

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA QUÍMICA

Especialización: Ingeniería de procesos



Departamento de Ingeniería Mecánica

***ANÁLISIS DE PROBLEMAS
OPERACIONALES EN TECNOLOGÍAS DE
GASIFICACIÓN EN LECHO FLUIDO DE
RESIDUOS POLIMÉRICOS***

Autor:

JOSÉ MANUEL LEÓN SANTOS

Directores:

**ANTONIA GIL
JAVIER PALLARÉS**

Ponente:

SERGIO ESPATOLERO

MAYO 2010



ANÁLISIS DE PROBLEMAS OPERACIONALES EN TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN EN LECHO FLUIDO DE RESIDUOS POLIMÉRICOS

RESUMEN

Los plásticos están presentes en todos los ámbitos de la sociedad. Debido a su gran producción y utilización, se generan una gran cantidad de residuos, con el correspondiente problema asociado, especialmente por su biodegradación lenta e impacto visual en vertederos. Por ello, es necesario el desarrollo de tratamientos que sean aceptables desde el punto de vista medioambiental y económico.

Dentro de las posibilidades que existen, destacan los tratamientos térmicos, y especialmente, la gasificación. La gasificación permite una reducción muy alta del volumen de residuos polímericos y la valorización de un residuo, que es rico en hidrógeno y carbono. El gas generado, conocido como gas de síntesis es susceptible de ser utilizado como materia prima en procesos químicos, tratamientos térmicos y energéticos. Además, la gasificación permite utilizar el gas posteriormente en tecnologías de combustión en motores de combustión interna alternativos y en gasificación integrada y ciclo combinado con elevada eficiencia.

Principalmente, los residuos plásticos no reciclables se destinan a vertederos, por lo que en la valorización de este tipo de residuos, los plásticos están acompañados por una gran heterogeneidad de compuestos. Esta heterogeneidad es problemática si contiene halógenos, metales pesados o alcalinos.

Por todo ello, se revisa numerosa bibliografía sobre el proceso de gasificación, principalmente de residuos plásticos, aunque también de biomasa y de co-gasificación con otros residuos. Todo ello, permite describir la tecnología incipiente de la gasificación de residuos plásticos, así como los parámetros más importantes observados para la obtención de un gas de calidad alta y limpio de contaminantes, que provocarían problemas de operación.

Los problemas operacionales son en gran parte el núcleo del proyecto y se observa que los alquitranes que se forman son el mayor inconveniente para su implementación industrial. La producción de un gas de síntesis de gran calidad está ligado a la descomposición de estos alquitranes, incrementándose los porcentajes de H₂ y CO.

Respecto a los problemas que pueden ocasionar las obstrucciones, se describen y se ofrecen soluciones aplicables tanto durante el proceso, además de medidas para detectarlas, como para evitar su aparición mediante una adecuada selección de parámetros.

Algunos contaminantes se arrastran con el gas de salida, por lo que se describen los equipos de limpieza que se consideran más eficientes.

Finalmente, los conocimientos desarrollados y adquiridos se aplican a un reactor experimental que se desarrollará en el grupo CIRCE, todo ello, teniendo en cuenta el residuo polimérico a valorizar, así como otras condiciones (equipos, complejidad, tiempo, coste). Se describen los parámetros operacionales recomendados y los equipos de limpieza.

Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
1.3 DISTRIBUCIÓN DEL PROYECTO	9
2. GASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS Y RESIDUOS	10
2.1 TERMOQUÍMICA DEL PROCESO	10
2.2 REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	13
3. PROBLEMAS OPERACIONALES.....	14
3.1 PRETRATAMIENTO PARA EL PROCESO DE GASIFICACIÓN	14
3.2 ALQUITRANES.....	16
3.2.1 <i>Temperatura y tiempo de residencia</i>	17
3.2.2 <i>Agente gasificantes</i>	18
3.2.3 <i>Material del lecho</i>	19
3.2.4 <i>Altura de lecho</i>	21
3.3 HALÓGENOS	22
3.4 ALCALINOS	22
3.5 METALES PESADOS	23
3.6 PROBLEMAS TÉCNICOS DE OBSTRUCCIONES	23
3.6.1 <i>Obstrucciones en la alimentación</i>	23
3.6.2 <i>Obstrucciones por los alquitranes</i>	24
3.6.3 <i>Obstrucciones debido a compuestos alcalinos</i>	24
3.6.4 <i>Medidas para detectar las obstrucciones</i>	25
3.6.5 <i>Estrategias post-obstrucción</i>	25
3.7 LIMPIEZA DEL GAS	26
3.7.1 <i>Ciclones y filtros</i>	26
3.7.2 <i>Separadores acuosos</i>	27
3.7.3 <i>Limpieza de alquitranes</i>	28
4. APLICACIÓN: REACTOR EXPERIMENTAL	30
4.1 DESCRIPCIÓN DEL REACTOR Y DE LOS RESIDUOS A TRATAR	30
4.2 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS.....	31
4.2.1 <i>Pretratamiento</i>	31
4.2.2 <i>Agente gasificante</i>	31
4.2.3 <i>Temperatura de operación</i>	32
4.2.4 <i>Ratio equivalente</i>	32
4.2.5 <i>Material de lecho</i>	33
4.3 SISTEMA DE LIMPIEZA	33
4.4 MODO DE OPERACIÓN: ARRANQUE, PARADA Y SEGURIDAD	34
5. CONCLUSIONES	35
ANEXOS	36
1. ANEXO PLÁSTICOS	37
1.1 EVOLUCIÓN DE LOS PLÁSTICOS.....	37
1.2 TIPOS DE PLÁSTICOS.....	39
1.3 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN	41
1.3.1 <i>Extrusión</i>	41
1.3.2 <i>Moldeo</i>	42
1.3.3 <i>Calandrado</i>	44
1.3.4 <i>Termoconformado</i>	45

1.3.5 <i>Aditivos para la transformación</i>	45
1.3.6 <i>Aditivos para el polímero</i>	46
1.4 APLICACIONES	46
1.4.1 <i>Envase y embalaje</i>	47
1.4.2 <i>Construcción</i>	47
1.4.3 <i>Transporte y Telecomunicaciones</i>	48
1.4.4 <i>Medicina</i>	48
1.4.5 <i>Electrónica</i>	49
1.4.6 <i>Agricultura</i>	49
1.5 RECICLAJE DE PLÁSTICOS. DIRECTIVA 2008/98/CE	50
2. ANEXO RECICLADO DE PLÁSTICOS.....	56
2.1 TIPOS DE RECICLAJE	56
2.1.1 <i>Reciclado primario: Re-uso</i>	56
2.1.2 <i>Reciclado secundario. Mecánico</i>	57
2.1.3 <i>Reciclado Químico</i>	58
2.1.4 <i>Valorización energética</i>	59
2.1.5 <i>Elección de la mejor técnica</i>	60
2.2 RECICLADO QUÍMICO	61
2.2.1 <i>Principales procesos existentes</i>	61
2.2.2 <i>Perspectiva actual del reciclado químico</i>	64
3. ANEXO GASIFICACIÓN.....	65
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES:.....	65
3.2 TERMOQUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	66
3.3 APLICACIÓN FINAL DEL GAS PRODUCIDO.....	69
3.3.1 <i>Fabricación de productos químicos</i> :	70
3.3.2 <i>Motores de combustión interna en motores</i>	70
3.3.3 <i>Calefacción directa</i>	70
3.3.4 <i>Ciclo integrado de electricidad y vapor</i>	70
3.3.5 <i>Ciclo combinado IGCC (Integrated gasification combined cycle)</i>	70
3.3.6 <i>Celdas de combustibles</i>	71
3.4 PLÁSTICOS MÁS ADECUADOS PARA EL RECICLAJE	71
3.5 GASIFICACIÓN	72
3.5.1 <i>Reactores de gasificación</i>	72
3.5.2 <i>Gasificadores de Lecho móvil</i>	75
3.5.3 <i>Lechos fluidizados</i>	79
3.5.4 <i>Elección del reactor</i>	87
3.6 PARAMETROS DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO	88
3.6.1 <i>Características del inerte</i>	88
3.6.2 <i>Agente gasificante empleado</i>	89
3.6.3 <i>Temperatura</i>	89
3.6.4 <i>Presión</i>	90
3.6.5 <i>Relación agente gasificante/residuo</i>	90
3.6.6 <i>Velocidad de fluidización</i>	91
4. ANEXO: REVISIÓN DE PLANTAS PILOTO	93
4.1 PLANTA PILOTO U.ARENA 2009.....	93
4.2 PLANTA PILOTO SANCHO 2008	95
4.3 PLANTA XIAO. 2006. AIR GASIFICATION	97
4.4 PLANTA XIAO RSU GASIFICATION	99
4.5 PLANTA GOMEZ 2008	100
4.6 PLANTA PILOTO PINTO	101
4.7 PLANTA PILOTO M.POHOELY	102
4.8 PLANTA TOSHIRO TSUJI 2008	103

Tabla de contenidos

4.9 PLANTA SHOJI 2000	106
5. ANEXO: RECICLADO DE LAS CENIZAS	108
6. BIBLIOGRAFÍA.....	109

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los plásticos juegan un papel fundamental en el desarrollo tecnológico. Una vez desechados, su destino final más habitual en Europa son los vertederos. Sin embargo, una nueva directiva prevé acabar con esta opción en los próximos años [1]. Por ello, es necesario desarrollar nuevas tecnologías en el reciclado, enfocadas a conseguir un desarrollo sostenible, medioambiental y económico.

Dentro de los posibles procesos de tratamiento, destaca la gasificación gracias a la combinación de flexibilidad, eficiencia, con un aceptable impacto medioambiental. Dentro de todas las tecnologías de gasificación de residuos existentes, la de reactores de lecho fluidizado es una de las de mayor potencial, debido a su gran flexibilidad operacional, así como al uso de diferentes agentes gasificantes, material de lecho, temperatura de operación, tiempo de residencia o a la posibilidad de utilizar catalizadores, entre otras [2-4]. El mayor problema a solventar para su desarrollo comercial, es la necesidad de limpiar el gas de salida para conseguir la calidad requerida [4, 5].

Durante la gasificación, alquitrances, metales pesados, halógenos y alcalinos, pueden ser liberados junto con el gas, causando problemas medioambientales y operacionales. Dentro de estos compuestos, la fracción de alquitrances es la más problemática ya que puede producir obstrucciones en el equipo, formación de aerosoles o polimerización de estructuras más complejas, causando problemas tanto en el equipo de gasificación como en los equipos posteriores en los que se use el gas de síntesis. Los metales pesados son tóxicos y bioacumulables si son liberados a la atmósfera, los halógenos son corrosivos y pueden causar lluvia ácida si son liberados al exterior y los alcalinos pueden crear problemas de obstrucción en el reactor de lecho fluidizado [6, 7].

El mercado de gasificadores con estaciones de limpieza de gases es muy limitado, por lo que el objetivo medioambiental y económico pasa por solventar los problemas asociados a estos contaminantes [8-10].

1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es profundizar en los procesos de gasificación dirigidos al reciclado de plásticos, revisando la tecnología existente e identificando los posibles problemas operacionales que pueden producirse, al aplicar la tecnología de gasificación de lecho fluidizado. Dentro de los problemas operacionales se describirán las condiciones de trabajo favorables con el fin de evitarlos, así como el efecto de los parámetros susceptibles de reducir los problemas descritos. Para terminar con el objetivo último de contribuir con el estudio, al desarrollo de un gasificador experimental de residuos plásticos. El proyecto contempla:

- Introducción a los plásticos y a su reciclado.
- Tipos de reciclado químico.
- Revisión de las tecnologías de reciclado existentes.

- Características del proceso de gasificación.
- Etapas y reacciones químicas del proceso de gasificación.
- Revisión de plantas piloto.
- Problemas operacionales del proceso de gasificación de plásticos.
- Evaluación de los problemas operacionales del proceso de gasificación de plásticos.
- Conclusiones y recomendaciones para el diseño de un gasificador experimental.

1.3 Distribución del proyecto

El proyecto consta de cinco partes en la memoria y cinco en los anexos. Dentro de la memoria, tras una introducción sobre la temática que se desarrolla en el presente proyecto, se introduce el proceso de gasificación para posteriormente, analizar los problemas operacionales en la gasificación de residuos poliméricos. Seguidamente, se apoya el desarrollo de un reactor experimental aplicando los parámetros estudiados que predicen unos resultados satisfactorios, evitándose los problemas descritos. Finalmente, se establecen las conclusiones del proyecto.

Dentro de los anexos, en la primera parte, se describen los plásticos comenzando por la clasificación de los polímeros, los procesos de transformación que existen, las aplicaciones de éstos y su reciclaje de acuerdo a la reciente directiva 2008/98/CE. En la segunda y tercera parte de los anexos, se encuentra la descripción de las posibilidades de reciclado de polímeros, su clasificación y dentro de estos tipos de reciclado, una extensa descripción del proceso de gasificación, proceso en el que se basa este proyecto. En la cuarta parte, se puede encontrar una revisión de plantas pilotos y en la quinta parte, se ha considerado enriquecedor adjuntar aplicaciones para las cenizas que se producen durante el proceso de gasificación.

2. GASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS Y RESIDUOS

La gasificación, por definición, es un proceso termoquímico que se produce en un ambiente pobre en oxígeno y que da como resultado un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante. La energía requerida para la gasificación puede ser suministrada por la combustión parcial del residuo y/o mediante un horno o intercambiador. El objetivo en el proceso de gasificación, es producir un gas útil y limpio. Simplificando el proceso con sus objetivos en una reacción, se obtiene:

- Residuo → Energía + Reducción de volumen

La temperatura del proceso puede variar, pero se fija una temperatura mínima de 700°C y máxima de 1100°C. La temperatura mínima, permite asegurar que el contenido de H₂ y CO sea elevado. Sin embargo, se debe fijar una temperatura máxima, evitándose la posible fusión y aglomeración de las cenizas, además de evitar un gasto energético excesivo en alcanzar la temperatura.

2.1 Termoquímica del proceso

En el proceso de gasificación, tienen lugar una gran variedad de reacciones que pueden agruparse en cuatro etapas:

- **Secado:** En esta etapa se produce la deshidratación del residuo. Es importante ya que la humedad en el residuo es uno de los problemas habituales en la alimentación, ocasionando la pérdida de eficiencia energética. Por ello, existen restricciones respecto al porcentaje de humedad permitido en el residuo plástico de alimentación (30%). Esta etapa se produce a una temperatura de 100-120°C.

- **Pirólisis** o descomposición térmica: La pirólisis se produce mediante calor; el residuo original se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. El sólido originado en esta etapa suele ser char (cadenas carbonosas) y los líquidos, están compuestos mayoritariamente por alquitrances (tars) y vapores condensables. Los productos obtenidos son función de la temperatura, de la presión y del gas que se piroliza.

De forma general: Plástico + Calor → Gases + Char + vapores-líquidos

Esta etapa se produce a una temperatura de 120-700°C. En la tabla 2.1 se muestran las reacciones que se producen en la pirólisis respecto a la temperatura que tienen lugar.

Temperatura (rango °C)	Reacción química
100-120	Deshidratación
250	Desoxigenación y desulfuración, dissociación molecular de agua y dióxido de carbono. Se libera sulfuro de hidrógeno.
340	Rotura de enlaces en compuestos alifáticos. Comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	Fase de carbonización. Concentración de carbón en los residuos.
400	Rotura de enlaces C-O y C-N.
400-600	Descomposición de los materiales bituminosos. Generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura.
600	Cracking de los materiales bituminosos. Generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos. (derivados del benceno)
>600	Dimerización de las olefinas (etileno) a butileno; reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Tabla 2.1: Rango de temperaturas y reacción que se produce [11].

- Oxidación: Esta etapa se produce cuando el agente gasificante es un oxidante como oxígeno o aire. Implica un conjunto de reacciones de oxidación, tanto homogéneas como heterogéneas, fundamentalmente exotérmicas, por lo que la temperatura aumenta (la temperatura oscila entre 700 y 1500°C). La oxidación es muy importante, ya que en ella se puede obtener el calor necesario para el resto de reacciones endotérmicas, pudiéndose conseguir que el proceso sea autotérmico. En dicha etapa, se producen reacciones irreversibles y muy exotérmicas de las cuales se obtiene la energía para llevar a cabo la evaporación del agua, la pirólisis y las reacciones endotérmicas. Dichas reacciones se detallan en la tabla 2.2.

Ecuación estequiométrica	ΔH_r^0 gas (kJ/mol)
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	-111
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	-242
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	-254
$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	-804
$C_nH_m + (n/2 + m/n) O_2 \rightarrow n CO + (m/2) H_2O$	<< 0

Tabla 2.2: Reacciones de oxidación [12].

- Gasificación: Es un proceso termoquímico que se produce en un ambiente en defecto de oxígeno, produciéndose un gas de síntesis, también llamado syngas, compuesto por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H), metano (CH₄), agua (H₂O), alquitrán y pequeñas cantidades de hidrocarburos (C_xH_y). En el proceso se producen reacciones sólido-gas y reacciones en fase gas a alta temperatura. Se trata de un gran número de reacciones endotérmicas en su mayoría, algunas de las cuales tienen lugar en muy poca extensión, como ocurre con las reacciones de hidrogenación y/o reformado. Dentro de la gasificación de las cadenas carbonosas (char), las reacciones de equilibrio más importantes se muestran en la tabla 2.3.

Reacción	Ecuación estequiométrica	ΔH (kJ/mol)
Reformado en seco	CH ₄ + CO ₂ <--> 2 CO + 2 H ₂	260
Bouduard	C + CO ₂ <--> 2 CO	168
Reformado de carbono	C + H ₂ O <--> CO + H ₂	136
	C + 2 H ₂ O <--> CO ₂ + 2 H ₂	103
Intercambio (Shift)	CO + H ₂ O --> CO ₂ + H ₂	-33
Metanación-hidrogasificación	C + 2 H ₂ --> CH ₄	-91
Metanación	CO ₂ + 4 H ₂ --> CH ₄ + 2 H ₂ O	-165
	CO + 3 H ₂ --> CH ₄ + H ₂ O	-206

Tabla 2.3: Reacciones de equilibrio de gasificación [12, 13].

Las reacciones de descomposición de los hidrocarburos en el gas se muestran en la tabla 2.4. Se toma como ejemplo de hidrocarburo, el tolueno (C₇H₈).

Reacción	Ecuación estequiométrica	ΔH (kJ/mol)
Reformado en seco	C ₇ H ₈ + 11 CO ₂ --> 18 CO + 4 H ₂ O	1236
	C ₇ H ₈ + 7 CO ₂ --> 14 CO + 4 H ₂	1105
Formación de carbono	C ₇ H ₈ --> 7 C + 4 H ₂	-73
Hidroalquilación	C ₇ H ₈ + H ₂ --> CH ₄ + C ₆ H ₆	-104
Hidrocraqueo	C ₇ H ₈ + 10 H ₂ --> 7 CH ₄	-713
Craqueo térmico	a C ₇ H ₈ --> b C _x H _y + c H ₂	<< 0

Tabla 2.4: Reacciones de descomposición de hidrocarburos [12,13].

Entre las reacciones de formación de contaminantes destacan la formación de amoníaco (NH_3) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S). En la tabla 2.5 se presentan las reacciones de formación.

Reacción	Ecuación estequiométrica	ΔH (kJ/mol)
Síntesis amoníaco	$\text{N}_2 + 3 \text{ H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{ NH}_3$	-112
	$\text{HCN} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{CO}$	-53
Síntesis de sulfuro de hidrógeno	$\text{COS} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$	-34

Tabla 2.5: Formación de contaminantes [12, 13].

2.2 Reactor de lecho fluidizado

Dentro de los posibles reactores, las dos grandes familias de gasificadores son los reactores de lecho móvil y los de lecho fluidizado. El reactor de lecho fluidizado se trata de un gasificador en el cual el sólido es mantenido en suspensión mediante el gas.

Una característica destacable de los lechos fluidizados es la intensa mezcla del sólido. Esta mezcla entre el sólido y el fluido permite tener coeficientes muy altos de transferencia de calor y de masa; facilitando que el conjunto del lecho sea prácticamente isotermo, incluso en reacciones muy exotérmicas. Así mismo, la agitación del sólido facilita la obtención de altos coeficientes de transferencia de calor entre el lecho y las superficies en contacto con el mismo, lo que permite retirar o aportar calor con facilidad. Por ello resultan especialmente adecuados para reacciones muy exotérmicas, o aquellas en que interese mantener un estricto control de la temperatura. Además, resulta una alternativa para el uso de partículas pequeñas, con las que un lecho fijo produciría una pérdida de carga inaceptable. En general, no se distinguen zonas diferenciadas de los procesos de secado, combustión, pirólisis y gasificación. Cada partícula, es sometida a estos procesos en cualquier punto del gasificador tras su entrada en él.

Estas características de elevada velocidad de reacción y excelente mezcla, permiten perfiles de temperatura y conversión uniformes a lo largo del reactor. Gracias a esta homogeneidad, las condiciones de operación pueden ser controladas. Ésta es también la causa de la alta capacidad específica (kg. de sólido/ m^3 de reactor) frente a otros tipos de reactores [14, 15].

3. PROBLEMAS OPERACIONALES

El proceso de gasificación es conocido desde los años ochenta en su aplicación de aprovechamiento térmico. Sin embargo, la generación de electricidad mediante la gasificación de residuos no está tan desarrollada. La eliminación de los contaminantes generados representa una barrera que implica la investigación en el desarrollo de tecnologías y técnicas fiables que permitan la eliminación de estos contaminantes a un precio competitivo, de no ser así, la implementación industrial será muy difícil.

La gasificación de residuos plásticos es problemática debido a la amplia heterogeneidad en los residuos alimentados, esta heterogeneidad, provoca la contaminación del gas de salida, problemas de obstrucciones, etc. Por ello, es necesario medidas que eviten los problemas asociados a contaminantes como alquitranes, metales pesados, halógenos o compuestos alcalinos, que causan problemas medioambientales y operacionales dentro del reactor y al ser liberados con el gas.

Actualmente el mercado de gasificadores no está desarrollado en su totalidad, por lo que no es suficiente limpiar el gas de salida mediante distintos sistemas acuosos, de filtros o captación de partículas, ya que se debe empezar por limitar la producción de los contaminantes. Estos contaminantes reducen la eficacia del proceso y la energía presente en el residuo al producir compuestos que deben ser eliminados. Esta limitación en la producción puede conseguirse modificando la temperatura de operación, el material de lecho, el agente gasificante, etc. Reduciendo la formación de compuestos indeseados. De este modo, se recortan gastos de limpieza, aumentándose la eficiencia del proceso.

Existen límites restrictivos de los contaminantes que puede contener el gas de síntesis. Los límites dependen del uso final del gas producido y tienen el fin de evitar problemas de obstrucción, principalmente, y otros problemas referidos a los requisitos de pureza, cuando el gas de síntesis tiene uso de materia prima para la síntesis de metanol, amoniaco o para su utilización en el proceso Fischer-Tropsch y su conversión a hidrocarburos o lubricantes.

La clave, debe ser conseguir una recuperación energética eficiente, medio ambiental y económica, de los residuos plásticos, superando los problemas asociados a los contaminantes mencionados.

3.1 Pretratamiento para el proceso de gasificación

Antes de introducir el residuo plástico en el reactor donde se llevará a cabo la gasificación, son necesarios algunos pretratamientos con el objeto de mejorar el propio proceso. Los pretratamientos más comunes, son la separación de materiales que pueden acompañar los residuos plásticos procedentes de vertederos (residuos de automóviles, madera, metales, etc.), la adecuación del tamaño de partícula mediante la molienda del residuo y finalmente, el secado, ya que el porcentaje de humedad del material a gasificar está limitado en el proceso de gasificación y se perdería eficiencia energética al tener que utilizar parte del calor en eliminar dicha humedad.

La presencia de compuestos inflamables no presenta problemas ya que el tiempo de residencia de los residuos es muy corto, unos segundos, por lo que no es necesario separarlos. Sin embargo, la presencia de estos compuestos se debe tener en cuenta para adecuar el ratio de reacción, consiguiéndose una gasificación favorable y completa [16, 17]. Dentro del pretratamiento, cabe destacar la molienda, siendo una etapa fundamental. Sin embargo, no es sencillo, los residuos plásticos son duros de trocear y/o secar ya que son materiales blandos y viscosos, con formas irregulares y un bajo punto de fusión.

El pretratamiento puede dividirse en un separador, una trituradora y un secador:

- **Separación:** En esta etapa se separan residuos de gran tamaño como metales (acero, aluminio...), madera y otros residuos no combustibles. Es necesario cuando la alimentación proviene de un vertedero municipal y a pesar de existir un proceso de separación en el origen, puede haber piezas de gran tamaño y de naturaleza distinta a la polimérica.
- **Molienda:** Esta etapa es fundamental, ya que el lecho debe contener partículas finas, aumentando la superficie activa, mejorando su eficacia. De este modo, el lecho se comporta como un cuerpo fluido permitiendo una alta transferencia de calor y masa, entre las partículas del material de lecho, el residuo plástico y el agente gasificante. La trituradora, trocea el residuo plástico mediante cuchillas o bolas y posteriormente, mediante una malla, se separa cuando el tamaño es el deseado. La elección del tamaño de partícula debe tener en cuenta la eficiencia de la gasificación así como la energía consumida por la trituradora, ya que se requiere mayor gasto energético cuando se precisa un tamaño menor.
- **Secado:** Esta etapa es utilizada si los plásticos contienen o pueden contener una cantidad excesiva de humedad. Si están relativamente secos se envían directamente de la trituradora al gasificador, sin pasar por el secador como se indica en el diagrama siguiente.

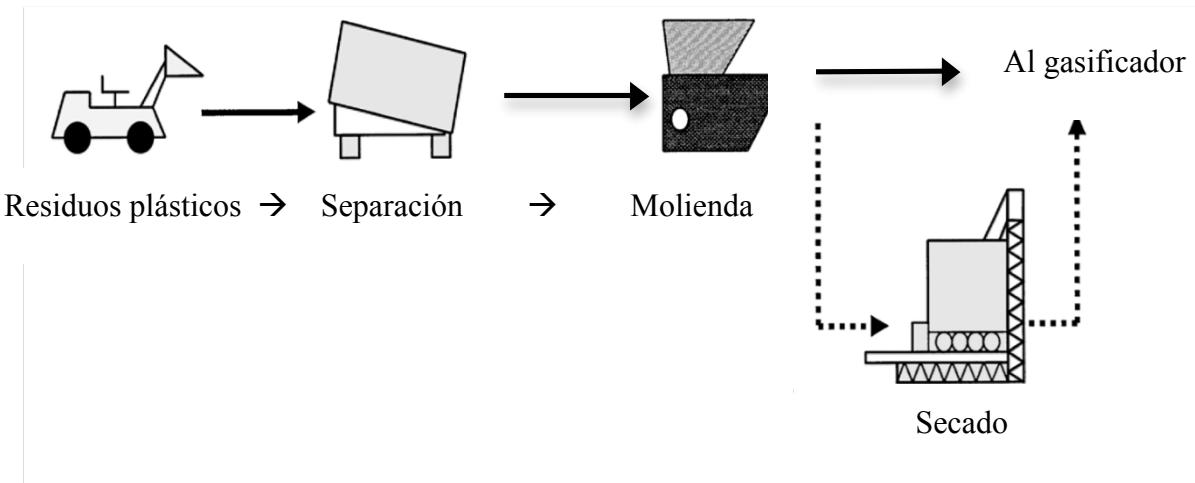


Figura 3.1: Pretratamiento al proceso de gasificación [18].

3.2 Alquitranes

Los alquitranes son compuestos orgánicos de carácter aromático que pueden ser compuestos aromáticos heterocíclicos, hidrocarburos aromáticos ligeros como benceno y tolueno, hidrocarburos poliaromáticos ligeros (PAH de dos a tres anillos) o hidrocarburos poliaromáticos pesados (PAH pesados de más de 3 anillos). La formación de estos compuestos depende de la temperatura alcanzada, tal y como se muestra en la tabla 3.1.

Temperatura	Compuesto
400 °C	Mezcla de productos oxigenados de la pirólisis
500 °C	Éteres fenólicos
600 °C	Éteres alquílicos
700 °C	Éteres heterocíclicos
800 °C	PAH
900 °C	PAH pesados

Tabla 3.1: Formación de alquitranes respecto a la temperatura [11].

Los alquitranes, pueden crear problemas de escorificación, polimerización de alquitranes, contaminación de la corriente de purificación o combustión de aerosoles, reduciendo la eficiencia global del proceso de gasificación. Estos problemas pueden requerir de reparaciones o paradas no programadas, las cuales incurrirían en un coste asociado. Además, la presencia de alquitrán limita o impide el uso del gas en motores de combustión interna o turbinas de gas para la generación de energía eléctrica. En la tabla 3.2 se enumeran los problemas causados, el equipo que se ve afectado, así como el efecto final producido.

Causa	Equipo afectado	Efecto - Problema
Escorificación	Evaporadores, metales y superficies refractarias	Deposición de alquitrán
	Reactor	Dificulta el reformado catalítico
	Sistema de limpieza	Inhabilitar el sistema de eliminación de sulfuros y filtros cerámicos.
Polimerización de alquitranes	Reactor	A elevadas temperaturas se produce la polimerización de los alquitranes generándose PAH de mayor peso molecular y en los casos extremos hollín.

Contaminación de la corriente de purificación	Sistema de limpieza acuoso	Si la limpieza del gas se realiza por vía húmeda se genera una corriente residual contaminada con los alquitranes que es necesario gestionar adecuadamente.
Combustión de aerosoles	Sistema de emisiones	La combustión de los alquitranes en forma de aerosol puede generar problemas de emisiones de PAH y formación de hollín.

Tabla 3.2: Problemas causados por alquitranes [19].

Debido a los problemas asociados, resulta necesario eliminar el alquitrán producido. La mayoría de los estudios se basan en limpiar el gas dentro del gasificador o en la corriente de salida. Las dos propuestas para eliminar los alquitranes del gas obtenido o al menos, para reducir la formación de alquitranes son:

Métodos primarios: Tratamiento dentro del gasificador.

En los métodos primarios se puede reducir fuertemente o incluso se podría eliminar la necesidad de limpiar el gas. Mediante la adecuada selección de los principales parámetros (temperatura, agente gasificante, altura de lecho, material de lecho), usando aditivos para el lecho, catalizando la reacción o modificando parámetros de diseño del gasificador previamente.

Métodos secundarios: Limpieza del gas post-gasificador.

Los métodos secundarios incluyen desde la descomposición térmica o catalítica de alquitrán hasta métodos mecánicos tales como el uso de ciclones, filtros cerámicos, filtros electrostáticos. Estos métodos son muy efectivos en la mayoría de los casos. Sin embargo, en los casos en los que se requiere un nivel muy bajo de alquitranes, estos métodos resultan muy complejos y no siempre económicamente viables ni aceptables.

Ambos métodos no son incompatibles, permitiendo la posibilidad de aplicar ambos métodos consiguiéndose porcentajes mínimos de alquitrán en el gas [5, 20].

A continuación, se desarrollan los parámetros que pueden ser modificados en el proceso de gasificación, con el fin de reducir el alquitrán producido y mejorar la gasificación del residuo plástico. Estos parámetros son: Temperatura, tiempo de residencia, agente gasificante, altura de lecho y material del lecho (inerte y catalizadores).

3.2.1 Temperatura y tiempo de residencia

La temperatura de reacción afecta notablemente al proceso de gasificación, ya que las reacciones que tienen lugar son mayoritariamente endotérmicas. El alquitrán no sólo se ve afectado en la cantidad que se forma, sino también en su composición como se ha visto en la tabla 3.1.

Al aumentar la temperatura disminuye la cantidad de alquitrán, tal como se indica en diversos estudios [21-23]. En dichos estudios también se observa que la variación de la temperatura afecta a la composición del “syngas”. Además de esta reducción del contenido de alquitrán, se aumenta la producción de hidrógeno, hecho positivo ya que es el compuesto básico del syngas junto con el monóxido de carbono [22]. La temperatura puede ser aumentada en el reactor y en el freeboard posterior al reactor, siendo preferible en el reactor al estar en contacto con el material de lecho.

Posteriormente, estudiándose la co-gasificación de carbón, biomasa y polietileno, se obtuvieron resultados similares, en los que un aumento de temperatura permitía la reacción más completa, formándose mayor porcentaje de hidrógeno y siendo las reacciones de hidrocarburos más completas [23]. Gracias a ello, se conseguía una reducción de hidrocarburos en el gas producido, aumentándose la calidad del gas de síntesis.

Otro parámetro de gran influencia, los agentes gasificantes, también se ven afectados por la temperatura. El efecto del vapor de agua como agente gasificante, mejora a mayor temperatura ya que el número de radicales de hidrógeno (H) es mayor. Los radicales libres de H pueden estabilizar las cadenas alifáticas que formarán el gas de flujo, estas cadenas son preferibles a las aromáticas, ya que son menos complejas, más fáciles de descomponerse y producen menos productos condensables, por lo que al igual que ocurre al estabilizar los alquitrances intermedios, se reduce la fracción condensable.

Se observa en la bibliografía estudiada que existe una correlación entre los resultados obtenidos en la gasificación de la biomasa y en la gasificación de residuos plásticos, respecto al efecto de la temperatura y el contenido de alquitrán [24]. En el anexo de revisión de plantas piloto, se confirma esta relación en los experimentos realizados ya que a mayor temperatura en el gasificador, mayor disminución del contenido de alquitrán en el gas producido y mayor rendimiento a gas de síntesis.

Respecto a la influencia del tiempo de residencia, una disminución en la velocidad del gas (aumenta el tiempo de residencia) reduce la cantidad de alquitrán producida [25]. Esto fue observado también por Kinoshita [27] y Corella [26] entre otros.

3.2.2 Agente gasificantes

La flexibilidad del proceso de gasificación permite utilizar distintos agentes gasificantes. Los agentes más estudiados son: el aire, vapor de agua y vapor-aire [28]. La elección del agente afecta a la selectividad de las reacciones de gasificación y por tanto al contenido de alquitrán en el gas.

Aire: el rendimiento a alquitrán decrece cuando la relación estequiométrica (RE) aumenta, esto ocurre como consecuencia de aumentar la cantidad de oxígeno que puede reaccionar con los volátiles en la zona de pirólisis. Este aumento de oxígeno también favorece la cantidad de carbón convertida, mientras que la energía química transferida del combustible al syngas permanece inalterada. Del mismo modo, analizando los compuestos CH_4 y C_2H_m que pueden formar alquitrances, se obtiene que a medida que aumentan estos compuestos, también aumenta el contenido de alquitrances, por ello se demuestra un paralelismo entre estos compuestos y el alquitrán formado. Se debe

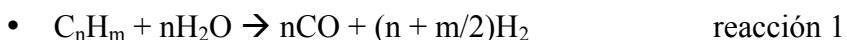
aumentar la conversión del carbón para evitar estos compuestos. Este agente no tiene riesgos asociados a su manejo y sus costes no son elevados, por lo que es el más utilizado. El gas obtenido, no es susceptible de ser transportado por su bajo poder calorífico, pero puede usarse en aplicaciones térmicas o energéticas.

Oxígeno: Operar con oxígeno supone aumentar en gran medida el poder calorífico del gas de salida, ya que no se diluye con nitrógeno. El calor generado por su presencia en la oxidación parcial, permite cubrir las necesidades energéticas de las reacciones endotérmicas. Además, operando con oxígeno, se consigue una gran conversión al gas, por lo que la formación de alquitrán se reduce.

Hidrógeno: Se produce un gas de alto contenido energético, que por tener altos porcentajes de metano y olefinas, puede utilizarse como sustituto de gas natural. Sin embargo, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es recomendable como gasificador en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación, como por ejemplo para una pila de combustible.

Vapor de agua: Se requiere diseños de equipos más complejos para suministrar el calor necesario para los procesos endotérmicos de gasificación. El vapor de agua, aporta radicales de hidrógeno que favorece la disminución de alquitrán. Además, el aporte de oxígeno favorece la autotermicidad del proceso. Sin embargo, este aporte de oxígeno favorece la producción de CO₂ en vez de CO, que es junto con el hidrógeno, producto básico del gas de síntesis [4].

Vapor de agua y aire: En la combinación del vapor de agua con aire, se consigue reducir el contenido de alquitrán [Arena 2009]. Este efecto se debe a la reacción de reformado con vapor de hidrocarburos pesados:



La cantidad de carbón convertida en syngas también se ve incrementada, así como la energía química del combustible transferida al gas de síntesis. La combinación de aire y vapor consigue buenos resultados, especialmente cuando el uso final se basa en la calidad del gas de síntesis.

3.2.3 Material del lecho

El contenido de alquitrán, puede disminuirse mediante el craqueo térmico como se ha visto en el punto 3.2.1, pero también puede producirse por craqueo catalítico. Esta actividad catalítica se consigue utilizando catalizadores como material de lecho, en vez del material “inerte” habitual, la arena de sílice.

El craqueo catalítico permite la conversión de los alquitrances a compuestos más ligeros. Este craqueo puede simplificarse del siguiente modo:

- El CH₄ y otros hidrocarburos se absorben en el catalizador donde tiene lugar la deshidrogenación. El H₂O también se absorbe, produciéndose el desprendimiento de radicales OH⁻ que van a la superficie del catalizador. A la temperatura adecuada, estos radicales migran a la parte metálica del catalizador, produciéndose la oxidación de los hidrocarburos intermedios a CO y H₂ [29].

La ventaja de este tipo de craqueo, es que puede producirse a temperatura menor que el craqueo térmico, entre 600-850 °C frente a 900-1250 °C necesarios en el térmico. Esta temperatura más baja no sólo permite reducir costes energéticos, sino también costes en los materiales de fabricación del reactor.

Potencialmente, el craqueo catalítico proporciona el método más simple y efectivo de la eliminación del alquitrán, a la vez que se retiene el calor sensible requerido para su uso eficiente en aplicaciones posteriores del gas de síntesis [30].

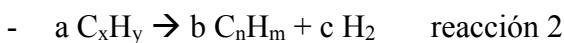
Dentro de los catalizadores naturales, destacan la dolomita y la olivina. A priori, el más prometedor es la olivina $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$. Aunque la dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ también ha sido utilizada en numerosos estudios [24, 31, 32]. Los dos materiales han sido utilizados satisfactoriamente en la gasificación de la biomasa y por ello, actualmente se investigan en la gasificación de residuos plásticos. En los estudios citados se obtiene un gas de síntesis con un contenido en alquitrán despreciable o muy pequeño.

Dolomita: El uso de dolomita con polipropileno como residuo plástico ha sido satisfactorio en la eliminación de alquitranes [31]. Usando este aditivo en un 30% en el lecho (30/70 dolomita-arena de sílice) se ha conseguido reducir un 92% el contenido de alquitranes respecto a un lecho 100% inerte. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados en la reducción del contenido de alquitrán, la dolomita tiene problemas asociados; al ser muy blanda, se erosiona fácilmente, por lo que muchas partículas, son arrastradas en el gas de salida; además, el uso de dolomita produce alquitrán con un tamaño pequeño ($dp < 50\mu\text{m}$), dichas partículas pueden escapar a la acción separadora de los ciclones, encontrándose en el gas de salida. Si al problema del tamaño de partícula, se suman la fácil erosión de la dolomita, la posible condensación del agua en algunos intercambiadores de calor y las obstrucciones en varios puntos de la instalación, parece clara la necesidad de buscar soluciones o una alternativa que evite estos problemas.

Olivina: Es una alternativa como catalizador a la dolomita, ya que, al ser más dura (6.5 en la escala Mohs frente a 3,5-4 en la escala Mohs que muestra la dolomita) su desgaste es mucho menor. Esta disminución en el desgaste, favorece que tras el gasificador se recojan menos partículas, entre cuatro a seis veces menos que con dolomita [31].

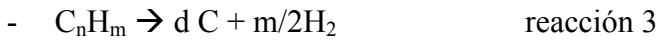
Respecto a su eficacia catalizando la gasificación, son numerosos estudios los que avalan la eficacia de la olivina en la gasificación [24, 33; 34]. El contenido en magnesio y el hierro presente en la olivina, catalizan las reacciones de descomposición, que al ser endotérmicas, permiten estabilizar la temperatura de lecho entre 800°C-820°C, frente a los 900°C necesarios con dolomita.

El contenido de magnesio cataliza la deshidrogenación e isomerización de los hidrocarburos mediante el craqueo térmico:



siendo C_xH_y alquitrán.

El contenido en hierro de la olivina, activa las reacciones de descomposición/carbonización endotérmicas del alquitrán:



siendo C_nH_m hidrocarburos menores que alquitrán.

En un estudio de lecho de olivina con alimentación de polietileno, se consigue reducir del 85% a prácticamente el 100% la producción de alquitrán, en condiciones de calcinación más largas con aire, se obtiene una actividad catalítica mayor de la olivina [19]. Además, se consigue un rendimiento a gas de síntesis mayor. Sin embargo, si se compara con la dolomita y un lecho parcialmente de aditivo, habitualmente un 30 %, y el resto de arena de silice, los resultados son favorables a la dolomita, reduciéndose un 94% el contenido de alquitrán a la salida del reactor frente al 40% que consigue la olivina, por lo que los resultados tan positivos comentados anteriormente se basan en un 100% de lecho de olivina. Utilizando el 100 % de olivina también se mejora el rendimiento a H_2 debido a la descomposición del alquitrán.

El uso de olivina permite una conversión de carbono más alta, obteniéndose en el gas producido, un porcentaje alto del hidrógeno contenido en el residuo plástico. Esta conversión del carbono favorece la reacción de Boudouard e incrementa notablemente el contenido de CO. Pero no todo son ventajas, el carbono puede recubrir las partículas del lecho, desactivando poco a poco, la actividad catalítica de la olivina. Sin embargo, numerosos estudios reportan una actividad catalítica larga, llegando incluso a 45 horas continuas sin desactivación [35]. Una solución para este problema de enmascaramiento, es un cambio continuo del lecho cuando se determina que se está perdiendo actividad catalítica, extrayendo catalizador usado y sustituyéndolo por catalizador fresco. Además, el catalizador retirado puede ser quemado en un regenerador externo como se realiza en procesos tan desarrollados como el craqueo fluidizado de combustibles o hidrocarburos (FCC) [24].

El uso de aditivos en el lecho, principalmente olivina y dolomita, permite conseguir rendimientos (conversión de carbón, reducción de alquitranes) mayores que los conseguidos con arena de sílice como material de lecho, por lo que la calidad del gas en la gasificación de plástico queda mejorada, quedando patente que modificar el material de lecho, es una línea de investigación muy prometedora y que arroja buenos resultados. Estos resultados son necesarios si se quiere implementar el proceso de gasificación para usar el gas producido cumpliendo las restricciones respecto al contenido de alquitranes principalmente [31, 36].

3.2.4 Altura de lecho

La altura de lecho ha sido analizada demostrándose que no es determinante, ya que no se consigue aumentar el volumen de zona de reacción eficaz [36]. Sin embargo, es conveniente colocar un espacio libre por encima del lecho, de altura suficiente para que los sólidos gruesos que se arrastran en la fluidización vuelvan al lecho y no sean arrastrados por la corriente gaseosa a equipos posteriores al espacio libre. Este espacio libre, es el ya mencionado freeboard. Para ello cabe señalar que el freeboard se debe

diseñar adecuadamente para que no se arrastren sólidos gruesos y que su altura y tamaño sea el necesario, ya que sino, se incurrirá en un coste mayor del necesario.

El diseño de altura del espacio libre se basa en el cálculo de la TDH (Transport disengaging height). Aumentando esta altura se reduce la concentración de sólidos y el arrastre de sólidos a la fase de limpieza; sin embargo, hay un límite en el que estos parámetros se hacen constantes y un aumento de altura sólo significaría un aumento en el coste sin resultados mejores. Por ello debe calcularse atendiendo a distintas correlaciones como las de: Geldart [37], Chase [38] o Smolders y Baeyens [39].

3.3 Halógenos

Cuando la materia prima utilizada es una mezcla de residuos plásticos municipales provenientes de RSU (Residuos sólidos urbanos), pueden existir pequeñas cantidades de varios halógenos. El mayor inconveniente surge del cloro, debido a la omnipresencia de la sal común y a los plásticos clorados. El cloro es el responsable de los mayores problemas de corrosión y contaminación en los gases residuales. Los halógenos forman radicales que pueden reaccionar con el hidrógeno formando, en el caso del cloro, ácido clorhídrico que deberá eliminarse. Estos compuestos se deben limpiar, de encontrarse en el gas de salida, siendo en ciertos casos inevitable como en la gasificación del PVC.

De forma general, los halógenos son corrosivos para los equipos y causan lluvia ácida si son liberados al medio ambiente, por lo que sus emisiones deben estar controladas, reduciéndose al máximo [18].

3.4 Alcalinos

Su presencia es debida a la mezcla de los plásticos con los residuos sólidos urbanos (RSU), pudiéndose encontrar también en el lecho de fluidización si se utilizan catalizadores de compuestos alcalinos. Estos compuestos crean problemas en turbinas de gas e incrementan las obstrucciones en reactores de lecho fluidizado, debido a la fundición de sus compuestos y el posterior taponamiento al solidificarse, por la disminución de la temperatura [6, 7].

La respuesta que se produce en el reactor es similar al efecto de reducir la temperatura, perdiendo conversión. Los compuestos alcalinos, principalmente de potasio (K) y sodio (Na), pueden ser una fuente de obstrucciones por la reacción en fase que puede producir compuestos de bajo punto de fusión. Estos compuestos se forman principalmente cuando el material de lecho es arena de sílice.

Además, el potasio (K), puede ser liberado del reactor en forma de cloruro potásico (KCl) cuando existe cloro en el sólido combustible. De no existir cloro, su destino puede ser convertirse en hidróxido, óxido o carbonato [40]. Se han detectado compuestos, en presencia de pequeñas cantidades de calcio (Ca), con un punto de temperatura eutéctico tan bajo como 770°C (para el compuesto K₂O-SiO₂). Cuando el compuesto es K₂O-CaO-SiO₂ esta temperatura es incluso menor [41]. Cuando se opera a temperaturas mayores, estos compuestos se fundirán provocando taponamientos.

En el supuesto de que no se pueda trabajar en ausencia de alcalinos, podemos usar alúmina (Al_2O_3). Este catalizador induciría a la formación de $\text{K}_2\text{O}\text{-}\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ que se trata de un compuesto eutéctico de mayor temperatura de fusión. Además de la alúmina, algunas reacciones sólido-gas pueden alterar la composición de las cenizas. Al añadir dióxido de sulfuro (SO_2) en la fase gas a baja temperatura ($<800^\circ\text{C}$), puede reaccionar con el potasio formando K_2SO_4 que tiene una temperatura mucho mayor que los compuestos eutécticos anteriores. La reacción producida responde a:



Por lo que reduciendo la presencia de KCl , se reduce también la deposición de estos compuestos en las partículas del lecho por condensación.

En el apartado de obstrucciones (3.6.3) se analiza las posibles aglomeraciones debido a compuestos alcalinos con más detalle.

3.5 Metales pesados

Los metales pesados se encuentran en los residuos plásticos si proceden de vertederos municipales. Una fuente importante son las pinturas. Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio (Hg), el plomo (Pb). A veces también se habla de contaminación por metales pesados incluyendo otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio (Be) o el aluminio (Al). Todos ellos, son tóxicos y bioacumulables si se liberan al medio ambiente. Sin embargo, los plásticos raramente contienen estos metales y además, de existir, quedarán depositados en las cenizas. El mayor inconveniente en la gasificación se produce al utilizar material de lecho catalítico (olivina, dolomita), ya que algunos metales pueden competir con los metales del catalizador enmascarándolos [19]. A pesar de ello, su problemática en las cenizas no será tratado en este proyecto, pero abre una línea de trabajo interesante.

3.6 Problemas técnicos de obstrucciones

A pesar de la amplia utilización de los lechos fluidizados, todavía existen dificultades técnicas cuando se quiere convertir combustibles sólidos. Las aglomeraciones provocan obstrucciones y representan el mayor problema, ya que pueden ocasionar paradas no programadas con un gran coste asociado.

Las obstrucciones son un problema conocido en la gasificación ya que los primeros estudios se remontan a los años setenta [42, 43]. Dichos estudios fueron pioneros y surgieron al detectar que la velocidad mínima de fluidización no seguía el valor teórico calculado por la ecuación de Ergun [44]. El fenómeno de la defluidización se ha seguido estudiando y debido a la prometedora técnica de la gasificación de plásticos, también se ha estudiado para gránulos de polietileno además de desarrollarse modelos de defluidización a alta temperatura [45, 46].

3.6.1 Obstrucciones en la alimentación

En la alimentación, debido a la naturaleza del proceso de extrusión y la técnica habitual del uso de tornillos sin fin para alimentar el residuo plástico al gasificador, puede producirse la fusión del plástico, produciéndose obstrucciones en el tornillo a la

entrada del reactor. Debido a la alta temperatura que se puede alcanzar, el residuo plástico, además, puede descomponerse pirolíticamente dando lugar a cadenas de alquitrances. Dichas cadenas de alquitrances formarían, junto con el plástico, la alimentación, por lo que la reducción de la formación de alquitrances se complicaría más ya que además de evitar la formación dentro del gasificador, se debería transformar el alquitrán introducido en la alimentación.

Medidas de prevención recomendadas:

- Añadir un intercambiador de calor, que retire calor del tornillo sin fin para evitar la descomposición térmica del residuo.
- Aumentar la velocidad del tornillo, para que el tiempo de residencia del residuo plástico sea el mínimo posible, siempre que el proceso de inyección del plástico al gasificador sea adecuado.

3.6.2 Obstrucciones por los alquitrances

Los compuestos más pesados de los alquitrances condensan en las superficies frías o forman aerosoles cuando se enfriá o se comprime el gas. La condensación de los alquitrances genera problemas de taponamiento y ensuciamiento generando paradas indeseadas de la instalación.

Esta mezcla compleja de un gran número de hidrocarburos condensables dificulta o impide el enfriamiento del gas, su filtración y su uso en motores o turbinas de gas.

Los alquitrances generan obstrucciones en los siguientes equipos de proceso:

- Intercambiadores de calor: Ensuciamiento de la superficie de intercambio de calor y formación de tapones
- Equipos de lavado: condensación en las partes frías formando tapones.
- Equipos de filtración: condensación a baja temperatura en la torta filtrante impidiendo su separación y/o taponamiento del medio filtrante.
- Motores de gas: formación de depósitos en la rampa de gas, compresor.
- Turbinas: formación de depósitos en el compresor, formación de hollín, etc.

3.6.3 Obstrucciones debido a compuestos alcalinos

Son aglomeraciones que se producen a alta temperatura dentro del lecho de fluidización. Su principal causa es la generación de cenizas con un punto de fusión bajo, debido a la reacción de los compuestos alcalinos con la arena de sílice del material del lecho.

Cuando el lecho fluidizado contiene arena de sílice como material de lecho, y en la alimentación existen compuestos alcalinos, pueden formarse silicatos a partir de los compuestos alcalinos y la sílice de la arena utilizada. Los silicatos, se caracterizan por tener un punto de fusión menor que los compuestos alcalinos individuales. Estos compuestos se caracterizan por tener la propiedad de ser adherentes, por lo que cuando se producen dentro del reactor, comienzan a cubrir la arena con una fina capa adhesiva. Estas partículas de arena comienzan a adherirse con otras formando partículas de tamaño mayor y creando problemas de aglomeraciones. Su tamaño crece ininterrumpidamente debido al choque continuo de los sólidos dentro del reactor de fluidización [47].

3.6.4 Medidas para detectar las obstrucciones

Existen actualmente medidas para detectar las aglomeraciones mientras el proceso está en curso.

Presión: Las medidas más frecuentes llevadas a cabo en los lechos fluidizados son las medias de presión tanto absoluta como diferencial. La medida de la presión nos permite obtener información sobre la densidad y el flujo global y local que se produce en el reactor. Mediante la pérdida de carga medida como diferencia de presión, podemos detectar aglomeraciones. Un aumento muy pronunciado indicaría una defluidización.

Emisiones acústicas: Son medidas de un amplio rango de frecuencias emitidas por el lecho fluidizado. Las frecuencias medidas no siempre son detectables por el oído humano. Estas medidas están todavía en desarrollo y en el futuro aspiran a ser un método para clasificar la fluidización y detectar aglomeraciones.

Temperatura: La temperatura es un parámetro que siempre se mide y nos aporta información sobre el grado de mezcla del lecho y de cómo de rápido las diferencias de temperatura locales son igualadas. Ésto nos permite detectar si existen aglomeraciones en el caso de que las temperaturas comiencen a igualarse más lentamente. Este hecho es provocado por un grado de mezcla menor, debido a aglomeraciones dentro del lecho fluidizado.

3.6.5 Estrategias post-obstrucción

Es recomendable tener un plan de actuación para solucionar principios de aglomeraciones, ya que si se ha de detener el proceso puede acarrear costes altos y perdida de combustible limpio, material de lecho, etc.

Reducción de temperatura: Una de las posibles soluciones es reducir la temperatura de operación por debajo de los puntos de fusión más relevantes [48]. Esta reducción puede realizarse mediante la disminución del ratio aire/fuel en el caso de aire como agente gasificante. No obstante, esta disminución es indeseable ya que produce conversiones menores de carbono y mayor concentración de alquitranes en el gas producido.

Aumento de la velocidad de gas: En plantas a escala de laboratorio se ha conseguido invertir aglomeraciones débiles o tendencias a la aglomeración, mediante el aumento de la velocidad del flujo de gas [49]. Se cree que este aumento de la velocidad del flujo puede romper pequeñas aglomeraciones o aumentar las fuerzas dentro de las partículas ocultando la formación de aglomeraciones. Esta medida no cuenta con el apoyo general de la bibliografía revisada ni es considerada como una de las mejores estrategias a seguir, por lo que no se recomienda utilizar excepto si el resto de estrategias no pueden realizarse.

Drenaje de lecho aglomerado: Podemos controlar el tamaño de partícula del lecho mediante la optimización del drenaje de material de lecho utilizado y la adición de nuevo material de lecho fresco, de partícula menor que el anterior, en el que se puede detectar un aumento de tamaño respecto al original y por tanto, el inicio de una tendencia a la aglomeración. Esta es una práctica frecuentemente aplicada en el proceso industrial [50].

3.7 Limpieza del gas

La limpieza del gas depende de la fuente de origen del residuo ya que de proceder de vertederos, por ejemplo, puede contener metales alcalinos o halógenos, por lo que la limpieza deberá ser más restrictiva. Si el diseño del freeboard ha sido insuficiente o erróneo, parte de los sólidos que son arrastrados a unos centímetros por encima del lecho no dispondrán de espacio suficiente para caer de nuevo al lecho por su propio peso y serán arrastrados con el gas.

3.7.1 Ciclones y filtros

El funcionamiento de un ciclón se basa en el aire o en la corriente gaseosa, entremezclada con el producto en suspensión, que al entrar tangencialmente en el ciclón es sometida a un movimiento circular. Dentro de este movimiento, las partículas más gruesas son obligadas, por el efecto de las fuerzas centrífugas creadas, a proyectarse contra las paredes y desprenderse hacia la salida inferior de descarga. El aire o los gases depurados salen por la parte superior del eje vertical, prácticamente libres de partículas. Algunas partículas ultrafinas o de muy bajo peso específico pueden ser arrastradas por la corriente de aire ascendente.

Los ciclones operan a alta temperatura, máxima 900 °C, para que no se depositen alquitrances y aceites, ya que son los primeros equipos tras el reactor y el gas puede contener estos compuestos [51].

El uso de ciclones es efectivo capturando partículas de gran tamaño, siendo los filtros de bolsas los más adecuados a la hora de eliminar partículas de tamaño pequeño como hollín. Los filtros cerámicos son una opción interesante ya que pueden ser colocados posteriormente al ciclón, debido a que pueden operar a la temperatura de salida de éste [52].

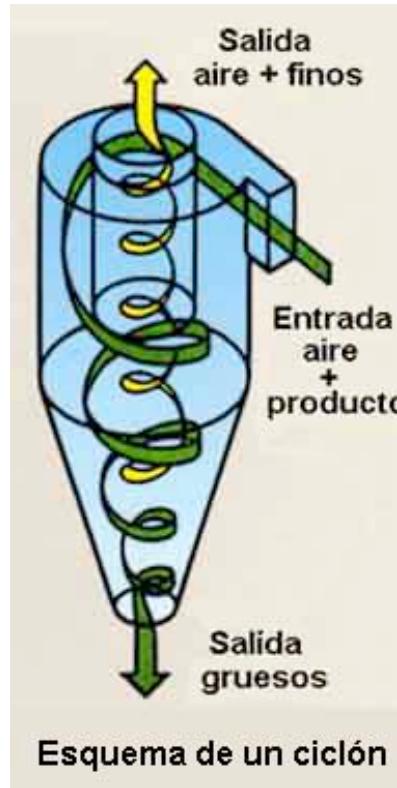


Figura 3.2: Esquema de un ciclón [53]

El carbón procedente de residuos plásticos es muy pequeño, por lo que si se utilizan filtros de bolsas a la salida del freeboard, no se consigue la captación necesaria, así que la disposición de los filtros de bolsas se hace posterior al ciclón.

Los filtros deben trabajar a temperaturas superiores al punto de rocío, de esta manera se evita la condensación de los alquitranes. En los filtros, se recogen principalmente partículas del gas no retenidas en los ciclones y char (sustancias carbonosas) que también retienen alquitranes por un proceso de adsorción.

El alquitrán y el polvo capturado, son transferidos de nuevo al gasificador, exceptuando el polvo de los filtros de bolsas. Todos los sólidos del filtro de bolsas que contienen HCl y metales pesados arrastrados, son tratados mediante separadores acuosos y posteriormente, el carbono limpio es reciclado al gasificador [18]

3.7.2 Separadores acuosos

Las partículas recogidas en los ciclones y filtros, se analizan permitiendo conocer los contaminantes presentes en los gases. El sulfuro de los residuos plásticos es transformado en H_2S , COS y CS_2 en atmósfera reductora. La mayor concentración corresponde a H_2S que es eliminado en un separador acuoso alcalino. Respecto al cloro, proveniente del policloruro de vinilo (PVC), es analizado como HCl, descomponiéndose rápidamente a $325^\circ C$ por lo que no es necesario tratarlo. El nitrógeno en forma de NH_3 y HCN son absorbidos también en el separador acuoso.

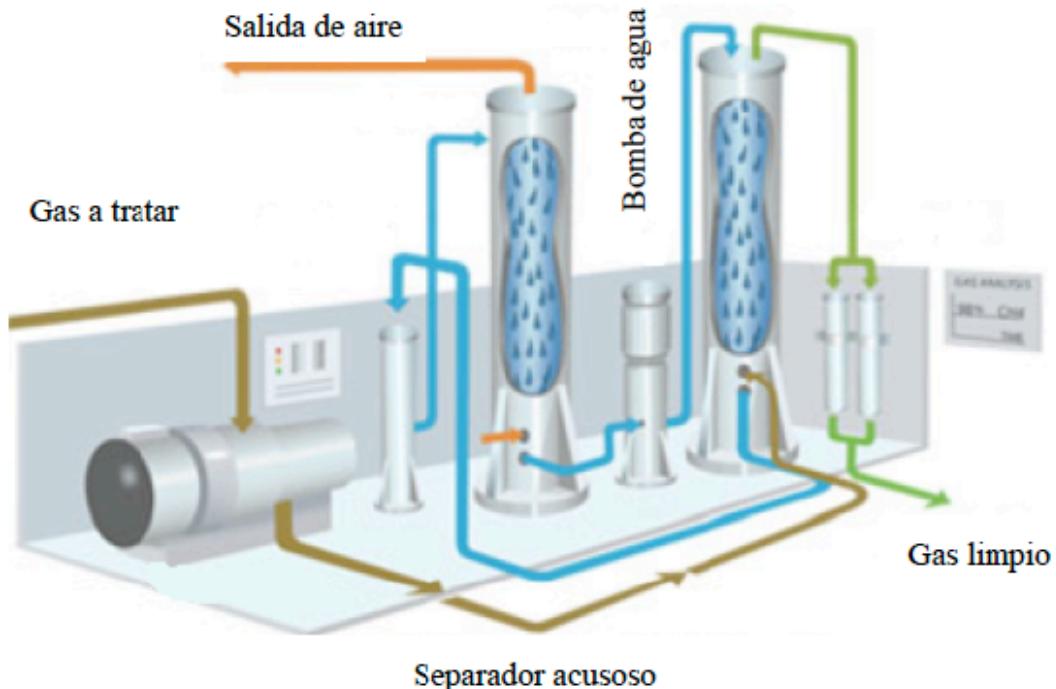


Figura 3.3: Esquema de un separador acuoso de gases [54].

En resumen, gracias al tratamiento de separación con agua, todos los contaminantes son eliminados mientras que el SO_2 y NO_2 se encuentran a niveles inferiores al límite de seguridad por lo que no necesitan tratamiento.

3.7.3 Limpieza de alquitranes

La limpieza de alquitranes se utiliza cuando el gas contiene alquitrán, que ocasiona un gas con una temperatura de rocío mayor de lo esperado. Esta temperatura ocasiona que se produzca la condensación a temperaturas superiores a las ambientales, causando problemas de condensación. Por ello, en la limpieza se debe tener en cuenta tanto el contenido como la temperatura de rocío del gas [55].

Lavador de gases o Scrubber: Son aparatos que depuran una corriente gaseosa mediante un líquido para eliminar partículas sólidas, líquidas y gases. El tipo más habitual es el lavador de venturi, que se diferencia al tener un estrechamiento en el medio que permite controlar la velocidad del gas y su caída de presión. Aumentar la caída de presión supone aumentar su eficacia aunque también se incurre en un gasto energético mayor. En la figura 3.4 se puede observar un scrubber típico en el cual se introduce el gas y el líquido por la misma zona, y en el que tras la separación de los sólidos formados mediante el movimiento ciclónico, el líquido junto con las partículas se depositan en el fondo, mientras que el gas limpido sale por la parte superior del cuerpo del lavador de gases.

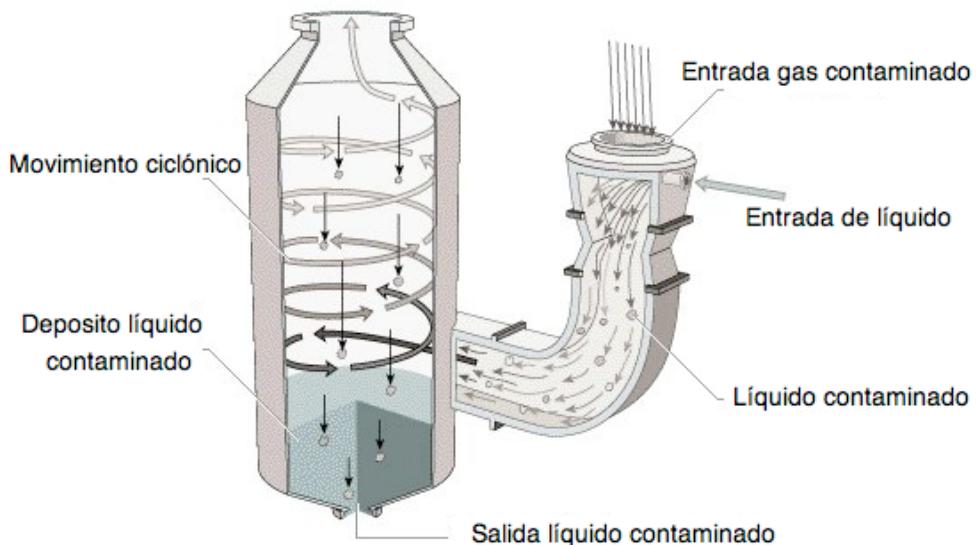


Figura 3.4: Esquema de un lavador de gases [54]

Tecnología OLGA: Su nombre proviene del acrónimo holandés de lavador de gases basado en aceite. Este proceso es un sistema diseñado para limpiar los alquitranes, siendo muy eficiente, operando por encima del punto de rocío. Se basa en un lavador multietapa con aceite, siendo este procedimiento costoso y complejo [55-57].

En la tabla 3.3 se muestran las ventajas e inconvenientes de los equipos anteriores.

Equipo	Ventajas	Inconvenientes
Ciclón	Coste bajo	Bajo rendimiento en partículas pesadas
	Funcionamiento a alta T ^a	Altos gastos de explotación
	Bajo mantenimiento	
Filtro	Funcionamiento a alta T ^a	Coste elevado
		Tecnología reciente
OLGA	Eficaz eliminando alquitrán	Coste elevado
		No asegura eliminar PAHs pesados
Lavadores	Permiten polvos inflamables o explosivos	Alto potencial de corrosión
	Permiten neblinas	Protección de solidificación
	Mantenimiento bajo	Tratamiento de agua y sólidos
	Diseño simple	
	Enfriamiento de los gases	

Tabla 3.3:Características de los equipos de limpieza [59, 60].

4. APLICACIÓN: REACTOR EXPERIMENTAL

El estudio bibliográfico realizado en el presente proyecto permite conocer la tecnología de gasificación. En los anexos se puede encontrar información sobre la tecnología de plásticos así como sus posibilidades de reciclado. En el apartado anterior se analizaron los problemas operacionales que se producen en el proceso de gasificación, por ello, se deben evitar condiciones o valores de parámetros que puedan provocar dichos problemas operacionales, disminuyendo el rendimiento del proceso. Con el conocimiento adquirido en este proyecto se ha considerado los parámetros recomendables para un reactor real de gasificación de lecho fluidizado a presión atmosférica.

4.1 Descripción del reactor y de los residuos a tratar

El reactor experimental objeto del estudio es un reactor de lecho fluidizado burbujeante atmosférico de 5 kW, para tratar residuos plásticos. Los residuos que serán alimentados serán polietileno (PE), polietileno mixto y polipropileno (PP).

Las dimensiones principales del reactor son:

- 0,50 m de altura de lecho + 1,30 m de altura de freeboard = Total 1,80 m
- 0,08 m de diámetro interno de lecho
- 0,12 m de diámetro interno del freeboard.



Figura 4.1: Reactor diseñado por CIRCE

La velocidad mínima de fluidización (parámetro de diseño) depende del diámetro de partícula y de la densidad de la partícula y del gas principalmente. Para el reactor experimental desde el grupo CIRCE se ha calculado la velocidad de fluidización, con un

valor de 0,25m/s. La temperatura de operación (facilitada) se encontrará en el intervalo de 750 °C-900 °C. Para alcanzar esta temperatura se dispondrá de dos hornos eléctricos. El primero se dispondrá en el lecho y el segundo en la parte superior, en el freeboard.

4.2 Selección de los parámetros

En la elección de los parámetros que pueden ofrecer un mejor rendimiento experimental, se ha prestado atención al tipo de agente gasificante, la temperatura de operación, el ratio aire/combustible y el material del lecho. Parámetros dependientes del diseño del reactor como la velocidad del gas o la altura de espacio libre no son discutidos, ya que dependen del diseño de reactor y cuyos valores se detallan en el apartado anterior.

4.2.1 Pretratamiento

El residuo debe ser tratado antes de ser introducido en el reactor para su gasificación. El tratamiento, depende del residuo y en qué estado se encuentre. En el caso de los residuos plásticos procedentes de vertedero, se debe efectuar una separación que permita desechar metales, maderas u otros residuos típicos de los residuos sólidos urbanos y que pueden acompañar a los residuos plásticos.

Posteriormente, el residuo debe triturarse. La trituración se puede llevar a cabo mediante equipos desarrollados específicamente para residuos plásticos, que además incluyen un equipo de secado y de separación, o bien, se puede utilizar una trituradora de molino de bolas. El tamaño deberá estar entre 500-1000 μm , pudiendo conseguirse mediante una trituradora de bolas y dos mallas, o tamizadora, que separen las partículas fuera del rango.

Para finalizar se procede al secado, cuando el residuo contenga humedad o supere el porcentaje máximo viable (30%) o el recomendado (20%), si no, tras el triturado, el residuo se envía directamente a la tolva de alimentación.

4.2.2 Agente gasificante

El agente gasificante dependerá del uso que se quiera para el gas producido. Respecto a los problemas operacionales descritos, el mayor inconveniente es la producción de alquitrán, sin embargo, esta producción puede ser minimizada mediante el material de lecho y la temperatura. De ser necesario un uso energético, el agente debe proporcionar un alto valor energético al gas, sin dilución por nitrógeno. Por lo que serían recomendables oxígeno o hidrógeno. Debido al alto coste y a las diversas aplicaciones del hidrógeno, es preferible el oxígeno. Como el uso en el reactor, será experimental, el coste de agentes gasificantes diferentes al aire, dificultaría su balance de coste, habiéndose creído más favorable incurrir en gastos de material de lecho que en el de agente gasificante.

- Oxígeno: Si el gas obtenido es objeto de ser utilizado en aplicaciones energéticas y/o gas de síntesis, por lo que debe tener un poder calorífico medio-alto. Utilizando oxígeno como agente gasificante se consigue un gas de poder calorífico de 15000 kJ/kg. Actualmente existen varias empresas que suministran botellas con gases comprimidos por lo que no es necesario adaptar al gasificador un costoso equipo para introducir oxígeno puro.

- Aire: Si el destino del gas obtenido es ser gas de síntesis u otra aplicación, como análisis en laboratorio, en la que no se necesite un poder calorífico alto, la opción más económica es la de utilizar aire como agente gasificante. El gas producido es un gas de bajo poder calorífico (5000-6000 kJ/kg). Este gas está diluido debido al contenido de nitrógeno en el aire, que disminuye el poder calorífico, de ahí su diferencia con el oxígeno.

4.2.3 Temperatura de operación

La temperatura de operación debe ser mayor que 700°C, para asegurar que se produce mayoritariamente gases ya que a temperaturas menores, las fracciones líquidas y sólidas aumentan. La temperatura máxima debe ser inferior a 1100°C, así se evitan problemas técnicos debido a fusión y aglomeración de las cenizas. Además, técnicamente 1100°C es la temperatura máxima de operación de los hornos típicos empleados. A una temperatura mayor se favorece el contenido de hidrógeno y monóxido de carbono.

La temperatura dependerá de la instalación, así como de los hornos encargados de suministrar la energía necesaria y de los balances de reacciones exotérmicas-endotérmicas. La zona de calentamiento se divide en tres zonas: lecho, freeboard y ciclón. La temperatura del lecho es la temperatura de operación del proceso mientras que la temperatura del freeboard permite romper algunas cadenas de alquitrán y mantener la temperatura a la salida del gas. La temperatura del ciclón debe ser superior a 360 °C para evitar la formación de condensados.

Una temperatura considerada para la aplicación al reactor real es 820°C, de este modo se asegura una conversión alta del residuo a gas y se limita la presencia de alquitrán a sus fracciones pesadas. A su vez, las cadenas inferiores son descompuestas, consiguiéndose un gas con alto contenido en hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO). (Esta temperatura se estabiliza debido a la olivina, que cataliza reacciones endotérmicas de descomposición.)

La temperatura puede medirse mediante termopares. Además de este modo, si se produce un aumento descontrolado en la temperatura, sin haber modificado ningún otro parámetro, es una señal de que el lecho se está aglomerando, por lo que se deberían tomar medidas para evitar una parada.

4.2.4 Ratio equivalente

El ratio equivalente es la relación real entre la cantidad de aire respecto la de combustible introducido respecto a la relación estequiométrica. Es interesante que esta relación sea suficiente para que el proceso sea autotérmico, autoabasteciéndose energéticamente mediante la oxidación parcial. El ratio óptimo se encuentra entre 0,2-0,4. Este ratio es determinante en la temperatura de operación. El valor recomendado es el máximo 0,4 en el caso de utilizar oxígeno como agente gasificante, ya que de utilizar aire, introducir mayor cantidad de aire incurría en una disolución del poder calorífico del gas de salida debido a la dilución con nitrógeno. La bibliografía sobre polipropileno y polietileno demuestra que a mayor ratio, mayor temperatura y se aumenta el contenido de gases y se disminuye el contenido de alquitrán y cadenas carbonosas. Además, la mayoría de las reacciones de gasificación son endotérmicas, por lo que están favorecidas a mayor temperatura. Como inconveniente, cabe destacar la disminución del poder calorífico del gas de salida.

4.2.5 Material de lecho

El material de lecho por excelencia en la gasificación es la arena de sílice, sin embargo, si el residuo que se va a tratar proviene de residuos urbanos, puede contener metales alcalinos y se pueden formar silicatos con temperaturas de fusión cercanas a 800°C. Este problema se agrava con el rendimiento a alquitrán, ya que el gas de salida típico contiene concentraciones de alquitrán superiores a los límites para cualquier aplicación, necesitando una limpieza exhaustiva del gas con el coste asociado.

A pesar de que en principio, el material alimentado no contiene metales ni halógenos, se recomienda utilizar olivina. De esta forma se consigue añadir flexibilidad al proceso, al permitir la posibilidad de tratar residuos plásticos de distintas procedencias. En el caso de que el residuo a gasificar contenga metales, éstos podrían competir con la actividad catalítica del hierro en la olivina, por lo que la dolomita tendría el mismo efecto que la olivina, ya que el hierro no sería eficaz.

De ser económicamente inviable, la segunda opción seleccionado se basaría en utilizar dolomita del 30% en el lecho y el resto de arena de sílice. Ya que entre un 30% de olivina y un 30% de dolomita, a precios similares, es más efectiva la dolomita. La posibilidad de un lecho 100% de dolomita no es contemplada ya que no produce cambios significativos respecto al lecho con un 30% del mismo material.

4.3 Sistema de limpieza

A la salida del reactor se deben utilizar dos ciclones de alta eficacia, asegurándose que se captan la mayor parte de las partículas sólidas liberadas. La temperatura de operación debe ser mayor de 360°C, para evitar que de existir fracciones condensables, condensen y obstruyan los ciclones. A la salida del segundo ciclón, el gas puede contener partículas muy finas. Estas partículas pueden eliminarse mediante un filtro cerámico. El filtro cerámico puede trabajar a la temperatura de salida del gas en el ciclón, por lo que puede situarse a continuación del ciclón. El mantenimiento de estos dos equipos es sencillo, ya que los finos del ciclón se recogen en un deposito y el elemento filtrante del filtro cerámico es sencillo y rápido de cambiar. Sin embargo, este filtro deberá valorarse in-situ, ya que dependiendo la cantidad de partículas finas, estas pueden ser retenidas en el filtro de algodón posterior, por lo que no sería necesario el filtro.

Tras el segundo ciclón y el filtro cerámico, se procederá a eliminar las fracciones condensables. El sistema de recogida de condensados elegido estará formado por piezas de vidrio, una boquilla, dos condensadores refrigerados por hielo y dos filtros. Los dos filtros serán uno de algodón y otro de celulosa. Al atravesar el gas la boquilla de vidrio, se retendrán los primeros compuestos de alquitrán. El gas saldrá a 0°C, por lo que el agua y los alquitranes quedarán condensados. Los condensados forman la fase líquida de los productos. El gas de salida pasará por un medidor de caudal y se tomará muestras para analizarlas mediante cromatografía. En el filtro de algodón, se retendrán las partículas más pequeñas arrastradas por la corriente gaseosa y el alquitrán que se encuentran en forma de aerosol.

La fracción sólida total (cenizas, materia lecho, residuo carbonoso...) será la suma de las cantidades recogidas en el lateral del reactor, el depósito de finos del ciclón y en el filtro de los condensados.

La fracción líquida se determina gravimétricamente. Tras añadir una cantidad de isopropanol, solvente recomendado, la mezcla se filtrará para eliminar y cuantificar los inertes no retenidos en los filtros. En el filtro se encuentra el residuo carbonoso. Parte del líquido debe someterse a una valoración para cuantificar el agua, a su vez los alquitrances condensados se obtienen por diferencia. Los alquitrances serán la suma de la parte de los condensados más los condensados de en la boquilla y en el filtro de algodón.

Si se trabaja con aire, como se recomienda, puede existir NH_3 . Se puede determinar mediante un método titulométrico, por ejemplo, usando ácido sulfúrico como titulante y rojo de metilo como indicador.

El gas de salida se quemará en una cámara de combustión con gas natural para facilitar el quemado, ya que al estar en un laboratorio será el mecanismo más sencillo.

4.4 Modo de operación: Arranque, parada y seguridad

Antes de comenzar a introducir el residuo, se deben alcanzar las condiciones de operación. De este modo, se evita perder residuo y sobrecargar los equipos de limpieza al operar en condiciones inferiores a las de operación.

La metodología propuesta consiste en calentar el reactor mediante los hornos debidamente acoplados, para minimizar la energía disipada. Una vez se empiece a calentar el reactor, el aire atravesará una resistencia eléctrica que lo caliente hasta 400°C para evitar perdidas de calor en el lecho. Posteriormente se introducirá en el gasificador para conseguir la fluidización del lecho y que la temperatura no cambie al introducir el residuo plástico a gasificar. Cuando la temperatura alcance 600°C se introducirá residuo de plástico para que mediante la combustión se alcance la temperatura de 820°C propuesta. Además, el material del lecho aumenta su actividad catalítica al calcinarse antes de llevarse a cabo la gasificación. El equipo de limpieza y de análisis también debe estar a punto cuando la reacción comience, por lo que el cromatógrafo deberá encenderse para que los gases alcancen la temperatura necesaria para el análisis.

Cuando la reacción ha terminado, se detendrá la alimentación de residuo plástico y se apagarán los hornos. El agente gasificante continuará pasando, ya que al ser aire, no se incurre en un gasto económico y se enfriará en un tiempo menor. Al acabar la reacción, el equipo de limpieza y análisis también debe limpiarse y apagarse.

Respecto a la seguridad concerniente al equipo y al laboratorio de trabajo, se recomienda instalar:

- Detectores de CO: Debido a la alta toxicidad, al sustituir la hemoglobina de la sangre pudiendo provocar la muerte, se recomienda instalar detectores de CO al ser un producto básico del gas de síntesis.
- Válvulas de seguridad: Para garantizar una presión adecuada y abrirse en el caso de superarse una presión dada.
- Válvulas de purga: Deben secundar a las de seguridad en el caso que estas puedan fallar.
- Válvulas antirretorno: Son necesarias en las líneas de gases calientes para evitar el retroceso del gas.

5. CONCLUSIONES

La gasificación de residuos plásticos, mediante lecho fluidizado, responde positivamente a las expectativas buscadas de valorizar un residuo tan importante en la actualidad como son los plásticos. Especialmente, se consigue gracias a la flexibilidad operacional que permite utilizar diferentes agentes gasificantes, materiales de lecho, temperaturas, relaciones de estequiométría, tiempos de residencia y el uso o no, de catalizadores. La problemática de contaminación del gas de salida, la baja calidad del gas de síntesis o la producción de fracciones condensables son objeto del proyecto y a continuación se procede a concluir los parámetros más representativos que se han observado, así como su relación con los problemas mencionados a lo largo del proyecto.

- La temperatura demuestra ser un parámetro esencial para eliminar fracciones de alquitrán, cuando es alta suministra energía a las reacciones endotérmicas de descomposición; obteniéndose a estas temperaturas, un gas de síntesis de gran calidad y con porcentajes altos de H₂ y CO. La estabilización de la temperatura depende del material del lecho catalítico que incide en la relación de las reacciones endotérmicas-exotérmicas.
- El material de lecho tiene una gran importancia en el proceso. Cuando se gasifican residuos plásticos con material catalítico, especialmente con olivina, se obtiene un gas de síntesis de calidad muy alta, con una producción de alquitrán prácticamente nula. La dolomita tiene menor actividad catalítica excepto cuando el residuo plástico contiene metales y otros contaminantes, que responde de forma similar.
- El agente gasificante influye en la calidad del gas obtenido, especialmente en el poder calorífico del gas. Sin embargo, también es uno de los mayores costes de operación, por lo que si se trata de eliminar alquitrán, que representa el mayor problema actualmente, se usará aire por su simplicidad y coste.
- El aumento del ratio equivalente en el proceso, aumenta la cantidad de oxígeno que puede reaccionar con los volátiles en la zona de pirólisis, por lo que se reduce la fracción de alquitrances, aunque trabajando con aire también se diluye el poder calorífico del gas al aumentar el nitrógeno presente en el gas de salida.
- El sistema de limpieza de gases es efectivo limpiando las partículas finas elutriadas, los contaminantes gasesosos y posteriormente las fracciones condensables que puedan acompañar al gas en la salida. De este modo, se consigue un gas libre de partículas y de fracciones condensables. Este gas puede ser utilizado sin dañar los equipos por corrosión, contaminantes u obstrucciones.