sólidos municipales, etc.

Las características del combustible alimentado deben asegurar como mínimo que (IDAE, 2011; Fundación para la Economía Circular, 2014):

- Contenga el mínimo de inertes y de componentes muy húmedos. Un exceso de estos podría causar pérdidas energéticas significativas en el proceso, disminuyendo su rendimiento y aumentando la producción de alquitranes.
- Tenga un tamaño de partícula reducido, lo que favorece los mecanismos de transferencia de materia y calor y reduce la cantidad de carbono residual en las escorias.
- Contenga una cantidad de carbono orgánico suficiente para que las reacciones del proceso de gasificación puedan producirse de manera correcta, de forma que se reduzcan posibles reacciones secundarias que podrían conducir a la formación de productos condensados (polimerizados), que son más refractarios al tratamiento.
- No deben contener sustancias peligrosas, ya que estas pueden tener una influencia muy importante en la gestión del gas de síntesis producido, obligando a este a ser sometido a tratamientos de depuración muy intensos y complicados para poder ser utilizado.
- En la medida de lo posible, que tenga un elevado PCI. Con valores por encima de 10 - 15 MJ/kg, los rendimientos energéticos pueden ser aceptables, mientras que para valores inferiores la viabilidad es discutible, aunque esta está muy ligada a la forma de valorización del gas de síntesis. Los requisitos de PCI mínimo no son iguales para todos los procesos de gasificación, por ejemplo, para los gasificadores de lecho fluidizado no se requieren valores de PCI muy altos.

En este trabajo se ha elegido como combustible para el proceso de gasificación los residuos sólidos urbanos (RSU) y la biomasa. Las áreas urbanas consumen el 75% de las fuentes naturales y generan el 50% de los residuos globales. Por tanto, obtener un rendimiento energético a partir de los desechos es una vía necesaria para asegurar la viabilidad y el desarrollo sostenible (Hernández López, 2015).

La biomasa es un término utilizado para todos los materiales orgánicos obtenidos de plantas, árboles, cultivos y algas. Estos materiales contienen cantidades considerables de carbono e hidrógeno y una gran cantidad de materia volátil, en

torno al 70%. Por esta razón, son muy reactivos y su gasificación puede tener lugar a temperaturas más bajas (800-900 °C) (Mondal et al., 2011). Cabe destacar que, debido a la presencia de alta humedad y bajo contenido de carbono en biomasa, los valores caloríficos de esta son bajos en comparación con el carbón y el coque de petróleo.

La biomasa se puede clasificar en diferentes tipos de residuos según su procedencia: residuos agrícolas y cultivos energéticos, residuos ganaderos, forestales e industriales. Además, es importante destacar que más del 50% de los residuos sólidos urbanos es de origen vegetal, por lo que se considerará como otro tipo de biomasa.

- **Residuos agrícolas y cultivos energéticos:** por una parte, los residuos agrícolas provienen del cultivo de plantas, es la parte que se separa porque no va a ser utilizada. Incluyen una amplia gama de materiales lignocelulósicos generados por el sector agroalimentario. Entre ellos, los más comunes y producidos son la paja de trigo y de otros cereales.

Por otra parte, se encuentran los cultivos energéticos, que son especialmente generados para producir biomasa que se pueda transformar en combustible. Su rentabilidad no es muy grande y pueden suponer una competencia para los cultivos tradicionales. Pueden ser cultivos herbáceos, de madera o acuáticos.

- **Residuos ganaderos:** son los residuos que se generan en la actividad ganadera. Se denominan normalmente purines, y engloban compuestos como los excrementos de los animales, sólidos como piel, pelos o plumas, deyecciones líquidas o el agua utilizada para la limpieza de las granjas. Son comúnmente utilizados como abono en la actividad agraria, sin embargo, debido a su impacto ambiental, se han de tratar previamente para poder ser usados. Dependiendo del tratamiento al que sean sometidos, se podrían usar con fines energéticos.

- **Residuos forestales:** su origen proviene de dos fuentes distintas; por una parte se encuentra la madera procedente de la limpieza y el mantenimiento de bosques y montes y, por otra, los residuos de industrias

de transformación de la madera, que utilizan los bosques como medio de explotación. Estos residuos generalmente son ramas, cortezas, virutas y serrín.

Es importante destacar que, entre las fuentes de energía a partir de la biomasa, los residuos de los aserraderos son potencialmente atractivos económicamente, ellos están concentrados en un determinado depósito y su costo de transporte es relativamente bajo. Se estima que durante el proceso de elaboración de la madera se obtienen 0,50 m<sup>3</sup> de residuos por m<sup>3</sup> de madera en bolos (Lesme Jaén et al., 2016).

- **Residuos industriales:** muchos sectores industriales pueden generar residuos de carácter orgánico, los cuales proceden generalmente de embalajes y pallets, que se generan en grandes cantidades. Suelen incluir papel, cartón, madera y plásticos con un alto poder calorífico. En este tipo de residuos suele haber plásticos clorados que pueden resultar un inconveniente en el proceso de gasificación.

- **Residuos sólidos urbanos (RSU):** Una parte importante de los residuos sólidos urbanos está compuesta por papel madera, textiles, plásticos, etc. y por tanto pueden ser tratados como biomasa. Los RSU son aquellos generados en los domicilios particulares, comercios y oficinas como consecuencia de la actividad doméstica. También son considerados RSU aquellos generados por la industria cuya composición se asemeje a los anteriores, aquellos procedentes de la limpieza de vías públicas y otras áreas urbanas, muebles, enseres y animales domésticos, así como escombros de obra menor y de reparación domiciliaria.

Cabe destacar que, para que el proceso de gasificación sea correcto y eficiente, es necesario que el material a base de carbono sea lo suficientemente homogéneo. Los residuos urbanos se caracterizan por su heterogeneidad y su variación en cuanto a composición, por lo que conseguir el gas de síntesis con las características deseadas es complicado. Por esta razón, muchos de ellos no pueden ser sometidos al proceso de gasificación directamente, sino que deben ser recuperados con extensos pretratamientos, mediante un correcto proceso de reciclaje o diferentes procesos de valorización. Una vez se han sometido estos

residuos a los tratamientos correspondientes, se obtienen los llamados combustibles derivados de residuos (CDR) (Belgiorno et al., 2003).

- **Combustibles derivados de residuos:** cuando los residuos urbanos son clasificados, una parte de ellos no se puede aprovechar directamente para fines energéticos y se convierten en rechazos. Este tipo de residuos engloban los fangos de depuradora, otros residuos de automóvil y madera procedente de la construcción y demolición de edificios. Los fangos de depuradora, aunque tienen un alto contenido en carbono, presentan grandes inconvenientes debido a su alto contenido en humedad, la gran cantidad de cenizas y la presencia de metales pesados. La madera procedente del derribo de edificios puede contener también grandes cantidades de metales pesados (Elías Castells, 2012). Así pues, una de las principales alternativas para la valorización de estos rechazos es su conversión en CDR. La normativa europea define CDR como aquellos combustibles producidos a partir de residuos no peligrosos, tras su adecuado tratamiento, y que cumplen los requisitos de clasificación y especificaciones establecidas en la norma CEN/TS 15359 (2012) (Ilie Ionut, 2019).

Para su fabricación es necesario la eliminación del material no combustible, la trituración, el secado, la separación de voluminosos y de metales. Deben eliminarse también, en la mayor extensión posible, el material fermentable y la fracción inerte compuesta por materiales de construcción, vidrio, etc. Los pretratamientos habituales son los mecánico-biológicos o los biológico-mecánicos (Martínez de León, 2016):

- **Tratamiento biológico-mecánico (TBM)** o biosecado, consiste en una reducción del tamaño de partículas, un proceso de secado biológico y la producción de CDR.

- **Tratamiento mecánico-biológico (TMB)** consiste en una reducción del tamaño de partículas, una separación de las fracciones seca y húmeda, compostaje y la producción de los CDR a partir de la fracción seca.

Cabe destacar que, la fracción CDR puede suponer hasta un 30% de los materiales que constituyen el rechazo de una planta convencional de gestión de RSU y su poder calorífico es superior a 19000 kJ/kg.

A continuación, se detallan algunas de las características más importantes de la materia prima a procesar mediante gasificación. Es importante destacar que estas características están basadas en la biomasa y la parte de los residuos urbanos tratados como tal. Estas propiedades se dividirán en físicas y químicas.

- **Propiedades físicas:** algunas de las características físicas más importantes a tener en cuenta de la biomasa son:
  - **Densidad:** una característica determinante para la biomasa a procesar debe ser su densidad, ya que las tecnologías de gasificación actuales requieren que esta sea de un mínimo de 200 a 250 kg/m<sup>3</sup>. Densidades menores crean un problema en el manejo de la biomasa y, en algunos sistemas de gasificación como el de lecho fluidizado, esta puede ser arrastrada junto al gas de síntesis producido reduciendo así su efectividad.
  - **Tamaño de las partículas:** Otra característica importante a tener en cuenta es el tamaño de la biomasa. Cada gasificador requiere un tamaño de partículas diferente que por lo general no debe ser menor de 2-3 mm de diámetro. De manera global, las partículas deben tener un tamaño homogéneo, fácilmente manejable y lo suficientemente pequeño para que las reacciones se produzcan en el tiempo adecuado. Un tamaño de partículas adecuado puede beneficiar al proceso de diferentes maneras; aumentar la calidad del syngas, reducir el tamaño del reactor o bien aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes). Sin embargo, si el tamaño de las partículas es excesivamente pequeño puede provocar obstrucciones en el sistema o podrían ser arrastradas junto con las cenizas generadas antes de tiempo.

- **Composición química:** la composición química de la biomasa juega un papel muy importante en el proceso de gasificación. Estas características químicas se pueden obtener mediante un análisis inmediato, el cual proporciona información fundamental como el carbono fijo, volátiles, humedad o cenizas; parámetros importantes para la elección de la tecnología de gasificación, el tiempo de residencia en el reactor y para poder agotar al máximo el poder calorífico de la biomasa, reduciendo al máximo los inquemados carbonosos.

- **Humedad:** es quizás la característica más importante a tener en cuenta a la hora de elegir entre las diferentes tecnologías de gasificación. Su contenido no debe de ser mayor del 30%, siendo el ideal entre el 10 y el 15%. Conviene tener humedad en el proceso, ya que esta favorece la formación de hidrógeno, pero reduce la eficacia térmica, por lo que debe de tener el contenido justo de esta.

Si se desea tratar una materia prima con un alto contenido en humedad debe de realizarse previamente un proceso de secado de la misma, lo que implica un gasto energético, y por tanto económico, adicional. Además, si la biomasa se seca más allá de su punto de equilibrio, cuando vuelve a ponerse en contacto con el aire ambiente recupera la humedad.

- **Volátiles:** resulta ideal que la alimentación al proceso de gasificación posea un alto contenido en volátiles; estos favorecen la velocidad global de la reacción, ya que las reacciones gas-gas son más rápidas que las reacciones sólido-gas y se desprenderán más gases en la etapa de pirólisis. La biomasa, en comparación a otro tipo de materia prima para gasificadores, tiene un alto contenido en volátiles, del orden del 75 al 80% en peso (Elías Castells, 2012).

- **Cenizas:** las cenizas entrantes son la fracción mineral mezclada o adherida al sólido. Es importante que sean reducidas lo máximo posible, ya que solo absorben calor, ensucian los filtros, erosionan los conductos y pueden llegar a producir

sinterizaciones. El contenido en cenizas y su punto de reblandecimiento y fusión es uno de los aspectos más importantes a la hora del diseño del reactor de gasificación. La materia prima debe tener un valor inferior al 10% en cenizas. La biomasa suele tener un menor contenido en cenizas que otros tipos de alimentación, su contenido normalmente es inferior al 5% en peso, esto hace que sea una de las materias primas más adecuadas para ser sometidas al proceso de gasificación (Martínez de León, 2016; Elías Castells, 2012).

La realización de un análisis elemental también proporciona datos muy significativos para la elección de la tecnología de gasificación. En la tabla 7 se adjunta un análisis elemental de algunos tipos de residuos urbanos.

**Tabla 7.** Análisis elemental típico de diferentes tipos de material orgánico (Elías Castells, 2012).

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>H</b>	<b>N</b>
<b>Biomasa</b>	50-60	30-40	5-7	Trazas
<b>Papel / cartón</b>	44	44	6	0,3
<b>Plástico</b>	60	23	7	0
<b>Textil</b>	56	30	7	0,2
<b>Madera</b>	50	43	6	0,1
<b>Materia orgánica</b>	50	38	6	0,4

Algunos de estos elementos tienen gran influencia en la composición del gas de salida y resultan contaminantes para el medioambiente:

- **Nitrógeno:** este elemento se encuentra en la biomasa de diversas maneras, y en el proceso de gasificación favorece la formación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), el cual, al oxidarse, puede generar óxidos de nitrógeno en las calderas, turbinas o motores en los que se utilice el gas.
- **Cloro:** puede generar gases ácidos al dar lugar a ácido clorhídrico (HCl). Deben reducirse al mínimo, ya que pueden generar la corrosión de elementos de la planta en la que se utilice el gas.



- **Azufre:** este compuesto da lugar, al igual que el cloro, a un gas ácido, ya que durante el proceso de gasificación puede provocar la generación de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), por lo que su contenido también debe reducirse al mínimo. Este compuesto no está muy presente en los residuos urbanos.

Niessel et al. (1996), establecieron ejemplos de los rangos en los que se deben encontrar los residuos sólidos y la biomasa para poder ser tratados mediante gasificación, en la tabla 8 se muestran estos parámetros.

**Tabla 8.** *Parámetros de residuos y biomasa para la gasificación (Niessel et al., 1996).*

Parámetros	Rangos
<b>Diámetro</b>	10 – 15 mm
<b>Longitud</b>	50 – 150 mm
<b>Densidad aparente</b>	500 – 700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Poder Calorífico Inferior</b>	16 – 18 MJ/kg
<b>Humedad</b>	6 – 10 %
<b>Volátiles</b>	71,1 %
<b>Carbono fijo</b>	11,4 %
<b>Azufre</b>	0,5 %
<b>Cloro</b>	0,4 – 0,6 %
<b>Componentes no combustibles</b>	11 %

## 8. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA GASIFICACIÓN

Existen diversas tecnologías de gasificación, cada una de ellas con sus ventajas e inconvenientes. A la hora de decidir cuál es la más adecuada para el tratamiento de biomasa, es necesario tener en cuenta ciertos aspectos. Principalmente, son decisivos los siguientes parámetros:

- Aplicación final del gas obtenido. Las necesidades energéticas que se deseen cubrir. Las aplicaciones orientadas a la generación eléctrica o a la cogeneración, son más exigentes en cuanto a la limpieza de gas (partículas) y a las posibles emisiones contaminantes postcombustión (alquitranes).
- Tipo y cantidad del recurso biomásico del que se dispone. Cuanto mejor cuantificada esté y más detallado sea el análisis sobre su composición física y química, mejor se podrá elegir la tecnología.

- Factores medioambientales y económicos. Hoy en día, la mejora de las tecnologías y el avance en el control más estricto de los parámetros en los sistemas, permiten producir syngas de buena calidad, y que cumplen las normas sobre emisiones a la atmósfera (IDAE, 2010).

En la tecnología de los reactores de gasificación aplicados a los residuos es muy importante el control de las variables, ya que la aportación de la energía térmica debe ser controlada y uniforme, aportando tan solo la necesaria para la transformación, de lo contrario, se podría producir una combustión completa, llevando a cabo el proceso no deseado. Esta aportación de energía condiciona el tipo de reactor utilizado para el proceso, y se puede realizar de diferentes formas:

- **Por calentamiento interno.** Se utiliza el calor producido por las reacciones de combustión parcial del proceso. Es el más utilizado en los procesos de gasificación autotérmica.
- **Por calentamiento indirecto.** A través de la pared del reactor o por medios eléctricos.
- **Por calentamiento directo.** El calor es aplicado desde una fuente de energía externa:
  - Por calentamiento de una masa inerte que se introduzca en el reactor, como es el caso de la arena en un reactor de lecho fluidizado.
  - Por calentamiento directo de la materia prima, en este caso biomasa residual, antes de ser introducida al reactor.
  - Por calentamiento previo del agente gasificante utilizado en el proceso. Al tratarse de un gas, debe de encontrarse a altas temperaturas (Fundación para la Economía Circular, 2014).

Actualmente, existen diversos tipos de gasificadores en el mercado, dependiendo de la forma de contacto entre la biomasa alimentada y el agente gasificante para el intercambio de materia y energía. De forma general, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Gasificadores de parrilla.** Son los menos utilizados para gasificación, se utilizan sobre todo para incineración.

- **Gasificadores de lecho fijo.** El agente gasificante puede circular en paralelo o en contracorriente con la biomasa.
- **Gasificadores de lecho fluidizado.** El agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible.

A continuación, se describe con más detalle los diferentes gasificadores, con sus respectivas variantes.

### **8.1. Gasificadores de parrilla**

Estos gasificadores también son conocidos como gasificadores de carga horizontal o incineradoras de aire restringido o controlado. En ellos, el residuo se alimenta depositándolo en una parrilla, normalmente vertical, y por la parte inferior de esta se introduce el aire necesario para la gasificación. Los gases producidos en la combustión inicial sobre la parrilla ascienden a través de la masa de residuos calentándolos y provocando las reacciones de combustión, cracking molecular y gasificación.

El sistema de los gasificadores de parrilla consta de una cámara de combustión principal, formada por parrillas fijas, donde se genera la combustión parcial que produce la evaporación de los compuestos más volátiles y la gasificación de los residuos. Por otra parte, se encuentra la cámara de combustión secundaria en la que el gas procedente de la cámara primaria se quema con oxígeno en una combustión total. Este movimiento del gas entre cámaras se produce mediante transporte mecánico, por empujadores, o por el simple movimiento de las parrillas (Fundación para la Economía Circular, 2014; Basu, 2010).

Los gasificadores de parrilla son similares a las parrillas de incineración. Son tecnologías muy utilizadas en plantas de incineración con recuperación de energía que recientemente se han empezado a aplicar en procesos de gasificación (ILIE IONUT, 2019).

### **8.2. Gasificadores de lecho fijo**

Estos reactores tienen forma de cilindro vertical y en la parte inferior poseen una parrilla que sirve como soporte del lecho. Dependiendo de la circulación del aire y de los gases, están clasificados como:

- Gasificadores de flujo en paralelo (down-draft): en estos reactores el sólido (residuo) y el gas se mueven en paralelo.

Después de la etapa de secado, se produce la formación de los alquitranes, a temperaturas entre los 200 - 500°C. Posteriormente, los productos de pirólisis y combustión fluyen hacia abajo; el gas formado en las capas superiores del reactor atraviesa las zonas de mayor temperatura, provocando así las reacciones de cracking de los alquitranes y otros compuestos orgánicos. En esta etapa se produce un fenómeno llamado pirólisis en llama, en el que los alquitranes, debido a la disponibilidad de oxígeno, se queman, elevando la temperatura del gas hasta unos 1000 – 1400°C (Milne et al., 1998).

La gasificación tiene lugar en la parte inferior de la máquina, en una zona de reacción caliente que contiene una capa de carbonilla (Martínez de León, 2016).

El gas de síntesis producto de la gasificación abandona el reactor por la parte inferior a temperaturas elevadas, entre los 700 – 800°C, lo que implica una pérdida de energía bastante considerable (ILIE IONUT, 2019). Al mismo tiempo, las escorias también salen a una temperatura similar a la del syngas, parámetro que hay que tener en cuenta, en concreto si hay metales alcalinos inertes en los residuos alimentados al reactor, ya que estas pueden llegar a fusionarse en el lecho provocando su sinterización. El calor necesario para la gasificación es aportado por las reacciones de combustión de los residuos, producidas en la parte inferior del reactor. Este se transmite por conducción y radiación desde la parte inferior y va recorriendo el reactor provocando una estratificación de la temperatura, permitiendo que se produzcan las reacciones correspondientes a medida que aumenta la temperatura.

Este mecanismo de transmisión de calor implica que los tiempos de residencia de los residuos sean elevados. Como consecuencia, los gasificadores deberán tener un mayor tamaño o trabajar a capacidades reducidas, teniendo que ser el tamaño de partícula de los residuos muy uniforme para así evitar pasos preferenciales en el lecho, lo cual podría

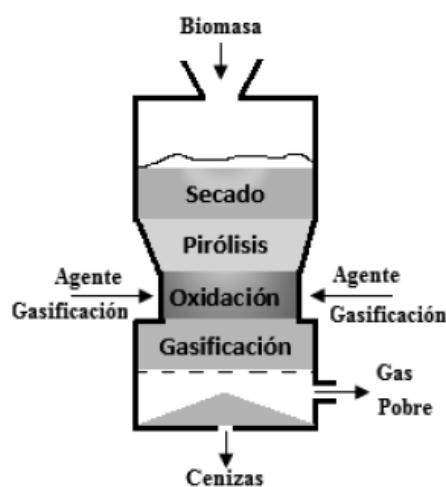
provocar un exceso de aire en las zonas de alta temperatura y favorecería a una combustión completa, reduciendo la producción de gas de síntesis. Una de las ventajas de estos gasificadores es que en ellos se produce una baja cantidad de alquitranes, ya que estos atraviesan la zona con la temperatura más elevada del proceso, por lo que son craqueados y quemados (Fundación para la Economía Circular, 2014; Basu, 2010).

Sin embargo, una de las desventajas es que el contenido en cenizas y partículas del gas suele ser elevado, ya que estos elementos son arrastrados desde la zona de gasificación, donde los residuos se encuentran ya en forma carbonizada y muy oxidada (ILIE IONUT, 2019; Sánchez Lario, 2017).

Por otro lado, este tipo de reactores son exigentes en cuanto a la calidad de la alimentación, ya que requieren que el tamaño de las partículas sea homogéneo y un bajo contenido en humedad, menor al 25%.

Para la generación de electricidad a pequeña escala (< 1MW) los reactores más utilizados son los gasificadores down-draft, ya que son capaces de garantizar los requerimientos de calidad del gas a suministrar al motor.

En la figura 3 se muestra un esquema del gasificador de lecho fijo descendente.



**Figura 3.** Gasificador de lecho fijo descendente (Arteaga Pérez et al., 2015).

- Gasificadores de flujo en contracorriente (up-draft): en estos gasificadores el aire se introduce por la parte inferior de la parrilla, moviéndose en sentido ascendente y en contracorriente con la biomasa, que entra por la parte superior del reactor y va descendiendo lentamente a medida que se produce la pérdida de masa sólida en la parte inferior del mismo.

El residuo introducido desciende por el reactor encontrando cada vez temperaturas más altas, produciéndose inicialmente su secado en la parte superior, seguido de la pirólisis o descomposición térmica, con la evaporación de volátiles. El residuo carbonoso obtenido de la pirólisis sigue descendiendo hasta la zona central del reactor, donde se encuentra con los gases de la combustión y el agente gasificante y se producen las reacciones del proceso de reducción. El sólido restante llega a la parte inferior del reactor, cerca de la parrilla, donde con el agente gasificante, se produce la combustión, en un ambiente con el oxígeno necesario para que únicamente se cumplan las necesidades térmicas del proceso y para reducir el carbono orgánico total (COT) en las escorias, haciendo que se alcancen temperaturas muy altas en esta zona.

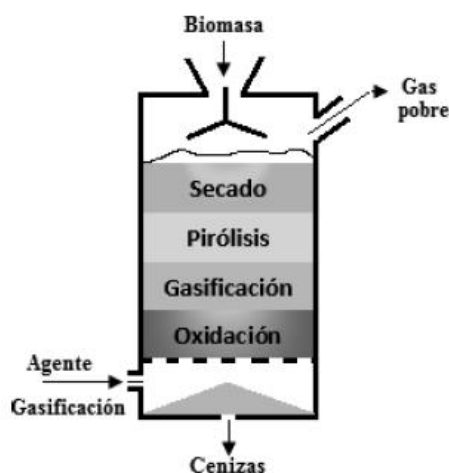
A diferencia de los reactores en paralelo, en estos el calor necesario para que se produzca el proceso es aportado por los gases generados en la combustión, que ascienden desde la parte inferior hacia las capas superiores mayoritariamente por convección (Fundación para la Economía Circular, 2014; Igado Gracia, 2013; Basu, 2010).

El gas resultante del proceso abandona el gasificador por la parte superior a una temperatura reducida, entre 300 y 400°C, junto con alquitranes parcialmente pirolizados, polvo y otros componentes líquidos. En este caso existe una gran formación de alquitranes, ya que ascienden hacia zonas de bajas temperaturas, lo que impide que se conviertan en gases. Con respecto a las escorias, estas son enfriadas por el aire de gasificación y salen a una temperatura reducida. Y las cenizas, son extraídas por la parte inferior del reactor mediante una grada rotatoria o un dispositivo similar.

Una de las ventajas de estos gasificadores es que son sencillos de construir y operan de una manera simple, sin muchos requisitos en cuanto al tamaño de partículas de los residuos introducidos o su contenido en humedad.

Sin embargo, posee algunas desventajas como la alta formación de alquitranes durante el proceso, en torno al 10 o 20 % en peso de la alimentación, los cuales se llevan una gran parte de la energía de los residuos de la que, por tanto, carecerá el gas de síntesis, el cual tendrá que ser sometido a unos tratamientos de acondicionamiento más estrictos para poder ser usado (Fundación para la Economía Circular, 2014; Igado Gracia, 2013; Basu, 2010).

En la figura 4 se muestra un esquema del gasificador de lecho fijo ascendente.



**Figura 4.** Gasificador de lecho fijo ascendente (Arteaga Pérez et al., 2015).

### 8.3. Gasificadores de lecho fluidizado

Existen diferentes tipos de gasificadores de lecho fluidizado, pero todos funcionan de forma similar. Estos reactores poseen un cilindro vertical de acero forrado con material refractario y un lecho de material inerte, normalmente arena, situado en la parte inferior del reactor, sobre la parrilla de distribución de aire. Esta arena favorece la transferencia térmica en el reactor, permitiendo así una mayor estabilidad; la más comúnmente utilizada es la arena de sílice (Belgiorno et al., 2003). Por debajo, se encuentran unas toberas a través de las cuales se distribuye el gas de fluidización, el aire, creando así, junto con los residuos que

se alimentan a través de uno o varios puntos del reactor, un lecho fluidizado. La velocidad de calentamiento de la alimentación es muy rápida, esto provoca que las etapas del proceso se realicen simultáneamente.

En la parte superior del gasificador tienen lugar los fenómenos de evaporación de la humedad, evaporación de los componentes volátiles de los residuos y, a temperaturas más elevadas, las reacciones típicas de gasificación ya señaladas. Una vez expandido el lecho e iniciada la reacción de gasificación se mantiene la temperatura entre 500 y 700°C en la parte superior del lecho, mediante la regulación del aire de entrada. A medida que aumenta la distancia respecto a la parrilla se produce una disminución de la temperatura de los gases, ya que se genera un intercambio térmico entre los gases calientes procedentes de la parte inferior del reactor, donde tiene lugar la combustión del carbono, y la masa de los residuos alimentados (Fundación para la Economía Circular, 2014).

El contenido en alquitranes del gas obtenido en estos gasificadores se encuentra entre los dos extremos representados por los de lecho fijo ascendente y descendente, con una media de unos 10mg/Nm<sup>3</sup> (Basu, 2010). En general, los reactores de lecho fluidizado pueden llegar a ser hasta cinco veces más eficientes que los de lecho fijo (Belgiorno et al., 2003).

Existen diferentes tipos de gasificadores de lecho fluidizado. Dependiendo de su expansión del lecho de arena, pueden clasificarse en:

- De lecho burbujeante: la expansión del lecho de arena es muy pequeña. Para conseguir una buena gasificación se emplean cantidades reducidas de aire de fluidización, lo que genera que el lecho tenga un aspecto similar al de un líquido en ebullición. La velocidad media del aire en la sección transversal del lecho está en torno a 1,5 m/s, lo que hace que este se mantenga en suspensión sin que exista arrastre de partículas al exterior (Fundación para la Economía Circular, 2014). La temperatura de operación habitual suele ser de aproximadamente 900°. Si no se opera a la temperatura adecuada, la interacción de la arena con las cenizas creadas en el proceso puede generar problemas, ya que se podría producir

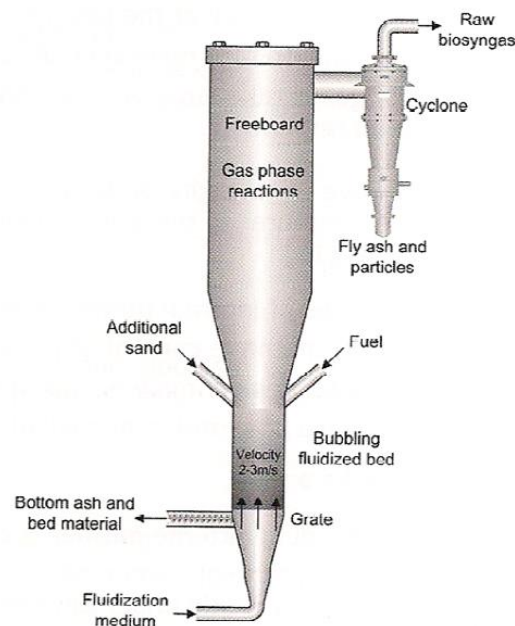


la fusión y sinterización de las cenizas llegando a formar aglomerados en el lecho.

En estos gasificadores la transferencia de materia y calor es buena, favoreciendo la obtención de un gas con un poder calorífico moderado y un bajo contenido en alquitranes, pero con una alta cantidad de partículas (ILIE IONUT, 2019).

Estos reactores presentan diversas ventajas, como un fácil control de su comportamiento y temperatura y una elevada capacidad de procesamiento. Permiten capacidades de gasificación medias y altas, de 1 a 20 MW (Sánchez Lario, 2017).

En la figura 5 se muestra un esquema del gasificador de lecho fluidizado burbujeante.



**Figura 5.** Gasificador de lecho fluidizado burbujeante (Bull, 2008).

- De lecho circulante: en este tipo de lecho se emplean velocidades de aire de fluidización mayores que en el burbujeante, superiores a 5 m/s, lo que produce una expansión completa del lecho de arena, que se extiende a la totalidad del reactor e incluso es arrastrado fuera del mismo (Fundación para la Economía Circular, 2014).

El concepto de flujo circulante hace referencia a la separación de las partículas del lecho mediante el uso de un separador ciclónico: la arena del lecho, junto con los sólidos de reacción, es arrastrada hasta la parte

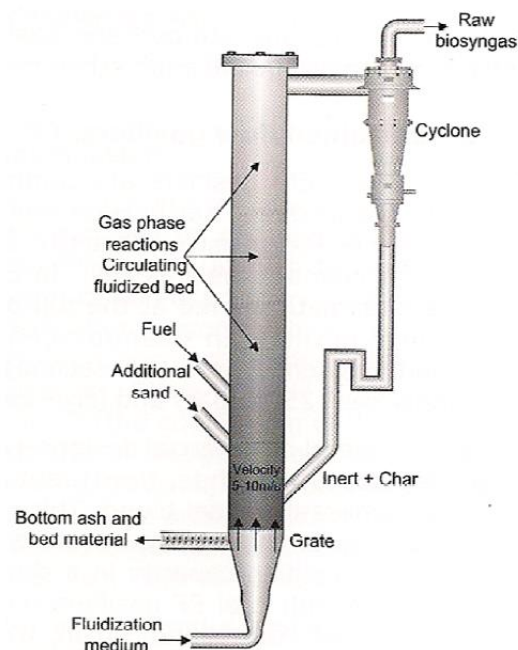
superior del reactor, donde el ciclón los separa de los productos volátiles y los devuelve al lecho. La temperatura permanece uniforme a lo largo del reactor, alcanzando como mucho los 1000°C (ILIE IONUT, 2019).

Algunas de las ventajas de este tipo de gasificadores es que permiten operar con un alto caudal de residuos, se produce un gas a altas temperaturas y con una baja cantidad en alquitranes. Al igual que los anteriores, tienen una gran flexibilidad en las características de los residuos a gasificar y tienen un fácil control del proceso. Sin embargo, su construcción requiere materiales más caros.

Estos reactores se caracterizan también por un alto nivel de mezcla entre el gas de fluidización y los sólidos y un mayor tiempo de residencia en el reactor (Basu, 2010).

Los gasificadores de lecho circulante suelen operar con aire enriquecido, con un 75-85% de oxígeno, y a presiones elevadas, entre los 30 y 70 bares. Gracias a estas condiciones se obtiene un gas de alto poder calorífico de 15 a 20 MJ/Nm<sup>3</sup>, utilizado para la síntesis de productos químicos o la producción de hidrógeno (Sánchez Lario, 2017).

En la figura 6 se muestra un esquema del gasificador de lecho fluidizado circulante.



**Figura 6.** Gasificador de lecho fluidizado circulante (Bull, 2008).

- De flujo arrastrado: estos gasificadores están aún en desarrollo y se caracterizan por tener una operación compleja y unos costes muy elevados para el desarrollo del proceso. No son válidos para el tratamiento de residuos urbanos en general y actualmente se están acondicionando para poder usarlos con este tipo de alimentación. Habitualmente este tipo de gasificadores se utilizan para tratar carbón, residuos de refinería o residuos plásticos.

Tienen unos requisitos muy estrictos de operación, no admiten cualquier tamaño de partícula, por lo que es necesario pretratar previamente la alimentación. La temperatura de operación es de unos 1200-1500°C y la presión es de aproximadamente 25 bares, por lo que se tienen problemas con los materiales de construcción del reactor (ILIE IONUT, 2019).

El gas de síntesis obtenido es de poder calorífico moderado, ya que su contenido en alquitrán es bajo, prácticamente nulo, ya que todo lo que se libera pasa por una zona de alta temperatura, mayor a 1000°C, lo que hace que se convierta casi todo en gases (Basu, 2010).

- De lecho estacionario: estos gasificadores poseen un tipo de fluidización intermedia entre los dos anteriores, la velocidad del aire es la justa para conseguir una expansión del lecho razonable, pero sin que este sea totalmente arrastrado (Fundación para la Economía Circular, 2014).

- De lecho circulante interno: es una variante del reactor de lecho burbujeante en el que se mejora la mezcla del gas de fluidización y los residuos mediante un distribuidor de gas especial. También posee un tabique inclinado entre la zona de combustión y de intercambio de calor que provoca diferentes flujos circulantes.

- De lecho fluidizado doble: esta tecnología utiliza dos reactores de lecho fluidizado. Este modo de operación hace que se separen las zonas de combustión y gasificación: la alimentación se introduce al primer reactor, donde se gasifica con vapor, y el alquitrán formado, junto con el char formado en la devolatilización y el material de lecho, es transportado al segundo reactor, donde es quemado con aire para producir calor, el cual se transfiere al primer reactor a través del material del lecho, que circula

de forma continua entre los dos reactores. (ILIE IONUT, 2019; Foscolo et al., 2007).

#### **8.4. Gasificación por plasma:**

La gasificación por plasma es una de las tecnologías recientes en desarrollo. Esta tecnología consiste en un método térmico para el tratamiento de residuos, en el que se utiliza plasma a alta temperatura como fuente de calor para gasificar los hidrocarburos de los residuos.

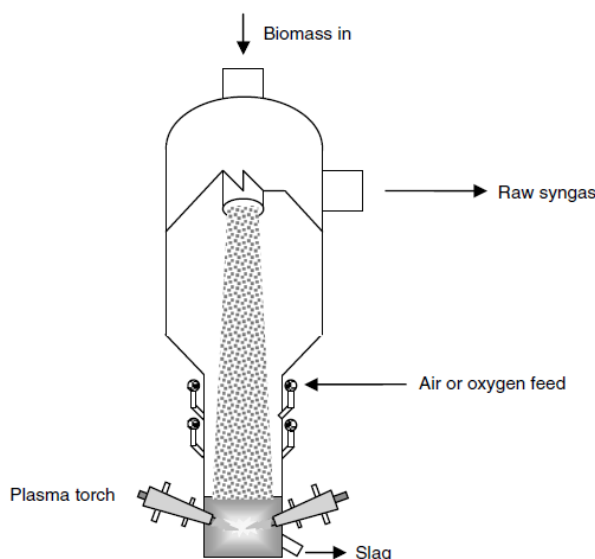
El plasma es un estado de la materia, formado a partir de un gas sometido a altas temperaturas y en el cual prácticamente todos los átomos han sido ionizados. El resultado es un fluido conductor de la electricidad.

En la gasificación por plasma, el combustible o los residuos se introducen en un recipiente del reactor donde el plasma es generado eléctricamente a muy altas temperaturas. El corazón del proceso es una pistola de plasma donde se crea un intenso arco eléctrico entre dos electrodos separados en un recipiente cerrado a través del cual se hace pasar un gas inerte, generalmente argón o helio, el cual es capaz de descomponer la alimentación introducida en el reactor (IDAE, 2011; Tamayo Pacheco et al., 2020).

Aunque la temperatura del arco es extremadamente alta, en torno a 13.000°C, la temperatura aguas abajo, donde los residuos entran en contacto con él, es mucho más baja, en un rango de 2700 - 4500°C. Sin embargo, la temperatura posterior es lo suficientemente alta para pirolizar los hidrocarburos complejos y convertirlos en gases simples como hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua y metano. Simultáneamente, las cenizas y otros materiales inorgánicos presentes en el combustible o los residuos se funden en un complejo líquido compuesto por silicio (Si) que fluye hacia el fondo del recipiente de reacción. El producto gaseoso sale del gasificador a temperaturas muy altas, entre 1000 y 1200°C, y su composición es más baja en trazas contaminantes que con cualquier tipo de incinerador u otro gasificador (Basu, 2010; Mondal et al., 2011).

Un reactor de plasma típico proporciona un tiempo de residencia relativamente largo del gas en el gasificador; esto y la alta temperatura provocan que los

productos de alquitrán se craqueen y que se destruyan los productos nocivos, como la dioxina y el furano. Sin embargo, debido a la elevada temperatura del reactor y a la presencia de cloro en los residuos, la vida útil del revestimiento del reactor es limitada, lo que supone un inconveniente (Basu, 2010). En la figura 7 se muestra un equipo de gasificación por plasma.



**Figura 7.** Esquema de un equipo de gasificación por plasma (Basu, 2010).

En resumen, se pueden distinguir dos productos resultantes del proceso de gasificación del plasma: un gas, compuesto fundamentalmente por monóxido de carbono e hidrógeno; y un residuo sólido, consistente en una escoria inerte generalmente vitrificada.

La gasificación por plasma es una técnica emergente con potencial crecimiento en la valorización energética de los residuos sólidos urbanos y otros productos de desecho, dada su capacidad para convertir dicho material en un gas combustible de forma respetuosa con el medio ambiente (Tamayo Pacheco et al., 2020). Este tipo de tecnología puede ser empleada para tratar cualquier tipo de residuos, excepto residuos nucleares, ya que, a dicha temperatura, toda la materia se descompone en sus principales constituyentes.

A diferencia de la gasificación y la pirólisis, en esta tecnología también se incluyen, residuos con alto contenido de compuestos inorgánicos e inertes, de

humedad, e incluso de valores de PCI reducidos, por la posibilidad de aportación energética externa. Sin embargo, esta misma aportación energética es la que implica limitaciones en rentabilidad económica. Para evitar un coste excesivo se debe tratar residuos de alto PCI, de bajo contenido en volátiles, impurezas y humedad (IDAE, 2011).

Como resultado de las pruebas realizadas en plantas piloto, algunas fuentes aseguran que esta tecnología podría llegar a tratar residuos sólidos urbanos, residuos industriales, biomasa, residuos sanitarios, de desguaces de vehículos, neumáticos, CDR, plásticos, residuos especiales, etc., aunque no todos ellos están probados al mismo nivel.

Existen dos referencias a nivel mundial de aplicación de este tipo de tecnología para el tratamiento de los residuos: la planta de Eco-Valley, de Hitachi Metals Ltd., y la planta de Trail Road, del grupo Plasco Energy.

Este tipo de plantas aún están en fase de pruebas y la disponibilidad de datos de explotación también es escasa para permitir establecer conclusiones sobre su eficiencia energética y su rentabilidad económica (IDAE, 2011).

## **9. LIMPIEZA O PURIFICACIÓN DEL SYNGAS**

En el proceso de gasificación de residuos, aparte de los componentes principales del syngas (monóxido de carbono, agua, metano, hidrógeno, dióxido de carbono e hidrocarburos ligeros), se producen algunas impurezas que deberán ser eliminadas. Es esencial caracterizar y cuantificar estas impurezas en el gas de síntesis para así poder someterlas a un proceso de limpieza específico.

Dependiendo de la naturaleza de los residuos que se introduzcan en el reactor y de las condiciones de trabajo del mismo, se producen derivados del nitrógeno en mayor o menor medida. Los principales compuestos formados son el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el cianuro de hidrógeno ( $\text{HCN}$ ). Los halógenos se liberan en forma de cloruros (como el  $\text{HCl}$ ) o de sales metálicas formadas al unirse los diferentes metales que contiene la biomasa. Otra de las impurezas que se generan en el proceso de gasificación son pequeñas cantidades de azufre, generalmente la especie dominante formada es el  $\text{H}_2\text{S}$ ; estos son muy perjudiciales para los

procesos posteriores debido al ensuciamiento de los componentes, el envenenamiento catalítico y las regulaciones medioambientales. Por último, se producen también una serie de alquitranes que se condensan al reducir la temperatura, estos presentan pérdidas de carbono y también suponen una dificultad durante la valorización del gas, por lo que deben ser separados previamente. En la tabla 8 se muestra un resumen de las impurezas nombradas, los problemas que generan y los posibles tratamientos de limpieza que se podrían realizar.

**Tabla 8.** *Contaminantes, los problemas que conllevan y métodos de limpieza (Belgiorno et al., 2003).*

Contaminantes	Rangos (g/Nm <sup>3</sup> )	Ejemplos	Problemas	Métodos de limpieza
<b>Partículas</b>	3 - 70	Cenizas, char o material del lecho del reactor	Erosión y emisiones	Filtración, lavado
<b>Metales alcalinos</b>	-	Compuestos con sodio o potasio	Corrosión y catalizadores	Condensación y filtración
<b>Compuestos nitrogenados</b>	1,5 - 3	Principalmente NH <sub>3</sub> y HCN	Emisiones	Lavado
<b>Alquitranes</b>	10 – 100	Aromáticos reformados	Obstrucción de filtros, atascos y desactivación de los catalizadores	Craqueo, lavado
<b>Derivados de azufre y cloruros</b>	2,5 – 3,5	H <sub>2</sub> S, HCl	Corrosión, envenenamiento y emisiones	Lavado de cal

Tanto el tipo de proceso de gasificación, como los requerimientos a cumplir para las distintas aplicaciones finales condicionarán el sistema de limpieza y acondicionamiento del gas a utilizar. El gas sometido a estos procesos deberá cumplir los requisitos de la aplicación deseada en términos de composición, temperatura y presión, entre otros, cumpliendo siempre con la normativa medioambiental correspondiente.

En la tabla 9 se detallan algunos ejemplos de requisitos del syngas para determinadas aplicaciones. En ella se observa que los hornos, las calderas y los sistemas de cocción tienen los requisitos de limpieza de gas más bajos que los motores y las turbinas de gas. Los combustibles sintéticos y la producción de productos químicos tienen los requisitos de calidad de gas más estrictos (Bull, 2008).

**Tabla 9.** *Requisitos del syngas según el uso al que va a ser destinado (Ruiz y Sánchez, 2014).*

	Combustible sintético			Gas combustible		
	Gasolina, diésel FT	Metanol	Hidrógeno	Caldera	Turbina	Motor
<b>H<sub>2</sub>/CO</b>	0,6	2	Alto	Indiferente	Indiferente	Indiferente
<b>CO<sub>2</sub></b>	Bajo	Bajo	Bajo	No crítico	No crítico	No crítico
<b>Hidrocarburos</b>	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Alto
<b>Contaminantes</b>	< 1ppm de S, Bajo nivel de partículas	< 1ppm de S, Bajo nivel de partículas	< 1ppm de S, Bajo nivel de partículas	Bajo nivel de partículas	Bajo nivel de partículas y metales	Bajo nivel de partículas, metales y alquitranes
<b>Poder calorífico</b>	Indiferente	Indiferente	Indiferente	Alto	Alto	Alto
<b>Presión (bar)</b>	20 - 30	50 (líquido) 140 (vapor)	20	Bajo	Alto	Bajo
<b>Temperatura (°C)</b>	200 – 400	100 – 200	100 – 200	250	500 – 600	Bajas

Por tanto, la previa depuración y acondicionamiento del syngas, será necesaria con el objetivo de eliminar contaminantes a niveles suficientemente bajos para cumplir con la normativa medioambiental y la tolerancia de los sistemas de conversión del gas, ajustar la relación CO/H<sub>2</sub> y mejorar la calidad del gas para su aprovechamiento energético o a su conversión en combustibles limpios (H<sub>2</sub>, síntesis química) y contribuir así a la reducción progresiva de emisiones responsables de la acidificación (NH<sub>3</sub>) y del efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) (Ruiz y Sánchez, 2014).

La eliminación de estas impurezas se puede desarrollar durante el mismo proceso de gasificación y después del mismo. Las medidas que se toman antes o durante el proceso de gasificación se denominan métodos primarios y su objetivo es la producción de un gas lo más limpio posible. Estos incluyen el pretratamiento de la biomasa o la utilización de materiales catalíticos mezclados con la biomasa o en el lecho de los reactores de fluidización.

Dependiendo de la tecnología de gasificación que se emplee, y de las condiciones de operación (relación biomasa/gasificante, tiempo de residencia, etc.) se pueden usar diferentes catalizadores para inducir ciertas reacciones y que se produzca prioritariamente algún componente.

Para facilitar el craqueo de las fracciones más pesadas y así reducir la formación de alquitranes durante el proceso, se pueden usar catalizadores de reformado de níquel o cobalto, gasificando a menos de 550°C. Si se trabaja con



temperaturas entre los 700 y 800°C, los catalizadores de cobalto y níquel también pueden favorecer la formación de monóxido de carbono e hidrógeno.

Por otra parte, si se introducen catalizadores basados en zeolita y dolomita, se reduce la temperatura en la zona de reducción, y por tanto también la de craqueo, de 1100°C a 800 - 900°C (IDAE, 2010).

Con respecto a los métodos de eliminación secundarios, son los que se realizan una vez se ha obtenido el gas de síntesis del proceso de gasificación y tienen como objetivo limpiar y mejorar las características del gas ya producido. Estos a su vez se dividen según sean realizados a temperatura alta o baja.

La limpieza del gas realizada a baja temperatura se desarrolla fundamentalmente en lavadores (scrubbers), precipitadores electrostáticos en medio húmedo y torres de spray. Estos métodos húmedos implican el enfriamiento de los gases a temperatura ambiente o inferior, por lo que no son adecuados para aplicaciones energéticas, ya que involucran costes elevados y pérdidas de eficiencia al tener que enfriar el gas para su limpieza y luego calentarlo para utilizarlo en la generación de energía. A pesar de ello, la vía húmeda es la más usada en las plantas de gasificación existentes, para aplicaciones que trabajan con gases a bajas temperaturas ya que se considera una tecnología desarrollada, con fácil diseño y eficacia comprobada. Sin embargo, la limpieza de gases en caliente, en la que se opera a temperaturas por encima de los 300°C, permite un mejor balance energético y una mejor economía del proceso, al tiempo que se eliminan los problemas derivados de la gestión de efluentes (Ruiz y Sánchez, 2014; Martínez de León, 2016).

La limpieza física en caliente se desarrolla por ciclones, filtros cerámicos y separadores electrostáticos en seco. Además de estos métodos físicos, la limpieza puede desarrollarse por métodos químicos como la conversión catalítica, que se basa en el uso de materiales catalíticamente activos para reducir la energía de activación de las reacciones de craqueo de alquitranes y descomposición de amoníaco (Arteaga Pérez et al., 2015). Estos catalizadores se estudiarán más adelante.

A continuación, se describen con más detalle los métodos secundarios de eliminación para los diferentes tipos de impurezas contenidos en el gas de síntesis.

### 9.1. Eliminación de partículas:

Las partículas están formadas por todos los elementos en fase sólida que salen del gasificador, principalmente por las cenizas. La presencia de estas cenizas en la corriente de salida del gas puede suponer problemas tanto en su uso posterior como dentro del gasificador, ya que estas tienen características erosivas, cohesivas, reactivas y adhesivas, pudiendo provocar la obstrucción de equipos y de las zonas de paso del gas en el gasificador, debido a su deposición continua, y bloquear los centros activos del catalizador, si lo hubiera. Además, estas partículas deben ser eliminadas debido a que la normativa ambiental limita el contenido de estas en el gas. La cantidad de partículas dependerá del proceso de gasificación, del tamaño del combustible alimentado y de su contenido en cenizas.

Los métodos de eliminación de partículas son muy variados, la elección del mismo vendrá determinada por la limpieza requerida y el coste del equipo (Hernández López, 2015). A continuación, se describen algunos de ellos:

- **Ciclones:** Se consigue un rendimiento cercano al 90% para partículas de un tamaño superior a 10  $\mu\text{m}$ . Soportan temperaturas muy altas, de hasta 900  $^{\circ}\text{C}$ .
- **Filtros de mangas:** Se elimina la práctica totalidad de las partículas de un tamaño comprendido entre 0,1 y 100  $\mu\text{m}$ . Este tipo de equipo también soporta altas temperaturas.
- **Filtros electrostáticos:** Presentan un rendimiento del 99% para tamaños de partícula inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . Su alto precio acompañado de la complejidad de operación y el hecho que la temperatura máxima permitida son 500  $^{\circ}\text{C}$  (el gas sale del gasificador aproximadamente a 850  $^{\circ}\text{C}$ , por lo que sería necesaria una etapa previa de enfriamiento) hacen que no sea una opción a tener en cuenta.

- **Scrubbers:** Con el lavado de los gases se conseguirían eliminar las partículas de más de 1  $\mu\text{m}$ , pero la temperatura no debe superar los 100  $^{\circ}\text{C}$ , para asegurar que el agua no se evapore, por lo que su uso también queda muy restringido.

En la tabla 10 se observan diferentes valores orientativos de la cantidad de partículas que se genera en los diferentes tipos de gasificadores. Normalmente, los gasificadores de lecho fijo suelen producir menos cantidad de partículas y de menor tamaño que los de lecho fluidizado.

**Tabla 10.** *Valores orientativos de partículas en suspensión para distintos gasificadores (La Cal Herrera, 2013).*

Tipo de gasificador	Partículas en suspensión ( $\text{g}/\text{Nm}^3$ )		
	Bajo	Alto	Intervalo
<b>Downdraft</b>	0,1	10	0,1 – 0,2
<b>Updraft</b>	0,1	3	0,1 – 1
<b>Lecho fluidizado burbujeante</b>	1	100	2 – 20
<b>Lecho fluidizado circulante</b>	8	100	10 – 35

Tras esta breve descripción de los diferentes equipos existentes para la eliminación de partículas, se puede concluir que; partículas por encima de 10  $\mu\text{m}$  pueden ser eliminadas con ayuda de ciclones, recirculando el material separado a los gasificadores. Para las pequeñas partículas que estos no han sido capaces de eliminar, es necesario el uso de equipos más eficaces como filtros cerámicos, de mangas o precipitadores electrostáticos. Es habitual encontrar estos aparatos a continuación de los ciclones para conseguir eficacias globales de separación de hasta el 99%. Ante la posibilidad de la sinterización de los materiales que constituyen estas máquinas debido a las altas temperaturas, será necesario enfriar los gases, lo cual, tal y como se ha indicado previamente, supone un gasto energético y económico mayor, ya que después de eliminar las partículas y acondicionar el gas habría que calentarlo de nuevo para que pudiera ser usado (Igado Gracia, 2013).

Un ejemplo de proceso para la eliminación de partículas del gas de síntesis puede ser un lavado con agua en dos etapas. El proceso está compuesto por un tubo de enfriamiento (separador de carbono) y una torre empaquetada (lavador

de carbono). En el tubo de enfriamiento, se elimina por pulverización directa de agua alrededor del 95% del carbono. En el lavador, el gas de síntesis se lava en flujo en contracorriente en dos lechos empacados. Se emplea un sistema de circulación sobre el lecho inferior mediante una bomba de circulación, y el lecho superior se lava con agua de retorno de la sección de recuperación de carbono. Otra técnica eficaz desarrollada para la separación de partículas es el uso de filtros de gas caliente. Los filtros cerámicos de flujo cruzado se utilizan sobre todo para eliminar el polvo del gas de síntesis caliente. Recientemente, también se están desarrollando filtros de lecho móvil para la eliminación económica de estas partículas de carbón mediante procesos secos (Mondal et al., 2011).

## 9.2. Eliminación de gas ácido

La atmósfera reductora en la que sucede la gasificación hace que el azufre esté presente en forma de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y sulfuro de carbonilo ( $COS$ ), generalmente se encuentran en pequeñas proporciones, en torno a un 0,4% en peso del gas de síntesis. El azufre es un contaminante más peligroso que el cloro, puesto que sus efectos pueden ser irreversibles si la concentración es demasiado alta. Los componentes del gas ácido se eliminan del gas de síntesis para que sea adecuado para varias aplicaciones posteriores en las que las concentraciones máximas permitidas de azufre,  $CO_2$  y  $CO$  son limitadas. La eliminación del  $H_2S$  normalmente va acompañada de la del  $CO_2$ .

Generalmente es más rentable económicamente eliminar el  $H_2S$  del gas de síntesis que el  $SO_2$  de los productos de combustión. El gas de síntesis se puede llegar a contener concentraciones de hasta 2000 – 3000 ppmv de  $H_2S$ .

A continuación, se detallan los diferentes métodos existentes para la limpieza de azufre del gas de síntesis, los cuales se clasifican dependiendo de la temperatura a la que se realicen.

- **Absorción de disolventes (proceso húmedo):** Este tipo proceso está diseñado para tratar grandes cantidades de gas a temperaturas inferiores a los  $100^\circ C$ , siendo la presión parcial de los gases un parámetro muy importante en el proceso. Normalmente se obtienen concentraciones de salida de  $H_2S$  en el gas de entre 1 y 2 ppm (Hernández López, 2015).

Los procesos de absorción aplicados para la eliminación de los gases ácidos del gas de síntesis incluyen la absorción química, la absorción física, así como procesos que incluyen la combinación de ambos.

En el proceso de absorción química, los componentes del gas ácido reaccionan con las moléculas del disolvente y se disuelven en él. Se utiliza una solución que reacciona con los gases ácidos. En este caso, el proceso precisa presiones parciales del H<sub>2</sub>S muy bajas (Mondal et al., 2011). Para este tipo de absorción se utilizan los siguientes compuestos, formados principalmente por aminas:

- Monoetanol amina (MEA)
- Dietanol amina (DEA)
- Metil-dietanol amina (MDEA)
- FLEXSORB (aminas impedidas)

En el proceso de absorción física, los componentes del gas de síntesis se encuentran en la molécula del disolvente y no existen reacciones químicas entre ellos. El proceso se ve favorecido por presiones parciales de H<sub>2</sub>S altas. Los absorbentes físicos más importantes son los dimetiléteres de polietilenglicol (proceso Selexol) y el metanol refrigerado (proceso Rectisol). La absorción física también elimina trazas de otros compuestos no deseados, como hidrocarburos de alto peso molecular o compuestos orgánicos sulfurados, evitando la formación de productos de reacción no deseados (Martínez de León, 2016).

En los procesos que combinan la absorción física y química se utilizan algunos compuestos como el sulfinol y el amisol, que absorben los componentes del gas ácido por adhesión física y por reacciones químicas.

Entre los procesos de absorción mencionados, los procesos MDEA, Selexol y Rectisol se han utilizado ampliamente en muchos gasificadores comerciales. En la tabla 11 se resumen las características más destacadas de los procesos de absorción más utilizados para la limpieza de gases ácidos (Mondal et al., 2011).

**Tabla 11.** Comparación entre los métodos de absorción más utilizados para la eliminación de gases ácidos (Mondal et al., 2011).

Disolvente y proceso	Eliminación	Parámetros del proceso	Calidad del gas tratado
<b>MDEA (Abs. química)</b>	H <sub>2</sub> S: 98 – 99 % CO <sub>2</sub> : ≈ 30 %	T(°C) = 30 a 35 (T.ambiente) P(MPa) = < 2,94	H <sub>2</sub> S: 10 – 20 ppmv
<b>Selexol (Abs. física)</b>	H <sub>2</sub> S: 99 % CO <sub>2</sub> : variable	T(°C) = -7 a -4 P(MPa) = 6,87	H <sub>2</sub> S: <30 ppmv
<b>Rectisol (Abs. física)</b>	H <sub>2</sub> S: 99,5 – 99,9 % CO <sub>2</sub> : 98,5%	T(°C) = -35 a -60 P(MPa) = 8,04	H <sub>2</sub> S: <0,1 ppmv

El gas H<sub>2</sub>S absorbido en los disolventes de tipo químico y físico se desorbe a temperaturas elevadas y el azufre elemental se recupera mediante el proceso Claus, que consiste en la oxidación catalítica del sulfuro de hidrógeno.

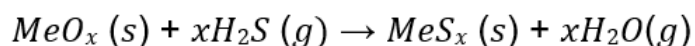
- **Adsorción (proceso caliente):** existen varios tipos de procesos de eliminación de azufre mediante adsorción. Estos se pueden clasificar en procesos regenerativos y no regenerativos.

- Lecho de adsorbentes basados en calcio: se trata de un proceso no regenerativo, en el que se usan una serie de materiales, previamente sometidos a un proceso de calcinación, para la eliminación del H<sub>2</sub>S. Es recomendable el uso de la caliza (CaCO<sub>3</sub>), ya que tiene una gran disponibilidad, su coste es bajo y su peligrosidad nula. Cuando la caliza contiene altas proporciones de carbonatos de magnesio se le denomina dolomita (CaCO<sub>3</sub>-MgCO<sub>3</sub>). Estos compuestos se pueden poner dentro del gasificador, para que capturen parte del azufre desprendido, sin embargo, estos reactivos se pueden consumir durante el proceso, teniendo que ser repuestos continuamente, de ahí que se le clasifique como proceso no regenerativo. Si el proceso de eliminación se realiza a temperaturas entre 800 y 900°C se obtienen muy buenos resultados y una gran eficacia (Martínez de León, 2016; Hernández López, 2015).

Cabe destacar que, aunque la cal tiene una alta disponibilidad y un precio algo inferior al de la dolomita, dado que su efectividad es

más baja, el material más utilizado para los procesos de eliminación es la dolomita, ya que llega a conseguir reducciones de hasta 80% debido a su mayor porosidad, que facilita la penetración de H<sub>2</sub>S, y, además, también puede actuar como catalizador de alquitranes y NH<sub>3</sub> a un precio asequible y competitivo (Martínez de León, 2016; Hernández López, 2015).

- Lechos de óxidos metálicos: se trata de un proceso químico regenerativo en el que se opera a temperaturas próximas a las de gasificación, lo que ayuda a incrementar la eficiencia energética del proceso, reduciendo y eliminando las necesidades de enfriar el gas antes de la eliminación de partículas y la desulfuración. Existe una gran variedad de adsorbentes, como MnO, CuO, ZnO, ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, ZnTiO<sub>3</sub>, Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc., capaces de eliminar el H<sub>2</sub>S del syngas, permitiendo reducir las concentraciones de este hasta valores cercanos a 0,5 ppm, operando a temperaturas entre los 400 y 500°C (Martínez de León, 2016; Hernández López, 2015). Es importante destacar que, debido al alto coste de los materiales usados es importante que estos se puedan regenerar, recuperando su forma original al reaccionar selectivamente con oxígeno o vapor, siendo necesario controlar la temperatura de regeneración (exotérmica) para evitar la sinterización del adsorbente. Los óxidos metálicos (MeO<sub>x</sub>) utilizados como adsorbentes deben reaccionar selectivamente con el sulfuro de hidrógeno, en una atmósfera reductora y en las condiciones habituales de salida de un gasificador, tal y como se muestra en la figura 8 (Ruiz y Sánchez, 2014).



**Figura 8.** Reacción entre los óxidos metálicos y el H<sub>2</sub>S (Martínez de León, 2016).

Dentro de los compuestos adsorbentes mencionados anteriormente, con algunos se obtienen mayores eficiencias que con otros. Merkel et al., (2003), realizó un estudio en el que se concluyó que los óxidos basados en zinc y titanio son los que más

capacidad de regeneración tienen (Hernández López, 2015). Además, el Research Triangle Institute (RTI) International, de Estados Unidos, ha desarrollado tecnología de adsorbentes de titanato de zinc para la desulfuración del gas de síntesis (Mondal et al., 2011).

- **Eliminación del sulfuro de carbonilo:** en el gas de síntesis el compuesto derivado del azufre mayoritario es el sulfuro de hidrógeno, pero es importante destacar la existencia de una fracción de sulfuro de carbonilo (COS) que debe ser eliminada. Los métodos de absorción anteriormente descritos son incapaces de eliminar este compuesto. Sin embargo, se sabe que a bajas temperaturas el COS se convierte en  $H_2S$ . Este proceso de transformación se puede ver acelerado con el uso de catalizadores como el aluminio o el titanio; este último utilizado en el método de adsorción por lechos de óxidos catalíticos, lo que implica que la utilización de este proceso hace que, aparte de eliminar el sulfuro de hidrógeno, se esté eliminando simultáneamente el COS (Martínez de León, 2016).

### **9.3. Eliminación metales alcalinos**

Los metales alcalinos como el sodio y el potasio a altas temperaturas son muy volátiles y pueden suponer problemas al sistema, ya que son volátiles a altas temperaturas y se depositan al enfriarse el gas, pudiendo ser una fuente potencial de corrosión y pueden desactivar los catalizadores, si estos fueran utilizados. La concentración típica del sodio en los gases procedentes de residuos es de 3000 a 5000 ppm, mientras que la de potasio está normalmente entre 2000 y 3000 ppm (Klein et al., 2003).

Los metales alcalinos contenidos en las cenizas de la gasificación se evaporan para formar productos como KOH y KCl. Cuando se trabaja a altas temperaturas, por encima de los  $650^{\circ}C$ , estos metales son capaces de atravesar los sistemas de separación de partículas. Sin embargo, la mayoría de estos compuestos, junto con otros metales pesados como el cadmio y plomo, tienen una temperatura de condensación entre  $500$  y  $650^{\circ}C$ , a partir de la cual comienzan a depositarse

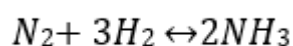


sobre las partículas arrastradas. Por tanto, si el gas se enfría hasta estas temperaturas, se podrá efectuar la eliminación conjunta de estos compuestos (La Cal Herrera, 2013).

#### **9.4. Eliminación de compuestos nitrogenados**

Del proceso de gasificación normalmente se puede obtener nitrógeno, ya que se encuentra en los residuos alimentados al reactor y en gran proporción en el aire que se usa como agente gasificante o como gas de fluidización, en el caso de los reactores de lecho fluidizado. Debido a la atmósfera reductora de la gasificación, se produce una combustión parcial de los residuos, previniendo la oxidación completa del nitrógeno, haciendo que se encuentre principalmente en forma molecular ( $N_2$ ), amoníaco ( $NH_3$ ) y, en menor cantidad, cianuro ( $HCN$ ), siendo mínima la concentración de  $NO_x$ .

Los problemas que genera el amoníaco son principalmente medioambientales, puesto que su presencia favorece la generación de  $NO_x$  cuando el gas se usa en motores y turbinas. Su eliminación se puede conseguir mediante scrubbing húmedo, donde el gas se debe enfriar previamente hasta los  $50^\circ C$ , o mediante conversión catalítica. Si se usa catalizadores metálicos o basados en dolomita se puede conseguir la eliminación de hasta el 99% del amoníaco mediante la reacción de la figura 9, a temperaturas de aproximadamente  $900^\circ C$  (Klein, 2002).



**Figura 9.** *Reacción de eliminación del amoníaco (La Cal Herrera, 2013).*

Cabe destacar que el uso de un lecho de dolomita puede ser beneficioso en la eliminación de muchos contaminantes contenidos en el gas de síntesis, como el amoníaco o los alquitranes.

#### **9.5. Eliminación de haluros**

Algunos compuestos de los residuos gasificados pueden presentar concentraciones de hasta el 0,5% en peso de cloro, el cual puede sufrir diferentes reacciones durante el proceso. Puede permanecer en las cenizas, en las partículas retenidas por el ciclón o salir en el gas producto en forma de ácido

clorhídrico (HCl). El porcentaje de cloro volatilizado dependerá en gran medida de la temperatura de operación del proceso y de la presencia de otros contaminantes.

Los ácidos de halógenos como el ácido clorhídrico (HCl), el ácido fluorhídrico (HF) o el ácido bromhídrico (HBr) son muy dañinos para el sistema, ya que provocan graves problemas de corrosión. La concentración de HBr suele variar entre 30 y 200 ppm, mientras que el principal contaminante de este tipo de compuestos es el HCl, cuya concentración inicial varía entre 3.000 y 6.000 ppm en el gas de síntesis generado a partir de los residuos (Klein et al., 2003).

Cabe la posibilidad de que el cloro contenido en los residuos se combine con el amoníaco formado durante el proceso, dando lugar al cloruro de amonio, el cual si se encuentra a temperaturas por debajo de los 250°C puede generar problemas de taponamiento y, además, cuando este entra en contacto con el agua y se condensa, puede ser altamente corrosivo.

El cloro y sus compuestos pueden ser eliminados mediante diversos procesos, los cuales se dividen dependiendo de si se realizan en un medio seco o húmedo. Esta eliminación puede llevarse a cabo mediante la absorción en materiales activos, ya sea en el propio gasificador o en un reactor secundario, o también por disolución en scrubbers o lavadores húmedos (Hernández López, 2015).

- **Adsorción química:** se realizan en materiales activos como carbonatos de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ) y óxido de calcio (CaO); este último es el menos adecuado para la limpieza del syngas, ya que puede provocar una reacción con el dióxido de carbono. Sin embargo, para el rendimiento de los compuestos basados en sodio, el  $\text{CO}_2$  no tiene influencia alguna, por lo que estos resultan más adecuados para la adecuación del syngas. Utilizando este tipo de material y trabajando a temperaturas entre 300 y 600°C, se pueden llegar a conseguir concentraciones de HCl menores a 1 ppmv.
- **Water scrubbers o lavadores de agua:** en este tipo de equipos el HCl es eliminado mediante un lavado con una corriente de agua. La cantidad de agua producida durante la gasificación presente en el gas

producto puede ser capaz de eliminar 500 ppmv de HCl del gas cuando condensa. Sin embargo, cuando el agua abandona el sistema por la corriente de salida está altamente contaminada, por lo que se deberá instalar un sistema adicional para el tratamiento del agua, como por ejemplo un intercambiador iónico, lo que encarecerá demasiado el presupuesto del tratamiento de limpieza.

- **Caustic scrubbers o lavadores de cal:** este procedimiento resulta efectivo para la eliminación conjunta de compuestos clorados y sulfurados mediante el uso de sosa o hidróxido de sodio (NaOH). Puede ser útil como paso previo a una depuración posterior, ya que la limpieza obtenida no es suficiente. Cabe destacar que durante este proceso de eliminación se puede producir una reacción con el CO<sub>2</sub>, la cual debe ser evitada ya que la sal carbonada que se forma tiene una baja solubilidad y no podría ser retirada con facilidad. Esta reacción puede ser eliminada con tiempos de residencia cortos, lo que no perjudicaría a la eliminación de los compuestos clorados y sulfurados, ya que las reacciones correspondientes se producen relativamente rápido.

### **9.6. Eliminación de alquitranes**

La mezcla de compuestos orgánicos condensables generados durante la gasificación recibe el nombre de alquitranes o tars. Estos compuestos incluyen una amplia gama de productos que van desde el benceno hasta hidrocarburos poliaromáticos.

En la tabla 12 se muestra la clasificación de los alquitranes en tres categorías principales basadas en los rangos de temperatura de reacción en los que se forman. Esta clasificación es importante para evaluar los procesos de gasificación, ya que la eficacia de los equipos de conversión y/o eliminación dependen en gran medida de la composición específica del alquitrán y de su concentración en el gas combustible (Klein, 2002).

**Tabla 12.** *Clasificación de los alquitranes y su composición (Klein, 2002).*

<b>Categoría</b>	<b>Temperatura de formación (°C)</b>	<b>Componentes principales</b>
<b>Primarios</b>	400 – 600	Oxigenados y éteres fenólicos
<b>Secundarios</b>	600 – 800	Éteres heterocíclicos y alquifenoles
<b>Terciarios</b>	800 – 1000	Aromáticos polinucleicos

Los alquitranes primarios son oxigenados mixtos producidos en la etapa pirolítica. A medida que la temperatura va aumentando en el proceso de gasificación, los productos primarios se descomponen térmicamente en menores cantidades de productos secundarios y terciarios, variando las proporciones según las condiciones del gasificador.

Los alquitranes contenidos en el gas de síntesis están presentes debido a que no han podido ser totalmente convertidos en moléculas de menor tamaño durante el proceso. La cantidad y composición de los mismos depende fundamentalmente del tipo de residuo, de las condiciones del proceso y del tipo de reactor. El contenido de alquitranes se reduce al aumentar la temperatura y/o la relación agente gasificante/residuo. Tiempos de residencia cortos y velocidades de calentamiento elevadas producen alquitranes de menor peso molecular. Cuando se trata de la gasificación de residuos sólidos y biomasa, se producen cantidades significativas de alquitrán, entre el 0,1 y el 10% del gas producido (Klein, 2002).

En relación al tipo de gasificador, en la tabla 13 se muestran valores orientativos de concentración de alquitranes. En el caso de los updraft, los alquitranes suelen ser compuestos oxigenados y éteres fenólicos, ya que son producidos a baja temperatura. Por el contrario, los alquitranes formados en gasificadores de tipo downdraft y lecho fluidizado suelen estar formados por éteres heterocíclicos o hidrocarburos poliaromáticos debido a la mayor temperatura.

**Tabla 13.** Valores orientativos de concentración de alquitranes para distintos gasificadores (La Cal Herrera, 2013).

Tipo de gasificador	Alquitranes (g/Nm <sup>3</sup> )		
	Bajo	Alto	Intervalo
<b>Downdraft</b>	0,04	6	0,1 – 1,2
<b>Updraft</b>	1	150	20 – 100
<b>Lecho fluidizado burbujeante</b>	< 0,1	23	1 – 15
<b>Lecho fluidizado circulante</b>	< 1	30	1 – 15

En la mayoría de las aplicaciones del syngas los alquitranes deben eliminarse para evitar los problemas de ensuciamiento y taponamiento que se ocasionan cuando estos se enfrían (a temperaturas por debajo de los 400°C), y también evitar complicaciones con el cumplimiento de las emisiones medioambientales. Además, resulta un proceso crítico en aquellos sistemas donde el gas debe ser comprimido antes de ser utilizado.

Existen principalmente dos estrategias que pueden ser aplicadas para la reducción del contenido en alquitranes en la corriente gaseosa:

- Limpeza de alquitranes mediante técnicas físicas. Se clasifican en tecnologías húmedas y secas dependiendo de si en ellos se utiliza agua o no. Existen varios métodos de depuración húmeda o seca disponibles en el mercado; los procesos físicos húmedos funcionan a través de la condensación del alquitrán gaseoso, la filtración de gotas y/o la separación de la mezcla gas-líquido. Los ciclones, las torres de refrigeración, los filtros de mangas o los precipitadores electrostáticos son algunos de los principales métodos utilizados.

Una de las técnicas físicas por vía húmeda más efectiva para la separación de los alquitranes es el lavado del gas; los alquitranes requieren una captura física con coalescencia, se necesita una disminución de temperatura para la condensación de gotas de agua en las partículas de alquitrán, incrementando su tamaño, y facilitando el proceso de aglomeración y coalescencia.

La principal desventaja de utilizar estos procesos físicos húmedos es que los alquitranes se acaban transfiriendo a las aguas residuales, perdiendo su valor calorífico y contaminando el agua. Las aguas residuales que contienen alquitrán están clasificadas como residuo peligroso, por lo que su tratamiento y eliminación es obligatorio, aumentando considerablemente el coste total de la planta de gasificación (La Cal Herrera, 2013).

La eliminación de alquitrán en seco mediante filtros cerámicos, metálicos o de tela son alternativas a los procesos de eliminación de alquitrán en húmedo. Sin embargo, a temperaturas superiores a 150°C, los alquitranes pueden volverse "pegajosos", lo que provoca problemas de funcionamiento. En consecuencia, estos sistemas de eliminación de alquitrán rara vez son implementados (Klein, 2002).

- Craqueo catalítico o térmico de alquitranes a temperaturas elevadas.

El craqueo de alquitranes mediante procesos térmicos o catalíticos permite obtener una serie de compuestos de bajo peso molecular.

- **Craqueo térmico:** El craqueo térmico consiste en la transformación de los alquitranes en gases más ligeros mediante un calentamiento a temperaturas superiores a 1200°C. De este modo, se conseguiría su eliminación sin perder poder calorífico, ya que el carbono seguiría presente. La eficacia de este método se puede mejorar aumentando el tiempo de residencia o la temperatura, con el consiguiente incremento del gasto energético y pérdida de poder calorífico, respectivamente. A los problemas económicos y de materiales hay que añadir aquellos asociados con la potencial formación de carbonilla (Kumar et al., 2009).

Los alquitranes de residuos son más difíciles de craquear por esta vía, ya que son muy estables y refractarios. Además, esta opción conlleva grandes inconvenientes, puesto que las altas temperaturas se podría provocar la sinterización de la ceniza, además de graves daños en el refractario y en los intercambiadores de calor. Por estos motivos, este

método de eliminación de alquitranes aún no está disponible comercialmente (Hernández López, 2015).

Otra posible vía se basa es el craqueo térmico mediante plasma, sin embargo, aun siendo sistemas muy novedosos y efectivos, presentan un elevado coste económico y energético (Ruiz y Sánchez, 2014).

- **Craqueo catalítico:** Los procesos catalíticos para la conversión de alquitranes necesitan temperaturas de reacción de alrededor de 800-900°C. La eficiencia de la eliminación del alquitrán en estos procesos es del 90-95% (Belgiorno et al., 2003). El craqueo catalítico normalmente se lleva a cabo en un reactor a parte después del gasificador.

Los catalizadores utilizados para este método de eliminación deben ser efectivos, capaces de reformar metano a gas de síntesis, resistentes a la desactivación por sinterización y carbonilla, fácilmente regenerables y tener un coste moderado.

Se distinguen seis grupos de catalizadores que pueden ser usados en este proceso: de base Ni, de base metálica (Rh, Ru, Pd, Pt Ir, Co, Fe, Mo y La), metales alcalinos ( $K_2CO_3$ , NaCl, LiCl, KCl, etc.), básicos (MgO, CaO, dolomita, olivino, etc.), ácidos (zeolitas y aluminosilicatos) y carbones activados (o incluso char de gasificación) (Shen et al., 2013; Richardson et al., 2012). En la tabla 14 se muestra la eficacia aproximada en la conversión de los alquitranes de algunos de estos catalizadores.

**Tabla 14.** *Catalizadores más usados y su eficiencia en eliminación de alquitranes (Arteaga Pérez et al., 2015).*

Catalizador	Temperatura de operación	Conversión de alquitranes
Dolomita	650 – 923 °C	43 – 95 %
Hierro metálico	600 – 800 °C	10 – 90 %
FeO/SiO <sub>2</sub>	650 °C	100%
Olivina	800 – 900 °C	75 – 98 %
Limonita	650 °C	95%
NiO-MoO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	440 – 460 °C	64 – 77 %
Ni/Carbón	650 – 850 °C	91 – 99 %
Carbón	700 – 900 °C	81 – 100 %

De los catalizadores nombrados, la dolomita es uno de los más efectivos y económicos para el craqueo del alquitrán, siendo necesario del orden de 0,03 kg/Nm<sup>3</sup> de gas crudo. Hoy en día es uno de los más utilizados para la eliminación de alquitranes (Belgiorno et al., 2003).

En la tabla 15 se muestran las características de los diferentes procesos de eliminación de alquitranes con sus respectivas ventajas e inconvenientes.

**Tabla 15.** *Ventajas y desventajas de los métodos de eliminación de alquitranes (Belgiorno et al., 2003).*

<b>Método de eliminación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Craqueo térmico</b>	Control sencillo Bajo coste	Pérdidas de PCI Baja eficiencia
<b>Craqueo catalítico</b>	No afecta al lecho Regenerativo No hay que enfriar el gas	Coste del catalizador Control difícil
<b>Lavadores</b>	Control sencillo Control de la contaminación del aire	Pérdidas de PCI Enfriamiento del gas Producción de aguas residuales

Actualmente, la opción del craqueo catalítico es la más usada en el proceso de gasificación, ya que es la que más eficacia tiene y por el carácter regenerativo de los catalizadores.

## **10. MEJOR TECNOLOGÍA PARA LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS**

Una vez descritos los tipos de gasificadores más comunes y usados en la actualidad, se procede a realizar una comparación de todos ellos, estudiando la opción más factible para el tratamiento de residuos urbanos y biomasa.

De todos los gasificadores explicados anteriormente, cabe destacar los gasificadores de lecho fluidizado, dado que presentan diversas ventajas frente a los gasificadores de lecho fijo:



- Poseen una alta velocidad de reacción y un buen control de la temperatura de operación.
- Son muy flexibles con respecto a la biomasa alimentada. Permiten residuos con alto contenido en cenizas.
- Temperaturas elevadas y homogéneas a lo largo del lecho, lo que provoca una alta conversión del carbono, especialmente en metano.

Dentro de los gasificadores de lecho fluidizado, cada uno de ellos posee diferentes ventajas y aplicaciones para los diversos tipos de residuos. Según la bibliografía, el tipo de gasificador más extendido para el tratamiento de residuos urbanos, o sus fracciones, es el de lecho burbujeante, ya que, aunque requieren que la alimentación sea bastante homogénea, permiten una mayor flexibilidad en cuanto a los diferentes tipos de residuos y capacidad de tratamiento. La diversidad en la alimentación se debe a que, en estos reactores, los residuos deben pasar el tiempo suficiente en el lecho como para alcanzar las condiciones adecuadas para poder ser arrastrados como cenizas volantes fuera del mismo (Fundación para La Economía Circular, 2014).

Además, estos gasificadores suelen operar en el rango de temperaturas relativamente bajas, entre 800 y 1000°C, para evitar la aglomeración de cenizas. Esto es satisfactorio para combustibles reactivos como la biomasa o los residuos sólidos urbanos, ya que estos se caracterizan por su alto contenido en cenizas, y estas temperaturas permiten su gasificación sin la posibilidad de que surjan problemas de sinterización y aglomeración. Debido a la gran inercia térmica y a la vigorosa mezcla en los gasificadores de lecho fluidizado, se puede utilizar una gama más amplia de combustibles. Por estas razones, muchas actividades de desarrollo de la gasificación de residuos a gran escala se centran en las tecnologías de lecho fluidizado (Basu, 2010).

Por último, cabe destacar que estos tipos de gasificadores también se adaptan mucho mejor a combustibles derivados de residuos. Existe una patente que consiste en un procedimiento para la obtención de syngas a partir de RSU y, más particularmente, de su fracción denominada CDR. El procedimiento comprende una etapa de gasificación en lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica y temperaturas en el intervalo de 750°C a 850°C, utilizando aire enriquecido con

oxígeno como agente gasificante, y una etapa de limpieza y acondicionamiento del gas de síntesis en caliente, basada principalmente en la utilización de un reactor de reformado catalítico que comprende un lecho formado por un catalizador metálico, que opera a temperaturas entre 750°C y 850°C, donde se lleva a cabo el proceso endotérmico de reformado con vapor de agua de los alquitranes y otros hidrocarburos (Bilbao Duñabeitia et al., 2013).

El parámetro más representativo para evaluar el rendimiento de operación de cualquier equipo es la eficiencia, la cual, para el caso de los procesos de gasificación puede ser definida de dos maneras distintas: eficiencia de gas frío y eficiencia de gas caliente. La eficiencia de gas frío es la que se usa normalmente y se define como la capacidad del sistema de reacción para aprovechar la energía disponible en la biomasa y transformarla en energía disponible en el gas (Rodríguez Alejandro, 2010). La eficiencia de gas frío se puede definir mediante la expresión de la ecuación 1.

$$\eta_{GF} = \frac{\dot{V}_g \cdot PCI_{gas}}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}} \quad [1]$$

Donde:

$\eta_{GF}$ : eficiencia de gas frío

$\dot{V}_g$ : flujo volumétrico del gas procedente de la gasificación

$PCI_{gas}$ : poder calorífico inferior de gas de síntesis

$PCI_{comb}$ : poder calorífico inferior combustible

$\dot{m}_{comb}$ : flujo másico de combustible

Cuando se considera además del poder calorífico del gas de síntesis, el calor sensible de los gases, el rendimiento del proceso se evalúa en base a la llamada eficiencia de gas caliente, la cual se expresa mediante la ecuación 2.

$$\eta_{GC} = \frac{\dot{V}_g \cdot PCI_{gas} + Cp_g \cdot \dot{V}_g \cdot (T_g - T_{amb})}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}} \quad [2]$$

Donde:

$\eta_{GC}$ : eficiencia de gas caliente

$Cp_g$ : capacidad calorífica del gas

$T_g$ : temperatura del gas

$T_{amb}$ : temperatura ambiente

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica de diferentes experimentos que indiquen la eficiencia de este proceso y sus características de producción. En la tabla 16 se muestran los resultados de los experimentos encontrados para la gasificación de RSU y CDR en un reactor de lecho fluidizado burbujeante (Arena et al., 2014; Vargas Salgado, 2012).

**Tabla 16.** *Parámetros obtenidos en diferentes experimentos (Arena et al., 2014; Vargas Salgado, 2012).*

	PCI (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Eficiencia en gas frío (%)	Producción (Nm <sup>3</sup> /kg)
<b>RSU</b>	5	60	2,04
<b>CDR</b>	3,34	56	2,77

## **11. CUANTIFICACIÓN EN CANARIAS DE LOS RESIDUOS QUE PODRÍAN SER SOMETIDOS A GASIFICACIÓN**

La generación de residuos supone un problema medioambiental, y su mala gestión podría provocar graves impactos irreversibles en los frágiles ecosistemas canarios. Potencialmente también puede representar un problema de salud pública. Un elemento clave en la lucha por reducir los volúmenes de residuos que se acumulan en los vertederos canarios, es la valorización energética de los mismos. La legislación sobre residuos señala la jerarquía que se debe seguir en la gestión de los residuos, donde la valorización energética se sitúa por detrás de la reutilización y el reciclado, y siempre por delante de la opción de la eliminación de residuos en vertedero.

Debido a la orografía de las islas que dificultan la mecanización de la agricultura extensiva, la falta de agua, y la falta de grandes superficies, no es posible desarrollar cultivos energéticos de forma eficiente. Por tanto, la biomasa energética disponible se limita a los distintos residuos susceptibles de ser valorizados energéticamente. Estos incluyen:

- Residuos Sólidos Urbanos
- Lodos de depuradora
- Residuos agrícolas
- Residuos ganaderos
- Residuos forestales

Actualmente los volúmenes de estos residuos destinados a su valorización energética son muy pequeños. Sin embargo, suponen un gran potencial, y existe un gran interés por la explotación de estos recursos energéticos. Representan biomasa, y como tal, una fuente de energía renovable; además, es complementaria a otras EERR no gestionables como la eólica o la fotovoltaica.

Se ha realizado una cuantificación de los diferentes tipos de residuos generados en Canarias durante los últimos años que podrían ser sometidos a gasificación. En la tabla 17 se muestran los datos más recientes obtenidos.

**Tabla 17.** *Cuantificación de residuos generados en el año 2018 (ISTAC; Tenerife Más Sostenible; Servicio de Residuos de Gran Canaria).*

<b>Tipo de residuo</b>	<b>Cantidad generada (toneladas/año)</b>
<b>Papel y cartón</b>	40485
<b>Plásticos (excepto embalajes)</b>	5
<b>Envases mixtos y embalajes mezclados</b>	22676
<b>Madera</b>	1649
<b>Ropa y residuos textiles</b>	142
<b>Residuos biodegradables (Tenerife y Gran Canaria)</b>	13597

## 12. CUANTIFICACIÓN DEL SYNGAS PRODUCIDO POR LOS RESIDUOS GENERADOS EN CANARIAS

En la actualidad, en Canarias existen tan solo dos plantas para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos para la generación de energía. Se trata de dos plantas destinadas a la producción de biogás situadas una en Tenerife y otra en Lanzarote. Desde el año 2008 una planta de 1,6 MW, ubicada en el Complejo Ambiental de Arico, en la isla de Tenerife y desde el 2013 una planta de biometanización en el Complejo Ambiental de Zonzamas, en Lanzarote, de 2,1MW.

La producción eléctrica de ambas instalaciones durante el 2019 ascendió a 8.474 MWh y 1.668 MWh respectivamente, por lo que la producción eléctrica mediante esta fuente de energía en Canarias fue de 10.142 MWh, aumentando un 7,9% con respecto al año anterior (Anuario Energético de Canarias 2019, 2020).

Se ha realizado una estimación de la producción de energía mediante el tratamiento de la biomasa y residuos disponibles en Canarias si se instalara una planta de gasificación. Una vez estudiadas las diferentes tecnologías de gasificación, tal y como se ha explicado anteriormente, se ha escogido la gasificación de lecho fluidizado burbujeante como opción más adecuada para la gasificación de este tipo de residuos.

En la tabla 18 se muestra una estimación de la cantidad de gas de síntesis que se podría producir mediante este tipo de gasificador para los diferentes tipos de residuos generados en Canarias. Cabe destacar que se han tomado como referencia los valores indicados en la tabla 16. En el caso de la ropa y residuos textiles se han tratado como CDR, el resto se han tratado como RSU.

**Tabla 18.** *Cuantificación del syngas obtenido a partir de los residuos generados en Canarias.*

	Producción syngas (Nm <sup>3</sup> )	MJ producidos
Papel y cartón	8,26E+07	4,13E+08
Plásticos (excepto embalajes)	1,02E+04	5,10E+04
Envases mixtos y embalajes mezclados	4,63E+07	1,55E+08
Madera	3,36E+06	1,68E+07
Ropa y residuos textiles	3,93E+05	1,31E+06
Residuos biodegradables (Tenerife y Gran Canaria)	2,77E+07	1,39E+08
<b>Total</b>	<b>1,60E+08</b>	<b>7,24E+08</b>

En la tabla se muestra la energía producida por cada Nm<sup>3</sup> de syngas. Esta ha sido calculada con el valor del PCI obtenido en los diferentes experimentos de la tabla 16, al igual que la producción del syngas, que ha sido hallada con el valor de producción por cada kg de residuos.

Dado que el PCI del syngas obtenido en este tipo de gasificador es bajo, este se puede aprovechar para la generación de calor en una caldera o en un motor, generación de calor y electricidad en una turbina de gas y en una turbina de vapor (ciclo combinado), ya que son los casos en los que no se requiere un alto PCI.

La demanda eléctrica total de Canarias en 2020 fue de 7945 GWh, de los cuales un 41% fue generado por el ciclo combinado, seguido de los motores diésel con un 21,6% y la turbina de gas con un 17,5% (Red Eléctrica de España, 2021). El gas de síntesis obtenido mediante la gasificación de residuos produciría un total de 201,20 GWh, lo que cubriría un 2,53% de la demanda energética total de las islas. En la tabla 19 se muestran los resultados del cálculo de la demanda cubierta por el syngas si fuera utilizado para la producción de electricidad a través del ciclo combinado o la turbina de vapor.

**Tabla 19.** *Demanda energética cubierta por syngas.*

	<b>Demanda eléctrica total en Canarias</b>	<b>Ciclo combinado</b>	<b>Turbina vapor</b>
<b>Producción en 2020 (GWh)</b>	7945	3257,45	1390,375
<b>Energía cubierta por el syngas (%)</b>	2,53	6,18	14,47

### 13. CONCLUSIONES

1. La gasificación como fuente de producción de energía de forma renovable tiene un gran potencial, ya que soluciona diversos problemas actuales, como la contaminación medioambiental o la gestión de residuos generados por la población.
2. La gasificación es un proceso termoquímico en el que se produce una combustión parcial obteniéndose un gas llamado gas de síntesis o syngas, compuesto principalmente de  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ , pequeñas cantidades de hidrocarburos más pesados y en ocasiones  $N_2$ , si el aire interviene en el proceso.
3. El proceso de gasificación está compuesto de diversas etapas y reacciones, que en la mayoría de ocasiones se superponen entre sí. Las reacciones más importantes son las generadas entre el agente gasificante y el carbonizado generado en la etapa pirolítica, ya que suceden de forma lenta y por tanto son las que determinan la velocidad del proceso.
4. El rendimiento del proceso de gasificación depende de diversos factores. Algunos de los más importantes son el contenido de humedad de los residuos gasificados o el agente gasificante utilizado durante el proceso. La temperatura juega un papel muy importante durante el proceso, ya que entre otras cosas condiciona el contenido de impurezas como alquitranes o cenizas en el syngas.
5. Dentro de los agentes gasificantes utilizados el más común es el aire ya que, aunque genera un gas de síntesis de bajo poder calorífico (entre 5 y 10  $MJ/Nm^3$ ), es el más rentable económicamente.
6. Existen múltiples tecnologías de gasificación, la más adecuada para la gasificación de residuos y biomasa es la realizada en un reactor de lecho fluidizado burbujeante, en la que se utiliza aire como agente gasificante y se obtiene un syngas de bajo PCI.
7. El gas de síntesis obtenido, dependiendo de los parámetros de operación de proceso y las características de la alimentación, tendrá una determinada pureza. El syngas con bajo PCI puede ser utilizado para la generación de calor en una caldera o en un motor, generación de calor y electricidad en una

turbina de gas y en una turbina de vapor (ciclo combinado), en los que no se requiere una alta calidad del gas. Para la generación eléctrica en una pila de combustible y procesos de síntesis química como la producción de metanol, gas natural sintético o hidrógeno, se requiere una alta pureza y PCI algo más altos, por lo que el syngas deberá ser sometido a procesos previos de purificación.

8. El acondicionamiento del gas de síntesis es un proceso importante para su uso posterior, ya que, en la mayoría de las situaciones, se requiere el cumplimiento de diferentes características para el mejor rendimiento de los procesos y además se deben cumplir por normativa unos límites de emisión de gases contaminantes como los gases ácidos.
9. La eliminación de los alquitranes es uno de los procesos de purificación de syngas más importantes. Generalmente estos compuestos se eliminan a través de procesos de craqueo catalítico, en los que además de alquitranes se eliminan también otros contaminantes como los haluros, compuestos nitrogenados o gases ácidos. Uno de los catalizadores más utilizados es la dolomita, ya que es un compuesto con el que se obtienen altos rendimientos de eliminación.
10. En Canarias actualmente no existe ninguna planta de gasificación instalada, tan solo existen dos plantas para el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos para la generación de energía; se trata de dos plantas destinadas a la producción de biogás. Según datos estadísticos en 2020 la demanda eléctrica del archipiélago fue de 7945 GWh, de los cuales, a través de la gasificación de los residuos generados en las islas, el syngas podría aportar un 2,53% a través de su uso en ciclos combinados o turbinas de vapor.



## 14. CONCLUSIONS

1. Gasification has great potential as a source of renewable energy production, because it solves several current problems, such as environmental pollution or the management of waste generated by the population.
2. Gasification is a thermochemical process in which partial combustion takes place to obtain a gas called synthesis gas or syngas, composed mainly of H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, small amounts of heavier hydrocarbons and sometimes N<sub>2</sub>, if air is involved in the process.
3. The gasification process is composed of several stages and reactions, which in most cases overlap each other. The most important reactions are those generated between the gasifying agent and the carbonized product generated in the pyrolytic stage, since they occur slowly and therefore determine the speed of the process.
4. The efficiency of the gasification process depends on several factors. Some of the most important are the moisture content of the gasified residues or the gasifying agent used during the process. The temperature plays a very important role during the process, since, among other things, it conditions the content of impurities such as tars or ashes in the syngas.
5. Among the gasifying agents used, the most common is air because, although it generates a synthesis gas with a low heating value (between 5 and 10 MJ/Nm<sup>3</sup>), it is the most economically profitable.
6. There are multiple gasification technologies, the most appropriate for waste and biomass gasification is the one carried out in a bubbling fluidized bed reactor, in which air is used as the gasifying agent and a low LHV syngas is obtained.
7. The syngas obtained will have a certain purity depending on the process operating parameters and feed characteristics. Syngas with low LHV can be used for heat generation in a boiler or engine, heat and power generation in a gas turbine and in a steam turbine (combined cycle), where high gas quality is not required. For electricity generation in a fuel cell and chemical synthesis processes such as methanol, natural gas or hydrogen production, high purity

and somewhat higher LHV are required, so the syngas must be subjected to a previous purification process.

8. The conditioning of the synthesis gas is an important process for its subsequent use, since in most situations, different characteristics need to be met for the best performance of the processes and, in addition, emission limits for pollutant gases such as acid gases must be complied with according to the regulations.
9. The removal of tars is one of the most important syngas purification processes. These compounds are generally removed through catalytic cracking processes, in which, in addition to tars, other contaminants such as halides, nitrogen compounds or acid gases are also removed. One of the most used catalysts is dolomite, as it is a compound with which high removal efficiencies are obtained.
10. At present, there is no gasification plant installed in the Canary Islands. There are only two plants for the use of solid urban waste for energy generation; these are two plants for the biogas production. According to statistical data, in 2020 the electricity demand of the islands was 7945 GWh. The syngas obtained through the gasification of waste generated on the islands could contribute 2.53% through its use in combined cycles or steam turbines.

## 15. BIBLIOGRAFÍA

**Anuario Energético de Canarias 2019. (2020).** Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial. Gobierno de Canarias.

**Arena, U., Di Gregorio, F. (2014).** Gasification of a solid recovered fuel in a pilot scale fluidized bed reactor. *Fuel*. 117. Part A. 528-536. ISSN 0016-2361.

**Arjan, F., Kirkels, G.; Verbong, P.J. (2011).** Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 471–481.

**Arteaga Pérez, L.E., Casas Ledón, E., Cabrera Hernández, J., Rodríguez Machín, L. (2015).** Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. *Afinidad – Barcelona*. 72. 1.

**Basu, P. (2010).** *Biomass Gasification and Pyrolysis, practical design and theory editorial*. s.l.: Elsevier. pág. 376. ISBN 13: 978-0-12-374988-8.

**Belgiorno V., De Feo G., Della Rocca C., Napoli R.M.A. (2003).** Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*. 23(1). 1-15. ISSN 0956-053X.

**Bilbao Duñabeitia, R., Arauzo Pérez, J.M., Guerrero Álvarez, M., Gala Buro, A.J., Artigas Alaya, A., Fernández Giménez, E. (2013).** *Procedimiento para convertir la fracción CDR en un gas de síntesis*. (España. Número de patente ES2411101). Oficina Española de Patentes y Marcas.

**Bull D. (2008).** *Performance Improvements to a Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB) Biomass Gasifier for Combined Heat and Power Plants*. (Trabajo de fin de Máster). University of Canterbury.

**Cabildo de Gran Canaria.** Consejería de Medio Ambiente y Emergencias. Servicio de Residuos. <https://residuoscabgc.hybridap.es/>

**Cabildo de Tenerife.** Tenerife Más Sostenible. Desarrollo Sostenible y Lucha contra el Cambio Climático. Estadísticas de residuos. <https://www.tenerifemassostenible.es/ambitos-tematicos/gestion-de-residuos/estadisticas-de-residuos/>

**Campoy Naranjo, M. (2009).** *Gasificación de biomasa y residuos en Lecho fluidizado: Estudios en planta piloto.* [Tesis doctoral, Universidad de Sevilla].

**Elías Castells, X. (2012).** Tratamiento y valorización energética de residuos. Madrid, Spain: Ediciones Díaz de Santos.

**Ephraim A., Munirathinam R., Nzihou A., Pham Minh D., Richardson Y. (2020).** Syngas. In: Nzihou A. (eds) Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products. *Springer, Cham. Web.*

**Foscolo, P.U., Germanà, A., Jand, N., Rapagnà, S. (2007).** Desing and cold model testing of a biomass gasifier consisting of two interconnected fluidized bed. *Powder Technology.* 179-188.

**Fundación para la Economía Circular. (2014).** Análisis de las tecnologías emergentes de valorización energética. *Estrategias para la gestión sostenible de los residuos en el horizonte 2020.*

**Gasification&Syngas Technologies Council. (2016).** Arlington, VA 22201 EE.UU. <http://www.gasification.org/>.

**Gil, J., Corella, J., Aznar, M.P., Caballero, M.A. (1999).** Biomass Gasification in Atmospheric and Bubbling Fluidized Bed: Effect of the Type of Gasifying Agent on the Product Distribution. *Biomass & Bioenergy.* 17. 389-403.

**Hernández López, S. (2015).** *Diseño de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para la generación de electricidad con una pila de combustible.* (Trabajo de fin de grado). Universidad de Sevilla.

**IDAE. (2010).** Biomasa - Gasificación.  
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf).

**IDAE. (2011).** Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011 – 2020.

**IFP. Innovation Energy Environment. (2007).** Potential biomass mobilization for biofuel production worldwide, in Europe and in France, Panaroma. [www.ifp.fr](http://www.ifp.fr).

**Igado Gracia, C. (2013).** Gasificación de biomasa en doble lecho fluidizado. Disminución del contenido en alquitranes mediante el uso de Fe-Olivina y filtros catalíticos. (Trabajo de fin de máster).

**Ilie Ionut, C. (2019).** *Diseño del proceso de gasificación para los combustibles sólidos recuperados procedentes de una planta de tratamiento mecánico biológico.* (Trabajo de fin de máster). Universitat Jaume I.

**Instituto Canario de Estadística (ISTAC).** Recopilación de Estadísticas sobre los Residuos / Series anuales. Canarias. 2002-2018. <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:13a69e41-7b47-41fe-87e4-7b79dddb60d1>

**Jarabo, F., Fernández, J. (1983).** *Energía de la biomasa*, Técnica Industrial, 171, (p. 47-57).

**Klein, A. (2002).** Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes. *M.S. in Earth Resources Engineering. Columbia University.*

**Klein, A., Themelis, N. (2003).** Energy Recovery from Municipal Solid Wastes by Gasification. *North American Waste to Energy Conference (NAWTEC 11).* Proceedings, ASME International, Tampa FL. 241-252.

**Kumar, A., Jones, D.D., Hanna, M.A. (2009).** Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology. *Energies.* ISSN 1996-1073.

**La Cal Herrera, J.A. (2013).** *Viabilidad de la integración de una planta de gasificación de biomasa.* [Tesis doctoral, Universidad de Jaén].

**Lesme Jaén, R., Garcia Faure, L., Oliva Ruiz, L., Pajarín Rodríguez, J., Revilla Suarez, D. (2016).** Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso. *Tecnología Química*, 36(2), 133-144.

**Martínez de León, C. (2016).** *Estudio tecno-económico de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para aplicaciones de caldera y motor.* (Trabajo de fin de grado). Universidad de Sevilla.

**McKendry, P. (2002).** Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology* 83(1), 47-54.

**Milne, T.A., Evans, R.J. (1998), Abatzoglou, N. (1998).** Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. *Report NREL/TP-570-25357*. National Renewable Energy Laboratory (NREL): Golden (Colorado), USA.

**Mondal, P., Dang, G.S., Garg, M.O. (2011).** Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications — Recent developments. *Fuel Processing Technology*. 92 (8). 1395-1410. ISSN 0378-3820.

**Narváez I., Orio A., Aznar M.P., Corella J. (1996).** Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 35. 2110-2120.

**Niessen, W.R., Markes, C.H., Sommerlad, R.E. (1996).** Evaluation of Gasification and Novel Thermal Processes for the Treatment of Municipal Solid Waste. *Report NREL/TP-430-21612*. NREL.

**Pérez, J., Borge, D., Agudelo, J. (2010).** Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico- experimentales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. (52). 95-107. ISSN: 0120-6230.

**Red Eléctrica de España. (2020).** El sistema eléctrico español: Avance 2020. <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/avance-del-informe-del-sistema-electrico-espanol-2020>

**Richardson Y, Blin J, Julbe A. (2012).** A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts. *Progress in Energy and Combustion Science*. 38. 765–781.

**Rodríguez Alejandro, D.A., Zaleta Aguilar A., Olivares Arriaga A., Torres Chimal F.F. (2010).** Análisis y Diseño de un Sistema de Gasificación de Biomasa. *Memorias del XVI congreso internacional anual de la SONIM*. ISBN: 978-607-95309-3-8

**Ruiz, E., Sánchez, J.M. (2014).** Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa. *Boletín del Grupo Español del Carbón*. (33). 15-19. ISSN-e 2172-6094.

**Sánchez Lario, A. (2017).** *Diseño de una planta de gasificación con*

*cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial.* (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Madrid.

**Sánchez López, I., Gallardo Izquierdo, A., Edo Alcón, N. (2014).** Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. *Conama 2014, Congreso Nacional del Medio Ambiente.*

**Shen Y, Yoshikawa K. (2013).** Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 21. 371–392.

**Stolecka, K., Rusin A. (2020).** Analysis of hazards related to syngas production and transport. *Renewable Energy*, 146, 2535-2555. ISSN 0960-1481

**Urien Pinedo, A. (2013).** *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.* (Trabajo de fin de máster). Universidad Nacional de Educación a Distancia.

**Vargas Salgado, C.A. (2012).** *Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación downdraft y lecho fluido burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia.* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia].