

Trabajo de Fin de Grado

---

# **Análisis de la aportación al autoabastecimiento energético del CH<sub>3</sub>OH obtenido a partir de la gasificación inicial de residuos**

---

Grado en Ingeniería Química Industrial  
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología  
Universidad de La Laguna

Autora: Cinthia María Rodríguez Martín

Tutores: Candela Díaz García; Douglas J. Escalante Ayala

Curso: 2020-2021

## Índice

1. Abstract .....	9
2. Introducción .....	12
3. Objetivos .....	16
4. Antecedentes y estado actual.....	18
4.1 Gestión de residuos sólidos en Canarias.....	18
4.2 Descripción de la técnica anterior.....	22
4.3 Composición de los RSU en las Islas Canarias .....	24
4.4 Tecnologías principales de conversión de residuos .....	25
4.4.1 Incineración.....	27
4.4.2 Pirólisis.....	28
4.4.3 Gasificación.....	29
4.5 Comparación de los procesos WtC y WtE.....	33
4.6 Obtención de CH <sub>3</sub> OH .....	33
4.7 Conclusiones .....	36
5. Método .....	38
5.1 Clasificación de los métodos de gasificación .....	39
5.1.1 Suministro de calor.....	40
5.1.2 Agentes oxidantes .....	40
5.1.3 Diseño de reactores de gasificación .....	43
5.2 Etapas del proceso de gasificación .....	50
5.2.1 Etapa 1. Calentamiento y secado.....	50
5.2.2 Etapa 2. Desvolatilización (o pirólisis o descomposición térmica) .....	51
5.2.3 Etapa 3. Reacciones químicas: .....	51
5.3 Parámetros de operación del proceso de gasificación .....	56
5.3.1 Relación de equivalencia.....	56
5.3.2 Temperatura del reactor .....	57
5.3.3 Tiempo de residencia .....	58
5.3.4 Composición y propiedades físicas de los residuos .....	58
5.3.5 Composición y temperatura de entrada del agente gasificante .....	59
5.4 Parámetros de rendimiento del proceso de gasificación .....	59

5.5 Técnicas de obtención de oxígeno .....	62
5.5.1 Separación criogénica .....	62
5.5.2 Separación por membrana .....	63
5.5.3 Separación por adsorción .....	63
5.6 Ajuste de la relación R del syngas .....	66
5.7 Purificación el syngas .....	69
5.7.1 Eliminación de agua .....	70
5.7.2 Eliminación de gases ácidos.....	73
5.7.3 Eliminación de hidrocarburos condensables .....	78
5.7.4 Eliminación de alquitrán .....	79
5.7.5 Eliminación de partículas en suspensión.....	80
5.7.6 Eliminación de otros contaminantes .....	82
5.8 Conclusiones .....	84
6. Estudio económico .....	86
6.1 Alternativa de proceso .....	86
6.1.1 Características del proceso .....	86
6.1.2 Gasificación.....	88
6.1.3 Purificación del syngas.....	89
6.1.4 Síntesis de CH <sub>3</sub> OH.....	93
6.2 Cálculos .....	94
6.3 Resultados .....	100
7. Conclusiones .....	103
8. Referencias .....	106

## Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de residuos urbanos recogidos en Canarias por años.....	19
Tabla 2. Indicadores sobre residuos urbanos. Serie 2010-2018. Cantidad per cápita de residuos recogidos por comunidades autónomas, periodo y clase de residuos en el año 2018 .....	20
Tabla 3. Emisiones en Canarias provenientes del tratamiento y la eliminación de residuos.....	21
Tabla 4. Parámetros de clasificación de los reactores de gasificación .....	39
Tabla 5. Tipos de gasificadores según la forma de contacto entre el agente gasificante y la alimentación.....	48
Tabla 6. Reacciones principales en la gasificación de residuos .....	53
Tabla 7. Parámetros de operación y rendimiento del proceso de .....	61
Tabla 8. Composición del syngas al abandonar el gasificador.....	66
Tabla 9. Separación de gases ácidos – CO <sub>2</sub> .....	76
Tabla 10. Separación de gases ácidos - H <sub>2</sub> S.....	77
Tabla 11. Parámetros utilizados para calcular la cantidad de CH <sub>3</sub> OH producida/año ...	95
Tabla 12. Beneficios por año.....	95
Tabla 13. Valor del equipo (DEL).....	95
Tabla 14. Índices CEPCI .....	96
Tabla 15. Cálculo de CAPEX.....	96
Tabla 16. Coste de servicios .....	97
Tabla 17. Coste de materias primas.....	98
Tabla 18. Costes de la mano de obra .....	98
Tabla 19. Cálculo de OPEX .....	99
Tabla 20. Resultados del análisis económico .....	100

## **Índice de figuras**

Figura 1. Jerarquía de residuos .....	13
Figura 2. Evolución de las emisiones de GEI debido al tratamiento y eliminación de residuos en las Islas Canarias .....	22
Figura 3. Composición de los RSU en Canarias .....	24
Figura 4. Ruta posible de utilización del syngas .....	24
Figura 5. Tecnologías de tratamiento de RSU.....	25
Figura 6. Gasificador de lecho fijo. Corriente ascendente .....	44
Figura 7. Gasificador de lecho fijo. Corriente descendente .....	44
Figura 8. Gasificador de lecho fluidizado. CFB .....	46
Figura 9. Gasificador de flujo de arrastre .....	47
Figura 10. Composición del syngas en función de la relación de equivalencia .....	57
Figura 11. Esquema del proceso.....	87

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Reacción water-gas.....	54
Ecuación 2. Reacción de Boudouard.....	54
Ecuación 3. Reacción water-gas shift.....	55
Ecuación 4. Hidrogasificación.....	55
Ecuación 5. CGE .....	60
Ecuación 6. HGE.....	60
Ecuación 7. CGE .....	60
Ecuación 9. Relación R .....	66
Ecuación 10. Reforming.....	69
Ecuación 11. Oxidación parcial.....	69
Ecuación 12. Reacción de conversión .....	93
Ecuación 13. Reacciones del bucle de síntesis de CH <sub>3</sub> OH.....	94
Ecuación 14. Cálculo de la cantidad de CH <sub>3</sub> OH producida/año .....	95
Ecuación 15. Actualización de costes.....	96
Ecuación 16. Ecuación de Wessell .....	98
Ecuación 17. Ecuación del Valor Presente Neto .....	100

## **Nomenclatura**

ASU: air separation unit (unidad de separación de aire)  
BFB: bubbling fluidized-bed (lecho fluidizado burbujeante)  
CAPEX: capital expenditure (gastos en capital)  
CCE: carbon conversion efficiency (eficiencia de conversión del carbono)  
CCUS: carbon capture utilization and storage (captura, almacenamiento y uso del carbono)  
CEPCI: plant cost index (índice de costo de la planta química)  
CGE: cold gas efficiency (eficiencia del gas frío)  
DEL: delivered equipment costs (valor del equipo)  
DME: dimetiléter  
ER: energía eléctrica renovable  
ESA: electric swing adsorption (adsorción con calentamiento por corriente eléctrica)  
FCI: fixed capital investment (inversión de capital fijo)  
GEI: gases de efecto invernadero  
HGE: hot gas efficiency (eficiencia del gas caliente)  
IGT: Institute of Gas Technology  
INE: Instituto Nacional de Estadística  
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)  
ISTAC: Instituto Canario de Estadística  
KM-CDR: Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery  
MEA: monoetanolamina  
OPEX: operational expenditures (gastos operativos)  
PEM: plasma enhanced melter (fusor de plasma mejorado)  
PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente  
PP: payback period (periodo de recuperación)  
PSA: pressure swing adsorption (adsorción con variación de presión)  
RdF: refuse-derived fuel (combustible derivado de desechos)  
RSU: residuo sólido urbano  
TIR: tasa interna de rendimiento  
TRC: thermal residence chamber (cámara de residencia térmica)

TSA: temperature swing adsorption (adsorción con variación de temperatura)

VPN: valor presente neto

VSA: vacuum swing adsorption (adsorción con variación de vacío)

WGS: water gas shift

WtC: waste to chemical (transformación de residuos en productos químicos)

WtE: waste to energy (transformación de residuos en energía)

WtM: waste to methanol (transformación de residuos en metanol)



---

## **1-Abstract**

---

## **1. Abstract**

The growing concern experienced by society about climate change encourages the development of new ways to mitigate its causes. One of the most promising ways to delay environmental degradation is the replacement of fossil fuels with fuels obtained from renewable sources.

In addition to the energy recovery of organic waste, it is also possible to use different local, non-recyclable and combustible waste, such as wood, fabrics, rubber and plastic, as raw material to obtain various valuable products, among which is CH<sub>3</sub>OH.

Obtaining CH<sub>3</sub>OH from the gasification of waste provides a solution both to the replacement of traditional sources by alternative energy, and to waste management, since, especially, waste management in the case of island territories such as the Canary Islands is a complex task, since they are isolated and limited places and, in addition, its remarkable tourist population must be considered.

Therefore, the development of a management model that solves the existing problems regarding the collection and treatment of waste and uses it beneficially, more particularly, that refines it and converts it into a liquid fuel, such as CH<sub>3</sub>OH, would mean a great advance towards energy self-sufficiency and commitment to the environment.

This work includes a bibliographic review in relation to the methods of gasification of waste to obtain CH<sub>3</sub>OH and its analysis in the contribution to energy self-sufficiency in the Canary Islands.

La creciente preocupación experimentada por parte de la sociedad acerca del cambio climático impulsa el desarrollo de nuevas vías para mitigar sus causas. Una de las vías más prometedoras para lograr frenar el deterioro medioambiental es la sustitución de los combustibles fósiles por combustibles obtenidos de fuentes renovables.

Además de la valorización energética de residuos orgánicos, también es posible utilizar diferentes residuos locales, no reciclables y con poder combustible, tales como madera, telas, caucho y plástico, como materia prima para obtener diversos productos valiosos, entre los que se encuentra el CH<sub>3</sub>OH.

La obtención de CH<sub>3</sub>OH a partir de la gasificación de residuos proporciona una solución tanto al reemplazo de fuentes tradicionales por energía alternativa, como a la gestión de residuos, ya que, especialmente, la gestión de residuos en el caso de territorios insulares como las Islas Canarias es una tarea compleja, ya que son lugares aislados y limitados y, además, hay que tener en cuenta su notable población turística.

Por lo tanto, el desarrollo de un modelo de gestión que resuelva los problemas existentes en cuanto a la recolección y al tratamiento de residuos y los utilice beneficiosamente, más particularmente, que los refine y los convierta en un combustible líquido, tal como CH<sub>3</sub>OH, significaría un gran avance hacia la autosuficiencia energética y el compromiso con el medioambiente.

Este trabajo recoge una revisión bibliográfica en relación a los métodos de gasificación de residuos para la obtención de CH<sub>3</sub>OH y su análisis en la aportación al autoabastecimiento energético en Canarias.

---

## **2-Introducción**

---

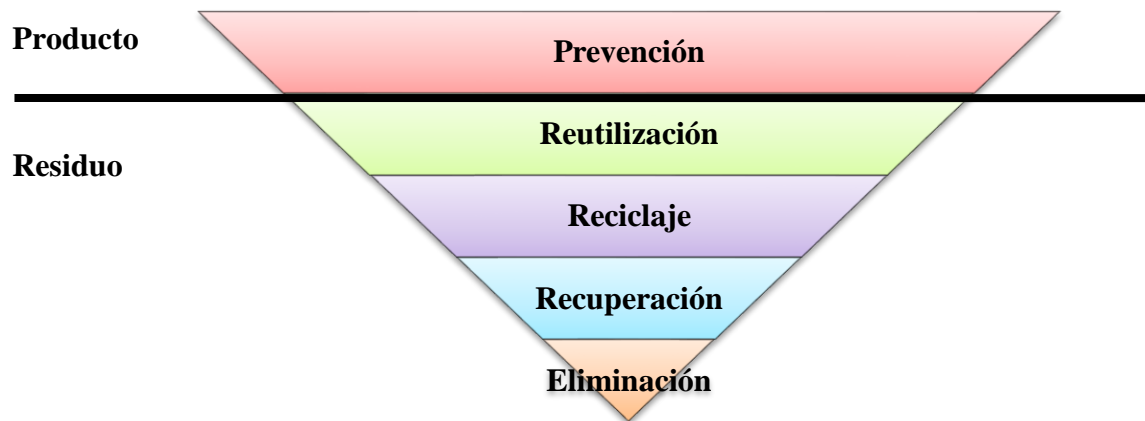
## **2. Introducción**

La generación y el manejo de los desechos constituyen hoy uno de los principales desafíos en la sociedad, no solo debido a las enormes cantidades que se producen, que aumentan anualmente, sino también a la necesidad de implementar una nueva gestión de estos que sea más sostenible a nivel ambiental.

Los sistemas de recogida de residuos inapropiados, junto con su eliminación inadecuada, así como las técnicas actuales de tratamiento de estos, que incluyen la incineración o el vertido de desechos, han causado una serie de problemas en las comunidades y también en el medio ambiente. Por lo tanto, la correcta gestión de los residuos es un factor clave del desarrollo sostenible exitoso<sup>1</sup>.

Considerando los desafíos para la gestión de residuos, se desarrolla la economía circular. Básicamente, se define como una economía que equilibra el desarrollo económico con la protección del medio ambiente y los recursos (*Naciones Unidas 2006*). Los objetivos principales son diseñar los productos con la finalidad de reciclarlos, hacer uso de las energías renovables para impulsar la economía y optimizar sistemas completos en lugar de sus componentes individuales<sup>2</sup>. Además, el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) sugiere que las características de la economía circular deben incluir un bajo consumo de energía, bajas emisiones de contaminantes y alta eficiencia.

Por otro lado, la jerarquía de residuos tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad de las operaciones de gestión de residuos mediante la aplicación de un orden de prioridad para estos. De esta manera, la jerarquía prioriza la prevención, la reutilización y el reciclaje de los desechos. Por lo tanto, la estrategia 3R (reducir, reutilizar y reciclar) incorpora los principios de la economía circular, logrando ahorros considerables en energía y recursos naturales no renovables al ser aplicada en la gestión de residuos.



**Figura 1. Jerarquía de residuos**

Los diferentes tipos de residuos se clasifican según su origen, composición y peligro, entre otros criterios. Algunas de las diversas clases de desechos son los residuos sólidos urbanos (RSU), los desechos industriales, las cenizas de combustión, los lodos de depuradora, los desechos comerciales, los provenientes del barrido de calles, los desechos hospitalarios y los desechos de construcción y demolición<sup>3</sup>.

Los residuos sólidos municipales incluyen los desechos domésticos, así como los desechos generados en establecimientos comerciales, en el sector de servicios y otros desechos similares a los domésticos. Su composición física se compone de material orgánico, papel y cartón, plástico, vidrio y metales<sup>4</sup>.

Los RSU son uno de los principales problemas ambientales en el mundo puesto que su manejo inadecuado provoca contaminación ambiental. Esta contaminación está asociada con la liberación de sustancias nocivas durante el tratamiento y la eliminación de estos, por ejemplo, la generación de dioxinas y furanos mediante la combustión incompleta de los desechos. Además, la cantidad de desechos generados va en aumento debido al crecimiento de la población, a la urbanización, al desarrollo de las industrias y a la migración de población a los centros urbanos.

Por lo tanto, la Unión Europea (UE) exige que la gestión de residuos se transforme en una gestión más sostenible que incorpore los principios de la economía circular<sup>5</sup>. La Directiva Marco de residuos de la UE 2008/98/CE (*Parlamento Europeo y Consejo, 2008*) establece los conceptos básicos y las definiciones relacionadas con la gestión de residuos y determina los objetivos de reciclaje y recuperación que se deberían alcanzar en el año 2025 para los residuos municipales (55%).

Por otra parte, debido al rápido agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, los RSU se han identificado como una fuente de energía alternativa para mitigar la futura crisis energética, ya que están compuestos por una alta fracción de compuestos orgánicos, de modo que, el tratamiento de RSU puede reducir los impactos ambientales y reemplazar una parte de la energía primaria, actualmente suministrada por combustibles fósiles, a través de las prácticas adecuadas de gestión de residuos. Por lo tanto, los RSU se han estudiado como una fuente que puede usarse para generar electricidad, calor o productos y esta se ha considerado económicamente viable y ambientalmente sostenible<sup>6</sup>. No obstante, hay que tener en cuenta que, en el caso de la UE, la jerarquía de gestión de residuos prioriza la reutilización y el reciclaje de materiales sobre los procesos de valorización energética (*Parlamento Europeo y Consejo, 2008*), por lo que algunas de las fracciones orgánicas, como el papel, el cartón y los materiales poliméricos que se pueden reciclar, pueden presentar en realidad cantidades más bajas disponibles para la valorización energética.

Teniendo en cuenta la economía circular, así como la jerarquía de residuos, existen varios métodos que se pueden considerar más sostenibles que las técnicas actuales para el tratamiento de residuos. Se ha identificado un enorme potencial para valorizar los desechos y así obtener energía o productos, como el CH<sub>3</sub>OH, a través de la gasificación, en lugar de eliminarlos o vertirlos de forma inadecuada.

---

## **3-Objetivos**

---



### **3. Objetivos**

El objetivo de este documento es el análisis de la aportación al autoabastecimiento energético del CH<sub>3</sub>OH obtenido a partir de la gasificación inicial de residuos. Se revisan algunos aspectos del estado actual de la gestión de residuos en Canarias, identificando los flujos de residuos con potencial energético y explorando el potencial de valorización de estos como materia prima para la obtención de CH<sub>3</sub>OH. Para ello, se realiza un estudio del estado del arte de las tecnologías más avanzadas en el campo de la gasificación con el fin de determinar su impacto en la independencia energética exterior de las islas. Por último, se realiza un estudio económico de una planta de gasificación básica a partir de la información de los RSU en Canarias con el objetivo de determinar su viabilidad.

---

## **4-Antecedentes y estado actual**

---

#### **4. Antecedentes y estado actual**

##### **4.1 Gestión de residuos sólidos en Canarias**

Las Islas Canarias son un archipiélago español que ocupa 7.447 km<sup>2</sup> ubicado frente a la costa noroeste de África continental, a 100 kilómetros al oeste de la frontera entre Marruecos y Sáhara Occidental. Canarias es una de las 17 comunidades autónomas de España y cuenta una población de 2.175.952 habitantes (2021), lo que la convierte en la octava comunidad autónoma más poblada de España, con una densidad de 292 habitantes por km<sup>2</sup>.

En Canarias, desde la década de 1990 se ha ido elaborando legislación ambiental. En el año 1999 entra en vigor la Ley 1/1999 de 29 de enero sobre residuos, cuya finalidad es la gestión de los residuos generados en la región. Los residuos en las islas se clasifican como residuos municipales, especiales, sanitarios, industriales y peligrosos y ganaderos. Respecto a los residuos urbanos, se establecen los siguientes objetivos básicos: (1) insularidad en la gestión de residuos urbanos (recogida, transporte, tratamiento y eliminación), (2) integración con otras corrientes de residuos, por ejemplo, procesar plásticos de invernadero junto con residuos urbanos, (3) recuperación de residuos peligrosos presentes en los residuos municipales, (4) recuperación y valoración de las fracciones de residuos que son factibles desde un punto de vista técnico, económico y ambiental, (5) eliminación segura de las fracciones no recuperables y (6) realización de campañas de comunicación y capacitación.

Sin embargo, la producción total de residuos municipales en Canarias ha ido aumentando en los últimos años, siendo de 1.331.187 t en 2018, como se muestra en la Tabla 1, donde muchos de estos residuos presentan componentes con potencial para ser reutilizados o reciclados.

**Tabla 1. Cantidad de residuos urbanos recogidos en Canarias por años**

	2018	2017	2016	2015	2014
<b>TOTAL RESIDUOS</b>	1.331.187	1.295.469	1.245.102	1.264.095	1.259.718
<b>TOTAL RESIDUOS MEZCLADOS</b>	1.154.154	1.145.477	1.096.600	1.144.978	1.127.565
<b>Residuos domésticos y vías públicas</b>	1.128.714	1.123.413	1.073.045	1.108.156	1.090.966
<b>Residuos domésticos voluminosos mezclados</b>	25.440	22.064	23.555	36.822	36.599
<b>TOTAL RESIDUOS DE RECOGIDA SEPARADA</b>	177.033	149.992	148.502	119.117	132.153
<b>Aceites minerales usados (no incluye los de tipo alimentario)</b>	..	..	..	..	..
<b>Medicamentos no utilizados</b>	..	..	..	..	..
<b>Residuos sanitarios y biológicos</b>	..	..	..	..	..
<b>Residuos metálicos</b>	2.305	1.334	1.096	515	520
<b>Vidrio</b>	41.243	38.888	35.939	33.225	31.163
<b>Papel y cartón</b>	40.485	31.954	33.094	31.543	30.659
<b>Caucho (neumáticos)</b>	..	..	..	..	..
<b>Plásticos (excepto embalajes)</b>	5	76	4.549	31	31
<b>Madera</b>	1.649	1.606	774	675	681
<b>Ropa y residuos textiles</b>	142	1.045	1.078	474	460
<b>Vehículos desechados</b>	..	..	..	..	..
<b>Equipos eléctricos desechados y componentes de equipos electrónicos desechados</b>	5.969	4.541	5.182	2.779	2.308
<b>Residuos de pilas y acumuladores</b>	385	209	48	814	676
<b>Residuos animales y vegetales</b>	27.922	21.812	19.956	21.541	38.799
<b>Envases mixtos y embalajes mezclados</b>	22.676	20.067	18.950	16.990	16.225
<b>Lodos comunes (secos)</b>	0	0	0	0	0
<b>Residuos minerales (incluye residuos de construcción y demolición)</b>	34.114	28.244	24.239	9.477	9.568
<b>Otros</b>	138	216	3.597	1.053	1.063

Notas:

Unidad de medida: Toneladas.

1.- (..) Dato no disponible.

2.- A partir del año 2011, los datos correspondientes a residuos domésticos mezclados, vidrio, papel y cartón, residuos animales y vegetales, así como los residuos de envases mixtos, han sido suministrados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Las estimaciones del resto de categorías provienen de la encuesta sobre recogida de residuos.

Fuente: Instituto Canario de Estadística (ISTAC) a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE).

Dentro de España, Canarias, detrás de Baleares, es la comunidad autónoma con mayor generación de residuos municipales durante el período 2010-2018 (Tabla 2). En Canarias existe mayor producción de residuos municipales que en la mayoría del territorio español debido al crecimiento económico y demográfico experimentado, además de la rápida urbanización, el aumento en el nivel de vida de los ciudadanos y el alto número de turistas que visitan el territorio cada año, generalmente superando los 10 millones al año, lo que constituye una población equivalente mucho más alta que el censo.

**Tabla 2. Indicadores sobre residuos urbanos. Serie 2010-2018. Cantidad per cápita de residuos recogidos por comunidades autónomas, periodo y clase de residuos en el año 2018**

	Residuos mezclados	Residuos de papel y cartón	Residuos de vidrio	Envases mixtos y embalajes mezclados	Total
<b>Total nacional</b>	391,3	22,8	17,9	15,9	485,9
<b>Andalucía</b>	465,0	13,9	12,9	11,2	526,7
<b>Aragón</b>	379,8	22,0	14,4	14,5	494,4
<b>Asturias</b>	394,4	40,8	16,0	12,4	489,1
<b>Baleares</b>	627,3	46,2	34,7	29,9	815,2
<b>Canarias</b>	527,4	18,5	18,8	10,4	608,3
<b>Cantabria</b>	465,0	17,9	19,4	10,8	566,1
<b>Castilla y León</b>	386,9	18,1	20,6	10,9	450,4
<b>Castilla - La Mancha</b>	423,4	13,8	10,5	11,0	476,4
<b>Cataluña</b>	310,5	29,9	22,4	21,1	461,8
<b>Comunitat Valenciana</b>	434,7	14,2	17,2	10,7	514,3
<b>Extremadura</b>	421,0	34,2	7,7	12,3	476,9
<b>Galicia</b>	353,4	13,9	17,0	9,6	421,7
<b>Madrid</b>	307,3	18,4	15,9	24,3	386,1
<b>Murcia</b>	437,8	14,1	17,8	12,3	493,5
<b>Navarra</b>	268,4	43,2	26,0	34,6	455,0
<b>País Vasco</b>	292,0	68,0	28,4	21,9	479,0
<b>La Rioja</b>	355,4	26,1	28,5	17,6	428,9
<b>Ceuta y Melilla</b>	..	..	..	..	..

Notas:

- 1) Unidades: Kilogramos/habitante/año.
- 2) En los indicadores per cápita se utilizan las últimas cifras de población residente que han sido publicadas por el INE, referidas a 1 de Julio de cada año.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Además del gran número de residuos generados, existen problemas en su gestión en los espacios insulares, ya que las características del territorio impiden en gran medida las actividades de recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y eliminación de estos, además de suponer altos costos de gestión. En particular, los problemas comunes a los que se enfrentan las islas son, principalmente, el hecho de que sean territorios limitados para la ubicación de vertederos, el número reducido de instalaciones existentes para el tratamiento o la eliminación de desechos, que hace necesario su transporte a la península ibérica, los pocos gestores para la recogida selectiva, el bajo porcentaje de reciclaje y la escasez de datos en general.

La evolución de las emisiones de GEI en el sector de tratamiento y eliminación de residuos en las Islas Canarias se muestra en la Tabla 3. En ella, se observa que la actividad que más contribuye a la contaminación es la disposición de vertederos, con un 93,6% de las emisiones totales del sector en el año 2016.

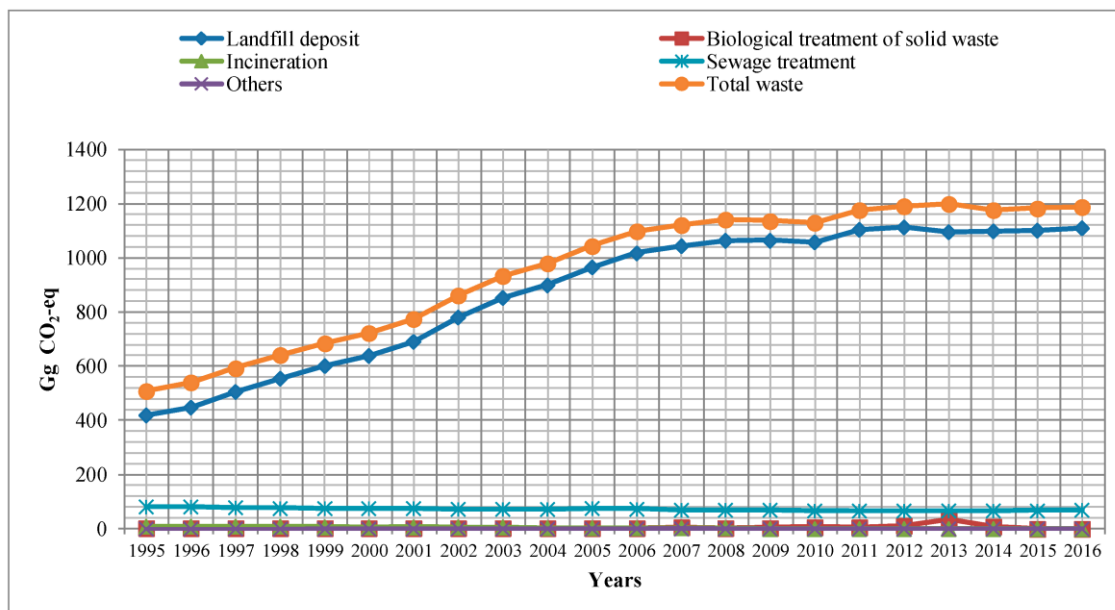
**Tabla 3. Emisiones en Canarias provenientes del tratamiento y la eliminación de residuos**

Año	Depósito en vertedero		Tratamiento biológico		Incineración		Tratamiento de aguas residuales		Otros		Total
	Gg <sup>1</sup> CO <sub>2</sub> -eq	%	Gg CO <sub>2</sub> -eq	%	Gg CO <sub>2</sub> -eq	%	Gg CO <sub>2</sub> -eq	%	Gg CO <sub>2</sub> -eq	%	Gg CO <sub>2</sub> -eq
2008	1064,3	93,3	3,7	0,3	2,9	0,3	69,9	6,1	0,3	0,03	1141,1
2009	1064,8	93,4	4,1	0,4	1,3	0,1	69,2	6,1	0,23	0,02	1136,8
2010	1056,5	93,5	6,7	0,6	1,3	0,1	65,5	5,8	0,02	0	1130,1
2011	1102,9	93,8	4,9	0,4	1,3	0,1	66,3	5,6	0,02	0	1175,4
2012	1111,4	93,4	10,3	0,9	1,3	0,1	66,2	5,6	0,02	0	1189,3
2013	1095,8	91,4	35	2,9	1,3	0,1	66,5	5,5	0,02	0	1198,7
2014	1096,8	93,4	9,5	0,8	1,3	0,1	67,2	5,7	0,02	0	1174,9
2015	1107	93,6	6,8	0,6	1,3	0,1	67,8	5,8	0,02	0	1183
2016	1110,5	93,6	6,8	0,6	1,3	0,1	68,5	5,8	0,02	0	1187,3

Fuente: <sup>7</sup>

Los datos indican que en el año 2016 ha habido un aumento del 0,4% en las emisiones totales de GEI en comparación con el año anterior. Estos datos se grafican en la Figura 2.

<sup>1</sup> Gg: 10<sup>6</sup> g



**Figura 2. Evolución de las emisiones de GEI debido al tratamiento y eliminación de residuos en las Islas Canarias**

Fuente: <sup>7</sup>

#### **4.2 Descripción de la técnica anterior**

En el caso de las Islas Canarias, no existen tantas tecnologías que se puedan utilizar para gestionar los residuos. Debido a los volúmenes de residuos que se manejan, algunos procesos termoquímicos como la incineración o el plasma no son adecuados, porque en el estado actual de la técnica son rentables solo para mayores cantidades de flujos. Los tratamientos que se realizan comúnmente son la deposición en vertedero, el reciclaje, y en muy poca medida, la incineración.

#### **Deposición en vertedero**

La deposición en vertedero consiste en eliminar los residuos en el suelo sin aprovecharlos. Es la opción menos deseada según la jerarquía de gestión de residuos<sup>8</sup>. Sin embargo, debido a la ausencia de técnicas más avanzadas en la gestión de residuos en Canarias y al hecho de que el vertedero es la opción menos costosa para el tratamiento de los residuos<sup>9</sup>, es la alternativa que prevalece en el archipiélago. Sin embargo, aunque los vertederos representen la forma más barata de eliminar los desechos, no aportan nada en la cadena de valor. Es decir, los residuos no se pueden aprovechar para obtener energía ni para transformarlos en otros materiales.

Por otro lado, un fenómeno que necesita control en el archipiélago es la proliferación de vertederos ilegales donde se depositan grandes cantidades de desechos sin ser controlados. *Quesada-Ruiz et al.* realizaron un estudio de este fenómeno en las islas de Gran Canaria y La Palma, identificando 286 y 153 ubicaciones ilegales de vertederos, respectivamente.

## **Reciclaje**

El reciclaje es una de las alternativas más deseadas según la jerarquía de residuos actual, sin embargo, en las Islas Canarias el porcentaje de reciclaje es bajo. Concretamente, en 2019, los RSU se depositaban en vertederos tras separar una fracción del 5% destinada a dicho fin.

Este bajo porcentaje se debe a diversas causas, entre las que destacan el bajo desarrollo económico, la falta de conciencia, educación y entrenamiento en la población y en las autoridades, la falta de tecnologías para realizar la recolección y el procesamiento de residuos de forma eficiente, la falta de inversión y el desconocimiento del valor que los desechos pueden tener con un tratamiento adecuado, además de que en ciertas islas las grandes cantidades de residuos no están disponibles. Asimismo, es difícil alcanzar los valores mínimos de reciclaje debido a la falta de espacio para almacenar materiales reciclables, ya que hay muchas áreas protegidas y lugares declarados patrimonio natural.

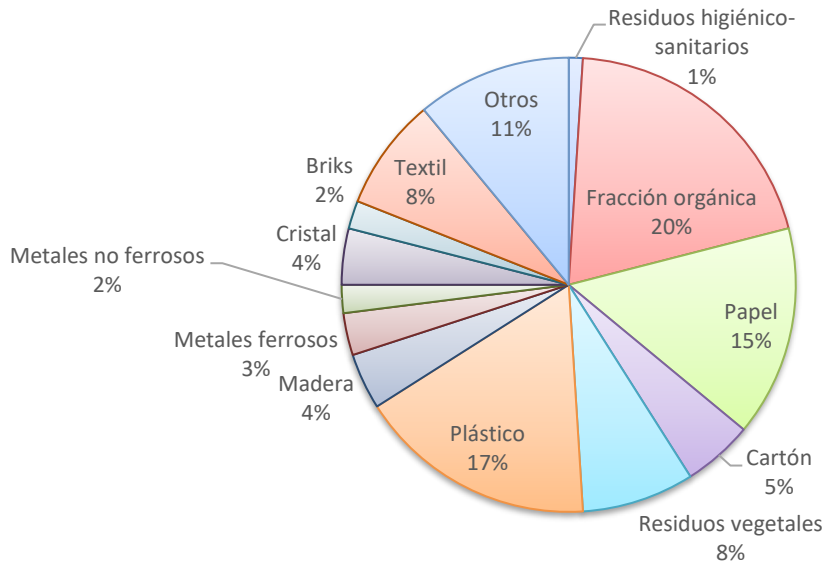
## **Procesos termoquímicos**

Entre los tres procesos termoquímicos principales, incineración, pirólisis y gasificación, en Canarias solo se realiza la incineración y únicamente de forma muy localizada. Sin embargo, este método no es rentable ya que la quema incontrolada provoca la liberación de sustancias nocivas.



### **4.3 Composición de los RSU en las Islas Canarias**

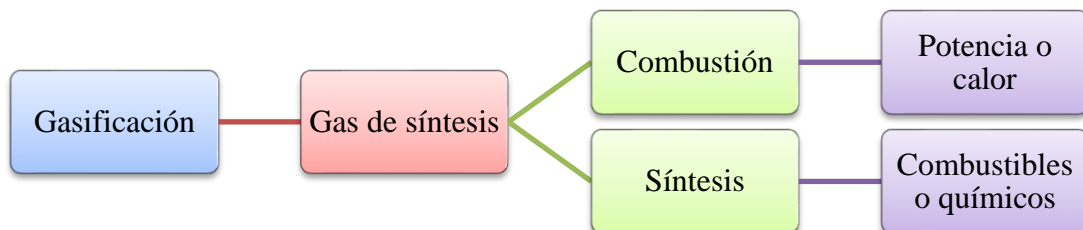
Observando las características de los RSU en Canarias (Figura 3), aparte de la fracción que puede ser reciclada, metales y cristal, la alta fracción de materia orgánica, así como de componentes no reciclables con poder combustible tales como plásticos, madera y textiles, implica que se puede considerar el uso de tecnologías de recuperación de energía o de obtención de nuevos materiales a partir de estos.



**Figura 3. Composición de los RSU en Canarias**

Fuente: <sup>7</sup>

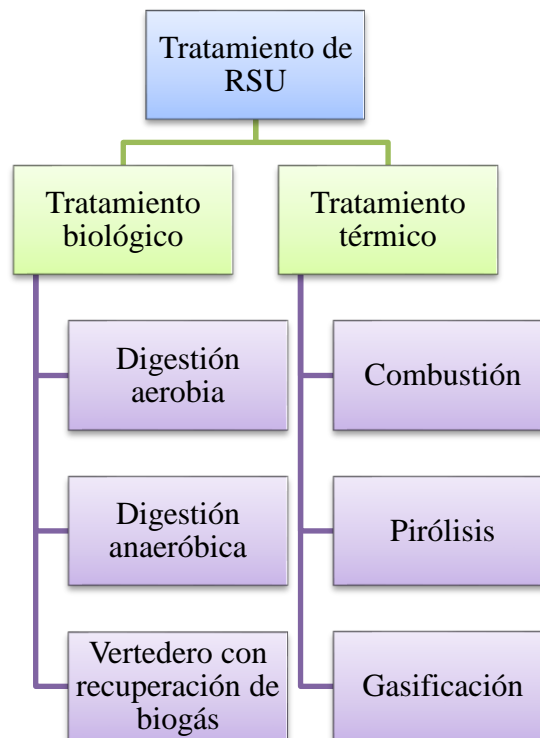
Por lo tanto, una forma de superar las deficiencias asociadas con la gestión tradicional de residuos en el archipiélago es la conversión de los RSU para obtener productos comercializables valiosos. Se pueden emplear los RSU para la síntesis de productos químicos, Waste to Chemical (WtC), o para la obtención de energía, Waste to Energy (WtE) utilizando diferentes vías para su conversión y valorización (Figura 4). La comparación de ambos métodos de conversión de residuos se realizará más adelante.



**Figura 4. Ruta posible de utilización del syngas**

#### **4.4 Tecnologías principales de conversión de residuos**

Actualmente, existen dos tecnologías principales para la conversión de los RSU que no se reciclen. El primer tipo son los procesos termoquímicos o térmicos (incineración, pirólisis y gasificación) y el segundo son los procesos bioquímicos o biológicos (compostaje, digestión anaeróbica y vertedero con recuperación de biogás), como se muestra en la siguiente figura (Kumar y Samadder, 2017).



**Figura 5. Tecnologías de tratamiento de RSU**

La composición de los residuos es un factor crucial que considerar para seleccionar la opción más adecuada para su gestión (Yadav y Samadder, 2017). Un residuo con alta humedad y fracción orgánica es más adecuado para ser tratado por la ruta de proceso biológico. Por otro lado, un residuo sólido con baja humedad y menor fracción orgánica es más apropiado para ser tratado mediante algún proceso termoquímico debido a su alto poder calorífico. Además, las tecnologías de tratamiento térmico se caracterizan por temperaturas y tasas de conversión más altas que las de los procesos bioquímicos, generalmente.

Como consecuencia, los residuos en Canarias, que contienen una fracción con alto poder calorífico (plástico, madera, textil) mayor que el contenido orgánico, como se muestra en la Figura 3, deben ser tratados preferiblemente por procesos térmicos.

El tratamiento térmico se realiza a altas temperaturas para reducir el volumen de residuos, además de hacerlos inocuos mediante la destrucción de patógenos y sustancias químicas tóxicas. Estas tecnologías son componentes esenciales de los sistemas integrados de gestión de residuos sólidos (*Brunner et al. 2004; Porteous 2005; Psomopoulos et al. 2009*). Sus principales beneficios son:

- Reducción significativa del volumen, entre 80 % y 90 %, y masa, entre 70% y 80 %, de los desechos (*Consonni et al. 2005*).
- Tiempo de procesamiento corto, desde unos minutos (unidades de lecho fluidizado) hasta una gran parte del día (algunas unidades de pirólisis) (*McKay 2002*).
- Destrucción de contaminantes orgánicos, tales como hidrocarburos halogenados (dioxinas y furanos), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), fenoles y cianuros (*Buekens y Cen 2011*).
- Concentración e inmovilización de contaminantes inorgánicos, como metales pesados, haciendo posible que se puedan reutilizar o bien que sean eliminados de forma útil y segura (*ISWA 2008*).
- Disminución del impacto medioambiental. Se ha demostrado que la conversión de residuos en energía tiene menor impacto que casi cualquier otra fuente de electricidad (*Arena 2012*).
- Aprovechamiento de la energía liberada por los residuos sólidos, como la electricidad y el calor de proceso (*Cheng et al. 2007*). El mayor costo de operación que presentan estas tecnologías puede compensarse con la venta de energía producida.

Como se ha mencionado previamente, las tecnologías principales de conversión térmica para la valorización de los RSU son la incineración, la pirólisis y la gasificación.

#### **4.4.1 Incineración**

La incineración de desechos sólidos comenzó en la década de 1870, donde los incineradores de horno fijo se establecieron por primera vez en el Reino Unido y Estados Unidos. Desde la década de 1970, las tecnologías de incineración de desechos sólidos experimentaron un rápido desarrollo y a principios de los 2000 eran los principales métodos de eliminación de RSU en muchos países desarrollados como Suiza, Dinamarca y Japón (*Zhang y Zhao, 2000*).

La incineración es un proceso que implica la combustión controlada y completa de los desechos sólidos. La combustión se define como una reacción química altamente exotérmica, donde se produce la oxidación de sustancias orgánicas contenidas en los desechos a altas temperaturas [ $700 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 1450$ ], a presión atmosférica y con inyección de oxígeno. El proceso permite una recuperación de energía, que puede usarse para generar electricidad o para suministrar calor<sup>10</sup>, y además reduce el volumen original de residuos entre un 80 % y un 90 %. La premisa de la incineración de residuos sólidos debe considerar las características y la composición de los residuos, al igual que su poder calorífico.

Además de la liberación de gases de combustión típicos, por ejemplo, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>, también se emiten otros contaminantes como metales pesados volátiles, compuestos orgánicos y partículas en forma de cenizas, que deben eliminarse utilizando metodologías y equipos para controlar la contaminación del aire. Por lo que, además de que existe peligro de contaminación ambiental, el control de la contaminación generada por esta técnica representa generalmente un costo significativo en las plantas de incineración.

Asimismo, incluso la generación de incineradores de RSU más moderna está limitada por una baja eficiencia eléctrica, que llega hasta aproximadamente un 25% (*Panepinto et al., 2015*). Esto se debe a la limitación en la temperatura máxima del vapor de la caldera, normalmente inferior a 450 °C, para prevenir la corrosión por HCl gaseoso (*Belgiorno et al., 2003*).

Aunque estos incineradores, operando adecuadamente, pueden cumplir con los requisitos medioambientales exigidos, el riesgo potencial de formación de PCDD/Fs<sup>2</sup> aún supone un debate para el público. Como consecuencia, la incineración presenta poca aceptación por parte de la sociedad, por lo que se aconsejan alternativas más respetuosas con el medio ambiente y energéticamente eficientes. Por lo tanto, la pirólisis y la gasificación son tecnologías de conversión térmica que recientemente han sido ampliamente estudiadas como sustitutivos.

#### **4.4.2 Pirólisis**

El concepto de pirólisis de RSU ganó popularidad en la década de 1960, ya que se asumió que, puesto que los RSU se componen de alrededor de un 60% de materia orgánica, estos serían muy adecuados para el tratamiento pirolítico. A mediados de la década de 1970, se completaron estudios en Europa y Estados Unidos sobre pirólisis de RSU, algunos de ellos involucrando la construcción y operación de plantas demostrativas. A finales de la década de 1970, sin embargo, surgieron dificultades tanto técnicas como económicas en torno a la pirólisis de los RSU, lo que resultó en una reducción en el interés y en las expectativas sobre la tecnología. Desde entonces, la pirólisis de RSU ha sido objeto de una intensa investigación, pero la aplicación sigue enfrentándose a limitaciones técnicas.

La pirólisis es la descomposición química de los desechos sólidos orgánicos a altas temperaturas [ $300 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 900$ ] llevada a cabo en un ambiente deficiente en oxígeno (hasta máximo un 10% de la cantidad estequiométrica requerida para una reacción de combustión). El proceso implica reacciones térmicas de craqueo y la transferencia de masa y calor, y conduce a la generación de vapores o gases pirolíticos<sup>11</sup>. La conversión se efectúa esencialmente por las reacciones endotérmicas que promueven la descomposición de las largas moléculas de hidrocarburos en las materias primas, y la recombinación de compuestos simples en la formación de los productos finales<sup>12</sup>.

---

<sup>2</sup> PCDD/Fs: Policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos

Los residuos se descomponen en productos gaseosos, gas de síntesis (syngas), líquidos, como el bio-aceite, y sólidos, como el carbón. La selectividad que conduce a los diferentes tipos de productos se puede controlar manipulando las condiciones de operación, temperatura y tiempo de residencia. Las bajas temperaturas ( $< 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y un alto tiempo de residencia favorecen la producción de carbón sólido (hasta un 35% en peso), mientras que las altas temperaturas, [ $700 < T\text{ (}^{\circ}\text{C)} < 1100$ ], y un corto tiempo de residencia favorecen la producción de gases (hasta 80 % en peso)<sup>13</sup>. Por otro lado, la producción de bio-aceite se favorece normalmente a  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con un tiempo de retención muy corto ( $< 1\text{ s}$ )<sup>14</sup>. Estos productos pueden ser tratados y utilizados como biocombustibles en procesos de obtención de energía térmica o eléctrica.

Durante la pirólisis, las emisiones se reducen al retener dentro de los residuos del proceso volátiles, como sales alcalinas y metales pesados (excepto mercurio y cadmio), y, hasta cierto punto, azufre y cloro. Especialmente, la pirólisis previene en gran medida la formación de PCDD/Fs y reduce la formación de NO<sub>x</sub> debido a las temperaturas más bajas y las condiciones reductoras (*Malkow 2004*).

#### **4.4.3 Gasificación**

La tecnología de gasificación de RSU es más reciente que las anteriores. Algunos de los primeros avances fueron realizados por parte de MTCI Company (EE. UU.), que desarrolló con éxito múltiples modelos de gasificador de residuos de lecho fluidizado utilizando una tecnología de gasificación por calentamiento indirecto y a una temperatura de operación de alrededor de  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estados Unidos también creó el gasificador de calefacción exterior (SilvaGas TM), más adecuado para gasificar desechos que contienen una alta proporción de madera. También fueron desarrolladas con éxito las tecnologías Purox y FLK, por parte de las empresas UUC y German, respectivamente. Japón también fue uno de los pioneros en trabajos de investigación, presentando una clara ventaja en la comercialización (*Xiao et al. 2006*). Por otra parte, en China, se crearon con éxito varias técnicas de gasificación de residuos y algunas de estas se pusieron en operación comercial después de años de investigación experimental. Algunos ejemplos del método en China fueron desarrollados por la Universidad de Tongji, que investigó a finales de la década de 1980 la gasificación de RSU en un lecho fluidizado (*Wen et al. 1992; Wu et al. 1989*), también por parte de la

Universidad de Zhejiang, que llevó a cabo una serie de estudios experimentales sobre la gasificación de biomasa diseñando un sistema de cogeneración eléctrica que utilizaba carbón y biomasa como combustible (*Cen et al. 1993*), y, por último, Southeast University estudió la tecnología de gasificación a baja temperatura de RSU en un lecho fluidizado circulante (*Xiao et al. 2001*).

Algunos ejemplos de tecnologías actuales de gasificación que emplean desechos para la producción de biocombustibles son:

ThermoChem Recovery International (TRI) produce syngas a partir de biomasa para la producción de combustibles y productos químicos de alto valor agregado. El sistema utiliza una etapa primaria de reforming con vapor en un lecho fluidizado a baja presión y temperatura media que es calentado indirectamente, así como una segunda etapa de gasificación de lecho fluidizado a baja presión y temperatura más alta para generar syngas. Una de las ventajas de este proceso es que, al introducir vapor, la limpieza del syngas comienza directamente dentro del reactor, simplificando las demás etapas de purificación y produciendo ahorros en capital invertido y en costos operativos.

Otro tipo de tecnología de gasificación utilizada para la transformación de residuos es Plasma Enhanced Melter (PEM), patentada por InEnTec®. Esta tecnología utiliza desechos, incluidos desechos peligrosos, sanitarios, radiactivos, industriales, municipales y de llantas, y los transforma en productos comerciales valiosos como combustibles y materiales industriales o en energía. El proceso utiliza un gasificador, donde la mayoría, aproximadamente el 80%, de la fracción orgánica de la materia prima se convierte en syngas. La materia prima restante, que consiste en materiales inorgánicos (suciedad, vidrio y metal, etc.), carbono y otros compuestos orgánicos no procesados, pasan a la cámara de proceso PEM, donde se proporciona la energía necesaria para gasificar los materiales orgánicos restantes, convirtiéndolos también en syngas. Seguidamente, ambas corrientes se canalizan hasta la cámara de residencia térmica (TRC), que proporciona un tiempo de residencia adicional a una temperatura lo suficientemente alta como para procesar completamente cualquier material orgánico restante presente en el syngas. Por último, el syngas se limpia y acondiciona. Mediante esta tecnología se planea producir C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH a partir de syngas proveniente de desechos en un futuro (*InEnTec, 2019*).

La gasificación es la combustión parcial de residuos que convierte los compuestos orgánicos en un producto gaseoso, gas de síntesis o syngas, a altas temperaturas [ $700 < T \text{ (}^\circ\text{C)} < 900$ ] y en ambientes privados de oxígeno (típicamente entre el 25 y el 35% de la relación estequiométrica para la combustión completa). Entonces, el resultado no es un gas de combustión caliente, como en la combustión directa convencional de desechos, sino un gas combustible caliente. El proceso incluye un grupo de reacciones químicas complejas que degradan las moléculas orgánicas grandes en CO, CH<sub>4</sub> e hidrógeno, así como otros gases inflamables, donde la materia prima pasa por deshidratación, volatilización y descomposición.

El objetivo de la gasificación es, generalmente, producir syngas. Este se compone principalmente de hidrógeno, CO, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> y tiene propiedades adecuadas para la obtención de energía u otros productos. El syngas se ha aplicado con éxito para hacer funcionar motores de combustión interna o como un sustituto del aceite del horno en aplicaciones de calor directo<sup>15</sup>.

La gasificación de desechos sólidos presenta varios beneficios sobre los otros procesos térmicos. Algunos de ellos son:

- La gasificación produce un producto intermedio o syngas, que puede ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones, como en la generación de energía o la fabricación de combustibles. Por el contrario, las unidades de combustión convencionales queman directamente la materia prima residual.
- En la gasificación se puede lograr una autonomía térmica en torno a una relación de equivalencia aire-combustible de 0,3 a 0,4 (*Zhang et al., 2011*), es decir, no se necesita ninguna asistencia térmica externa. Por el contrario, la pirólisis requiere energía térmica adicional para mantener la reacción, lo que conlleva a costos más altos.
- Por lo general se alcanza una conversión de mayor eficiencia respecto a los otros métodos.
- Las temperaturas de operación son típicamente más bajas que las de combustión directa, lo que reduce la probabilidad de volatilización de álcalis y de metales pesados.



- El proceso de gasificación se puede aplicar para la generación de energía a menor escala (normalmente inferior a 120 kt / año), mientras que el sistema de combustión directa convencional puede no ser conveniente.
- Las plantas de gasificación suelen ser modulares, lo que permite la posibilidad de modificar la capacidad de tratamiento de residuos sólidos.
- A excepción de las cenizas liberadas y algunos componentes volátiles, la mayor parte del material inerte no combustible se recoge en el fondo del reactor.
- Debido a la atmósfera reductora, la emisión de dioxinas y furanos está muy limitada. También existe una reducción sustancial de emisiones NO<sub>x</sub>.
- El déficit de aire, en lugar de exceso como en la combustión, reduce las pérdidas y, por lo tanto, aumenta la eficiencia de recuperación de energía.

Se puede concluir que, teniendo en cuenta el impacto medioambiental, así como la inversión económica, la gasificación es considerada generalmente como la vía más eficaz para el aprovechamiento de residuos.

Especialmente en Canarias, la gasificación presenta ventajas frente al principal tipo de tratamiento de residuos que prevalece archipiélago, el vertedero, ya que mientras que este solo puede garantizar una recuperación parcial de energía, a partir de la gasificación térmica se obtiene syngas que se puede utilizar tanto para la generación de energía como para la producción de productos químicos<sup>16</sup>.

#### **4.5 Comparación de los procesos WtC y WtE**

Previamente se había mencionado que los RSU se pueden emplear para la síntesis de productos químicos, WtC, o por otro lado para obtener de energía, WtE.

Comparando los procesos de conversión, WtC y WtE, para la eliminación y valorización de residuos, *G. Iaquaniello et al, 2017*<sup>17</sup>, llegaron a la conclusión de que el proceso de WtC presenta ventajas frente al WtE.

En primer lugar, se produce un combustible líquido en lugar de energía eléctrica, lo que permite el fácil almacenamiento del combustible y su distribución incluso a larga distancia, mientras que el almacenamiento de energía eléctrica aún no es efectivo a gran escala, ya que la energía eléctrica depende en gran medida de la capacidad de la red, que a su vez depende de la demanda altamente fluctuante. Por lo tanto, el enfoque WtC al depender menos de las fluctuaciones de la demanda del mercado, hace posible operar bajo una capacidad pseudo-constante, obteniéndose así un beneficio en términos de amortización<sup>17</sup>. Por otra parte, el proceso WtC parece ser más ventajoso también en cuestiones ambientales, ya que las emisiones son inferiores<sup>18</sup>.

En conclusión, la metodología de conversión de RSU a productos químicos, WtC, destaca de forma general por encima de la obtención de energía a partir de estos residuos, donde uno de los fines más prometedores de dicha tecnología WtC es la producción de CH<sub>3</sub>OH.

#### **4.6 Obtención de CH<sub>3</sub>OH**

El CH<sub>3</sub>OH se utiliza como combustible y producto químico en diversas aplicaciones, del cual según bibliografía reciente la producción mundial supera los 100 millones de toneladas<sup>19</sup>. A nivel industrial es el alcohol más utilizado debido principalmente a que presenta doble mercado:

1. Como combustible o materia prima para producir componentes de combustible, por ejemplo, MTBE.
2. Como químico o componente básico para la obtención de otros productos químicos, como pueden ser dimetiléter (DME), formaldehído, ácido acético, etc.

Aunque como químico actualmente no existan incentivos equivalentes a los del biocombustible, la posibilidad de presentar un doble mercado permite tener una mayor flexibilidad y reducir así los riesgos de inversión<sup>20</sup>. Se destaca su elevada reactividad, su relativo bajo costo y que es utilizado cuando existen aspectos legales en algunos países que no permiten el uso ésteres de etilo. Además, presenta ventajas frente a otros productos químicos, como que es fácil de almacenar y de esta forma se evita la dependencia de las tendencias del mercado, y que puede utilizarse para la producción de energía e hidrógeno.

El CH<sub>3</sub>OH se produce típicamente mediante el proceso Fischer-Tropsch, donde el syngas presurizado reacciona en presencia de un catalizador. Esta reacción es altamente exotérmica, por lo que se presenta un desafío importante: la eliminación del exceso de calor con el fin de cambiar el equilibrio hacia los productos y evitar reacciones secundarias y la sinterización del catalizador.

Hoy en día, la ruta principal para la producción de syngas es a partir de fuentes fósiles, como pueden ser gas natural (80%) y carbón y petróleo (17%), y posteriormente se realiza la conversión catalítica hasta CH<sub>3</sub>OH. Aunque el reformado con vapor de gas natural es la tecnología más básica y barata para la producción de CH<sub>3</sub>OH, la eficiencia energética de dicho proceso ronda el 40%<sup>21</sup>, por lo que tiene un impacto ambiental relevante en cuanto a la generación de gases de efecto invernadero (GEI), e incluso éste puede aumentar considerando también el impacto relacionado con la producción y la distribución del gas natural, por lo tanto, se ha prestado atención a la búsqueda de alternativas renovables para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

Como se ha mencionado, una de las alternativas es utilizar un proceso WtC, donde se minimiza el consumo de combustibles fósiles, y por tanto su impacto ambiental, además de permitir la utilización de residuos, concretamente la fracción de RSU, que normalmente sería eliminada en los vertederos. Dicho proceso enfocado a la síntesis de CH<sub>3</sub>OH se denomina como Waste to Methanol (WtM) y es, por tanto, un proceso amigable con el medio ambiente donde los reactivos principales son obtenidos de materias primas renovables aportando mayor valor agregado a los residuos.

La comparación en relación con el impacto medioambiental por generación de GEI entre ambos procesos, obtención de syngas a partir de fuentes fósiles y a partir de residuos, se realiza a continuación.

*G. Iaquaniello et al, 2017<sup>17</sup>*, realizaron el estudio en una planta que produce 300 t de CH<sub>3</sub>OH al día. Para analizar el impacto en las emisiones de GEI, es necesario calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> de la plantas realizando un balance de carbono y energía.

Para una planta WtM que produce CH<sub>3</sub>OH a partir de residuos, las experiencias previas estimaron que se emitían 1,2 kg CO<sub>2</sub> / kg CH<sub>3</sub>OH. Además, a este valor hay que añadirle aproximadamente 1,0 t CO<sub>2</sub> / t CH<sub>3</sub>OH de emisiones provenientes de la producción de la energía eléctrica necesaria para la operación de la planta. El valor resultante de emisiones de CO<sub>2</sub> para una planta WtM es de  $1,2 + 1,0 = 2,2$  t CO<sub>2</sub> / t CH<sub>3</sub>OH.

Por otro lado, las emisiones típicas de CO<sub>2</sub> provenientes de la producción de CH<sub>3</sub>OH a partir de fuentes fósiles oscilan entre 0,5 t CO<sub>2</sub>.eq / t CH<sub>3</sub>OH para reformado con vapor y 1,4 t CO<sub>2</sub>.eq / t CH<sub>3</sub>OH para oxidación parcial de aceite residual (*Pérez-Fortes et al., 2016*). En el caso de las plantas europeas, se utilizan ambas tecnologías, por lo que las emisiones medias de CO<sub>2</sub> (directo e indirecto) se han supuesto de 0,76 t CO<sub>2</sub>.eq / t CH<sub>3</sub>OH<sup>22</sup>. A este valor hay que sumarle las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con la combustión de combustible derivado de desechos o Refuse-derived fuel (RdF). En los incineradores actuales de RdF, las emisiones promedio equivalen a 1,23 t CO<sub>2</sub> / t RdF, que se traducen como 2,9 t CO<sub>2</sub> / t CH<sub>3</sub>OH. Por lo tanto, la producción de CH<sub>3</sub>OH a partir de combustibles fósiles produce emisiones equivalentes a  $0,76 + 2,9 = 3,66$  t CO<sub>2</sub> / t CH<sub>3</sub>OH.

Comparando las emisiones de 2,2 t CO<sub>2</sub> para el proceso WtM con las de 3,66 t CO<sub>2</sub> para la producción de CH<sub>3</sub>OH a partir de combustibles fósiles, se concluye que hay una reducción de aproximadamente el 40% en términos de impacto en las emisiones de GEI utilizando residuos en lugar de combustibles fósiles.

#### **4.7 Conclusiones**

- El vertedero es la opción de tratamiento de los residuos que prevalece en Canarias debido a la ausencia de técnicas más avanzadas y al hecho de que los vertederos son la opción más económica. Estos no aportan nada en la cadena de valor.
- Empleando residuos en lugar de combustibles fósiles se produce una reducción de aproximadamente el 40% en términos de impacto en las emisiones de GEI.
- Los residuos en Canarias contienen una fracción con alto poder calorífico, por lo que deben ser tratados preferiblemente por procesos térmicos.
- La gasificación de residuos es una tecnología más eficiente y viable medioambientalmente respecto a los demás procesos térmicos.

Se puede concluir en que una forma de solucionar el problema de la gestión de residuos en las Islas Canarias es valorizarlos mediante un proceso WtC, donde la conversión puede realizarse a través de la gasificación, tecnología viable con mayor sostenibilidad ambiental respecto a otros métodos, con el objetivo de obtener CH<sub>3</sub>OH.

---

## **5-Método**

---

## 5. Método

A continuación, se revisa el estado de la tecnología de gasificación de residuos orientada a la producción de gas de síntesis apto para la obtención de CH<sub>3</sub>OH.

El núcleo principal del proceso de residuos a CH<sub>3</sub>OH (WtM) es el reactor de gasificación, donde se produce la conversión a alta temperatura de los desechos en syngas. Sin embargo, el syngas no cumple directamente con los requisitos para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH, estos son:

- La relación molar H<sub>2</sub>/CO debe ser cercana a 2.
- Las cantidades de CO<sub>2</sub>, nitrógeno, hidrocarburos, agua, partículas y azufre deben ser bajas, por ejemplo, la cantidad de azufre debe ser inferior a 1 ppm y se admite hasta un 1% en peso de nitrógeno dentro del reactor.
- Los intervalos de presión y temperatura deben estar entre 50 bar y 150 bar y entre 100 °C y 200 °C<sup>23</sup>.

Por lo tanto, son necesarias etapas de purificación y acondicionamiento, lo que implica que el CH<sub>3</sub>OH se produce a partir de una serie de etapas que incluyen la gasificación de residuos, la limpieza y el acondicionamiento del syngas, y finalmente la síntesis catalítica de CH<sub>3</sub>OH.

En el proceso de gasificación, los residuos se transforman en syngas mediante una oxidación parcial. El syngas se compone principalmente de hidrógeno y CO, además de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, hidrocarburos pesados y nitrógeno en menores cantidades. Las reacciones se llevan a cabo a altas temperaturas, entre 500 °C y 1400 °C, y a presiones comprendidas entre valor atmosférico y 33 bar. En el proceso es necesario el empleo de un agente gasificante, el cual normalmente se utiliza aire, oxígeno puro, vapor o mezclas de los anteriores.

## 5.1 Clasificación de los métodos de gasificación

De forma general, los reactores de gasificación se clasifican según los criterios de operación, presentados en la Tabla 4.

**Tabla 4. Parámetros de clasificación de los reactores de gasificación**

<b>Criterios operativos</b>	<b>Tipos</b>
<b>Suministro de calor</b>	Gasificadores calentados directamente (autotérmicos) Gasificadores calentados indirectamente (alotérmicos)
<b>Presión de operación</b>	Gasificadores atmosféricos Gasificadores presurizados (hasta valores de 3 MPa) <i>Operar por encima de la presión atmosférica permite rendimientos más altos y mayor contenido de H<sub>2</sub> en el syngas, pero implica mayores costos de inversión y operación</i>
<b>Agente de gasificación</b>	Gasificadores de aire Gasificadores de aire enriquecido con oxígeno Gasificadores de oxígeno Gasificadores de vapor Gasificadores de plasma
<b>Diseño de reactores</b>	Gasificadores de lecho fijo <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corriente ascendente</li> <li>▪ Corriente descendente</li> </ul> Gasificadores de lecho fluidizado: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lecho fluidizado burbujeante</li> <li>▪ Lecho fluidizado circulante</li> <li>▪ Lecho fluidizado dual</li> </ul> Gasificadores de flujo de arrastre Gasificadores de horno rotativo Gasificadores de parrilla móvil Gasificadores de plasma
<b>Temperatura</b>	Gasificadores de baja temperatura, por debajo de 900 °C Gasificadores de alta temperatura, por encima de 1200 °C <i>El rango de temperatura puede determinar la posibilidad de obtener cenizas como residuo fáciles de manejar</i>
<b>Valor energético del gas</b>	Bajo poder calorífico (3 - 5 MJ / Nm <sup>3</sup> ) Medio poder calorífico (5 - 10 MJ / Nm <sup>3</sup> ) Alto poder calorífico (10 - 40 MJ / Nm <sup>3</sup> )



### **5.1.1 Suministro de calor**

La gasificación se puede definir como la oxidación parcial de los desechos en presencia de una cantidad de agente gasificante inferior a la requerida para la combustión estequiométrica. Básicamente, parte del combustible se quema para aportar el calor necesario para gasificar la alimentación, gasificación directa o autotérmica, como en el caso de la gasificación con aire, o la energía térmica la proporciona un suministro externo, gasificación indirecta o alotérmica, como al utilizar un soplete de plasma.

### **5.1.2 Agentes oxidantes**

La gasificación de desechos sólidos es un proceso complejo que incluye una serie de interacciones físicas y químicas que ocurren a temperaturas generalmente superiores a 600 °C, donde la temperatura exacta depende del tipo de reactor y de las características de los desechos, más particularmente de la temperatura de fusión y del ablandamiento de las cenizas (*Arena U., 2009, Higman C., 2003, E4tech, 2009*).

Como se observa en la Tabla 4, los procesos de gasificación de residuos se clasifican generalmente en función del medio oxidante: el proceso puede llevarse a cabo mediante oxidación parcial con aire, con aire enriquecido con oxígeno, con oxígeno puro, con vapor, con plasma o con algún tipo de mezcla<sup>24</sup>.

#### ***Oxidación con aire***

La oxidación parcial con aire genera un syngas diluido con nitrógeno atmosférico, hasta un 60 %, que tiene un poder calorífico comprendido entre 4 MJ / Nm<sup>3</sup> y 7 MJ / Nm<sup>3</sup>. Este valor se considera demasiado bajo para ser utilizado en una turbina de gas, ya que es notablemente inferior al del gas natural, que está alrededor de los 38 MJ / Nm<sup>3</sup>. Sin embargo, en los últimos años se comercializan turbinas de gas de nueva generación que son capaces de quemar syngas de bajo poder calorífico de forma eficiente, siempre que este se limpie y sea enfriado parcialmente para proteger las palas de la turbina<sup>24</sup>.

### ***Oxidación con aire enriquecido con oxígeno***

Algunos procesos operan con aire enriquecido con oxígeno, es decir, una mezcla de nitrógeno y oxígeno con un contenido de oxígeno entre 21 % y 50 %. El objetivo es obtener un gas de mayor poder calorífico, ya que contiene una cantidad reducida de nitrógeno, que posibilite la realización de procesos autotérmicos a mayor temperatura sin consumos elevados de oxígeno (*Mastellone et al., 2010*).

### ***Oxidación con oxígeno puro***

El oxígeno es capaz de descomponer las moléculas orgánicas grandes en compuestos que no tienen más de cuatro átomos de carbono, permite optimizar la conversión de componentes orgánicos en CO, controlar la temperatura dentro del reactor para que esté en el rango de 800 °C a 1000 °C y, además, contribuye a que el nitrógeno, un elemento que dificulta la síntesis de CH<sub>3</sub>OH y que no se separa fácilmente del CO, quede sustancialmente excluido del sistema.

La oxidación parcial con oxígeno puro genera un syngas libre (o casi libre) de nitrógeno atmosférico, con altas concentraciones de hidrógeno y CO y con un poder calorífico superior, que oscila entre 10 MJ / Nm<sup>3</sup> y 15 MJ / Nm<sup>3</sup>, lo cual es adecuado para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH posterior. Este proceso requiere una inversión adicional y mayores costos operativos debido a que se necesita producir el oxígeno en una unidad de separación de aire (ASU), algo justificado solo para unidades a gran escala (más de 100 kt / año). Además, se produce bajo contenido de alquitrán, así como ceniza vítrea, que permite opciones de eliminación más fáciles.

### ***Oxidación con vapor***

La gasificación con vapor genera un syngas con alta concentración de hidrógeno, con poder calorífico medio de 15-20 MJ / Nm<sup>3</sup> y libre de nitrógeno. En este caso, el proceso no incluye reacciones exotérmicas, por lo que se necesita una fuente externa de energía para las reacciones de gasificación endotérmicas. También se puede introducir vapor en el reactor junto con otros agente oxidantes como un absorbente de calor para reducir la temperatura, en caso de ser necesario, asegurar una mayor conversión del carbono y fomentar la producción de alquitranes que son fáciles de reformar catalíticamente (*Milne y Evans, 1998*).

### ***Oxidación por plasma***

En caso de gasificación por plasma, la fuente de calor del gasificador es una o más antorchas de arco de plasma. Se produce un gas de plasma con una alta temperatura, hasta 15000 °C, que permite el control térmico independientemente de las fluctuaciones en la calidad de la alimentación y del suministro de un agente de gasificación. Este tipo de gasificador puede aceptar materias primas con un tamaño de partícula variable, incluso aquellas que contengan grumos gruesos y polvos finos, y solo se requiere una preparación mínima a la alimentación (*Gomez et al., 2009*).

### ***Oxidación con una mezcla de oxígeno y CO<sub>2</sub>***

Se ha estimado que las emisiones de CO<sub>2</sub> deberían reducirse al menos un 50% para 2050 (*IPCC*). Una forma de lograr esto es mediante las tecnologías de captura, almacenamiento y uso del carbono (CCUS), donde este es separado y utilizado para obtener productos valiosos. El informe del IPCC indicó que sin la implementación de CCUS, el costo total requerido para mitigar el cambio climático global puede aumentar hasta un 138%<sup>25</sup>. Por lo tanto, puesto que el CO<sub>2</sub> es un producto de la gasificación, sería beneficioso desde el punto de vista medioambiental implementar esta metodología y utilizarlo en el proceso en lugar de descargarlo. Puede mezclarse con oxígeno, que presenta diversas ventajas como medio oxidante, ya que por sí solo necesita más avances en términos de integración de procesos<sup>26</sup>. El CO<sub>2</sub> cumple con tres funciones:

- Proporciona el flujo de gas necesario para transportar el calor de la combustión a través del lecho de desechos.
- Ayuda a controlar la temperatura en el reactor, disminuyéndola.
- El CO<sub>2</sub> se convierte en CO al reaccionar con el carbono, que luego será utilizado en la síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

Para este proceso puede emplearse una mezcla de, al menos, 95% en volumen de oxígeno puro diluido con CO<sub>2</sub>, preferiblemente en una relación de oxígeno a CO<sub>2</sub> de 50:50 en volumen, pero sería aceptable dentro del rango de 40:60 a 60:40. Deseablemente, la cantidad de oxígeno puro requerida es del 5% al 15% en peso de la carga de residuos sólidos, preferiblemente del 8% al 12% en peso, dependiendo de la composición de la carga y de la temperatura de reacción<sup>27</sup>. El oxígeno con un 95% de pureza requerido puede obtenerse mediante técnicas conocidas.

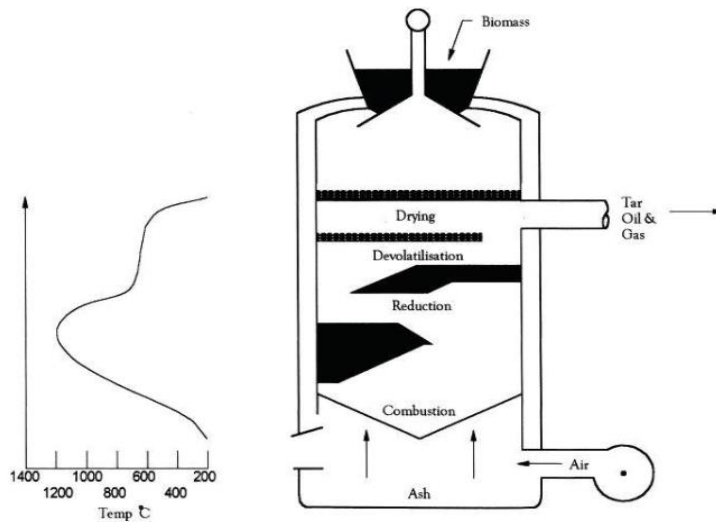
### **5.1.3 Diseño de reactores de gasificación**

Como se observa en la Tabla 5, los gasificadores pueden clasificarse según la forma de contacto entre el agente gasificante y la alimentación. La literatura muestra que los tres tipos principales son: gasificadores de lecho fijo, gasificadores de lecho fluidizado y gasificadores de flujo de arrastre<sup>28</sup>. También se utilizan los gasificadores de horno rotativo, de parrilla móvil y de plasma.

#### ***Gasificador de lecho fijo***

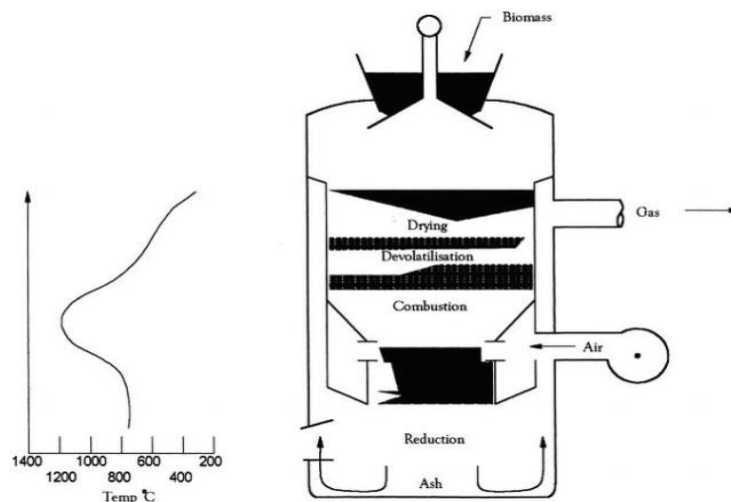
Los gasificadores de lecho fijo son el método tradicional aplicado para la gasificación de biomasa y generalmente operan a una temperatura alrededor de 1000 °C. En ellos, la biomasa alimentada fluye a través de un lecho fijo de partículas de combustible con un caudal muy lento. En general, se produce un gas de alto poder calorífico y elevado contenido de alquitran. Los gasificadores de lecho fijo pueden clasificarse según sean de corriente ascendente o de corriente descendente, debido a la diferente dirección del flujo de agente gasificante.

En un gasificador de corriente ascendente, la biomasa se alimenta desde la parte superior del reactor y se mueve corriente abajo, mientras que el agente de gasificación ingresa desde la parte inferior, de modo que la biomasa se mueve a contracorriente respecto de los gases, pasando por diferentes zonas (secado, pirólisis, reducción y oxidación) sucesivamente, logrando una combustión completa y elevando la temperatura hasta alrededor de 1000 °C, produciéndose H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. El gas generado se expulsa por la parte superior, filtrándose a través del lecho de carbón sin reaccionar para producir H<sub>2</sub> y CO, secando la biomasa entrante y produciendo pirólisis en la biomasa descendente. En este sistema, el gas producto está contaminado con una cantidad significativa de alquitrán, por lo que, si se pretende utilizar para aplicaciones posteriores, se requiere realizar una limpieza.



**Figura 6. Gasificador de lecho fijo. Corriente ascendente**  
 Fuente: <sup>28</sup>

En el gasificador de corriente descendente, tanto la biomasa como el agente de gasificación entran en el reactor desde la parte superior y se mueven en la misma dirección. Es posible distinguir las mismas zonas que en los gasificadores de corriente ascendente, pero en un orden diferente. La temperatura puede elevarse entre 1200 °C y 1400 °C, lo que conduce tanto a la combustión como a la pirólisis del combustible. Algunos de los desechos se queman y forman un lecho de carbón caliente por el que pasan los gases producidos, reduciéndose a H<sub>2</sub> y CO y abandonando la unidad de gasificación a temperaturas de entre 900 °C y 1000 °C, aproximadamente, por la parte inferior del reactor. El contenido de alquitrán en el syngas producido es menor que en el caso anterior, pero el contenido de partículas es mayor.



**Figura 7. Gasificador de lecho fijo. Corriente descendente**  
 Fuente: <sup>28</sup>

### ***Gasificador de lecho fluidizado***

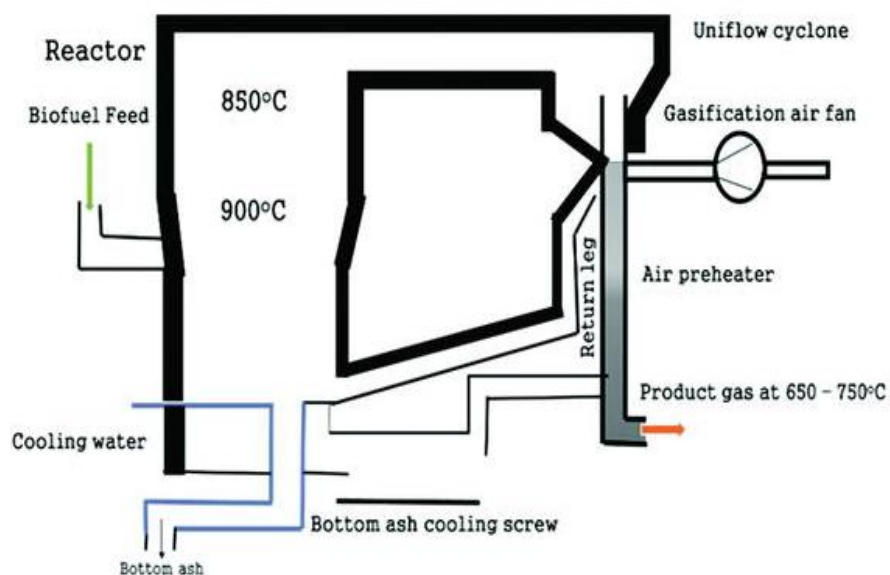
En el gasificador de lecho fluidizado, el agente de gasificación entra por el fondo del reactor, atraviesa el lecho de pequeñas partículas fluidizadas a una velocidad relativamente rápida y abandona el reactor por la parte superior. Por otro lado, la alimentación de biomasa es gasificada en el lecho por la acción del medio gasificante. Debido a la intensa mezcla gas-sólido que se realiza, las zonas de secado, pirólisis, oxidación y reducción no se distinguen.

Este tipo de gasificador presenta una distribución uniforme de temperatura en la zona del lecho, mayor rendimiento y conversión del carbono, contenido energético del gas producido superior, así como mejor transferencia de calor y materia respecto a los de lecho fijo. Actualmente, destacan tres tipos principales de gasificadores fluidizados: de lecho fluidizado burbujeante (BFB), de lecho fluidizado circulante (CFB) y de lecho fluidizado dual (DFB).

En el gasificador BFB, la entrada de alimentación se realiza desde la parte inferior del reactor, se opera a velocidades de entre 1 m/s y 1,5 m/s y la temperatura del lecho se mantiene entre 700 °C y 900 °C manipulando la relación entre biomasa alimentada y agente de gasificación. Por otro lado, el flujo gaseoso de agente de gasificación impregna el lecho de material inerte ubicado en el fondo del gasificador, típicamente arena de sílice u olivino, donde se encuentran los residuos a tratar (*Arena y Mastellone, 2005*), y su velocidad se establece para que sea superior a la velocidad mínima de fluidización del material del lecho, normalmente 1 m/s mayor, lo que hace que las fuerzas de arrastre sobre las partículas sean iguales al peso de las partículas en el lecho, provocando un comportamiento similar al de un fluido, así como produciendo una mezcla intensa gas-sólido que permite transferencias muy altas de calor y masa (*Kunii y Levenspiel, 1991*). La biomasa se descompone en carbón y syngas con un bajo porcentaje de alquitrán. Este reactor no tiene partes móviles, por lo que el mantenimiento es sencillo y relativamente económico.

Por otro lado, el gasificador CFB opera a altas velocidades, ente 4 m/s y 7 m/s, y a temperaturas de entre 800 °C y 1000 °C. Los desechos se alimentan por un lateral del reactor, se calientan rápidamente y se desvolatilizan, para luego reaccionar con el agente gasificante. En este caso, la velocidad superficial del gas es significativamente mayor que la velocidad terminal de los sólidos, típicamente más de 3 m/s superior, lo que provoca que el gas arrastre grandes cantidades de partículas del lecho, material inerte del lecho y residuos carbonizados, por lo que estas tienen que ser separadas del producto gaseoso mediante un separador ciclónico y luego ser devueltas al lecho. Por tanto, este sistema consta de dos unidades principales: la unidad de gasificación y la unidad de circulación y el régimen se define, no solo por la velocidad superficial del gas, sino también por el flujo de masa sólida que es recirculado.

Finalmente, el gasificador de lecho fluidizado dual (DFB) se compone de dos gasificadores de lecho fluidizado separados que se utilizan para los procesos de pirólisis y combustión, respectivamente. Entonces, el primer lecho, perteneciente al reactor de pirólisis, es calentado por el segundo reactor, mientras que el segundo reactor proporciona calor quemando el carbón procedente del primer reactor. Por lo tanto, el material que conforma el lecho juega un papel importante como medio de transferencia de calor, lo que evita la dilución del producto gaseoso.



**Figura 8. Gasificador de lecho fluidizado. CFB**

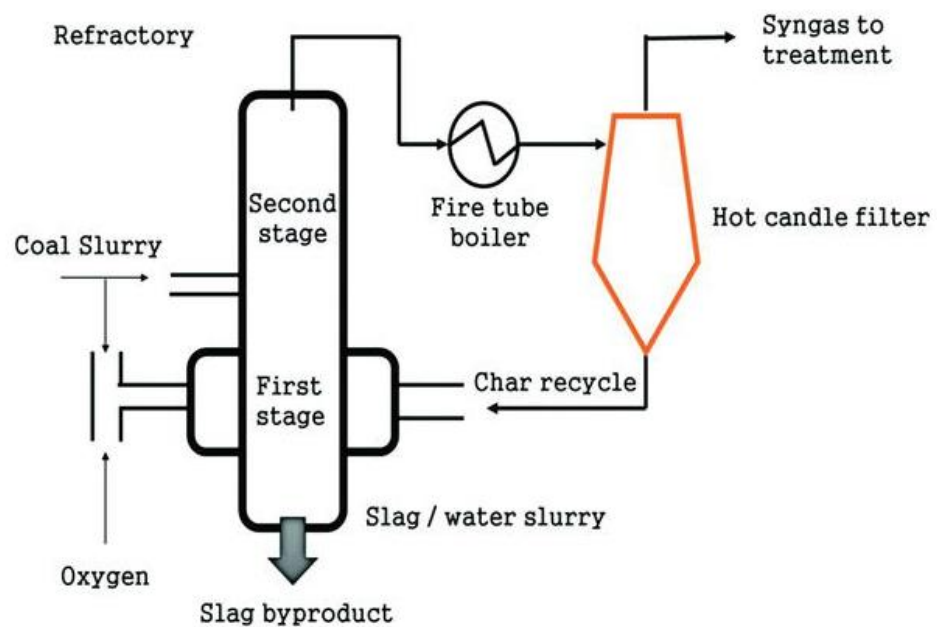
Fuente: <sup>28</sup>

**Gasificador de flujo de arrastre**

En un gasificador de flujo de arrastre se utiliza vapor de agua como medio de transporte y de control de temperatura, así como de reactivo, ya que promueve la formación de hidrógeno. Al vapor de agua se le añaden partículas finas de combustible, menores de 1 mm para producir la suspensión.

Estos gasificadores se clasifican según la forma en la que el vapor combustible y el agente gasificante entran: de forma superior o lateral, mientras que la alimentación es pulverizada, entrando conjuntamente a estos.

En el proceso, la temperatura de gasificación es superior respecto a la de los dos tipos anteriores, pudiendo alcanzar los 1400 °C, con un rango de presión alto de entre 20 bar y 70 bar, lo que puede acelerar el agrietamiento del alquitrán para así mitigar el problema que este supone. Sin embargo, este tipo de gasificación requiere una alimentación muy fina (< 0,4 mm), siendo comúnmente empleado para tratar residuos de refinería. Se produce un syngas con cantidades despreciables de CH<sub>4</sub> y, como se ha mencionado, poca formación de alquitranes e hidrocarburos pesados.



**Figura 9. Gasificador de flujo de arrastre**

Fuente: <sup>28</sup>



Estos tres tipos de gasificador explicados previamente se resumen en la Tabla 5.

**Tabla 5. Tipos de gasificadores según la forma de contacto entre el agente gasificante y la alimentación**

Tipo de gasificador	Descripción y características de operación
<b>Gasificador de flujo de arrastre</b>	<p>La alimentación es pulverizada en la corriente entrante, superior o lateral, de combustible y agente gasificante.</p> <p>Opera a mayor temperatura que los demás gasificadores, llegando a 1400 °C</p>
<b>Gasificador de lecho fluidizado</b>	<p>La alimentación está en contacto íntimo con el medio oxidante en un lecho de partículas fluidizadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lecho fluidizado circulante: Opera a 800 -1000 °C</li> <li>▪ Lecho fluidizado burbujeante: Opera a 700 - 900 °C</li> </ul>
<b>Gasificador de lecho fijo</b>	<p>La alimentación fluye a través de un lecho fijo de partículas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flujo ascendente: La alimentación entra por la parte superior del reactor y se mueve hacia abajo, mientras que el agente gasificante ingresa desde la parte inferior y fluye a través del lecho. Opera a temperaturas alrededor de 1000 °C</li> <li>▪ Flujo descendente: La alimentación y el agente gasificante entran desde la parte superior y se mueven en igual dirección. Opera a 1200 - 1400 °C</li> </ul>

Los otros tipos de gasificadores utilizados son los gasificadores de horno rotativo, de parrilla móvil y de plasma.

#### ***Gasificador de horno rotativo***

Este sistema logra dos objetivos simultáneamente: mover los sólidos dentro y fuera de una zona de reacción de alta temperatura, así como mezclarlos durante la reacción, donde el movimiento está controlado por la velocidad de rotación (aproximadamente 1,5 rpm). Los desechos se gasifican con aire a alta temperatura por lo que no se necesita combustible externo adicional.

### ***Gasificador de parrilla móvil***

Cuenta con una rejilla que alimenta de forma constante el horno incinerador con los residuos, y, además, realiza el movimiento del lecho para mejorar el proceso. La conversión térmica se lleva a cabo en dos etapas: la gasificación de los desechos en la cámara primaria y la oxidación a altas temperaturas en la cámara secundaria del syngas producido en la cámara primaria. La oxidación se ve facilitada por múltiples inyecciones de aire y gases de combustión reciclados (*Grimshaw y Lago, 2010*).

### ***Gasificadores de plasma***

Los desechos se depositan en el gasificador, que a menudo se trata de un gasificador de lecho móvil, y entran en contacto con un plasma generado eléctricamente, generalmente a presión atmosférica y temperaturas entre 1500 °C y 5000 °C. En el proceso, la materia orgánica se convierte en un syngas de alta calidad y la materia inorgánica en escoria inerte vitrificada.

Estos gasificadores utilizan antorchas de plasma ubicadas en la parte inferior del reactor, como por ejemplo en las unidades WtE propuestas por Hitachi Metals Env. Syst. Co. y Alter NG (*Williams et al., 2003, Willis et al., 2010*). Estas instalaciones requieren una gran cantidad de electricidad para operar la antorcha de plasma, generalmente se indica que es necesario un consumo eléctrico de alrededor de 1200-2500 MJ / t de residuos, que es del orden de entre 15 % y 20 % de la potencia bruta de la planta (*Williams et al., 2003, Lombardi et al., 2012, Hetland et al., 2011*).

También existe una tecnología de gasificación de plasma en dos etapas, donde la primera etapa utiliza un gasificador convencional, mientras que en la segunda etapa se emplea el gasificador de plasma para reducir el contenido de alquitrán en el syngas y aumentar la eficiencia de conversión.

Considerando los requerimientos para el syngas, así como las cuestiones de eficiencia, complejidad y costos del proceso, se llega a la conclusión de que para la obtención de syngas a gran escala, una de las tecnologías que da mejores resultados son los gasificadores de lecho fluidizado calentados de manera directa o indirecta<sup>29</sup>.

Típicamente, estos reactores incluyen un lecho cuya base puede contener materiales inertes, el cual se mezcla con los desechos mediante un flujo que promueve la agitación y la reacción turbulenta entre los compuestos sólidos y gaseosos. Estos reactores presentan una serie de ventajas, como asegurar unas condiciones de proceso uniformes debido a su alta capacidad de mezcla, la posibilidad de utilizar diversos agentes de oxidación y, además, la alimentación de residuos puede entrar por diferentes posiciones al reactor. Como desventaja, el proceso genera contaminantes como alquitrán, partículas carbonosas y materiales inorgánicos, lo que conduce a un aumento en los costos operativos y una pérdida de eficiencia. Sin embargo, el lecho puede incorporar catalizadores como dolomita<sup>3</sup>, olivino<sup>4</sup> y alúmina<sup>5</sup>, que mejoran la eficiencia de la gasificación y minimizan la generación de estos subproductos indeseables.

## **5.2 Etapas del proceso de gasificación**

La gasificación de residuos sólidos incluye una secuencia de reacciones sucesivas, endotérmicas y exotérmicas (*Knoef, 2005; de Souza-Santos, 2004*), descritas esquemáticamente en la Tabla 6<sup>24</sup>. Los pasos que ocurren dentro del reactor se pueden dividir en tres etapas principales que pueden suceder de manera paralela en diferentes zonas del gasificador y a una determinada temperatura. Estas etapas son:

### **5.2.1 Etapa 1. Calentamiento y secado**

Ocurre a temperaturas de hasta aproximadamente 160 °C. Los residuos alimentados se calientan, por lo que la humedad se elimina mediante evaporación. En esta etapa no se produce reacción química.

---

<sup>3</sup> Dolomita [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]: Mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio.

<sup>4</sup> Olivino [A<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>]: Minerales constituyentes de rocas, donde A puede ser hierro, magnesio, manganeso o níquel entre otros.

<sup>5</sup> Alúmina [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]: Óxido de aluminio, material cerámico.

### **5.2.2 Etapa 2. Desvolatilización (o pirólisis o descomposición térmica)**

Ocurre a temperaturas entre 160 °C y 700 °C y la etapa comienza aproximadamente a 350 °C, acelerándose al acercarse a los 700 °C. El proceso de desvolatilización es una descomposición, donde el vapor de agua, los líquidos orgánicos y los gases no condensables se separan del carbón sólido que está presente en el combustible, por lo que involucra reacciones de craqueo térmico y transferencia de calor y masa. Los productos formados se agrupan como:

- Gases ligeros: H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y NH<sub>3</sub>.
- Alquitrán, que es un líquido viscoso y corrosivo compuesto por hidrocarburos pesados y moléculas inorgánicas.
- Carbono en forma de sólidos residuales (*char*).

La composición, cantidad y características de las especies químicas liberadas en este proceso, no necesariamente en una sola etapa, dependen de varios factores, principalmente de la composición original y la estructura de los desechos (*Kawaguchi et al. 2002*), así como de la temperatura, presión y tasa de calentamiento impuesta por el tipo de reactor (*de Souza-Santos, 2004*). Se debe destacar que la desvolatilización libera diversos componentes y el hidrógeno es requerido para los enlaces moleculares en varios de ellos, entonces, la desvolatilización agota el hidrógeno de la matriz carbonosa original de los desechos.

### **5.2.3 Etapa 3. Reacciones químicas:**

Debido a la diversa composición de los RSU, el mecanismo de reacción del proceso de gasificación es muy complejo e incluye diversas reacciones en serie y en paralelo. En el proceso, ocurren dos tipos de reacciones principales, las reacciones de oxidación y las reacciones de gasificación. Además, también se produce la descomposición de alquitranes. Estas reacciones ocurren en un ambiente reductor, es decir, bajo una presencia de oxígeno notablemente más baja, del 25 % al 50 %, respecto a la requerida para la oxidación estequiométrica.

- a) Reacciones de oxidación** (700-1500 °C): los componentes del combustible reaccionan exotérmicamente con el oxígeno suministrado. En el proceso se forman CO<sub>2</sub> y agua, que posteriormente se reducen en la zona de gasificación.
- b) Reacciones de gasificación** (800-1100 °C): la gasificación implica una serie de reacciones endotérmicas impulsadas por el calor producido en las reacciones de oxidación. En ellas, el residuo carbonoso reacciona con diferentes compuestos, como vapor de agua, CO<sub>2</sub> e hidrógeno, obteniéndose CO, CH<sub>4</sub> e hidrógeno.

Además, dependiendo del tipo de gasificador, habrá diferencias en esta etapa:

- En un proceso de gasificación autotérmica, la oxidación parcial de gas combustible, vapores y residuo carbonoso, con una cantidad controlada de aire, oxígeno o aire enriquecido con oxígeno, proporciona el calor necesario para que se produzca el craqueo térmico de alquitranes e hidrocarburos y para la gasificación del residuo carbonoso por vapor o CO<sub>2</sub>, así como para mantener fija la temperatura de operación del gasificador.
- Por el contrario, en un proceso de gasificación alotérmica, el calor requerido por el proceso endotérmico proviene de fuentes externas. Las reacciones de gasificación específicas son las que tienen lugar entre los residuos carbonosos y los gases, excluyendo el oxígeno.

En la Tabla 6 se muestran las reacciones principales del proceso de gasificación, donde todas estas, a excepción de las de oxidación, son reacciones de equilibrio.

**Tabla 6. Reacciones principales en la gasificación de residuos**
*Fuente: <sup>24</sup>*
**Reacciones de oxidación**

1	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	-111 MJ/kmol	Oxidación parcial de carbono
2	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	-283 MJ/kmol	Oxidación de CO
3	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394 MJ / kmol	Oxidación de carbono
4	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	-242 MJ / kmol	Oxidación de hidrógeno
5	$C_n H_m + \frac{n}{2} O_2 \leftrightarrow n CO + \frac{m}{2} H_2$	Exotérmica	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> oxidación parcial

**Reacciones de gasificación que involucran vapor.**

6	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	+131 MJ / kmol	Reacción water-gas
7	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41 MJ / kmol	Reacción water-gas shift
8	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$	+206 MJ / kmol	Reformado de CH <sub>4</sub> con vapor
9	$C_n H_m + n H_2O \leftrightarrow n CO + (n + \frac{m}{2}) H_2$	Endotérmica	Reformado con vapor

**Reacciones de gasificación que involucran hidrógeno.**

10	$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75 MJ / kmol	Hidrogasificación
11	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-227 MJ / kmol	Metanización

**Reacciones de gasificación que involucran CO<sub>2</sub>.**

12	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$	+172 MJ / kmol	Reacción de Boudouard
13	$C_n H_m + n CO_2 \leftrightarrow 2 n CO + \frac{m}{2} H_2$	Endotérmica	Reformado en seco

**Reacciones de descomposición de alquitranes e hidrocarburos**

14	$P C_x H_y \rightarrow q C_n H_m + r H_2$	Endotérmica	Deshidrogenación
15	$C_n H_m \rightarrow n C + \frac{m}{2} H_2$	Endotérmica	Carbonización

C<sub>x</sub> H<sub>y</sub>: Alquitranes y fragmentos de combustible más pesados producidos por craqueo térmico.

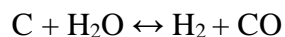
C<sub>n</sub> H<sub>m</sub>: Hidrocarburos con un número menor de átomos de carbono y/o un mayor grado de insaturación que C<sub>x</sub> H<sub>y</sub>.

La tabla anterior representa un marco simplificado, ya que otros componentes como H, N, O, S, etc. podrían estar involucrados como reactivos y productos (*de Souza-Santos, 2004*). Es evidente que la mayoría de las especies en las reacciones de gasificación se encuentran en sus formas reducidas o menos oxidadas, como el CO en lugar del CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> en lugar de H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S en lugar de SO<sub>2</sub>, así como NH<sub>3</sub> o HCN en lugar de NO u otros óxidos. Además, la ausencia de una atmósfera oxidante elimina uno de los pasos del mecanismo de síntesis de dioxinas y reduce fuertemente su formación (*Stieglitz y Vogg, 1987, McKay, 2002, Vehlow, 2005*).

A pesar de que existe un gran número de reacciones en el proceso de gasificación, es posible individualizar tres reacciones de gasificación independientes: la reacción water-gas, la reacción de Boudouard y la de hidrogasificación. En las secciones del gasificador donde solo hay carbono sólido, estas se reducen a solo dos: reacción de water-gas shift, que es la combinación de las reacciones water-gas y de Boudouard, y la metanización, que es la combinación de las reacciones water-gas y la hidrogasificación.

- **Reacción water-gas:** Es la oxidación parcial del carbón por el vapor proveniente de fuentes como la evaporación de la humedad del sólido combustible, la descomposición de la alimentación o el vapor suministrado al gasificador junto con el aire o el oxígeno. El vapor reacciona con el carbono de acuerdo con la siguiente reacción heterogénea:

#### **Ecuación 1. Reacción water-gas**



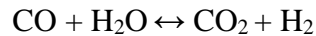
- **Reacción de Boudouard:** El gas presente en el gasificador puede reaccionar con el carbono para producir CO según la reacción endotérmica:

#### **Ecuación 2. Reacción de Boudouard**



- **Reacción water-gas shift:** Se reduce del vapor por el CO, lo cual es altamente deseable ya que se produce hidrógeno mediante la reacción endotérmica expresada a continuación:

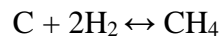
### **Ecuación 3. Reacción water-gas shift**



Esta reacción incrementa la relación H<sub>2</sub>/CO en el gas producto.

- **Hidrogasificación:** Se forma CH<sub>4</sub> en el gasificador a través de la siguiente reacción general:

### **Ecuación 4. Hidrogasificación**



Dicha reacción se puede acelerar utilizando catalizadores basados en níquel a temperaturas alrededor de 1100 °C y presiones comprendidas entre 6 bar y 8 bar.

En la práctica, la composición final está determinada por las velocidades de reacción y la presencia de sustancias catalíticas (particularmente importante para las reacciones de descomposición del alquitrán) más que por el equilibrio químico (*Heermann et al., 2001, C-Tech, 2003, Arena et al., 2010*). En general, se observan las siguientes tendencias en el proceso (*C-Tech, 2003*):

- A bajas temperaturas, es decir, alrededor de 600 °C, el carbono y el oxígeno se encuentran como CO<sub>2</sub>.
- A altas temperaturas, si hay un exceso de carbono, el CO<sub>2</sub> se degrada para formar CO. El oxígeno prefiere reaccionar con el carbono, para formar CO y CO<sub>2</sub>, en lugar de con el hidrógeno, para formar H<sub>2</sub>O, por lo que el contenido de hidrógeno aumenta a temperaturas más altas.
- El CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos tienden a descomponerse a temperaturas superiores a 600 °C. Esto también puede implicar una disminución notable del contenido de alquitrán, pero solo para temperaturas superiores a 1000 °C.



- Respecto al punto anterior, de todos modos, no existe un gasificador sin alquitrán y en la mayoría de los casos se requiere la eliminación y/o conversión de este (*Devi et al., 2003, Arena et al., 2010*).
- El residuo carbonoso o *char* está presente incluso a altas temperaturas y, en parte, se descarga como carbón no convertido en la ceniza rechazada.

### **5.3 Parámetros de operación del proceso de gasificación**

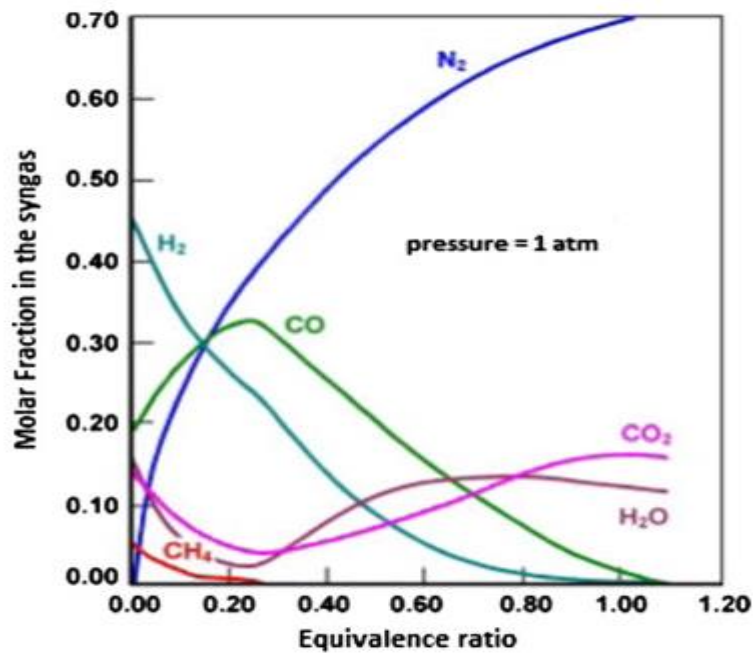
Existen parámetros de operación que siempre son clave en el proceso de gasificación de residuos, sea cual sea la tecnología específica del reactor que se utilice<sup>24</sup>. Estos son:

#### **5.3.1 Relación de equivalencia**

Es la relación entre el contenido de oxígeno en el medio oxidante y el requerido para una combustión estequiométrica completa. Posiblemente sea el parámetro más importante en este tipo de unidades, ya que afecta considerablemente a la composición del syngas producto y al contenido de alquitrán.

Los valores cercanos a cero corresponden a condiciones de pirólisis, mientras que los valores iguales o superiores a uno indican condiciones de combustión. Los valores más bajos pueden provocar que quede carbón sin convertir y mayor contenido de alquitrán, mientras que los valores más altos hacen que se oxide parte del syngas, reduciendo su poder calorífico (*Devi et al., 2003, Li et al., 2004, Arena et al., 2010*).

Como se muestra en la siguiente figura, los valores entre 0,25 y 0,35 parecen maximizar la conversión de carbón, por lo que son los que se utilizan típicamente en las plantas comerciales a gran escala, aunque es posible operar con valores tan altos como 0,5 en gasificadores de parrilla móvil (*Grimshaw y Lago, 2010*) y en gasificadores de lecho fluidizado con combustibles húmedos (*Hankalin et al., 2011*).



**Figura 10. Composición del syngas en función de la relación de equivalencia**

Fuente: Kaupp y Goss, 1981

### **5.3.2 Temperatura del reactor**

El perfil de temperatura a lo largo de las diferentes secciones del reactor es un parámetro clave para lograr el rendimiento adecuado<sup>30</sup> en ambos tipos de reactores, en los gasificadores alotérmicos o calentados indirectamente, donde el suministro externo de calor proporcionado al gasificador se puede ajustar adecuadamente, y en los gasificadores autotérmicos o calentados directamente, donde el perfil de temperatura del reactor es un estado variable del proceso.

La temperatura requerida para producir el syngas con la composición deseada puede mantenerse variando las cantidades de agentes de gasificación. En general, la temperatura aumenta con la cantidad de oxígeno introducido en el reactor, mientras que la introducción de otros componentes, como el vapor y el CO<sub>2</sub>, ejercen un efecto de disminución.

Se sabe que las altas temperaturas de reacción, por ejemplo, entre 1200 °C y 1300 °C, favorecen un mayor rendimiento de hidrógeno a expensas del CO, mientras que el CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos tienden a descomponerse a temperaturas por encima de 600 °C. Sin embargo, si se desea que la conversión a CH<sub>3</sub>OH sea altamente eficiente, es preferible trabajar dentro del reactor a una temperatura en el rango de 900 °C a 1000 °C para fomentar un alto rendimiento de CO, ya que así se evitan las pérdidas de carbono que se producirían al operar entre 1200 °C y 1300 °C. Para estas temperaturas, la demanda de hidrógeno debe satisfacerse de otras formas, como, por ejemplo, utilizando un sistema de reposición de hidrógeno como se describirá más adelante. Además, el operar a temperaturas inferiores evita la formación de óxido de nitrógeno (NO), por lo que facilita el cumplimiento de normativas en cuanto a las restricciones de NO<sub>x</sub> descargados a la atmósfera.

Además, el perfil de temperatura determina el estado de las cenizas de fondo, es decir, la posibilidad de obtener desechos vitrificados, y, en cierta medida, el contenido de alquitrán en el syngas<sup>24</sup>, ya que este disminuye a temperaturas por encima de 1000 °C. Existe una pequeña cantidad de carbón incluso a temperaturas tan altas como 1600 °C, que será descargada en los residuos.

### **5.3.3 Tiempo de residencia**

La composición del syngas depende directamente del tiempo de residencia. Este parámetro queda definido en gran medida por el diseño del reactor y se puede variar de forma limitada: para un gasificador de lecho fluidizado, variando la velocidad superficial del gas y, en un gasificador de parrilla móvil, aumentando la velocidad de los elementos de la parrilla (*Arena U., 2005, Grimshaw y Lago, 2010, Suzuki y Nagayama, 2011*).

### **5.3.4 Composición y propiedades físicas de los residuos**

El rendimiento del proceso de gasificación para la conversión de RSU en productos valiosos o energía se ve necesariamente afectado por las propiedades específicas de los residuos. Las propiedades más importantes para la gasificación son (*Zevehoven-Onderwater et al., 2001, Heermann et al., 2001, C-Tech, 2003*):

- Composición elemental.
- Densidad aparente y tamaño.
- Poder calorífico inferior (LHV).
- Contenido y composición de cenizas.
- Contenido de humedad.
- Contenido de materia volátil.
- Contenido de otros contaminantes; N, S, Cl, álcalis, metales pesados, etc.

Algunas de estas propiedades son tan importantes que en muchos casos se utiliza RdF en lugar de residuos sólidos. Por esta razón, a los residuos se les realiza un pretratamiento orientado principalmente a reducir el tamaño y la heterogeneidad de estos, así como su contenido de cenizas y humedad.

### **5.3.5 Composición y temperatura de entrada del agente gasificante**

Estos parámetros afectan a los balances de masa y energía del reactor. Además, la temperatura de entrada del agente gasificante se relaciona, tanto con el perfil de temperatura que debe establecerse a lo largo del gasificador, como con la posibilidad y/o la necesidad de recuperar el calor del syngas caliente (*Arena et al., 2011*).

### **5.4 Parámetros de rendimiento del proceso de gasificación**

En el proceso de combustión, un solo parámetro proporciona una indicación sustancialmente exhaustiva de la calidad del tratamiento, o eficiencia del proceso, definida como la cantidad de calor disponible en los desechos que es liberada y utilizada. Sin embargo, para el proceso de gasificación, se utilizan diferentes parámetros de rendimiento, de los cuales destacan<sup>24</sup>:

#### ***Eficiencia de gas frío o cold gas efficiency (CGE)***

Definida como la relación entre la energía química del syngas producido, o producto del caudal de syngas y su poder calorífico neto, y la energía química de los residuos alimentados, o producto del caudal de residuos y su valor calorífico neto, es decir:

### **Ecuación 5. CGE**

$$CGE = \frac{Q_{syngas} LHV_{syngas}}{Q_{residuos} LHV_{residuos}}$$

Se denomina eficiencia en frío ya que no tiene en cuenta el calor sensible del gas.

### ***Eficiencia del gas caliente o hot gas efficiency (HGE)***

Es la relación entre la suma de la energía química y el calor sensible del syngas producido y la suma de la energía química y el calor sensible de los residuos alimentados a la unidad, es decir:

### **Ecuación 6. HGE**

$$HGE = \frac{H_{syngas} + Q_{syngas} LHV_{syngas}}{H_{residuos} + Q_{residuos} LHV_{residuos}}$$

### ***Eficiencia de conversión de carbono o carbon conversion efficiency (CCE)***

Se define como la relación entre el caudal de carbono convertido en productos gaseosos y el que se alimenta al reactor junto con los desechos sólidos, es decir:

### **Ecuación 7. CGE**

$$CGE = \frac{Q_{syngas} C_{carbono\_syngas}}{Q_{residuos} C_{carbono\_residuos}}$$

Donde:

- $C_{carbono\_residuos}$  es la fracción de carbono en los desechos.
- $C_{carbono\_syngas}$  es la fracción de carbono en el componente gaseoso del syngas, es decir, excluyendo el polvo y el alquitrán.

Este parámetro además de proporcionar la medida de la eficiencia química del proceso da una estimación de la cantidad de material no convertido que debe tratarse con otra técnica o eliminarse.

### **Contenido de alquitrán en el syngas**

Además de, cuando sea posible, composición de alquitrán. Este parámetro es muy importante ya que los alquitranes, que son una mezcla compleja de hidrocarburos condensables, causan problemas en los equipos y dispositivos del proceso (*Milne et al., 1998*). La presencia de estos compuestos aumenta la aparición de escoria en las calderas y en otras superficies, puede estropear catalizadores, sistemas de eliminación de azufre y filtros cerámicos y también puede causar bloqueos y corrosión. Todo esto conlleva a una reducción en la eficiencia general del proceso.

### **Otros parámetros**

Como el poder calorífico del syngas (kJ / Nm<sup>3</sup>), el caudal de syngas específico (Nm<sup>3</sup>/ kg de residuos ), la producción de energía específica, es decir, la energía química del syngas por unidad de masa de residuos sólidos alimentados a el gasificador (kJ / kg de residuos).

Los parámetros descritos anteriormente no necesariamente aportan una evaluación exhaustiva de la calidad del syngas obtenido, ya que esto depende del fin para el cual este vaya a ser destinado. Por ejemplo, un syngas con un CGE elevado puede ser adecuado para una unidad WtE, pero no tanto para su conversión a combustibles.

En la siguiente tabla se muestra el rango de variaciones de los principales parámetros del proceso de gasificación de RSU utilizando aire o aire enriquecido con oxígeno como medio gasificante (*Knoef, 2005, Grimshaw y Lago, 2010, Tanigaki et al., 2011, Suzuki y Nagayama, 2011, Hankalin et al., 2011*).

**Tabla 7. Parámetros de operación y rendimiento del proceso de gasificación de RSU**

Fuente: <sup>24</sup>

<b>Parámetros de operación</b>	
Razón de equivalencia	0,25 – 0,35 <sup>a</sup>
Residuos de bajo poder calorífico, MJ / kg de residuos	7 - 18

<b>Parámetros de rendimiento del proceso</b>	
Eficiencia de conversión de carbono, %	90 – 99
Eficiencia de gas frío, %	50 – 80
Valor calorífico bajo del syngas, MJ / Nm <sup>3</sup>	4 -7 <sup>b</sup>
Eficiencia eléctrica neta, %	15 - 24
Energía neta específica, kWh / t de residuos	400 –700

a: Este valor suele ser igual a 0,50 en gasificadores de parrilla móvil

b: Este valor puede aumentar a 10 MJ / Nm<sup>3</sup> empleando oxígeno como agente gasificante.

## **5.5 Técnicas de obtención de oxígeno**

Previamente se había mencionado que el oxígeno como agente de gasificación es una buena opción ya que se obtiene un syngas adecuado para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH posterior. Sin embargo, el oxígeno debe producirse previamente mediante algún método para ser utilizado en el proceso. A continuación, se explican diferentes tecnologías de separación de aire.

Puesto que los gases presentes en el aire, nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (<7%), ozono, CO<sub>2</sub>, hidrógeno, neón y argón (1%), presentan diferentes características y propiedades físicas y/o químicas, es posible separar los mismos cuando están presentes en forma de mezcla, por lo que se puede lograr obtener cualquiera de ellos mediante diferentes procesos, donde se diferencian principalmente la separación a bajas temperaturas (criogénica), la separación por membrana y la separación por adsorción. El método utilizado depende del gas y la cantidad que se desea obtener, del costo de inversión y de la producción que se está dispuesto a destinar.

### **5.5.1 Separación criogénica**

La separación criogénica de aire es un proceso por el cual es posible obtener grandes cantidades de gases o líquidos de alta pureza. Esta tecnología se basa en el hecho de que los diferentes constituyentes del aire tienen diferentes puntos de ebullición, entonces, manipulando la presión y la temperatura es posible separar el aire en sus componentes.

Para la separación criogénica de aire se requieren varios procesos, como la compresión del aire y su purificación, y el enfriamiento, destilación y compresión del producto. Por este motivo, se trata de un método que requiere de una gran cantidad de energía para su funcionamiento.

### **5.5.2 Separación por membrana**

La separación de aire por membrana es otro de los métodos utilizados para separar gases. Se trata una tecnología con ventajas sobre otros métodos, como compactibilidad y bajo peso, permite diseños modulares, poco mantenimiento, tiene un reducido consumo de energía, bajo costo y es respetuosa con el medio ambiente.

El método está basado en el principio de que diferentes gases tienen diferentes tasas de permeabilidad a través de una película de polímero. Por ejemplo, el oxígeno es considerado como un “gas rápido” que se propaga más rápidamente a través de las paredes de los tubos que los “gases lentos”, argón y nitrógeno.

Las membranas presentan un método simple y menos costoso de producir oxígeno en comparación con otros procesos. Sin embargo, la separación de membrana para la purificación de oxígeno presenta el inconveniente de que requiere una gran cantidad de área superficial. Aunque ciertas membranas cerámicas permitan la separación con un área más pequeña, estas requieren el uso de una alta corriente eléctrica que puede suponer un problema de seguridad debido al calor que se produce en el proceso.

### **5.5.3 Separación por adsorción**

La separación por adsorción es una operación que separa mezclas de fluidos a través de la retención de uno o varios componentes sobre la superficie interna de un sólido poroso. Esta adsorción se produce por la existencia de fuerzas de interacción entre el adsorbato y el adsorbente.

Según el grado de interacción adsorbente-adsorbato, la adsorción puede ser física, producida por fuerzas intermoleculares de tipo Van der Waals o puentes de hidrógeno, o química, donde la fuerza de atracción es similar a la de un enlace químico.



Esta técnica presenta la ventaja con respecto a otras operaciones de separación convencionales de que permite la separación de componentes con propiedades físicas similares, así como la separación de componentes que se encuentren en bajas concentraciones, como pueden ser impurezas o contaminantes.

Las dos etapas básicas del proceso son la adsorción y la regeneración. En la etapa de adsorción, la alimentación se hace circular por un lecho que adsorbe uno o varios de los componentes que se desea separar, dejando pasar el resto de la mezcla. Cuando el lecho llega a su capacidad máxima de adsorción, la alimentación se envía a otro lecho limpio mientras que se procede a la regeneración del primero, extrayéndole las sustancias que han sido adsorbidas previamente.

Dentro de la tecnología de adsorción para la separación en fase gas se puede distinguir entre:

- PSA (Pressure Swing Adsorption, adsorción con variación de presión): el adsorbente se regenera mediante la reducción de la presión.
- VSA (Vacuum Swing Adsorption, adsorción con variación de vacío): el adsorbente se regenera mediante la reducción de la presión por debajo de la atmosférica.
- TSA (Temperature Swing Adsorption, adsorción con variación de temperatura): el adsorbente se regenera mediante un aumento de temperatura.
- ESA (Electric Swing Adsorption, adsorción con calentamiento por corriente eléctrica): el adsorbente se regenera al hacer pasar una corriente de bajo voltaje por él.

La aplicación de una técnica de separación u otra depende principalmente de la composición de la mezcla a separar, tanto del número y proporción de los componentes principales, como de las impurezas que puedan estar presentes, y también de las condiciones de operación.

Para este caso, es recomendable utilizar PSA, ya que es uno de los métodos de obtención de gases con menor tiempo de puesta en marcha y menos costoso, se puede obtener el 95% de pureza para el oxígeno deseado y el oxígeno producido puede usarse, no solo para la fase de gasificación de desechos sólidos, sino también para la formación de hidrógeno. La desventaja del proceso es que no cuenta con capacidad de obtención de subproductos, pero para este caso esto no es un requisito que considerar.

Los procesos PSA se basan en el hecho de que bajo presión los gases tienden a ser atraídos a superficies sólidas o "adsorbentes". Cuanto mayor sea la presión, más gas es adsorbido y cuando se reduce la presión, el gas se libera. Para la mezcla de gases de aire, se hace pasar a presión a través de un recipiente que contiene un lecho adsorbente que atrae nitrógeno más fuertemente de lo que atrae oxígeno, donde parte o todo el nitrógeno se quedará en el lecho, y el gas que sale del recipiente estará enriquecido en oxígeno. Cuando el lecho satura su capacidad para adsorber nitrógeno, se puede regenerar mediante la reducción de la presión, liberando de este modo el nitrógeno adsorbido. Entonces puede comenzar el nuevo ciclo.

En el sistema PSA, uno de los tipos de adsorbente más empleados es la zeolita, que cuenta con una serie de ventajas, como alta selectividad hacia el nitrógeno respecto al oxígeno, bajo costo por kilogramo respecto a otros tipos, fácil disponibilidad en el mercado, alta capacidad de regeneración ante la disminución de presión, larga vida útil y baja apertura de poros.

Por tanto, utilizar un sistema PSA para la obtención de oxígeno de alta pureza que será utilizado como agente gasificante en el proceso de gasificación de residuos destaca frente a otros métodos, como pueden ser la separación criogénica, por membrana u otros tipos de separación por adsorción.

## **5.6 Ajuste de la relación R del syngas**

El flujo y la composición del syngas producido en el proceso depende de la configuración del gasificador, de la composición y cantidad de los residuos y otros materiales introducidos en el reactor (como agentes gasificadores), de las condiciones de operación, como la temperatura y la presión en la zona de combustión (*Gagliano et al., 2017; Mahishi y Goswami, 2007*), y, en caso de que se utilice, también depende del tipo de combustible, su temperatura y presión (*Ramzan et al., 2011*), puesto que el tipo de combustible afecta al rendimiento de la gasificación (*De Souza-Santos, 2010*).

Sin embargo, el syngas que abandona el gasificador no cumple directamente con los requisitos para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH, ya que, entre otros aspectos, la composición del syngas obtenido del gasificador no se ajusta a los requisitos para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH, expresada típicamente con la relación R:

### **Ecuación 8. Relación R**

$$R = \frac{H_2 - CO_2}{CO + CO_2}$$

- Los valores son en porcentaje en volumen.
- Según la estequiometría, se requiere un valor de R igual a 2 para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH. Sin embargo, de acuerdo con las experiencias industriales, debe alcanzarse un valor de R entre 2 y 2,1 (*Rostrup-Nielsen, 2000; Shahhosseini et al., 2018*).
- La composición típica del syngas que abandona el gasificador, en condiciones normales de reacción, se indica a continuación.

**Tabla 8. Composición del syngas al abandonar el gasificador**

Componente	Valor típico	Mínimo	Máximo
Hidrógeno, vol%	40	36	40
CO, vol%	41	37	43

Componente	Valor típico	Mínimo	Máximo
CO <sub>2</sub> , vol%	13	8	16
H <sub>2</sub> O, vol%	5	6	8
N, vol%	< 4	1	5
O, vol%	< 1	-	< 2
CH <sub>4</sub> , vol%	< 3	-	< 5
Ar, vol%	< 1	-	< 2

La tabla muestra que la relación R del gasificador está alrededor de 0,5. Para aumentar este valor al rango óptimo según condiciones industriales, entre 2 y 2,1, se implementa una de estas dos estrategias: (1) agregar hidrógeno o (2) eliminar el exceso de carbono.

### **Opción 1 para aumentar R - Eliminación de carbono**

El CO reacciona con agua (WGS), donde se forman CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, y en el siguiente paso, se elimina el CO<sub>2</sub>. Para la unidad de eliminación de CO<sub>2</sub>, se puede utilizar una tecnología convencional de absorción de amina utilizando monoetanolamina (MEA) como disolvente. También es una opción el proceso KM-CDR (Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery), basado en el uso de la amina con impedimento estérico desarrollado por Mitsubishi (*Kamijo et al., 2013*), que permite una reducción del coste del proceso. Por otro lado, la tecnología de separación de membrana o la adsorción basada en adsorbentes sólidos todavía están en desarrollo (*D'Alessandro et al., 2010*).

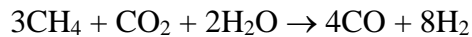
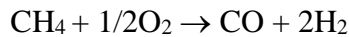
Esta vía es la más adecuada para obtener la proporción R óptima, sin embargo, la eficiencia del proceso es menor, por lo que la Opción 2 es preferible.

## **Opción 2 para aumentar R - Agregación de hidrógeno**

Se había comentado que para que la conversión a CH<sub>3</sub>OH sea altamente eficiente, es preferible trabajar a temperaturas entre 900° C y 1000 °C para fomentar un alto rendimiento de CO. Sin embargo, para estas temperaturas la demanda de hidrógeno debe satisfacerse mediante algún método, ya que la gasificación que ocurre en el reactor produce normalmente 1/3 del hidrógeno que se necesita en las reacciones de síntesis de CH<sub>3</sub>OH, por lo que es necesario obtener más hidrógeno mediante otro método. Una opción es conseguir el hidrógeno para su uso en la síntesis o, alternativamente, puede prepararse mediante cualquier técnica común, como métodos electrolíticos, disociación térmica de agua, reformado con CH<sub>4</sub>)<sub>vapor</sub>, oxidación parcial de hidrocarburos o conversión por desplazamiento de CO.

Es posible obtener hidrógeno a partir de fuentes renovables, como en el proceso de electrólisis, donde se utiliza energía eléctrica renovable (ER). Esta podría ser una estrategia para utilizar un exceso de ER de bajo costo cuando sea posible, como energía solar o eólica. La electrólisis requiere entre 4 y 4,1 kWh/Nm<sup>3</sup> de hidrógeno y, por lo tanto, para producir hidrógeno a un costo de 1–2 €/t se requiere un costo de ER por debajo de 2–3 ¢/KW, que únicamente es posible en situaciones muy específicas (*Barbato et al., 2014*). Por lo tanto, la aplicación de electrólisis para la producción de H<sub>2</sub> solo es posible cuando el costo de energía sea muy bajo. En una perspectiva a más largo plazo, la producción directa de H<sub>2</sub> por métodos fotocatalíticos puede ser comercialmente factible. En ambos casos, electrólisis y métodos fotocatalíticos, se produce O<sub>2</sub> como subproducto, que puede ser utilizado como alimentación para la unidad de gasificación.

En el sistema de reposición de hidrógeno, el CH<sub>4</sub> y los hidrocarburos superiores se convierten a hidrógeno y CO mediante reforming en presencia de CO<sub>2</sub> o mediante oxidación parcial. De esta forma, la cantidad de hidrógeno se puede controlar al modificar la cantidad de gas de hidrocarburo que llega al sistema de reposición de hidrógeno. Opcionalmente, se puede agregar CH<sub>4</sub> adicional al sistema en caso de que no haya suficientes hidrocarburos que satisfagan la demanda de hidrógeno para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH. Por lo tanto, una de las siguientes dos reacciones tiene lugar en el sistema de reposición de hidrógeno:

**Ecuación 9. Reforming****Ecuación 10. Oxidación parcial**

Entonces, añadir un sistema de reposición de hidrógeno en este tipo de planta de gasificación de residuos parece ser una buena alternativa para solventar tanto la demanda de hidrógeno provocada al trabajar a las temperaturas recomendadas, así como para ajustar la composición del syngas a una relación R adecuada.

**5.7 Purificación el syngas**

Cualquier gas derivado de la biomasa, ya sea gas de síntesis o gas de biosíntesis, producido por cualquier vía, digestión anaeróbica, pirólisis o gasificación, típicamente está saturado con vapor de agua y contiene contaminantes. Por lo tanto, la limpieza del gas crudo es estrictamente necesaria para eliminar contaminantes<sup>31</sup>, así como para lograr la composición requerida para el uso al que vaya a ser destinado el gas, en este caso, para la producción de biocombustible. Generalmente, los contaminantes se clasifican como:

- Material particulado.
- Derivados de hidrocarburos condensables, incluidos los productos de alquitrán.
- Metales alcalinos, como sodio y potasio.
- Derivados que contienen nitrógeno, incluidos amoníaco (NH<sub>3</sub>) y cianuro de hidrógeno (HCN).
- Derivados que contienen azufre, tales como sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), sulfuro de carbonilo (COS), disulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>) y derivados tales como cloruro de hidrógeno (HCl), bromuro de hidrógeno (HBr) y fluoruro de hidrógeno (HF).

### **5.7.1 Eliminación de agua**

La humedad relativa del syngas producido puede ser alta debido a la saturación con vapor de agua. El agua en fase líquida causa problemas de corrosión o erosión en tuberías y equipos, particularmente cuando el gas contiene CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Por tanto, para proteger el equipo para la posterior de síntesis de CH<sub>3</sub>OH, se debe eliminar el agua del syngas. Algunas de las tecnologías para la eliminación del agua son:

#### ***Absorción***

Para evitar confusiones, conviene destacar que la absorción se diferencia de la adsorción en que la absorción no es un fenómeno fisicoquímico superficial sino un proceso en el que el gas absorbido se distribuye por todo el absorbente (líquido). En estos procesos se utiliza un disolvente, o absorbente, que es un líquido que absorbe selectivamente los gases ácidos y no se produce ninguna reacción química entre el gas ácido y el disolvente. Los medios absorbentes utilizados dependen del tipo de gas a absorber.

#### ***Deshidratación de glicol***

Para retirar el agua, un ejemplo de proceso de absorción se conoce como deshidratación por glicol, donde el agente absorbente es el dietilenglicol (DEG) o el trietilenglicol (TEG), que tienen afinidad química por el agua (*Mokhatab et al., 2006; Abdel-Aal et al., 2016; Speight, 2019*).

En el proceso, se emplea una columna de absorción, donde la solución de glicol absorbe el agua del syngas húmedo y, una vez absorbida, las partículas de glicol se vuelven más pesadas y se hunden hasta el fondo de la columna, donde se eliminan. A continuación, la corriente de gas seco se transporta fuera de la columna. Por otro lado, se regenera la solución de glicol, que contiene el agua extraída, retirándole el agua por vaporización mediante una caldera y se recircula a la columna. La diferencia de punto de ebullición entre el agua (100 °C) y el glicol (204 °C) hace que sea relativamente fácil separarlos.

### *Proceso Rectisol*

Otro proceso de absorción, el proceso Rectisol, es un proceso físico de eliminación de gas ácido que utiliza un disolvente orgánico, típicamente CH<sub>3</sub>OH, a temperaturas por debajo de 0 °C. Es capaz de purificar el syngas hasta cantidades en el rango de 0,1 ppm de azufre total (Mokhatab et al., 2006; Liu et al., 2010; Abdel-Aal et al., 2016). Además, mediante el uso de un separador flash después de la columna de absorción, se puede recuperar productos como hidrógeno, CO y CO<sub>2</sub>.

### *Adsorción*

La adsorción es un fenómeno fisicoquímico en el que el gas se concentra en la superficie de un sólido o líquido para eliminar impurezas. Mediante adsorción, se puede eliminar la humedad y los componentes ácidos del gas empleando un adsorbente o desecante sólido, y generalmente consta con dos o más torres de adsorción, que se llenan con el desecante (Mokhatab et al., 2006; Abdel-Aal et al., 2016; Speight, 2019). La cantidad de material adsorbido es proporcional al área superficial del sólido, en consecuencia, los adsorbentes suelen ser sólidos granulares con una gran área superficial por unidad de masa.

En el proceso, una corriente de gas húmedo con ácidos pasa a través las torres, de arriba a abajo. A medida que el gas pasa alrededor de las partículas de material desecante, el agua y los componentes ácidos se retiene en la superficie de estas partículas. Al pasar por todo el lecho, casi todo el agua se adsorbe sobre el material desecante, permitiendo obtener un gas seco que abandona la torre por la parte inferior.

Se requieren dos o más torres debido al hecho de que después de un cierto período de uso, los lechos en una torre en particular se saturan de agua y ácidos, por lo que es necesario regenerarlos y reciclarlos antes de que se vuelvan ineficaces debido a la sobresaturación. La regeneración se logra pasando gas combustible seco y caliente a través del lecho, donde el gas ácido capturado en el lecho se puede desorber y el agua se evapora.



Un ejemplo muy utilizado de esta técnica son los tamices moleculares o zeolitas. Los tamices moleculares son una clase de aluminosilicatos que provocan puntos de rocío de agua más bajos y que se pueden utilizar para adsorber selectivamente agua y compuestos de azufre en gases y líquidos (*Mokhatab et al., 2006; Maple y Williams, 2008; Abdel-Aal et al., 2016; Speight, 2019*). Como deshidratantes, se utilizan normalmente de recuperación etano, ya que estas plantas operan a temperaturas muy bajas, por lo que requieren una alimentación gaseosa muy seca para evitar la formación de hidratos.

En el proceso, el gas húmedo que contiene azufre pasa a través de un lecho de tamices a temperatura ambiente, donde la presión de funcionamiento es lo suficientemente alta para mantener la alimentación en la fase líquida. Entonces, se produce el proceso de adsorción, donde el azufre y el agua son retenidos por el lecho. Esta etapa de adsorción se detiene en un tiempo predeterminado para evitar que se produzca la penetración de azufre y ambos componentes, azufre y agua, se eliminan de los tamices mediante una purga con gas combustible a una temperatura de 205 °C a 315 °C.

También se puede emplear gel de sílice (SiO<sub>2</sub>) para la deshidratación de gas ácido, debido a su alta tolerancia al H<sub>2</sub>S y así proteger los tamices moleculares de la obstrucción por azufre, o colocar lechos de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) delante de los tamices moleculares para eliminar los compuestos de azufre.

El gel de sílice y la alúmina tienen buenas capacidades de adsorción de agua, hasta un 8% en peso, mientras que los tamices moleculares adsorben hasta un 15% en peso de agua.

Los deshidratadores de adsorbente sólidos son generalmente más efectivos que los deshidratadores de absorción líquidos, por ejemplo, que los deshidratadores de glicol, por lo que las unidades de desecante sólido suelen ser costosas, así que su uso se limita a gases que tengan un alto contenido de H<sub>2</sub>S.

### ***Sistemas criogénicos***

Los sistemas criogénicos aprovechan los distintos puntos de ebullición / sublimación de diferentes gases para separarlos, en particular, para la separación del CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> del syngas. En el proceso, el syngas crudo (sin tratar) se enfría a temperaturas en las que el CO<sub>2</sub> se condensa o sublima y puede separarse como una fracción líquida o sólida, mientras que el CH<sub>4</sub> se acumula en la fase gaseosa. Este enfriamiento permite también la condensación del agua y su eliminación. Sin embargo, el enfriamiento se realiza en varios pasos para eliminar los diferentes gases contenidos en el syngas de forma individual, por lo que se pueden llegar a necesitar muchos equipos, especialmente compresores, turbinas e intercambiadores de calor, haciendo que el proceso sea muy costoso para este fin.

#### **5.7.2 Eliminación de gases ácidos**

Además de la eliminación de agua, una de las partes más importantes del procesamiento de syngas implica la eliminación de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>, contaminantes que pueden llegar a ser extremadamente dañinos, envenenando los catalizadores y provocando que el gas sea muy corrosivo. El proceso para eliminar compuestos de azufre del gas, principalmente H<sub>2</sub>S, se denomina comúnmente como endulzar el gas o desulfuración. Los principales procesos para eliminar gases ácidos son (*Soud y Takeshita, 1994; Mokhatab et al., 2006; Speight, 2014, 2019*):

- Adsorción física en la que se usa un adsorbente sólido.
- Absorción física en la que se usa un disolvente de absorción selectiva.
- Absorción química es la que se utiliza un disolvente de absorción selectiva.

#### ***Adsorción***

El proceso ha sido previamente explicado en la eliminación de agua, ya que el proceso con tamices moleculares retira tanto la humedad como los contaminantes ácidos.

### **Absorción**

En la absorción de gases ácidos se emplea un disolvente que absorbe selectivamente los gases ácidos y excluye los hidrocarburos.

Entre los procesos comerciales que destacan, se encuentra el proceso Selexol, el proceso Sulfinol y el proceso Rectisol (*Mokhatab et al., 2006; Speight, 2014, 2019*). Por ejemplo, en el proceso Selexol se utiliza una mezcla de dimetiléter de propilenglicol como disolvente, con una selectividad para el H<sub>2</sub>S mucho mayor que para el CO<sub>2</sub>, por lo que puede usarse separar diferentes gases ácidos.

### **Quimisorción**

Los procesos de quimisorción o absorción química se caracterizan por una alta capacidad de absorber grandes cantidades de gases ácidos. Se utiliza una solución de una base relativamente débil, como la monoetanolamina (MEA) o la dietanolamina (DEA). La DEA es el absorbente preferido debido a su menor probabilidad de producir corrosión, menor potencial de pérdida de amina y más facilidad de recuperación. La DEA reacciona reversiblemente con el 75% de los sulfuros de carbonilo (COS), mientras que la MEA reacciona de manera irreversible con el 95% de COS, formando un producto que debe eliminarse.

En el proceso, la corriente de gas ácido pasa a través de la solución de amina y forma un enlace débil con la base, donde se obtienen sulfuros, carbonatos y bicarbonatos. Seguidamente, la amina se puede regenerar fácilmente.

En esta tecnología, destaca el proceso Girbotol, que elimina los gases ácidos, H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>, del syngas utilizando una solución acuosa de etanolamina (H<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH). En el proceso Girbotol, la torre de absorción se llena con la solución de etanolamina a través de la cual se burbujea el gas ácido. Entonces, el gas purificado sale de la parte superior de la torre, mientras que la solución de etanolamina sale por el fondo de la torre con los gases ácidos absorbidos.

Para regenerar la solución de etanolamina, esta entra en una torre de desorción. El proceso de regeneración es exotérmico y el aire debe introducirse lentamente para que el calor de reacción se pueda disipar, entonces, los gases ácidos y la amina se separan y la amina es recirculada de nuevo a la torre de absorción, mientras que los gases ácidos se liberan por la parte superior de la torre.

### ***Otros procesos***

Un tipo de proceso alternativo a los visto anteriormente implica el uso de reacciones químicas para eliminar los contaminantes de las corrientes de gas por absorción. En este caso, se emplean las soluciones básicas fuertes como absorbentes para gases ácidos. El proceso cuenta con una alta eficiencia, sin embargo, estas soluciones no se utilizan normalmente para tratar grandes volúmenes de syngas porque los gases ácidos forman sales estables, que no se regeneran fácilmente.

No obstante, estas tecnologías son utilizadas, como el proceso Merox, donde un disolvente cáustico que contiene un catalizador como el cobalto, es capaz de convertir mercaptanos (RSH) en disulfuros insolubles cáusticos (RSSR). El proceso Merox se utiliza principalmente para el tratamiento de corrientes de gases de refinería.

A continuación, se muestran tablas con diversas opciones para la separación de gases ácidos del syngas.

**Tabla 9. Separación de gases ácidos – CO<sub>2</sub>**

<b>Eliminación de CO<sub>2</sub></b>	
<b>Lavado con agua</b>	Utiliza el principio de mayor solubilidad del CO <sub>2</sub> en agua para separar el CO <sub>2</sub> del gas
	El proceso opera a alta presión y elimina el H <sub>2</sub> S y el CO <sub>2</sub>
	La principal desventaja de este proceso es que requiere un gran volumen de agua que debe purificarse y reciclarse
<b>Lavado con polietilenglicol (PEG)</b>	Este proceso es más eficiente que el lavado con agua.
	También requiere la regeneración de un gran volumen de polietilenglicol.
<b>Absorción química</b>	Reacción química entre CO <sub>2</sub> y disolventes a base de aminas (olaminas)
<b>Tamices moleculares de carbono</b>	Se realiza una separación de CH <sub>4</sub> y el CO <sub>2</sub> por adsorción por cambio de presión (PSA)
	El H <sub>2</sub> S debe eliminarse antes del proceso de adsorción
<b>Separación por membrana</b>	Separa selectivamente el H <sub>2</sub> S del CO <sub>2</sub> y del CH <sub>4</sub> .
	El CO <sub>2</sub> y el H <sub>2</sub> S se disuelven mientras que se extrae el CH <sub>4</sub> para su uso.
<b>Separación criogénica</b>	Enfriamiento hasta la condensación o sublimación del CO <sub>2</sub>

**Tabla 10. Separación de gases ácidos - H<sub>2</sub>S**

<b>Eliminación de H<sub>2</sub>S</b>	
<b>Desulfuración biológica</b>	Las bacterias pueden convertir el H <sub>2</sub> S en azufre elemental en presencia de oxígeno y Fe. Esto se puede hacer introduciendo una pequeña cantidad (< 5%) de aire en un digestor
	Este proceso puede optimizarse mediante un diseño en el que se burbujea aire a través de la materia prima del digestor. Es fundamental que la introducción de aire se controle para evitar reducir la cantidad de gas que se produce
<b>Reacción de Fe / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	El H <sub>2</sub> S reacciona fácilmente con el Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> o el FeCl <sub>3</sub> para formar FeS insoluble
	La reacción se puede mejorar añadiendo el FeCl <sub>3</sub> junto con la materia prima o pasando el gas a través de un lecho de material que contenga Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
	El medio de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> debe reemplazarse periódicamente
	El proceso de regeneración es altamente exotérmico y debe controlarse para evitar problemas
<b>Carbón activado</b>	El carbón activado impregnado con yoduro de potasio (KI) puede reaccionar catalíticamente con oxígeno y H <sub>2</sub> S para formar agua y azufre.
	Los lechos de carbón activado necesitan regeneración cuando están saturados
<b>Separación por membranas</b>	El CO <sub>2</sub> y el H <sub>2</sub> S se separan por medio de membranas

### **5.7.3 Eliminación de hidrocarburos condensables**

#### ***Extracción***

La extracción de componentes de hidrocarburos de mayor punto de ebullición que la corriente de syngas en una columna de destilación a baja temperatura permite obtener un syngas más limpio y puro, así como derivados de hidrocarburos valiosos que pueden utilizarse en, por ejemplo, una planta petroquímica (*Speight, 2019*). Este proceso utiliza una turbina de expansión para producir la refrigeración necesaria, logrando temperaturas muy bajas y una alta recuperación de componentes ligeros, como etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) y propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

#### ***Absorción***

El método de absorción para la recuperación de derivados de hidrocarburos de alto peso molecular es muy similar al proceso de absorción para la deshidratación (*Mokhatab et al., 2006; Speight, 2014, 2019*). La principal diferencia es que, en este caso, se utiliza un aceite absorbente en lugar de glicol. Este absorbente tiene afinidad por los constituyentes de hidrocarburos de mayor punto de ebullición que el syngas de la misma manera que el glicol tiene afinidad por el agua.

#### ***Fraccionamiento***

El proceso de fraccionamiento ocurre en etapas y cada etapa implica la separación de los derivados de hidrocarburos como productos individuales. El proceso comienza con la eliminación de los derivados de hidrocarburos de bajo punto de ebullición de la corriente de syngas. Así, cada columna puede funcionar a una presión sucesivamente más baja que la anterior, sin necesitar el uso de bombas.

Generalmente, las columnas de fraccionamiento siguen el siguiente orden: (1) torre desetanizadora, que se utiliza para separar el etano de la corriente de la corriente de gas, (2) torre despropanizadora, para separar el propano de la corriente de gas, (3) torre desbutanizadora, que se utiliza para separar los isómeros de butano, dejando los isómeros de pentano y los derivados de hidrocarburos de mayor punto de ebullición en la corriente de gas, y (4) torre desbutanizadora, que se utiliza para separar n-butano e isobutano.

#### **5.7.4 Eliminación de alquitrán**

El alquitrán es un producto líquido altamente viscoso producido en procesos térmicos que se condensa en las zonas de baja temperatura del equipo, como en el gasificador, interfiriendo con el flujo de gas y provocando la interrupción del sistema. Es, quizás, el producto más indeseable del proceso y una alta concentración de alquitrán en el syngas impide su utilización (*Devi et al., 2003; Torres et al., 2007; Anis y Zainal, 2011; Huang et al., 2011*).

Los métodos para la reducción o eliminación de alquitrán se pueden dividir en dos grandes grupos: (1) reducción de alquitrán in situ o reducción de alquitrán primaria, que reduce o evita la formación de alquitrán en el reactor, y (2) reducción de alquitrán post gasificación o reducción secundaria, que elimina el alquitrán del gas del producto. Se recomienda una combinación de ambas etapas para mejorar la eficiencia de eliminación.

Los dos métodos básicos para después de la gasificación son la eliminación física y el craqueo (catalítico o térmico).

##### ***Métodos físicos***

En la eliminación física del alquitrán, el alquitrán se condensa antes de la separación y se trata como partículas de polvo. La separación se puede realizar mediante ciclones, filtros de manga, precipitadores electrostáticos húmedos (ESP) o depuradores húmedos. Por tanto, se utilizan los mismos métodos que en la separación de partículas, que serán descritos en el siguiente apartado.

##### ***Métodos térmicos***

Los métodos de craqueo son más ventajosos ya que es posible recuperar la energía contenida en el alquitrán al convertir los constituyentes de alto peso molecular en productos de menor peso molecular. Por ello, el craqueo catalítico se utiliza en muchas plantas de refinerías y se ha demostrado que es uno de los procesos más efectivos para la conversión de productos de alto peso molecular, como residuos de petróleo crudo, en gases y líquidos (*Parkash, 2003; Gary et al., 2007; Speight, 2014; Hsu y Robinson, 2017; Speight, 2017*).



Se pueden emplear catalizadores no metálicos como dolomita, calcita, zeolita y catalizadores metálicos como catalizadores a base de níquel, de níquel / molibdeno, de níquel / cobalto, de molibdeno, de platino y basados en rutenio, entre otros.

La eliminación del alquitrán también se puede lograr mediante reformado catalítico, que cuenta con la ventaja de permitir el aprovechamiento de carbono contenido en el alquitrán para su posterior conversión en combustible.

Otra opción para reducir el contenido de alquitrán de la corriente de syngas es la utilización de un lecho catalítico en el reactor de gasificación, por ejemplo, de arena de olivina.

### **5.7.5 Eliminación de partículas en suspensión**

Las partículas presentes en el syngas pueden afectar negativamente a los catalizadores utilizados para limpiar el syngas, por lo que deben ser retiradas (*Gustafsson et al., 2011*). El material particulado se puede eliminar utilizando tecnologías estándar como ciclones, precipitadores, filtros y depuradores húmedos, que también reducen el contenido de alquitrán en la corriente de syngas.

#### ***Ciclones***

Un ciclón es un equipo que se utiliza para la separación de partículas de una corriente de gas que funciona según el principio de separación de vórtices. El método también se puede utilizar para separar finas gotas de líquido de una corriente gaseosa. Los ciclones se utilizan a menudo como recolectores primarios debido a su eficiencia relativamente baja, lo habitual es de 50 % a 90 %.

Para el proceso, se establece un flujo giratorio de aire de alta velocidad dentro del contenedor cónico o ciclón. La corriente de gas fluye en un patrón helicoidal, comenzando en la parte superior (extremo ancho) del ciclón y terminando en el extremo inferior (estrecho) antes de salir del ciclón a través del centro de este. En el proceso, las partículas más grandes, y por tanto más densas, tienen demasiada inercia para seguir la curva cerrada de la corriente, por lo que golpean la pared, caen al fondo del ciclón y son eliminadas.

### ***Precipitadores electrostáticos***

Un precipitador electrostático (ESP) es un dispositivo de filtración que elimina partículas finas, como polvo y humo, del gas mediante la fuerza de una carga electrostática inducida.

El diseño más básico consta de una fila de alambres seguida de una pila de grandes placas metálicas planas orientadas verticalmente, con un espaciamiento entre placas de entre 1 cm y 18 cm, según la aplicación.

La corriente de gas fluye horizontalmente por medio de los espacios entre los alambres y luego pasa a través de la pila de placas. En el proceso, se aplica un voltaje negativo de varios miles de voltios entre el alambre y la placa. Si el voltaje aplicado es lo suficientemente alto, las partículas quedan ionizadas en la corriente de aire, entonces, debido a la fuerza electrostática, se desvían hacia las placas, separándose de la corriente de aire, donde se acumulan para ser eliminadas posteriormente.

### ***Filtros de mangas***

Son materiales porosos que pueden capturar cierta cantidad de partículas cuando el syngas pasa a través de ellos. Un catalizador se puede integrar como lecho fijo dentro del filtro para promover la eliminación simultánea de partículas y alquitrán (*Rapagna et al., 2010*). A medida que el gas fluye a través del medio filtrante, generalmente algodón, polipropileno, fibra de vidrio o teflón, el material particulado se acumula en la superficie. Estos filtros pueden alcanzar eficiencias del 99,9%.

### ***Depuradores húmedos***

Son dispositivos en los que se utiliza un líquido pulverizado a contracorriente para eliminar las partículas de la corriente gaseosa. Los depuradores húmedos pueden lograr altas eficiencias de recolección a expensas de caídas de presión notables. Las configuraciones del dispositivo incluyen: depuradores de placa, depuradores de lecho compacto, depuradores de orificio, depuradores Venturi y torres de pulverización. Estos sistemas pueden lograr una alta eficiencia de recolección, del orden de 90%, y, además, pueden diseñarse para separar también contaminantes gaseosos.

Los depuradores húmedos eliminan las partículas al capturarlas en gotas de líquido que luego se recolectan, donde la capacidad del depurador para recolectar las partículas pequeñas es a menudo directamente proporcional a la entrada de energía en el dispositivo. Los dispositivos de baja energía, como las torres de pulverización, se utilizan para recoger partículas de más de 5  $\mu\text{m}$ . Para obtener una eliminación de alta eficiencia de partículas de  $< 1 \mu\text{m}$ , se pueden utilizar depuradores Venturi.

### **5.7.6 Eliminación de otros contaminantes**

#### ***Eliminación de nitrógeno***

El nitrógeno a menudo puede aparecer en cantidades notables en la corriente de syngas, reduciendo su poder calorífico. Debido a esto, se han construido varias plantas para la eliminación de nitrógeno, siendo la forma general de eliminarlo mediante una licuefacción al syngas seguida del fraccionamiento de toda la corriente, lo que puede afectar a la economía del proceso. Como alternativa, la corriente de gas que contiene nitrógeno se puede mezclar con algún gas que tenga un poder calorífico superior y posteriormente venderlo a un precio reducido en función del valor térmico (Btu / ft<sup>3</sup>).

#### ***Eliminación de amoníaco***

La biomasa con un contenido relativamente alto de nitrógeno producirá un gas producto con amoníaco (NH<sub>3</sub>) y cianuro de hidrógeno (HCN) (Yuan et al., 2010) que, a su vez, generará óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) durante la combustión.

El NH<sub>3</sub> se puede eliminar empleando la tecnología de depuración húmeda, que ha sido ampliamente adoptada en los procesos de gasificación de biomasa existentes (Dou et al., 2002; Proell et al., 2005) o mediante la limpieza con gas caliente y la adición de catalizadores, tecnología más ventajosa que la anterior en cuanto a eficiencia energética, ya que produce un ahorro energético (Torres et al., 2007).

Además, los procesos catalíticos también eliminan eficazmente el NH<sub>3</sub> por conversión a nitrógeno, hidrógeno y agua, donde los catalizadores a base de níquel destacan por su mayor actividad.

### ***Eliminación de siloxano***

Los compuestos de siloxano son derivados de silicona ampliamente utilizados en una variedad de procesos industriales. Aunque la mayoría de los siloxanos se dispersan en la atmósfera, donde se descomponen, algunos terminan en las aguas residuales, concretamente, formando parte del lodo.

A medida que el lodo se somete a digestión anaeróbica a temperaturas de hasta 60 °C, los siloxanos contenidos en él se volatilizan, convirtiéndose en partículas de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), que son similares a la arena, por lo que son un componente no deseado del syngas resultante.

Los siloxanos se pueden eliminar del syngas mediante alguno de los métodos ya vistos, como por (1) carbón activado o resinas sintéticas, tecnologías ampliamente utilizadas para eliminar sustancias orgánicas de gases y líquidos debido a sus propiedades adsorbentes, mediante (2) alúmina activada (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que absorbe siloxanos del syngas y se regenera cuando se satura, o empleando la (3) tecnología de separación por membrana, entre otras.

### ***Eliminación de sales de metales alcalinos***

En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa es rica en sales alcalinas. Es necesario eliminar el contenido de álcali ya que su condensación puede causar problemas de corrosión. Puesto que condensan como finas partículas sólidas, se pueden separar por medio de un separador ciclónico, de precipitadores electrostáticos o con algún tipo de filtro.

## **5.8 Conclusiones**

La gasificación se considera generalmente como la vía más eficaz para el aprovechamiento de residuos teniendo en cuenta el impacto medioambiental y la inversión económica. Especialmente en Canarias, presenta ventajas frente al principal tipo de tratamiento de residuos que prevalece archipiélago, el vertedero, ya que a partir de la gasificación térmica se pueden obtener beneficios.

De acuerdo con la revisión realizada, se pueden sintetizar los siguientes aspectos relacionados con la producción de syngas para la obtención de CH<sub>3</sub>OH:

- A pesar de que la gasificación con aire es una tecnología ampliamente utilizada, el gas que se obtiene es de bajo poder calorífico y con mayor cantidad de humedad, alquitranes e hidrocarburos, por lo tanto, incrementan los costes de postratamiento del syngas para tratar de eliminar impurezas y contaminantes.
- El uso del vapor tiene la desventaja de que podría causar corrosión en los equipos, sin embargo, es preferible usarlo, ya que asegura una mayor conversión del carbono, así como la producción de alquitranes que sean más fáciles de reformar catalíticamente (*Milne y Evans, 1998*).
- La operación a alta presión disminuye la cantidad de alquitranes e hidrocarburos pesados producidos.
- Es conveniente utilizar un gasificador de lecho fluidizado que emplee oxígeno y vapor como medios oxidantes con el fin de evitar la presencia de nitrógeno diluido en el gas de salida y disminuir las etapas relacionados con la limpieza del gas. Además, el empleo de oxígeno permite obtener un gas con mayor calidad energética, alrededor de 10-15 MJ/Nm<sup>3</sup> (*Saxena, 2008*).
- El oxígeno como agente de gasificación se puede obtener mediante un sistema de separación de aire PSA, ya que es uno de los métodos de obtención de gases menos costoso.
- Puesto que el CO<sub>2</sub> es un producto de la gasificación, sería beneficioso desde el punto de vista medioambiental implementar la metodología CCUS y utilizarlo en el proceso en lugar de descargarlo.
- Añadiendo un sistema de reposición de hidrógeno se solucionan la demanda de hidrógeno del proceso y el ajuste de la composición del syngas.

---

## **6-Estudio económico**

---

## **6. Estudio económico**

### **6.1 Alternativa de proceso**

El proceso detallado a continuación es una de las diversas alternativas que permiten obtener CH<sub>3</sub>OH a partir del proceso de gasificación de residuos, estimado a partir de datos bibliográficos. Se utilizan residuos municipales sin costo como material de partida, lo que representa un ahorro sobre otros procesos de producción de CH<sub>3</sub>OH que utilizan como materia prima CH<sub>4</sub>, hidrocarburos o fuentes fósiles.

#### **6.1.1 Características del proceso**

Previamente se llegó a una serie de conclusiones:

- El oxígeno presenta buenos resultados como agente de gasificación en este tipo de procesos.
- Opcionalmente, se puede adicionar vapor y/o mezclar el oxígeno con otros componentes, como el CO<sub>2</sub>. Esto aporta una serie de ventajas en el proceso:
  - 1) Introducir vapor en el reactor permite trabajar a temperaturas más bajas, así como alcanzar una mayor conversión del carbono.
  - 2) La reacción exotérmica con CO<sub>2</sub> no es tan potente como con CO, lo que facilita el control de las condiciones de reacción.
  - 3) El CO<sub>2</sub> es utilizado en lugar de simplemente descartarse (CCUS): se emplea el CO<sub>2</sub> producido mediante gasificación en tres operaciones: para diluir el oxígeno que alimenta al reactor, como reactivo en el sistema de reposición de hidrógeno y como componente en la alimentación del bucle de síntesis de CH<sub>3</sub>OH, ya que el syngas debe ajustarse en proporciones estequiométricas de H, CO y CO<sub>2</sub>, reactivos que son utilizados para la producción de CH<sub>3</sub>OH.
- El oxígeno se puede obtener mediante un sistema de separación de aire aparte.
- La adición de una unidad que proporcione hidrógeno de reposición es beneficiosa para el proceso.
- El CH<sub>4</sub> y los hidrocarburos producidos, hasta el C<sub>4</sub>, se pueden utilizar para producir hidrógeno de reposición.

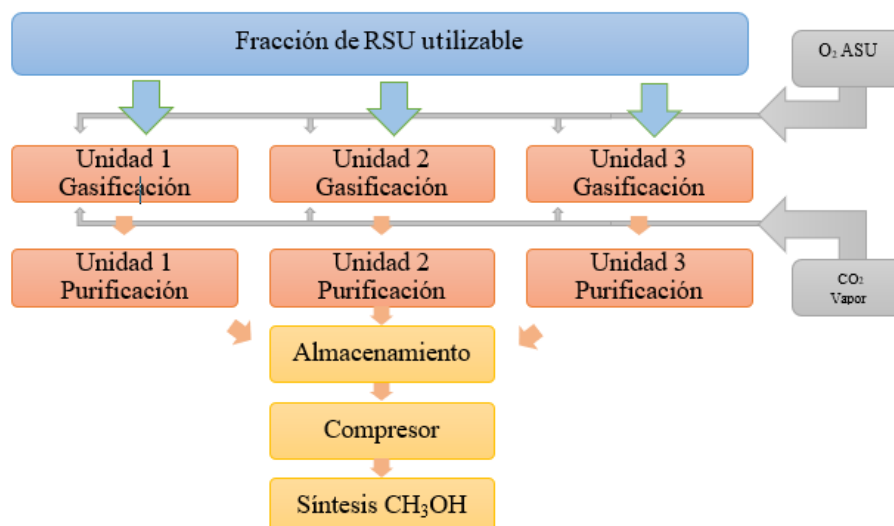
En el proceso, los residuos sólidos se convierten en syngas en un sistema de gasificación mediante la oxidación parcial y en presencia de un agente oxidante, que puede ser una mezcla de oxígeno de alta pureza y CO<sub>2</sub>, en ausencia efectiva de nitrógeno, para así lograr una conversión muy alta del carbono en los desechos sólidos a CO y CO<sub>2</sub> (en lugar de CH<sub>4</sub> e hidrocarburos superiores).

Seguidamente, los productos resultantes de la combustión, incluido el CO<sub>2</sub>, se separan en varios componentes y se reutilizan en el proceso, se convierten en combustible líquido, como CH<sub>3</sub>OH, o se descargan al ambiente en caso de ser inocuos.

El proceso se puede resumir en las siguientes etapas:

- A. Gasificación: los desechos se oxidan parcialmente y se forman gases de combustión. Para ello, se introducen en el reactor de gasificación, al que se le añade como agente gasificante una mezcla de oxígeno, con una pureza de 95% en volumen como mínimo, y CO<sub>2</sub>, siendo su relación en volumen de 50:50 aproximadamente. Se obtiene syngas.
- B. Purificación del syngas: se eliminan partículas, alquitrán, se separa el CO<sub>2</sub> y se recircula una parte al gasificador, se seca el syngas, se realiza una separación criogénica para separar hidrocarburos y se elimina azufre.
- C. Almacenamiento de syngas limpio.
- D. Se comprime el syngas limpio.
- E. Síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

**Figura 11. Esquema del proceso**





Se utilizan tres unidades de gasificación y tres unidades de purificación del syngas obtenido para mantener la continuidad de operación, ya que, debido a la alta temperatura de gasificación, es necesario considerar un mantenimiento periódico de los reactores. También se emplea un almacenamiento intermedio del syngas para minimizar la fluctuación del gas. Por último, el syngas se comprime y se envía a la unidad de síntesis de metanol<sup>17</sup>.

### **6.1.2 Gasificación**

En el proceso de gasificación, la alimentación que entra al reactor comprende la fracción de residuos urbanos con poder combustible: fracción orgánica, papel, cartón, madera, textiles, plástico y residuos vegetales, separada de la fracción destinada al reciclaje, metal y vidrio. Los residuos se queman en presencia de la mezcla de O<sub>2</sub> con un 95% de pureza producido en la instalación de separación de aire (ASU), que es comprimido y luego alimentado al gasificador, el CO<sub>2</sub> reciclado.

Los desechos se van quemando mediante la combustión con oxígeno. A medida que los productos de la combustión aumentan, los desechos restantes son calentados directamente por estos gases de combustión ascendentes, así como por el CO<sub>2</sub> y el oxígeno, consumiéndose el oxígeno y descomponiéndose la materia orgánica en compuestos que contienen cuatro carbonos o menos.

Los gases que se elevan se enfrían a medida que liberan calor a la carga de residuos entrante, mientras que la parte no quemada de los desechos se descarga. Todo el volumen de residuos se consume en el proceso, excepto una cantidad entre el 2% y el 5%, que será en gran parte material inerte que contiene muy poco, sin exceder del 1-2% en peso, de carbono desperdiciado.

En el proceso prácticamente todo el oxígeno se agota, quedando menos del 0,2% en peso en los gases que salen del reactor. Se forman componentes como CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y algunos hidrocarburos superiores, además de cenizas, alquitrán, carbón y gases como H<sub>2</sub>S, por lo que tendrá que ser purificado.

### **6.1.3 Purificación del syngas**

#### ***Separación de partículas***

El efluente del gasificador o syngas crudo se extrae y se envía a la unidad de separación de partículas, en la cual se pueden utilizar separadores ciclónicos, entre otros métodos.

Dentro de los separadores ciclónicos se establece un flujo giratorio de aire de alta velocidad y se hace que la corriente de gas fluya a través del ciclón, haciendo que las partículas más densas choquen con las paredes y caigan en el fondo del dispositivo, desde donde son retiradas.

En esta etapa se separan las partículas de un tamaño alrededor de 50  $\mu\text{m}$  de ceniza sólida y de carbón.

#### ***Separación de alquitrán***

La eliminación del alquitrán del syngas crudo se realiza mediante métodos químicos, como el craqueo catalítico, o métodos físicos, como mediante depuradores húmedos. A pesar de que la segunda opción produzca una disminución del poder calorífico en el gas, tiene como ventaja que es una tecnología más simple y menos costosa que el craqueo catalítico.

Entonces, el syngas crudo, una vez limpio de partículas, se lleva a un depurador húmedo donde se utiliza agua pulverizada a contracorriente, enfriando la corriente hasta aproximadamente 50 °C y provocando la condensación de alquitranes y aceites, que serán separados, obteniéndose una corriente de syngas limpio.

### ***Separación del CO<sub>2</sub>***

El CO<sub>2</sub> contenido en el syngas se separa de los otros componentes para ser recirculado al gasificador y así mezclarse con el oxígeno introducido como agente de gasificación, además, otra fracción de CO<sub>2</sub> puede recircularse a la unidad de reposición de hidrógeno para participar en las reacciones de producción de hidrógeno.

Para separar el CO<sub>2</sub> de la corriente de syngas, se puede aplicar cualquiera de las técnicas ya vistas, por ejemplo, mediante un sistema de adsorción/desorción. En el proceso, la corriente de syngas con CO<sub>2</sub> pasa a través las torres de adsorción, donde las partículas de material desecante, como zeolita, retienen el CO<sub>2</sub>. Entonces, el syngas sin CO<sub>2</sub> abandona la torre por la parte inferior. Seguidamente, se separa el CO<sub>2</sub> del lecho haciendo pasar gas combustible seco y caliente a través este, de forma que el CO<sub>2</sub> se puede desorber para posteriormente ser recirculado.

### ***Eliminación de agua***

Se había comentado que para proteger al reactor de síntesis de CH<sub>3</sub>OH se debe eliminar el agua, ya que en fase líquida causa problemas de corrosión.

Entonces, el syngas limpio y mayoritariamente libre de CO<sub>2</sub>, se somete a algún proceso de deshidratación. Por ejemplo, un proceso de adsorción con gel de sílice o similares como adsorbente, que se regenera según sea necesario.

### ***Separación criogénica***

Se realiza esta etapa de purificación para garantizar que el syngas esté lo suficientemente limpio para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

En esta unidad, siempre que el syngas esté prácticamente libre de CO<sub>2</sub>, puede separarse fácilmente en dos fracciones sin necesidad de utilizar una columna de fraccionamiento. Por tanto, aprovechando los distintos puntos de ebullición de los diferentes gases, se puede realizar la separación por medio de la condensación de componentes de volatilidad relativamente baja, por lo que se obtiene una fracción más pesada constituida por componentes tales como CH<sub>4</sub> e hidrocarburos superiores y una fracción más ligera y limpia que consiste mayoritariamente en hidrógeno y CO (syngas purificado).

En el proceso se realiza un enfriamiento en varias etapas para eliminar los diferentes componentes de forma individual, contando con diversos compresores, turbinas e intercambiadores de calor. Por lo tanto, una forma de operar es mediante cuatro columnas donde los gases se tratan sometidos a cuatro ciclos. Mientras una de las torres se enfría utilizando un flujo de gas refrigerante purificado, se realiza una separación en otra torre, y los componentes condensados se eliminan en las dos torres restantes.

Una vez se ha separado la fracción más pesada, constituida por CH<sub>4</sub> e hidrocarburos superiores, y la fracción más ligera, que consiste en hidrógeno y CO, la fracción más ligera se utiliza para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH, mientras que, por otro lado, la fracción más pesada se dirige al sistema de reposición de hidrógeno, donde se convierte en hidrógeno para utilizarlo posteriormente en el proceso.

### ***Separación de azufre***

Esta unidad solo se utiliza en caso de que el contenido de azufre exceda los límites. De ser así, también sería necesaria la desulfuración de la corriente de hidrocarburos antes separada.

El azufre actúa como un veneno para los reactores de síntesis de CH<sub>3</sub>OH, y los sistemas de depuración anteriores no lo eliminan de manera eficiente. Por tanto, se requiere un sistema de desulfuración adecuado para reducir los compuestos de azufre por debajo de 0,1 ppm.

Generalmente, el azufre está presente en el syngas como sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y sulfuro de carbonilo (COS) principalmente, aunque también existen pequeñas cantidades de sulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>).

Para separar estos componentes del syngas, se puede realizar alguna de las técnicas ya vistas, como el proceso de adsorción Girbotol, que elimina los gases ácidos utilizando una solución acuosa de etanolamina (H<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>OH), o un proceso de absorción química empleando una solución de amina, donde la corriente de syngas pasa a través de la solución de amina formando un enlace débil con los ácidos para dar sulfuros, carbonatos y bicarbonatos, por lo que el azufre se separa del syngas.

### ***Ajuste de la relación R agregando hidrógeno***

Previamente se había comentado que para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH, el syngas debía tener un valor de R entre 2 y 2,1 (*Rostrup-Nielsen, 2000; Shahhosseini et al., 2018*), para lo cual se podía eliminar carbono o agregar hidrógeno, llegando a la conclusión de que la eliminación de carbono es la vía es la más adecuada para obtener el valor de R requerido, sin embargo, la eficiencia del proceso es menor, por lo que ajustar R mediante la agregación de hidrógeno es la opción preferible.

Para la producción de hidrógeno, el gas de CH<sub>4</sub> e hidrocarburos superiores, obtenido de la unidad de separación criogénica, se calienta desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 800 °C en un horno de reforming para así prepararlo para las reacciones de producción de hidrógeno, que se ven favorecidas a altas temperaturas. Seguidamente, esta corriente de gas ingresa como alimentación en un reactor en el que se introduce CO<sub>2</sub> u oxígeno, dependiendo de si la corriente de entrada debe reformarse en presencia de CO<sub>2</sub> u oxidarse parcialmente.

La oxidación parcial, que utiliza como reactivos el CH<sub>4</sub> y los hidrocarburos superiores, parece ventajosa, especialmente al inicio, ya que hay oxígeno disponible para inyectar en el gasificador. Además, la reacción es exotérmica y rápida, lo que permite un ahorro energético al generarse el calor dentro del sistema.

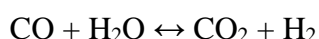
Por otro lado, la reacción de reforming de CO<sub>2</sub> presenta la ventaja, entre otras, que utiliza el CO<sub>2</sub> producido en el proceso, minimizando así la necesidad de descargarlo a la atmósfera.

Generalmente, si la corriente de alimentación es pesada en hidrocarburos superiores, se elige la oxidación parcial, donde el oxígeno alimenta al reactor y la adición de vapor es opcional. En cambio, si la corriente de alimentación es rica en CH<sub>4</sub>, entonces se realiza el proceso de reforming, donde el CO<sub>2</sub> y el vapor alimentan al reactor. Ambas reacciones, de reforming u oxidación parcial, se producen en presencia de catalizadores en condiciones de reacción comunes para producir una corriente de CO e hidrógeno como salida.

Sin embargo, el hidrógeno generado con cualquiera de los dos métodos, oxidación parcial o reforming, será insuficiente para satisfacer las necesidades requeridas para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

Una alternativa para producir más hidrógeno es hacer reaccionar en otro reactor la corriente con CO, producto de cualquiera de las dos reacciones, con vapor a una temperatura alrededor de 800 °C, produciéndose la siguiente reacción (WGS):

#### **Ecuación 11. Reacción de conversión (WGS)**



De forma que, se obtiene una corriente con una fracción alta de hidrógeno, una fracción menor de CO y pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> y agua.

A continuación, esta corriente se enfría hasta, aproximadamente, temperatura ambiente y se recircula, mezclándose con el gas antes de entrar en la unidad de eliminación de CO<sub>2</sub>, y así proporcionando la composición de hidrógeno necesaria para ajustar correctamente la relación R.

#### **6.1.4 Síntesis de CH<sub>3</sub>OH**

La fracción más ligera que se ha separado en el sistema de purificación y separación criogénica de gases, compuesta por CO y H<sub>2</sub>, constituye una porción sustancial del gas de alimentación al bucle de síntesis de CH<sub>3</sub>OH. Esta corriente de gas puro se dirige a la unidad de dosificación de syngas, donde la relación de concentración de CO:H<sub>2</sub> puede ser monitoreada para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> que debe desviarse del sistema de recuperación de CO<sub>2</sub> para mezclarse con ella. En general, es deseable proporcionar el gas de alimentación próximo a la mezcla estequiométrica con un ligero exceso de hidrógeno y aproximadamente un 12% en volumen de CO<sub>2</sub><sup>27</sup>.

Entonces, una vez que la alimentación de syngas se haya mezclado con el CO<sub>2</sub> proveniente de la unidad de separación de CO<sub>2</sub>, se ajusta a las proporciones deseadas y se comprime y precalienta hasta una temperatura y presión alrededor de 160 °C y 56 bar<sup>30</sup>, respectivamente, y se lleva desde la unidad de dosificación hasta el reactor del bucle de síntesis de CH<sub>3</sub>OH.

El CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> reaccionan exotérmicamente en presencia de un catalizador, donde el exceso de calor que se genera durante la reacción es disipado mediante agua. Se supone que las reacciones que ocurren en el reactor del bucle de síntesis de CH<sub>3</sub>OH, de donde se obtiene CH<sub>3</sub>OH del syngas, son las siguientes:

**Ecuación 12. Reacciones del bucle de síntesis de CH<sub>3</sub>OH<sup>32</sup>**



El CH<sub>3</sub>OH debe ser purificado para poder utilizarlo como combustible. Entonces, el CH<sub>3</sub>OH se enfría hasta 30 °C y lleva a dos torres de separación flash, donde se retiran los gases de combustión, que se pueden enviar a una caldera para producir vapor, y se obtiene CH<sub>3</sub>OH.

## **6.2 Cálculos**

Para determinar si la planta descrita previamente es viable, se estima que fue diseñada para producir CH<sub>3</sub>OH obtenido de la conversión de desechos mediante cuatro bloques operativos principales, que son:

1. Gasificador.
2. Unidad de separación de aire (ASU) y compresores.
3. Unidad de purificación y acondicionamiento del syngas.
4. Unidad de síntesis y purificación de CH<sub>3</sub>OH.

En primer lugar, se calcula la cantidad de CH<sub>3</sub>OH producida cada año a partir de la siguiente ecuación teniendo en cuenta la cantidad de residuos urbanos recogidos en Canarias (Tabla 1) y su composición (Figura 3), donde se observa que el 77% de estos residuos se corresponden con la fracción orgánica, papel, cartón, residuos vegetales, plásticos, madera y textil, y, por tanto, es la fracción que alimenta el proceso, así como suponiendo una eficiencia del proceso del 70%.

**Ecuación 13. Cálculo de la cantidad de CH<sub>3</sub>OH producida/año**

$$Eficiencia\ teórica = \frac{CH_3OH\ producido}{RSU\ alimentado}$$

**Tabla 11. Parámetros utilizados para calcular la cantidad de CH<sub>3</sub>OH producida/año**

<b>Cantidad total de residuos (t/año)</b>	1,33·10 <sup>6</sup>
<b>Fracción reciclable</b>	0,77
<b>Eficiencia del proceso</b>	0,7

Una vez se ha obtenido la cantidad de CH<sub>3</sub>OH producido al año, se calculan los beneficios de la venta de CH<sub>3</sub>OH considerando su precio, 260€ por tonelada en 2020<sup>33</sup>.

**Tabla 12. Beneficios por año**

<b>Cantidad de CH<sub>3</sub>OH producido (t/año)</b>	7,18·10 <sup>5</sup>
<b>Beneficios (€/año)</b>	1,87·10 <sup>8</sup>

A continuación, se procede a calcular la inversión en bienes de capital, denominada como CAPEX (capital expenditure). El parámetro CAPEX, que representa el costo de capital total, consiste en los costos directos e indirectos descritos con el porcentaje del costo del equipo comprado. Se ha calculado multiplicando el coste del equipo (DEL) (Tabla 9) por las proporciones basadas en el costo unitario para una planta de procesamiento sólido-líquido determinadas por Peters et al., (1968)<sup>34</sup>.

**Tabla 13. Valor del equipo (DEL)**

<b>Valor del equipo (DEL)</b>	<b>€<sub>2017</sub></b>
<b>Gasificador</b>	2,50·10 <sup>7</sup>
<b>ASU, compresores</b>	1,20·10 <sup>7</sup>
<b>Purificación y acondicionamiento de syngas</b>	7,00·10 <sup>6</sup>
<b>Síntesis de CH<sub>3</sub>OH y purificación</b>	1,00·10 <sup>7</sup>
<b>Total, €<sub>2017</sub></b>	5,40·10 <sup>7</sup>
<b>Total, €<sub>2019</sub></b>	5,78·10 <sup>7</sup>

Fuente:<sup>35</sup>

Como se observa, los costes mostrados en la tabla anterior se han actualizado del año 2017 al año 2019. Para ello, se ha utilizado la siguiente ecuación<sup>36</sup>:



**Ecuación 14. Actualización de costes**

$$C_{real} = C_{referencia} \cdot \frac{I_{real}}{I_{referencia}}$$

Donde  $I_{real}$  e  $I_{referencia}$  son los índices de costos para una planta de ingeniería química, también denominados Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), que son publicados mensualmente en Chemical Engineering Magazine<sup>37</sup>. Todos los índices utilizados para actualizar los precios se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 14. Índices CEPCI**

Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)	
2010	550,8
2015	556,8
2016	541,7
2017	567,5
2018	603,1
2019	607,5

Finalmente, los cálculos para el CAPEX quedan reflejados en la siguiente tabla:

**Tabla 15. Cálculo de CAPEX**

Costes directos	Factor	€ <sub>2019</sub>
Valor del equipo DEL	100	5,78·10 <sup>7</sup>
Instalación del equipo	39	2,25·10 <sup>7</sup>
Instrumentación	13	7,51·10 <sup>6</sup>
Tubería	31	1,79·10 <sup>7</sup>
Electricidad	10	5,78·10 <sup>6</sup>
Edificios (incluidos servicios)	29	1,68·10 <sup>7</sup>
Mejoras en el terreno	10	5,78·10 <sup>6</sup>
Servicios instalados	55	3,18·10 <sup>7</sup>
Terreno	6	3,47·10 <sup>6</sup>
<b>Total costes directos</b>	<b>293</b>	<b>1,69·10<sup>8</sup></b>

Costes indirectos	Factor	€ <sub>2019</sub>
Ingeniería y Supervisión	32	1,85·10 <sup>7</sup>
Gastos de construcción	34	1,97·10 <sup>7</sup>
<b>Total gastos</b>	<b>359</b>	<b>2,08·10<sup>8</sup></b>

Costes directos e indirectos	Factor	€ <sub>2019</sub>
Tasas del contratista	18	1,04·10 <sup>7</sup>
Contingencia	36	2,08·10 <sup>7</sup>

	Factor	€ <sub>2019</sub>
<b>Capital fijo (FCI)</b>	Factor (Total gastos + Tasas del contratista + Contingencia) = 413	2,39·10 <sup>8</sup>
<b>Capital circulante (alrededor de un 15% del capital fijo)</b>	74	4,28·10 <sup>7</sup>
<b>Capital total = CAPEX</b>	Factor (FCI + Capital circulante) = 487	2,82·10 <sup>8</sup>

Seguidamente, se calcula el OPEX. El OPEX representa el costo total de fabricación, que incluye los costos operativos diarios incurridos una vez que la planta está en funcionamiento. Consta de costos directos de fabricación, costos indirectos de fabricación y gastos generales. Los costos directos de fabricación incluyen los costos de materias primas, servicios públicos, mantenimientos y reparaciones, los costos relacionados con la mano de obra operativa, patentes y regalías, mientras que los costos indirectos de fabricación consisten en supervisión, gastos de construcción, gastos legales, seguros y depreciación, y finalmente, los gastos generales constan de costos administrativos, costos de distribución y venta y los relacionados con la investigación y el desarrollo. El OPEX se calcula utilizando los factores establecidos por Turton et al., (2008)<sup>38</sup>.

Para calcular el OPEX, es necesario previamente obtener los costes de servicios, materias primas y mano de obra, actualizados al año 2019. Esto queda expresado a continuación. Se ha utilizado una conversión de 0,92€/€.

**Tabla 16. Coste de servicios**

Servicios	Cantidad necesaria	Precio (\$ <sub>2010</sub> )	Coste (\$ <sub>2010</sub> / t CH <sub>3</sub> OH)	Coste (€ <sub>2019</sub> / año)
<b>Electricidad</b>	0,137 MWh / t CH <sub>3</sub> OH	0,06 \$/kWh	8,22	5,98·10 <sup>6</sup>
<b>Agua</b>	90 t H <sub>2</sub> O / t CH <sub>3</sub> OH	14,8 \$/1000 m <sup>3</sup>	90	6,55·10 <sup>7</sup>

Fuente<sup>39</sup>

Se obtiene un coste de servicios de 7,15·10<sup>7</sup> € al año.

**Tabla 17. Coste de materias primas**

Materias primas	Cantidad necesaria	Precio	Coste (\$ <sub>2019</sub> / t RSU)	Coste (€ <sub>2019</sub> / año)
Agente gasificante: O <sub>2</sub>	0,4 t O <sub>2</sub> / t RSU (1)	100 \$2013 / t O <sub>2</sub>	40,59	4,16·10 <sup>7</sup>
CO <sub>2</sub>	60% del agente gasificante (2)	50 \$2008 / t CO <sub>2</sub>	12,18	1,25·10 <sup>6</sup>

Fuentes (1)<sup>40</sup>, (2)<sup>41</sup>

Se ha calculado que el precio de las materias primas equivale a 5,41·10<sup>7</sup> €/año.

La mano de obra se calcula según el Método de Wessell, multiplicando la mano de obra por el sueldo y el número de turnos. La expresión es la siguiente:

**Ecuación 15. Ecuación de Wessell**

$$\frac{H - h}{\text{tonelada de producto}} = t \cdot \frac{N}{Q^{0,76}}$$

Siendo:

- N: número de etapas funcionales.
- t: factor de automatización, el cual en este caso al ser un proceso altamente automatizado es igual a 10.
- Q: toneladas de alimentación por día.
- H-h: hombre-hora.

Se considera un funcionamiento de la planta de 8400 horas al año. Se obtiene que los costes de la mano de obra ascienden a 6,12·10<sup>6</sup> €/año.

**Tabla 18. Costes de la mano de obra**

<b>N</b>	4
<b>T</b>	10
<b>Q (t/d)</b>	2928,6
<b>H-h / t producto</b>	0,09
<b>Nº turnos</b>	4,0
<b>Sueldo trabajador/hora (€/h)</b>	23,0

Por lo tanto, se calcula el OPEX a partir de los factores establecidos por *Turton et al.*, (2008)<sup>42</sup>, teniendo en cuenta que el coste de capital fijo (FCI) ha sido hallado previamente.

**Tabla 19. Cálculo de OPEX**

<b>1. Costes directos de fabricación</b>	<b>Factor</b>	<b>€<sub>2019</sub></b>
Materias Primas	100%	$5,41 \cdot 10^7$
Tratamiento de efluentes	100%	0
Servicios	100%	$7,15 \cdot 10^7$
Mano de obra (COL)	100%	$6,12 \cdot 10^7$
Mano de obra de supervisión	18% COL	$1,10 \cdot 10^6$
Mantenimiento	6% FCI	$1,43 \cdot 10^7$
Suministros	0,9% FCI	$2,15 \cdot 10^6$
Cargas de laboratorio	15% COL	$9,19 \cdot 10^5$
Royalties	0%	0
	<b>TOTAL</b>	$1,50 \cdot 10^8$

<b>2. Costes fijos de fabricación</b>	<b>Factor</b>	<b>€<sub>2019</sub></b>
Amortizaciones	10% FCI	$2,39 \cdot 10^7$
Impuestos	3,2% COL	$1,96 \cdot 10^5$
Gastos generales de producción	70,8% COL + 3,6% FCI	$1,29 \cdot 10^7$
	<b>TOTAL</b>	$3,70 \cdot 10^7$

<b>3. Coste generales de fabricación</b>	<b>Factor</b>	<b>€<sub>2019</sub></b>
Costes de administración	17,7% COL + 0,9% FCI	$3,23 \cdot 10^6$
Gastos de distribución	0%	0
Gastos de investigación y desarrollo	0%	0
	<b>TOTAL</b>	$3,23 \cdot 10^6$

<b>Coste total de producción, OPEX (€<sub>2019</sub>)</b>	$1,90 \cdot 10^8$
---	-------------------

Los indicadores económicos elegidos para evaluar la viabilidad del proyecto fue el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Rendimiento (TIR) y el período de recuperación o payback period (PP). El proyecto se considera viable si el VPN es mayor que cero y el PP tiene un valor inferior aceptable en comparación la vida útil prevista para la planta, que en el caso actual se supuso que era  $t = 20$  años<sup>43</sup>. El VPN se calcula según la siguiente expresión:

### Ecuación 16. Ecuación del Valor Presente Neto

$$VPN = \sum_{i=1}^t \left( \frac{CF_i}{(1+d)^i} \right) - CapEx$$

En esta fórmula,  $CF_i$  es el flujo de efectivo reportado para el año  $i$  a lo largo de la vida útil de la planta, es decir, es la diferencia entre ganancias y gastos en el año  $i$ , y  $d$  es la tasa de descuento, que se ha establecido al 6%<sup>44</sup>.

Por otro lado, la TIR se calculó teniendo en cuenta que es la tasa de descuento la que hace que el VPN sea igual a cero. Se utiliza cuando es necesario elegir el mejor proyecto entre varias alternativas consideradas viables, puesto que un resultado con un valor más alto indica que la alternativa bajo análisis genera los mejores resultados económicos para los inversores. Mientras que PP corresponde al año en que el flujo de efectivo acumulado para el año  $n$  es mayor que cero, es decir, es el año que se recupera la inversión.

### 6.3 Resultados

**Tabla 20. Resultados del análisis económico**

Parámetro	Valor
<b>Beneficios (€/año)</b>	$1,87 \cdot 10^8$
<b>CAPEX (€)</b>	$2,82 \cdot 10^8$
<b>OPEX (€/año)</b>	$1,90 \cdot 10^8$
<b>VPN (€)</b>	$3,89 \cdot 10^{10}$
<b>TIR (%)</b>	33,80%
<b>PP (año)</b>	6

La Tabla 20 presenta los principales resultados obtenidos para el estudio económico sobre la implementación de una unidad de gasificación en las Islas Canarias. Para una instalación que recibe más de un millón de toneladas al año de desechos, donde alrededor del 77% tiene el potencial de ser utilizado para obtener CH<sub>3</sub>OH, y operando durante 8400 horas al año, el proyecto presenta una viabilidad económica adecuada.

El período de retorno de toda la inversión (PP) se calcula en 6 años. Este resultado es positivo ya que es mucho más bajo que la vida útil supuesta para la planta (20 años). El proyecto puede generar  $1,87 \cdot 10^8$  al año de beneficios y sus gastos son de  $2,82 \cdot 10^8$  € para CAPEX y  $1,90 \cdot 10^8$  €/año para OPEX.

Además, teniendo en cuenta que la conversión de desechos para generar energía o nuevos productos está ganando una atención creciente por parte de la comunidad científica y la sociedad, se espera que en los próximos años la viabilidad económica para la construcción de unidades de gasificación mejore debido a la creciente producción de desechos y la posible reducción en los costos de inversión para esta tecnología.

Por lo tanto, la implementación de unidades de gasificación a pequeña escala puede considerarse una opción viable para la valorización de los residuos municipales generados a nivel local, con posibles retornos de inversión si se considera la producción y venta de los productos o de la energía eléctrica obtenidos, al mismo tiempo que mitiga los problemas ambientales relacionados con el manejo inapropiado o la eliminación de desechos.

---

## **7-Conclusiones**

---

## **7. Conclusiones**

1. Due to the absence of more advanced techniques and the fact that landfills are the cheapest option, this is the prevalent waste treatment option in the Canary Islands. Since these do not provide any type of economic benefit, valuing waste through a WtC process to obtain CH<sub>3</sub>OH is a way to solve the problem of deficient waste management in the Canary Islands.
2. Manufacturing CH<sub>3</sub>OH using MSW as raw material reduces GHG emissions by 40% compared to the traditional route, fossil fuels.
3. The WtC process has advantages over the WtE, since, when it comes to obtaining benefits, it depends less on fluctuations in demand, it allows operating at a pseudo-constant capacity and emissions are lower.
4. Waste in the Canary Islands contains a fraction with high calorific value, so it is preferable that they are treated by a thermal process, where gasification stands out, considered the most effective way to use waste, taking into account the environmental impact and the economic inversion.
5. Apart from the gasification of MSW, the synthesis of CH<sub>3</sub>OH includes a series of steps that include cleaning and conditioning of the syngas, since, as it is obtained by gasification of heterogeneous waste, it does not meet the specifications for CH<sub>3</sub>OH synthesis.
6. In the field of gasification, it is generally advisable to use a fluidized bed gasifier that uses oxygen as gasifying agent, which allows obtaining a gas with higher energy quality, and steam, which ensures a higher conversion of carbon and the production of tars easier to reform catalytically, in order to avoid the presence of dilute nitrogen in the syngas. In addition, a mixture of the above agents can also be made with CO<sub>2</sub>, since it provides advantages to the system and, in addition, this is a product of gasification, so when it is reused in the process instead of being discharged into the atmosphere it has benefits from an environmental point of view (CCUU).
7. The study carried out at the end of the document shows favorable results for the implementation of a small-scale gasification plant in the Canary Islands: it can generate possible returns on investment while improving waste management.



1. Debido a la ausencia de técnicas más avanzadas y al hecho de que los vertederos son la opción más económica, esta es la opción de tratamiento de los residuos que prevalece en las Islas Canarias. Ya que estos no aportan ningún tipo de beneficio económico, valorizar los residuos mediante un proceso WtC para la obtención de CH<sub>3</sub>OH es una forma de solucionar el problema de la deficiente gestión de residuos en las Islas Canarias.
2. Fabricar CH<sub>3</sub>OH utilizando RSU como materia prima reduce las emisiones de GEI un 40% respecto a la vía tradicional, combustibles fósiles.
3. El proceso WtC presenta ventajas respecto al WtE, ya que, a la hora de obtener beneficios, depende menos de las fluctuaciones de la demanda, permite operar a una capacidad pseudo-constante y las emisiones son inferiores.
4. Los residuos en Canarias contienen una fracción con alto poder calorífico, por lo que es preferible que sean tratados mediante algún proceso térmico, donde destaca la gasificación, considerada como la vía más eficaz para el aprovechamiento de residuos teniendo en cuenta el impacto medioambiental y la inversión económica.
5. Aparte de la gasificación de RSU, la síntesis de CH<sub>3</sub>OH engloba una serie de etapas que incluyen la limpieza y el acondicionamiento del syngas, puesto que, al ser obtenido mediante la gasificación de residuos de naturaleza heterogénea, no cumple con las especificaciones para la síntesis de CH<sub>3</sub>OH.
6. En el campo de la gasificación, generalmente es conveniente utilizar un gasificador de lecho fluidizado que emplee como medios oxidantes oxígeno, que permite obtener un gas con mayor calidad energética, y vapor, que asegura una mayor conversión del carbono y la producción de alquitranes más fáciles de reformar catalíticamente, con el fin de evitar la presencia de nitrógeno diluido en el syngas. Además, también se puede realizar una mezcla de los agentes anteriores con CO<sub>2</sub>, puesto que aporta ventajas al sistema y, además, este es un producto de la gasificación, por lo que al reutilizarse en el proceso en lugar de descargarse a la atmósfera tiene beneficios desde el punto de vista medioambiental (CCUU).
7. El estudio realizado al final del documento muestra resultados favorables para la implementación de una planta de gasificación a pequeña escala en las Islas Canarias: puede generar posibles retornos de inversión al mismo tiempo que mejora la gestión de residuos.

---

## **8-Referencias**

---

## 8. Referencias

- <sup>1</sup> Cavdar K, Koroglu M, Akyildiz B (2016) Design and implementation of a smart solid waste collection system. *Int J Environ Sci Technol* 13(6):1553–1562.
- <sup>2</sup> Murray A, Skene K, Haynes K (2017) The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J Bus Ethics* 140(3):369-380.
- <sup>3</sup> Viegas S (2012) Caracterização e quantificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) e resíduos de construção e demolição (RCD). Dissertation, Universidade Católica Portuguesa.
- <sup>4</sup> Vecchi TPB, Surco DF, Constantino AA, Steiner MTA, Jorge LMM, Ravagnani MASS, Paraíso PR (2016) A sequential approach for the optimization of truck routes for solid waste collection. *Process Saf Environ* 102:238–250.
- <sup>5</sup> Malinauskaite J, Jouhara H, Czajczyńska D, Stanchev P, Katsou E, Rostkowski P, Thorne RJ, Colón J, Ponsá S, Al-Mansour F, Anguilano L, Krzyżyńska R, López IC, Vlasopoulos A, Spencer N (2017) Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy* 141:2013–2044.
- <sup>6</sup> Ng WPQ, Lam HL, Varbanov PS, Klemeš JJ (2014) Waste-to-energy (WTE) network synthesis for municipal solid waste (MSW). *Energ Convers Manag* 85:866–874.
- <sup>7</sup> Uche-Soria, M.; Rodríguez-Monroy, C. An Efficient Waste-To-Energy Model in Isolated Environments. Case Study: La Gomera (Canary Islands). *Sustainability* **2019**, *11*, 3198. <https://doi.org/10.3390/su11113198>
- <sup>8</sup> Smith, A.; Brown, K.; Ogilvie, S.; Rushton, K.; Bates, J. Waste Management Options and Climate Change, Final Report to the European Commission; European Commission and DG Environment: Brussels, Belgium, 2001.
- <sup>9</sup> Renou, S.; Givaudan, J.G.; Poulain, S.; Dirassouyan, F.; Moulin, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *J. Hazard. Mater* 2008, 150, 468–493. [CrossRef] [PubMed]

- 
- <sup>10</sup> Kuo JH, Tseng HH, Rao PS, Wey MY (2008) The prospect and development of incinerators for municipal solid waste treatment and characteristics of their pollutants in Taiwan. *Appl Therm Eng* 28:2305–2314.
- <sup>11</sup> Teixeira S, Monteiro E, Silva V, Rouboa A (2014) Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal. *Energ Pol* 71:159–168.
- <sup>12</sup> Manara P, Zabaniotou A (2012) Towards sewage sludge-based biofuels via thermochemical conversion—a review. *Renew Sustain Energy Rev* 16(5):2566–2582.
- <sup>13</sup> Lan P. Investigation of Hydrogen Production from Steam Reforming of Bio-oil and Catalytic Deactivation by Carbon Deposition, East China University of Science and Technology, East China University of Science and Technology; 2011. pp. 121
- <sup>14</sup> Bridgwater AV, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*. 1999; 30:1479-1493
- <sup>15</sup> Monarca D, Colantoni A, Cecchini M, Longo L, Vecchione L, Carlini M, Manzo A. (2012). Energy characterization and gasification of biomass derived by hazelnut cultivation: analysis of produced syngas by gas chromatography. *Math Probl Eng*.
- <sup>16</sup> S. Consonni, F. Viganò. Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: a comparative evaluation of two commercial technologies. *Waste Manag.*, 32 (4) (2012), pp. 653-666
- <sup>17</sup> Iaquaniello G, Centi G, Salladini A, et al. Waste-to-methanol: Process and economics assessment. *Bioresource Technology*. 2017
- <sup>18</sup> C. Aracil, P. Haro, J. Giuntoli, P. Ollero. Proving the climate benefit in the production of biofuels from municipal solid waste refuse in Europe. *J. Clean. Prod.*, 142 (2017), pp. 2887-2900.
- <sup>19</sup> Dalena F, Senatore A, Basile M, Knani S, Basile A, Iulianelli A (2018) Advances in methanol production and utilization, with particular emphasis toward hydrogen generation via membrane reactor technology.
- <sup>20</sup> Iaquaniello G, Centi G, Salladini A, et al. Waste-to-methanol: Process and economics assessment. *Bioresource Technology*. 2017

- 
- <sup>21</sup> M.A. Rosen, D.S. Scott. Energy and exergy analyses of a production process for methanol from natural gas. *Int. J. Hydrogen Energy*, 13 (1988), pp. 617-623.
- <sup>22</sup> M. Pérez-Fortes, J.C. Schöneberger, A. Boulamanti, E. Tzimas. Methanol synthesis using captured CO<sub>2</sub> as raw material: techno-economic and environmental assessment *Appl. Energy*, 161 (2016), pp. 718-732.
- <sup>23</sup> Chew T, Bhatia S (2008) Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery. *Bioresource Technol.* 99: 7911- 7922.
- <sup>24</sup> Arena, U., Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Management*, Volume 32, Issue 4, 2012, Pages 625-639, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>.
- <sup>25</sup> R.S. Norhasyima, T.M.I. Mahlia, Advances in CO<sub>2</sub> utilization technology: A patent landscape review, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, Volume 26, 2018, Pages 323-335, ISSN 2212-9820, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.05.022>.
- <sup>26</sup> Zdeb, J.; Howaniec, N.; Smoliński, A. Utilization of Carbon Dioxide in Coal Gasification—An Experimental Study. *Energies* 2019, 12, 140. <https://doi.org/10.3390/en12010140>
- <sup>27</sup> Funk, H. F. Solid waste refining and conversion to methanol. U.S. Patent 5,104,419, Apr. 14, 1991.
- <sup>28</sup> Xiang Luo, Tao Wu, Kaiqi Shi, Mingxuan Song and Yusen Rao (July 11th 2018). Biomass Gasification: An Overview of Technological Barriers and Socio-Environmental Impact, Gasification for Low-grade Feedstock, Yongseung Yun, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.74191. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/59423>
- <sup>29</sup> Minteer S (2006) *Alcoholic Fuels*. CRC. Boca Raton, FL, EEUU. 296 pp.
- <sup>30</sup> E. Antonetti, G. Iaquaniello, A. Salladini, L. Spadaccini, S. Perathoner, G. Centi. Waste-to-chemicals for a circular economy: the case of urea production (waste-to-urea). *ChemSusChem*, 10 (2017), pp. 912-920.
- <sup>31</sup> Speight J.G. *Handbook of Gasification Technology: Science, Processes, and Applications*. John Wiley and Sons. Apr 1, 2020

- 
- <sup>32</sup> Annarita Salladini, Emanuela Agostini, Alessia Borgogna, Luca Spadacini, Maria Cristina Annesini and Gaetano Iaquaniello (July 11th 2018). Analysis on High Temperature Gasification for Conversion of RDF into Bio-Methanol, Gasification for Low-grade Feedstock, Yongseung Yun, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.74218. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/60428>
- <sup>33</sup> Methanex Corporatin n.d. <https://www.methanex.com/our-business/pricing>
- <sup>34</sup> M.S. Peters, K.D. Timmerhaus, R.E. West, K. Timmerhaus, R. West. Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw-Hill, New York (1968).
- <sup>35</sup> Yongseung Yun. Gasification for Low-grade Feedstock. Institute for Advanced Engineering (2018).
- <sup>36</sup> Basu P (2013) Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction— practical design and theory, 2nd edn. Academic Press, New York
- <sup>37</sup> Chemical Engineering Online. <https://www.chemengonline.com/tag/cepci/>
- <sup>38</sup> R. Turton, RC Bailie, WB Whiting, JA Shaeiwitz. Análisis, síntesis y diseño de procesos químicos. Pearson Education (2008).
- <sup>39</sup> Mar Pérez-Fortes, Jan C. Schöneberger, Aikaterini Boulamantia, Evangelos Tzimas. Methanol synthesis using captured CO<sub>2</sub> as raw material: Techno-economic and environmental assessment s
- <sup>40</sup> Jinsong Zhou, Qing Chen, Hui Zhao, Xiaowei Cao, Qinfeng Mei, Zhongyang Luo, Kefa Cen. Biomass-oxygen Gasification in a High-Temperature Entrained-Flow Gasifier
- <sup>41</sup> Yongpan Chenga, Zhihao Thow, Chi-HwaWang. Biomass gasification with CO<sub>2</sub> in a fluidized bed
- <sup>42</sup> R. Turton, RC Bailie , WB Whiting , JA Shaeiwitz Análisis, síntesis y diseño de procesos químicos. Pearson Education (2008)
- <sup>43</sup> Luz FC, Rocha MH, Lora EES, Venturini OJ, Andrade RV, Leme MMV, Olmo OA (2015) Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. Energy Convers Manag 103:321–337. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>