

1.1. Evolución histórica de los residuos sólidos urbanos y su tratamiento

Desde sus orígenes, el hombre ha utilizado los recursos naturales para asegurar su supervivencia y crear objetos que le ayudaran a prosperar dentro de un medio difícil y hostil. Entre estos recursos, los más importantes eran alimentos y madera que, en las primeras épocas, generaban unos restos que se integraban fácilmente en el medio sin afectarlo.

Con el paso del tiempo, la humanidad evolucionó de forma exponencial. Se produjo un gran crecimiento de los núcleos urbanos ligado a la extracción y transformación de elementos naturales. Se desarrolló la metalurgia, la alfarería y las incipientes producciones de productos químicos, como el yeso o la cal. Como consecuencia, en estas sociedades se comenzaron a tener dificultades para eliminar los residuos producidos, formándose así los primeros vertederos.

En la Edad Media, la mayoría de estos vertidos eran depositados en las mismas ciudades, lo que originaba problemas de roedores y pulgas, que proliferaban la transmisión de enfermedades como la peste bubónica. Hasta el siglo XVIII no se empiezan a crear medidas de control para la deposición de estos residuos urbanos como medida importante desde el punto de vista higiénico. De esta forma, se crearon redes de alcantarillado, cementerios y hospitales. Aunque la visión medioambiental estaba centrada en la salud de los ciudadanos.

Hasta la segunda mitad del siglo XX no se observan los residuos urbanos como un problema medioambiental de carácter ecológico a considerar. En esta sociedad, la composición de los residuos urbanos es completamente distinta a la de los siglos anteriores, al disminuir los residuos orgánicos de los alimentos y crecer los productos utilizados como envases, como el vidrio, el cartón y el plástico característicos de la sociedad de consumo actual.

En el marco del tratamiento de los residuos generados, hasta mediados del siglo pasado fue muy importante el aprovechamiento agrícola como fertilizante y el ganadero como alimento, ya que la mayor parte de los residuos eran orgánicos. En España, hasta 1945, no se empezaron a realizar controles a los vertederos, siendo habituales los vertidos incontrolados y los quemaderos. Finalmente, en los años 60 y 70, se crearon las primeras instalaciones de compostaje e incineración, iniciándose un panorama más próximo al actual. (1)

1.2. Clasificación y composición de los residuos sólidos urbanos

La ley 10/1998 define los residuos como cualquier sustancia cuyo poseedor se desprenda o tenga la obligación de desprenderse. Los residuos sólidos urbanos son una mezcla de residuos domésticos y comerciales, residuos institucionales, residuos de construcción y demolición, residuos de servicios municipales, residuos de plantas de tratamiento y otros residuos, derivados de actividades industriales y agropecuarias (2)

Características	% peso
Orgánicos	50
Papel y Cartón	19
Plásticos	12
Vidrio	8
Metales	4
Tierras, cenizas y otros	7

Tabla 1.1. Composición típica de los residuos sólidos urbanos en España (2)

Los residuos sólidos urbanos producidos pueden ser tratados para producir combustibles sólidos recuperados (SRF por sus siglas en inglés) y combustibles derivados de residuos (RDF en inglés). La diferencia entre ellos es que los SRF cumplen con la clasificación y especificaciones establecidas en la norma EN 15359 y los RDF no cumplen con ninguna norma o especificación, cumpliendo solo las establecidas por el usuario.

Para producir SRF o RDF se puede realizar lo siguiente:

- Eliminar los materiales inertes o incombustibles como arenas, gravas o vidrio.
- Eliminar productos que contentan un alto contenido en cloro como el PVC y metales pesados como el mercurio, ya que son residuos peligrosos.
- Eliminar metales férreos mediante un separador magnético.
- Eliminar metales no férricos como el aluminio de los envases.
- Realizar un secado para bajar la humedad de la mezcla.
- Realizar una trituración y acondicionamiento final de la densidad y peso específico de la muestra.

1.3. Gestión y tratamientos realizados a los residuos sólidos

Durante las últimas décadas se ha realizado un progreso importante en los sistemas de integración de la gestión de residuos. Los tratamientos térmicos, la deposición en vertederos, la reutilización mediante reciclaje o compostaje y las medidas de mitigación son elementos integrales del sistema. En particular, estas medidas están destinadas a la minimización de peligros para nuestra salud y el medio ambiente. (3)

En particular, los tratamientos térmicos como la incineración, la gasificación, la pirólisis, etc. Tienen como principales objetivos:

- Reducir el contenido total de materia orgánica.
- Destruir los contaminantes orgánicos.
- Facilitar la separación de contaminantes inorgánicos al concentrarlos.
- Reducir la masa y el volumen del residuo.
- La recuperación del contenido de energía del residuo en forma de productos con valor añadido, energía térmica o eléctrica.

La opción planteada en el proyecto se basa en la gasificación. Esta permite aprovechar la energía química transformando los sólidos en una mezcla gaseosa muy versátil en la valorización del residuo, permitiendo un considerable rendimiento eléctrico y un escaso impacto ambiental.

1.3.1. Gestión de residuos sólidos en España y Andalucía

En España, la importancia de la gestión de residuos ha sido clave en la última década. Esta legislación corresponde a las comunidades autónomas, que priorizan un tipo de gestión sobre otra, creando diferencias bastante notorias entre ellas. Según los datos del Eurostat, en España el destino de los residuos es principalmente a vertedero en más de un 50% seguido del compostaje, reciclaje e incineración.

Tratamientos de residuos en España

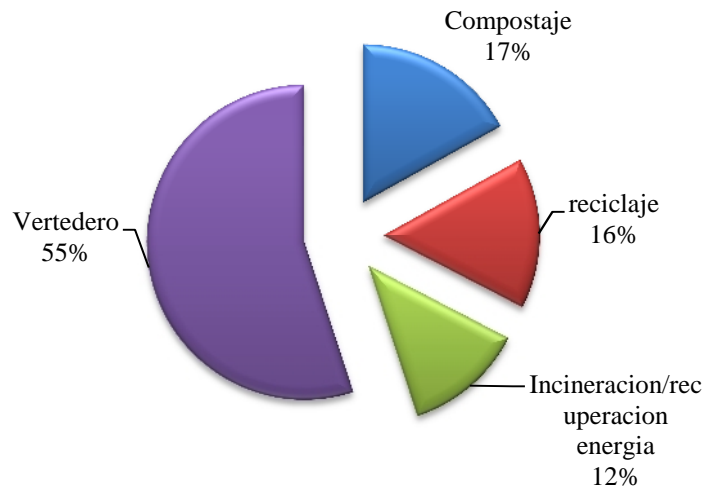


Figura 1.1. Tratamiento de residuos en España. (4)

En Andalucía, los residuos sólidos urbanos han sido destinados tradicionalmente a vertederos, priorizando la alternativa del compostaje, que genera un compost de baja calidad, o el reciclado. La incineración fue descartada debido a las emisiones de dioxinas y furanos derivadas de una mala práctica en su uso. Ya que la incineración no es el único método térmico existente, se está intentando introducir la gasificación como método de tratamiento de residuos sólidos más limpio que la incineración, y así aprovechar la energía térmica a la vez que se minimiza el volumen de residuos generado en la comunidad.

1.4. La gasificación de residuos sólidos urbanos

Es un proceso térmico que convierte, mediante la oxidación parcial del carbono a alta temperatura, una materia combustible sólida en un gas combustible de relativamente bajo poder calorífico. El producto es un gas formado por: H_2 , CO , CO_2 , N_2 , H_2O , CH_4 , hidrocarburos ligeros y pesados (alquitranes), polvo, y cantidades minoritarias de otros compuestos como el amoníaco, el H_2S y el HCl . La cantidad de estos compuestos en el gas, depende de la composición de la alimentación y de factores como son el tipo de gasificador o el agente gasificante. Aparte de los gases, se producen residuos sólidos que pueden ser tratados con métodos como la vitrificación.

Además de las ventajas incluidas en el anterior punto, la gasificación permite el uso del syngas generado lejos de su punto de producción a través de los gaseoductos.

Uno de los múltiples usos que puede tener el gas de gasificación es la producción eléctrica. Este tipo de procesos, del orden de producción de 2,5 MWe, carece del tamaño y de la composición que presentan los procesos clásicos existentes en los combustibles fósiles, lo que repercute en ser una tecnología menos rentable de cara la construcción y operación, pero con las ventajas de tener una materia prima prácticamente inagotable, aunque dispersa.

1.5. Limpieza de los gases de gasificación

Una vez son generados los gases de gasificación, existen compuestos no reutilizables o peligrosos que deben ser eliminados antes o después de su uso final, dependiendo de la facilidad con la que estos gases son abatidos o por requisitos del equipo. Entre los más importantes están los alquitranes, las dioxinas, los furanos, los metales pesados, el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno. Estos compuestos son tóxicos para los seres humanos, y no pueden llegar en concentraciones altas a equipos de producción eléctrica como un motor de combustión interna, ya que debido a su alta acidez son muy corrosivos o por los problemas de atascos que generarían. Por lo tanto, el propósito principal para la eliminación de estos compuestos es doble: purificar la corriente de syngas para aprovechar su potencial y controlar la emisión de contaminantes al aire.

Tipo de impureza	Eliminación de gases ácidos
Gases ácidos	Dióxido de carbono (CO ₂)
	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)
	Cloruro de hidrógeno (HCl)
Compuestos orgánicos sulfurados	sulfuro de carbonilo (COS)
	Mercaptano (RSH)
Otras impurezas	Agua (H ₂ O)
	Cianuro de hidrógeno (HCN)
	Amoníaco (NH ₃)
	Partículas
	Alquitranes
	Metales pesados
	Metales alcalinos
Dioxinas y furanos	

Tabla 1.2. Impurezas encontradas en el tratamiento de gases de gasificación de RSU (5)

Este trabajo se centrará en la eliminación, mediante absorción húmeda, de tres compuestos principalmente: el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno. Estos presentan

unas concentraciones distintas a los tradicionales de la industria del carbón y requieren un tratamiento especial.

Siendo el sulfuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno gases ácidos y el amoníaco un gas básico, los tratamientos destinados a separar estos compuestos son muy distintos.

En la industria, tradicionalmente, la separación de amoníaco y cloruro de hidrógeno ha sido realizada mediante absorción con agua por su alta solubilidad. Esto no ha evitado que existan alternativas que permiten su eliminación en otras condiciones como por ejemplo en seco. El caso del HCl es el más usual ya que, al ser un gas ácido, puede reaccionar químicamente con sólidos como el óxido de calcio, permitiendo evitar bajar la temperatura al rango de la operación de la absorción líquida. Para el amoníaco sigue siendo común utilizar agua si se deben absorber grandes cantidades, o lechos de carbón activo si existen trazas de amoníaco que hay que eliminar.

El caso del sulfuro de hidrógeno requiere un análisis separado para su abatimiento por su dificultad para absorberse en agua. Se han desarrollado numerosos métodos y demostrado comercialmente para la eliminación de este compuesto en la industria. Entre ellos están la absorción con aminas, la oxidación en seco, la adsorción, la absorción cáustica y la oxidación química.

Las aminas han sido utilizadas comercialmente desde los años 30 para la eliminación de gases ácidos como el CO₂ y el H₂S en gases procedentes de la gasificación de hidrocarburos. Estos procesos son regenerativos aplicando temperatura, limpiando la corriente de aminas y liberando los gases ácidos que pueden pasar a una etapa de proceso Claus u otro modo de neutralización del H₂S.

Las ventajas de trabajar con aminas son varias:

- Al ser un proceso regenerativo no es necesario la alimentación continua al proceso de materia prima para la eliminación de los gases contaminantes. Sólo es necesario el aporte de la amina degradada que hay que ir purgando del sistema.
- Es un proceso selectivo, por lo que es necesario un menor aporte de líquido absorbente para alcanzar un rendimiento parecido, lo que disminuye las necesidades de tamaño de la columna de absorción.

- Es un esquema utilizado ampliamente en la industria del carbón, por lo que no sería difícil encontrar suministradores de equipos destinados específicamente a este absorbente.

Por otra parte presenta una serie de inconvenientes:

- El líquido absorbente es caro.
- La necesidad de regeneración aumenta el coste de energía del proceso.
- El alto coste de inversión por el número de equipos de proceso provoca que sea poco rentable en plantas de pequeño tamaño.

La oxidación en seco o adsorción química es un proceso en desarrollo que previene el enfriamiento de los gases con la consecuente pérdida de exergía. Consiste en la utilización de ZnO/CuO para desulfurar la corriente a 400°C y posteriormente una etapa de regeneración oxidando con oxígeno a 600°C. Este gas producido puede ser utilizado en un proceso Claus para producir sulfuro elemental.

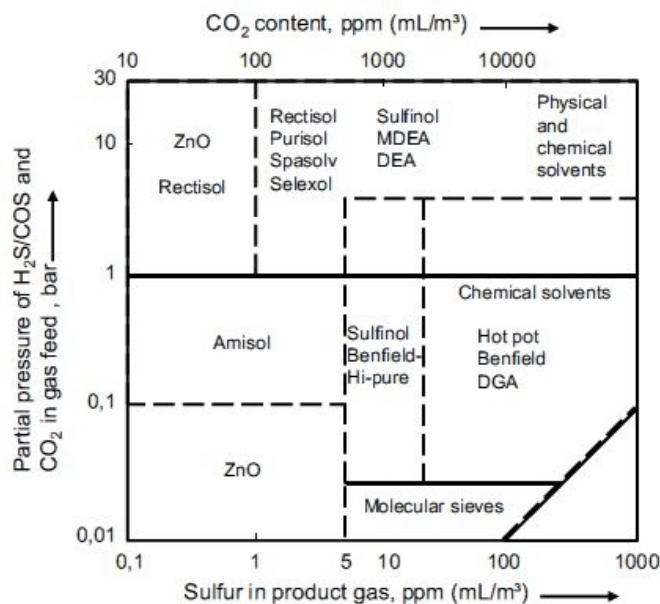


Figura 1.2. Selección del método de eliminación de una mezcla H₂S y CO₂. (6)

La adsorción se ha utilizado para la captura de trazas de contaminantes durante años. Para la adsorción de H₂S suele escogerse carbón activo debido a su gran capacidad. Este adsorbente no

puede ser utilizado cuando existen otros gases, ya que puede absorberlos sin selectividad, presentando a su vez una baja capacidad.

Por último, la absorción cáustica normalmente está unida a una oxidación química por dos motivos: el primero es porque el proceso de absorción cáustica es un proceso limitado por el equilibrio ácido-base, y la oxidación, en cambio, no. El segundo motivo, es que la oxidación es necesaria porque una bajada en el pH crearía una emisión del contaminante a la atmósfera al ser poco soluble en agua. Entre los absorbentes cáusticos más utilizados desde los años 40 está el NaOH que permite la posibilidad de buscarle una salida potencial al producto NaHS. El caso de los oxidantes, los más comunes son el NaOCl o H₂O₂, ya que son compuestos relativamente baratos y poseen una gran capacidad de oxidación. (7)

Las ventajas del proceso de absorción cáustica son:

- El azufre final del proceso queda en forma oxidada y neutralizada, por lo que es un esquema final del proceso sin necesidad de más equipos.
- El NaOH y el NaOCl son productos disponibles y relativamente baratos en la industria.

Las desventajas en cambio son:

- No es un proceso regenerativo, por lo que requeriría de un aporte constante de materia prima.
- No es selectivo, por lo que para alcanzar el rendimiento necesario de H₂S y demás gases ácidos es necesario absorber una cantidad proporcional de CO₂, que es muy mayoritario en la corriente. Para evitar esto sería necesario un ajuste especial de la cinética del proceso para minimizar la absorción de CO₂.

1.6. Especificación del gas a tratar

Como se ha indicado previamente, los datos presentes en la bibliografía sobre gasificación de residuos sólidos es muy dispersa. Esto es debido a diversos factores:

- La alimentación es muy variable.
- Los productos de gasificación depende del tipo de gasificador.
- Errores de medición.

Por tanto, es necesario realizar un balance de materia en la planta desde la alimentación para poder realizar un trabajo lo más representativo posible. Para una información sobre este análisis más exhaustiva se puede consultar el anexo 1.A. En él, se presenta un resumen de los trabajos en los que nos basamos para hacer la composición obtenida en el proyecto. Al ser trabajos en escala laboratorio, puede haber errores de escalado, por lo que hay que tener en cuenta que este análisis es aproximado. Así se ha podido obtener una composición molar presentada en la Tabla 1.3 de la concentración de los contaminantes inorgánicos objetivos del trabajo, el H_2S , el HCl y el NH_3 .

Compuesto traza	ppm
H_2S	486
NH_3	915
HCl	534

Tabla 1.3. Concentración de los tres gases objetivo del proyecto

Estos compuestos se presentan en concentraciones de ppm, lo que añade dificultad a la separación por tener que refinar la concentración hasta límites muy inferiores.

1.7. Marco del proyecto

Este trabajo fin de master se desarrolla en el marco de investigación de la tecnología de tratamiento de los residuos sólidos urbanos. La investigación en este sector es muy importante para mitigar la generación de residuos y minimizar el impacto que ejercemos en el medio ambiente. En el caso de España, esta investigación tiene un punto de vista especial, ya que la incineración es una alternativa con mucha menor participación en el mix que el vertido directo al vertedero.

Más concretamente, el proyecto se localiza en la etapa de depuración final de los gases de la gasificación para eliminar el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno. Gases muy peligrosos que es necesario estudiar detenidamente ya que la literatura está destinada principalmente a la separación de estos gases de combustibles fósiles dejando de lado mezclas de Syngas de RDF, un problema más reciente.

1.8. Resumen y objetivos del trabajo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Master es seleccionar y prediseñar el tren de separación adecuado para la absorción de la absorción de H_2S , HCl y NH_3 presentes en una corriente de gases de gasificación de RDF mediante cáusticos utilizando una torre de relleno como sistema de contacto gas-líquido. Para ello, es necesario tener en cuenta que el absorbente escogido debe ser el más barato posible. La metodología seguida para este fin es la realización de un modelado que permita el cálculo de la separación de estos tres compuestos hasta los límites de pureza estipulados.

Para realizar este modelo se ha escogido como referencia una corriente de gases que permitan generar 2,5 MWe, acorde con el tamaño general de una planta de tratamiento de residuos por gasificación. En primer lugar, se hizo un balance de materia general de la planta, se estipularon los requisitos de separación y finalmente se modeló mediante dos softwares principales: Aspen Plus y un modelo desarrollado con la ayuda de programa de cálculo de ecuaciones EES (Engineering Equation Solver) acompañado de algunos cálculos mediante Aspen Hysys.

El uso de estos programas responde a la necesidad de comparar los resultados obtenidos en Aspen Plus con los resultados que dan las ecuaciones del modelo, ya que, al realizar la primera simulación en Aspen Plus, los resultados obtenidos distaban en gran medida de los resultados experimentales. Esto forzó la necesidad de formular el modelado en otro sistema de cálculo como es EES para comparar y detectar errores de modelado.

Una vez realizado el modelo, se ha validado comparándolo con resultados experimentales y ejemplos de manuales y libros de ingeniería. Este proceso es imprescindible ya que verifica la robustez del modelo en torno a los puntos de operación del proceso llevado a cabo.

Una vez realizado y verificado el modelo de absorción de los tres compuestos, se procedería a realizar un sistema de separación que pudiera abatir los tres compuestos mediante absorción.

Por tanto, se desea analizar el comportamiento de los tres gases contaminantes a capturar por separado, es decir, ignorando la mezcla gaseosa global y centrándonos en desarrollar modelos adecuados para cada uno de los gases.

En el caso del H_2S se va a hacer uso de artículos como el de Chen (8), que trata un ejemplo de absorción de H_2S en una columna de relleno con NaOH utilizando NaOCl como oxidante en la mezcla. Con los resultados comparativos se podrá ver la proximidad de los resultados a la realidad o el efecto que tiene la oxidación en la absorción.

Después, se analizaría el NH_3 y el HCl . Aunque su absorción se puede realizar con agua, es necesario analizar su comportamiento en todo el rango de pH para detectar bajadas de rendimiento. El análisis de estos compuestos es muy importante, ya que siempre que existen estos dos compuestos y la presencia de humedad existe la posibilidad de la precipitación de cloruro de amonio o NH_4Cl , cuya deposición está asociada a la generación de atascos en los equipos.

Por último, se realizará un análisis económico del proceso seleccionado frente a algunas alternativas con el objetivo de poder comparar la viabilidad de esta tecnología.

Los esquemas que se van a investigar se pueden ver en la Tabla 1.4, donde se observan además los problemas posibles en la investigación de estas configuraciones. A pesar de que, a priori, algunas configuraciones son más lógicas que otras, se ha llevado a cabo la simulación para cuantificar los resultados. Estas opciones de tren de abatimiento no se tiene en cuenta la concentración real de gases ácidos como el CO_2 o el HCN , que tendrían que ser evaluados en un trabajo posterior.

<i>Esquema utilizado</i>	<i>Gas objetivo</i>	<i>Líquido absorbente</i>	<i>Problemas</i>
Una columna con agua	Todos	Agua	El agua líquida es un mal líquido para absorber el H ₂ S por lo que probablemente sea necesario una segunda columna para este fin.
Una columna a pH básico	Todos	Agua + NaOH + NaOCl	Para eliminar el problema de la absorción del H ₂ S se puede utilizar una columna única para la absorción de los tres compuestos pero puede consumir mucha cantidad de líquido.
Dos columnas	NH ₃ y HCl	Agua	Este esquema es el más lógico ya que el agua es un buen absorbente para el NH ₃ y HCl. Una vez eliminados estos se puede realizar una segunda absorción centrándonos en el H ₂ S para terminar de cumplir las especificaciones.
	H ₂ S	NaOH + NaOCl	
Dos columnas	NH ₃	Ácido a pH ~ 1	Este esquema se analizará para ver si es posible la separación operando a pH ácido en la primera columna del NH ₃ y el HCl. Se analizará la eficiencia que tendría la medida de bajar el pH en la absorción del HCl aunque al ser un ácido fuerte no se esperan cambios importantes.
	H ₂ S y HCl	NaOH + NaOCl	
Tres columnas	NH ₃	Ácido a pH ~ 1	Este esquema se analizaría si el anterior es operativo y segunda columna absorbe de forma poco eficiente ya que es un esquema poco interesante desde el punto de vista económico ya que requiere tres columnas para tres contaminantes y no unificar todo en pocos equipos.
	HCl	Agua o pH < 9	
	H ₂ S	NaOH + NaOCl	

Tabla 1.4. Distintas opciones barajadas de disposición de las columnas

1.8.1. *Objetivos de pureza necesarios a alcanzar*

Para saber si un esquema opera satisfactoriamente es necesario establecer un límite de pureza necesario a alcanzar. Existen dos límites de requisitos de pureza: El límite de operación para un motor de gas, equipo utilizado para la producción de energía eléctrica, y el límite de emisiones.

La pureza que se debe alcanzar para la operación en un motor de gas se puede encontrar en Van Paasen, donde especifica para un motor de gas unos límites de azufre total de 80 mg/Nm³,

de cloro total de 100 mg/Nm^3 y de amoníaco de 50 mg/Nm^3 . Estos límites están especificados para evitar la corrosión de las paredes del motor y la degradación del aceite de lubricación. (9)

El límite de emisiones por su parte en España para este tipo de instalaciones de combustión de bajo tamaño no está regido específicamente. Existen leyes de obligado cumplimiento para instalaciones de incineración que establecen límites para condiciones de operación al 11% de Oxígeno que puede servir de referencia para nuestros intereses. En este caso, se establece una concentración media diaria en el anexo 2 parte 5 del Real Decreto 815/2013 de 10 mg/Nm^3 de HCl, 50 mg/Nm^3 de SO_2 y 200 mg/Nm^3 de NO_x . (10)

Hay que tenerse en cuenta que, al trabajar con un syngas de RDF, el azufre está principalmente en forma de COS y H_2S . Por lo tanto, al ser el COS una especie poco soluble en agua, el objetivo de separación del H_2S estará condicionado por el primero. Así, cuando se realice la combustión, será necesario tener en cuenta el SO_2 formado por la oxidación de ambas especies.

Se calcula, que para cumplir con los límites de operación del motor de gas, se requiere eliminar el H_2S con un rendimiento de aproximadamente un 95%, un 88,2% para el HCl y un 94,5% para el amoníaco. Se asumirán que los productos de combustión cumplen la ley de emisiones gaseosas salvo para el caso de HCl que requeriría un rendimiento del 97,4% para cumplirla. En la Tabla 1.5 se presenta un resumen de los requisitos de pureza y la concentración de gases en cada corriente.

Compuesto	Límite operación motor de gas (mg/Nm^3) (9)	Límite de emisiones (mg/Nm^3) (10)	Corriente Syngas (mg/Nm^3)	Después de Combustión sin tratamiento (mg/Nm^3)
NH_3	50	-	695	(848,5)
HCl	100	10	872	393
H_2S	80	-	739	(333)
COS	-	-	88	(42)
SO_2	-	50	-	375
NO_x	-	200	-	848,5

Tabla 1.5. Límites de operación y de emisión frente a la corriente de Syngas a tratar y la corriente de emisiones sin tratamiento. Entre paréntesis emisiones procedentes de ese gas. NH_3 - NO_x y $\text{COS} + \text{H}_2\text{S} - \text{SO}_2$

Anexo 1.A. Balance de materia y especificación del gas a tratar

- *Alimentación a la planta de gasificación*

En la Tabla 1.6 se representan distintas composiciones de residuos sólidos urbanos clasificados según el origen de estos productos. Se puede observar las disparidades presentadas entre las distintas alimentaciones en composición y poder calorífico.

Origen		plastic and textiles	Domestic Waste	Municipal Solid Waste	RDF with plastic	RDF without plastic	MSW SRF	<i>SRF media</i>
Proximate Analysis	moisture	1,13	2,6	6,4	7,87	10	6,52	5,57
	volátiles	86,2	70,15		69,86		74,07	75,07
	fixed carbón	2,51	8,3		7,33		5,08	5,80
	ash	10,15	18,95	19,45	13,76	34,26	14,33	16,85
Ultimate analysis	C	66,78	51,73	43,3	46,24	25,18	49,7	46,60
	H	10,7	8,15	6,25	7,62	3,2	7,2	7,05
	O	10,68	19,03	23,55	23,16	25,97	41,6	25,86
	N	0,76	1,22	0,68	0,82	0,82	0,8	0,82
	S	0,23	0,2	0,2	0,27	0,41	0,4	0,25
	F	<0,01	<0,01			0,00463		0,00
	Cl	0,7	0,7	0,15	0,49	0,144	0,3	0,54
LHV (MJ/kg)		26,99	20,26	19,95		9,5	19,63	17,14
Fuente		(11)	(11)	(5)	(12)	(12)	(13)	

Tabla 1.6. Composición de distintos residuos sólidos urbanos que pueden ser utilizados como alimentación

A partir de esta composición se puede obtener el caudal de sólido SRF necesario para obtener 2,5 MWe. Si se supone un rendimiento global del sistema del 20% se obtiene la necesidad de alimentar 2625 kg/h de SRF

- *Gas de gasificación producido*

Una vez se conoce la composición de la alimentación, ésta se introduce en el gasificador y se obtiene una corriente de gas llamada syngas, que depende del tipo de gasificador o del tipo de gas de gasificación que se utilice. Lo más común y barato es utilizar aire, ya que la energía para realizar la gasificación se obtiene de la misma alimentación.

Fuente		(9)	(9)	(5)	(5)	(13)	<i>Este proyecto</i>
Gasifier type		Fluid bed	Fluid bed	Fluid bed	Lecho fluido	Down-draft	<i>Fluid bed</i>
T gasifier	°C	725	820	879	898	800	825
Equivalence Ratio		0,21	0,21	0,302	0,318	0,3	0,3
Product gas flow	Nm ³ /h (wb)	1,2	1,3	170	170,2	32	4322
H₂O calculated	% vol (wb)	16,3	12,5	4,8		10,6	5,65
SRF flow rate	(kg/h)	0,7	0,8	51,9	49,4	10	2625
Air flow	(Nm ³ /h)	0,63	0,72	69,57	69,66	13,10	3438
Specific volumetric air flow consumption	Nm ³ /kg-SRF					2,3	2,3
Specific air mass flow rate consumption	kg/kg-SRF			1,73	1,82	1,69	1,69
Specific mass flow rate of ashes generated	kg/kg-SRF			0,2		0,3	0,3
Carbon Conversion Efficiency	%					85	85
Syngas exit T	°C					670	800
Syngas density	kg/Nm ³					1,45	1,45
Specific producer syngas flow rate yield	Nm ³ /kgSRF			3,27	3,44	3,2	
Permanent Gases							
CO	%vol db	10,3	12,1	10,4	12,73	11,57	12,20
H₂	%vol db	5,1	7,1	8,24	7,08	7,92	7,19
CO₂	%vol db	15,5	13,7	12,83	14,04	14,9	13,87
CH₄	%vol db	5,7	6,4	4,35	3,33	3,9	5,90
N₂	%vol db	52	53	61,86	60,66	60,53	55,96
Acetylene (C₂H₂)	%vol db	0,1	0,2	0,16	0,18	0,08	0,16
Ethylene (C₂H₄)	%vol db	4,2	4,6	2,05	1,78	0,8	2,81
Ethane (C₂H₆)	%vol db	0,7	0,3	0,04	0,07	0,05	0,22
Benzene	ppmv	6743	9309	1000	800	2500	3102

(C6H6)	db						
Toluene (C7H8)	ppmv db	2378	1490				1190
Total GC tar	g/Nm ³ db	26,9	26,4	39	5	2	39,00
Gravimetric Tar	g/Nm ³ db	12,4	15,9				15,90
LHV (excl tar)	MJ/N m ³ db	8,4	9,3	5,16	4,91	4,6	4,60
Sulphur							
S fuel	% ar	0,035	0,035	0,2		0,4	0,25
H₂S	ppmv db	89	74	39,1		450	850,00
COS	ppmv db	10,5	19				100,28
H₂S+COS/Sfuel	%	66,24	65,64	6,10		32,184	53,02
S in cyclon ash	mg/kg	1448	1248				1248,00
Chlorine							
Cl fuel	% ar	1,33	1,33	0,15		0,30	0,54
HCl	mg/N m ³ db	1559	5123	117,5		1040	1000
Dioxines	ng I-TEQ/N m ³ db	74,22	4,5				
HCl/Cl fuel	%	16,86	54,91	24,42		99,17	27,78
Cl in tar	mg/N m ³ db	3344	4120				4120
Cl in cyclon ash	mg/kg	61964	60800				60800
Nitrogen							
N fuel	% ar	0,62	0,62	0,68		0,80	0,82
NH₃	ppmv db	130	584	39,6		2000	800,00
HCN	ppmv db	96	207				80,00
NH₃+HCN/Nfuel	%	4,97	15,92	1,82		71,52	13,32
Ashes							
Ash	g/Nm ³	3,9	5,2				
Cyclon ash	g/h	2,5	12			1280	32800

Tabla 1.7. Composición del gas de gasificación y sus condiciones de operación.

En la Tabla 1.7 se presenta un resumen de los trabajos en los que nos basamos para hacer la composición obtenida en el proyecto. En la composición finalmente escogida en el trabajo se ha tenido en cuenta el tipo de gasificador con el que se trabaja y se ha comprobado mediante un balance de materia el destino de cada uno de los compuestos en el gasificador para el cálculo de

la concentración de agua. De esta tabla se puede obtener una composición molar presentada en la Tabla 1.8.

Compuestos principales	%	Compuesto traza	ppm
N ₂	47.99	H ₂ S	486
H ₂ O	15.38	NH ₃	915
CO ₂	11.89	HCl	534
CO	10.46	COS	33
CH ₄	5.056	HCN	77
H ₂	7.067	C ₂ H ₂	840
C ₂ H ₄	1.522	C ₆ H ₆	1610
C ₂ H ₆	1.166	C ₇ H ₈	516

Tabla 1.8. Concentración de los compuestos presentes en el tren de separación.

Siendo los compuestos principales para eliminar el H₂S, el HCl y el NH₃. Estos compuestos se presentan en concentraciones de ppm, lo que añade dificultad a la separación por tener que refinar la concentración hasta límites muy inferiores.

