

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Química

Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico

Autor: Mario Fernández García

Tutor: Alberto Gómez Barea

**Dep. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Química

Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico

Autor:

Mario Fernández García

Tutor:

Alberto Gómez Barea

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico

Autor: Mario Fernández García

Tutor: Alberto Gómez Barea

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

*A quienes estuvieron a mi lado durante estos años, porque sé que jamás hubiera llegado hasta aquí sin ellos.
Desde lo más nimio a lo más importante, de todos saqué algo que me sirvió para superar los obstáculos del camino.
Muchas gracias a todos.*

Resumen

La tecnología de gasificación por plasma es una opción tecnológica para la valorización de ciertos residuos como los derivados del consumo directo en hogares o comercios (residuos sólidos urbanos o RSU), sanitarios o industriales de carácter peligroso.

La tecnología de gasificación por plasma consiste en emplear plasma térmico que permite descomponer el residuo de forma completa, obteniéndose gas de síntesis y unas cenizas en forma de escorias vitrificadas que se pueden asimilar a un residuo inerte.

En la primera parte de este proyecto se realiza una revisión general de las tecnologías y procesos de tratamiento de RSU, incluida la incineración, que es el método termoquímico más empleado en la actualidad. Después se tratarán la gasificación y la pirolisis, tecnologías emergentes de valorización energética de los RSU, entre las que está la gasificación por plasma con sus diferentes variantes comerciales.

En la segunda parte se realiza una comparación tecnico-económica específica de varias tecnologías seleccionadas: incineración, gasificación convencional y gasificación con plasma, esta última valorada a través de varias tecnologías semi-comerciales de las que existen algunas plantas a pequeña y gran escala aunque aun no están ampliamente implantadas.

Abstract

Plasma gasification technology is an option that could be used for municipal (MSW), commercial, sanitary or hazardous industrial wastes in “waste to energy” plants.

This technology consists in using thermal plasma that allows decomposing the waste completely into syngas and vitrified slag which is considered an inert waste.

In the first part of this project, there is a general review of technologies for MSW processing, including incineration, which is currently the most used technology, as well as gasification and pyrolysis, which are emerging technologies for energetic valorization.

The second part of this document presents a technical-economic comparison of various selected technologies: incineration, conventional gasification and plasma gasification. The interest in plasma gasification is assessed and challenges and opportunities for future implementation of this technology are discussed.

Índice

Agradecimientos	7
Resumen	8
Abstract	10
Índice	11
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	15
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Los residuos sólidos urbanos y su problemática</i>	1
1.1.1 <i>La fracción resto</i>	2
1.2 <i>La conversión termoquímica de residuos</i>	3
1.3 <i>Gasificación de residuos</i>	4
1.4 <i>El plasma</i>	5
1.4.1 <i>Definición, tipos y generación de plasma</i>	5
1.5 <i>Objetivos del proyecto</i>	9
2 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE RSU Y DERIVADOS	11
2.1 <i>Vertederos controlados</i>	11
2.2 <i>Compostaje y tratamientos biológicos</i>	12
2.3 <i>Incineración</i>	13
2.4 <i>Pirólisis y gasificación</i>	15
2.5 <i>Gasificación por plasma</i>	17
2.5.1 <i>Introducción</i>	17
2.5.2 <i>Procesos comerciales de gasificación por plasma</i>	19
2.6 <i>Combustibles derivados de residuos</i>	24
2.6.1 <i>CSR (Combustibles sólidos recuperados)</i>	25
2.6.2 <i>CDR (Combustible derivado de residuo)</i>	25
2.6.3 <i>Bioetanol procedente de RSU</i>	26
3 ANÁLISIS EN DETALLE DE PLANTAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	11
3.1 <i>Incineración</i>	11
3.1.1 <i>Diagrama de bloques y balance de materia</i>	11

3.1.2	Descripción	15
3.1.3	Balance de energía	17
3.2	<i>Gasificación</i>	17
3.2.1	Gasificación convencional	18
3.2.2	Gasificación a alta temperatura	22
3.3	<i>Gasificación por plasma</i>	25
3.3.1	Proceso Plasco	26
3.3.2	Descripción	29
3.3.3	Balance de energía	31
3.3.4	Proceso desarrollado por alternrg	33
3.4	<i>TABLAS COMPARATIVAS</i>	45
4	COMPARACIÓN DE PLANTAS DE GASIFICACIÓN	47
4.1	<i>Planta de gasificación por plasma</i>	48
4.1.1	Pretratamiento	48
4.1.2	Gasificador	48
4.1.3	Enfriamiento de escorias	51
4.1.4	Tratamiento de gases	52
4.1.5	Producción de electricidad	52
4.1.6	Efluentes del proceso	53
4.1.7	Resumen del balance de materia y energía	54
4.2	<i>Planta de gasificación convencional</i>	56
4.2.1	Gasificador	56
4.2.2	Tratamiento de gases	57
4.2.3	Producción de electricidad	57
4.2.4	Efluentes del proceso	58
5	ESTIMACIÓN DE COSTES E INGRESOS.	60
5.1	<i>Costes</i>	60
5.2	<i>Ingresos</i>	62
6	Conclusiones	67
7	BIBLIOGRAFÍA	70
	GLOSARIO	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición RSU	1
Tabla 2 Composición de la fracción resto	2
Tabla 3 Fuentes de plasma (8)	9
Tabla 4 Aplicación de cada tecnología a cada residuo	16
Tabla 5 Destrucción de contaminantes	19
Tabla 6 Parámetros CSR	25
Tabla 7 Corrientes de la incineradora	14
Tabla 8 Emisiones de la incineradora (20)	16
Tabla 9 Corrientes de la planta de gasificación convencional	20
Tabla 10 Recopilación de plantas de gasificación	21
Tabla 11 Balance de materia	24
Tabla 12 Producción eléctrica de diferentes plantas de gasificación a alta temperatura (45)	24
Tabla 13 Corrientes del proceso de gasificación por plasma de Plasco	28
Tabla 14 Producción eléctrica del proceso de Plasco	31
Tabla 15 Corrientes del proceso de Alter NRG	35
Tabla 16 Especificaciones de las antorchas de Westinghouse Plasma (48)	37
Tabla 17 Especificaciones de los gasificadores de AlterNRG	38
Tabla 18 Especificaciones de los gasificadores de Alter NRG (continuación)	38
Tabla 19 Lixiviados de escorias vitrificadas (47)	43
Tabla 20 Composición desglosada RSU	47
Tabla 21 Composición elemental RSU (% masa)	48
Tabla 22 Composición del coque (% másico)	48
Tabla 23 Moles de cada compuesto por mol de CO	49
Tabla 24 Entrada al gasificador por plasma	51
Tabla 25 Salida del gasificador por plasma	51
Tabla 26 Producción y consumo eléctrico	52
Tabla 27 Resumen del balance de materia	54
Tabla 28 Composición gas de síntesis gasificador (% v/v)	56
Tabla 29 Entrada al gasificador	57
Tabla 30 Salida del gasificador	57
Tabla 31 Producción y consumo eléctrico	58
Tabla 32 Plantas de gasificación por plasma (costes corregidos)	60
Tabla 33 Plantas de gasificación	61

Tabla 34 Plantas de gasificación (costes corregidos)	61
Tabla 35 Precios de venta de la electricidad	63
Tabla 36 Incineradoras en España (62)	63
Tabla 37 Resumen de VAN y TIR	64
Tabla 38 Registros de la incineradora	65
Tabla 39 Tabla de rangode costes	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Antorcha de plasma	6
Figura 2 Vertedero	11
Figura 3 Esquema de la planta de Plasco en Ottawa	20
Figura 4 Proceso previo Plasco	21
Figura 5 gasificador de InEnTec	22
Figura 6 Reactor Gasificación Plasma	24
Figura 7 Diagrama resumido incineradora	12
Figura 8 Diagrama incineradora	13
Figura 9 Destino de la energía en una incineradora	17
Figura 10 Diagrama resumido de la gasificación	18
Figura 11 Diagrama de la planta de gasificación convencional	19
Figura 12 Detalle del gasificador	21
Figura 13 Relacion producción - capacidad	22
Figura 14 Producción eléctrica	22
Figura 15 Destino de la energía en la gasificación convencional	22
Figura 16 Diagrama de bloques de la gasificación a alta temperatura	23
Figura 17 Gasificador de alta temperatura	23
Figura 18 Ajuste de producción eléctrica para gasificación de alta T ^a	25
Figura 19 Ajuste de producción eléctrica frente a capacidad de la planta	25
Figura 20 Diagrama resumen del proceso de Plasco	26
Figura 21 Diagrama del proceso de gasificación por plasma de Plasco (46)	27
Figura 22 Destino de la energía en el proceso de Plasco	31
Figura 23 Destino de la energía en el proceso de Plasco (variante con turbina)	32
Figura 24 Diagrama resumen del proceso de Alteer NRG	33
Figura 25 Diagrama de bloques del proceso de gasificación por plasma de Alter NRG (48)	34
Figura 26 Esquema de trituración de neumáticos	36
Figura 27 Esquema de la alimentación de RSU	36
Figura 28 Gasificador Alter NRG / WPC	37
Figura 29 Métodos de separación de oxígeno del aire	39
Figura 30 Instalación de Crystasulf	41
Figura 31 Unidad de catalizadores (53)	41
Figura 32 Instalación de motores de gas	42
Figura 33 Destino de la energía de la planta de AlterNRG	44

Figura 34 Diagrama de Sankey gasificación por plasma	55
Figura 35 Diagrama de Sankey de la gasificación	59

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Los residuos sólidos urbanos y su problemática

El desarrollo tecnológico y económico mundial que viene sucediendo desde la revolución industrial ha producido que gradualmente la población tenga a su alcance la adquisición de un mayor número de bienes de todo tipo. A su vez esto ha provocado que la cantidad de residuos haya aumentado en igual proporción, puesto que no sólo hay que contar con los desechos inherentes a estos bienes, sino también con otros que se han extendido como la utilización de envases no reutilizables. Como muestra, se puede indicar que hubo un incremento del 42% de media en las tasas de generación de residuos en la UE en el periodo 1980 – 2000.(1)

Hay que matizar, sin embargo, que no ha sucedido de una manera ni mucho menos homogénea puesto que, dependiendo del país, el consumo medio per cápita puede variar enormemente. Por tanto este es un problema que no afecta por igual en todas partes, teniendo impactos y soluciones diferentes para cada caso.

Por residuos, de manera legal, se entiende lo descrito como tal en la ley 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados. Citando parte del artículo 3 de dicha ley, para el caso de los residuos domésticos o RSU (residuos sólidos urbanos):

“a) «Residuo»: cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar.

b) «Residuos domésticos»: residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias.

Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres así como los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.”

La composición de los residuos es por tanto muy variable, incluso las cantidades generadas por persona y día así como las composiciones medias varían mucho entre un país y otro e incluso entre zonas de un mismo país. Según estudios oficiales de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, los porcentajes medios en España son:

Tabla 1 Composición RSU

Materia orgánica	48,9	Vidrio	7,6
Papeles	11,8	Madera	0,6
Plásticos	11,7	Complejos. Celulosa	2,0

Metales férreos	2,5	Textiles	3,7
Metales no férreos	1,6	Varios	2,9

Se estima que de los datos anteriores, el 26% proceden de envases.

En España se recogen una media de 1,2 Kg/(habitante·día), siendo una cifra modesta comparada con las de otros países desarrollados en los cuales se llegan a alcanzar los 3 Kg/(hab·día). Por el contrario, es notablemente más alta que las de Sudamérica, que suelen rondar los 0,6 Kg/(hab·día).

También hay que destacar diferencias entre tamaños de poblaciones. En una ciudad grande suele haber un 20% más de residuos por habitante que en una pequeña, y a su vez en una ciudad pequeña se producen entre un 20% y un 30% más que en pueblos pequeños.

Además hay picos puntuales por fechas señaladas como Navidad o en temporadas de vacaciones en zonas turísticas, que pueden provocar problemas si no se planifica correctamente su gestión.

Es fundamental el correcto tratamiento de los residuos por los siguientes motivos:

- Provocan problemas de contaminación, por emisión de gases, lixiviados y materiales no biodegradables.
- Aparición de plagas de insectos y roedores.
- Problemas de salud a los habitantes cercanos.
- Muchos recursos útiles son desperdiciados.

El tratamiento de residuos más extendido suele ser, en los países desarrollados, su disposición en vertedero controlado. Sin embargo cada vez se hace un mayor esfuerzo en el reciclaje y el compostaje debido al ahorro de recursos tan grande que esto supone y que es fundamental por motivos económicos y ambientales.

1.1.1 La fracción resto

En las plantas de reciclaje y tratamiento biológico de RSU, hay una parte de los residuos que no puede ser procesada y es la denominada fracción resto. En España, normalmente, es llevada a vertederos convencionales donde se entierra; pero por sus propiedades también puede ser un buen combustible. Además propiciaría la compenetración entre plantas de valorización energética y las de recuperación de materiales, aprovechándose las ventajas de cada una.(2)

A continuación, en la tabla 2, se resumen las características promediadas de la fracción resto de una planta española, que se tomarán como referencia para los cálculos:

Tabla 2 Composición de la fracción resto

Materia orgánica	11,7
Papel	14,5
Celulosa sanitaria	6,7
Plástico	21,6
Brick	7,7
Madera	3,3
Textiles	14,9
Cauchos y gomas	0,2

Vidrio	3,6
Metales férricos	2,3
Metales no férricos	0,7
Peligrosos del hogar	0,1
Aparatos eléctricos / electrónicos	1,2
Inertes	2,7
Otros	8,7
<hr/>	
Humedad (%)	33,0
PCI (kcal/kg)	4000,1
Densidad aparente (kg/m ³)	141,7
Análisis elemental	
C (% p/p)	39,2
Cl (ppm)	4899,7
Hg (ppm)	0,3
Cd (ppm)	0,5
Pb (ppm)	30,4

1.2 La conversión termoquímica de residuos

Las conversiones termoquímicas son reacciones que suceden a alta temperatura en presencia de gases y, ocasionalmente, de catalizadores.(3)

Combustión:

Se trata de la oxidación total del combustible, transformándose idealmente los compuestos de carbono e hidrógeno en CO₂ y agua, respectivamente. Se libera la energía en forma de calor.

Gasificación:

Es una oxidación parcial, se produce de manera parecida a la combustión pero con cantidades sub-estequiométricas de oxígeno. Se obtiene un gas que puede ser usado como materia prima o combustible. Será tratado en detalle en un apartado a continuación.

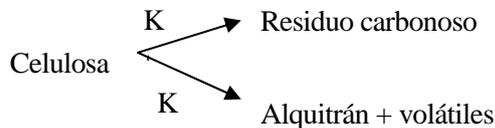
Pirólisis:

Consiste en someter a altas temperaturas a la materia orgánica en ausencia de oxidante. Se forman productos sólidos, líquidos y gaseosos con aplicaciones como combustibles y materia prima.

La teoría más extendida sobre cómo se produce es que se van degradando los compuestos originales debido a la temperatura y posteriormente hay otras reacciones como craqueos de compuestos orgánicos volátiles. Dependiendo de las temperaturas y los tiempos de residencia, se favorece la formación de sólidos (baja temperatura y mucho tiempo), líquidos (bajas temperaturas y enfriamiento rápido) o gases (altas temperaturas y tiempos de residencia). A mayor temperatura, se rompen las moléculas en otras más simples. Además las densidades altas favorecen la retención de alquitranes y por tanto que aumente el tiempo de residencia.

La humedad juega otro papel importante, no sólo debido a la energía que debe emplearse para su evaporación, sino también porque tras la formación de radicales libres y alquitranes debido a la “rotura” de las cadenas moleculares, el agua interfiere con éstas propiciando la recombinación con el sólido en detrimento de la formación de compuestos más ligeros como aceites.

Las reacciones químicas son complicadas de modelar, existen diferentes mecanismos de reacción que se han propuesto para los residuos típicos como celulosa, caucho, PVC, grasas... Hay también modelos simplificados en los que se toman 2 o 3 reacciones que suceden en paralelo o de forma sucesiva y cada una produce gases, alquitranes o sólidos carbonosos como por ejemplo las reacciones primarias de la celulosa propuestas por Shafizadeh:(3)



Licuefacción:

En esta técnica, se calientan los residuos en presencia de una corriente de monóxido de carbono e hidrógeno o vapor de agua. Se rompen las cadenas largas y el oxígeno es sustituido por hidrógeno, formándose una serie de gases que condensan a temperatura ambiente, dando lugar a un combustible líquido.

1.3 Gasificación de residuos

Se trata de un proceso por el cual se somete al combustible (los RSU en este caso) a altas temperaturas en presencia de oxígeno pero por debajo de la relación estequiométrica. De esta manera, se mantiene la temperatura pero sin llegar a producirse la combustión del residuo por lo que se propicia la formación de gas de síntesis, una mezcla de H_2 y CO , aunque también suele tener otros componentes como CH_4 , CO_2 y compuestos orgánicos volátiles.(4)(5)

Es una tecnología que tuvo uso en el S. XX en momentos y lugares donde había falta de combustibles para motores de combustión interna y turbinas. Con el auge del petróleo se abandonó, pero su aumento de precio ha hecho que se recupere.

Sucedan numerosas reacciones químicas y procesos físicos en la gasificación, muchas veces difíciles o imposibles de determinar, por lo que se han obtenido algunos modelos simplificados que aúnan los mecanismos cinéticos y de transferencia de calor y materia para casos concretos de reactor y combustible.

Hay una serie de etapas comunes en todos los procesos de gasificación:

- Secado: se produce a unos $100\text{ }^\circ\text{C}$ y se evapora el agua contenida en la alimentación.
- Pirólisis: tal y como se explicó antes, consiste en la ruptura de los compuestos de cadena larga en otros más simples por efecto de las altas temperaturas.
- Reducción: en los gasificadores que operan en contracorriente, se debe a la combinación de vapor de agua con
- Oxidación: es la última etapa, se produce al mezclarse el agente gasificante con el residuo carbonoso del fondo.

El agente gasificante es el gas necesario para que se produzca la gasificación. Dependiendo de las características de éste, el gas de síntesis será válido para unas u otras aplicaciones. Los más usuales son:

- Aire: se trata del más económico, pero a la vez tiene el problema de que aporta nitrógeno al gas de síntesis, lo cual empobrece su contenido energético o como materia prima. Es válido como combustible para motores de gas convencionales o para producir vapor de agua.

- Oxígeno o aire enriquecido: se mejora las características con respecto al anterior, pero se añade el coste de separar el nitrógeno. Válido el gas de síntesis producido como materia prima para etanol o gasolina.
- Vapor de agua: igual que el anterior, se produce un buen gas de síntesis para emplearlo como materia prima, pero se añade el coste de tener que producir vapor.
- Hidrógeno: el gas de síntesis resultante tiene el mismo poder calorífico que el gas natural. Aunque el precio del hidrógeno es muy alto.

Para su estudio cinético existen varias alternativas, modelos más o menos complejos basados en una serie de suposiciones. Siendo rigurosos, habría que tener en cuenta los siguientes pasos:

- Difusión del agente gasificante desde el seno del gas hasta la superficie del sólido, pasando por la hipotética capa límite.
- Difusión a través de los poros de la partícula de residuo.
- Adsorción superficial.
- Reacción química.
- Desorción de los productos.
- Difusión de los productos a través de los poros y la capa límite hasta el seno del gas.
- Transferencia de calor entre partícula y gas, así como en el interior de ambos.

Sin embargo, debido a la dificultad de estudiar un problema tan complejo que implica fenómenos de transporte de materia y energía con reacción química, se han desarrollado una serie de modelos simplificados

1.4 El plasma

1.4.1 Definición, tipos y generación de plasma

1.4.1.1 Composición del plasma

El plasma es el cuarto estado de la materia y el estado más común con diferencia en el que se presenta en el universo, se trata de una mezcla de partículas en la cual hay algunas con carga (iones y electrones) aunque globalmente es de carga eléctrica neutra. El grado de ionización de éste será mayor cuantos más átomos hayan ganado o perdido electrones. Estos electrones, por su gran movilidad, a su vez generan iones y electrones al colisionar elásticamente con las otras partículas del plasma.

Dentro de esta denominación hay sistemas físicos en muy variadas presiones y temperaturas originados a su vez por distintas causas, compartiendo la característica de que son conductores y eléctricamente neutros de una forma parecida a los electrolitos.(6)

1.4.1.2 Tipos de plasma

Básicamente hay dos clases(7):

Plasma térmico o de equilibrio: sus partículas (tanto electrones como átomos e iones) se encuentran todas a altas temperaturas muy similares y tanto la densidad energética como la disociación son elevadas. Esto le confiere algunas ventajas como tamaño compactos de reactores, alta transferencia de calor, bajos caudales de gas o la emisión de radiación no ionizante, pero por otro lado tiene desventajas económicas al requerir el empleo de gran cantidad de recursos energéticos.

Se emplea en metalurgia, recubrimientos, destrucción de residuos peligrosos...

Plasma no térmico o de no-equilibrio: Las diferencias de temperatura entre las partículas pesadas (átomos e iones) y los electrones son muy significativas, siendo las de éstos últimos incluso de algún orden de magnitud por encima de las otras. Por tanto presentan bajos niveles de disociación e incrementos de entalpía entre entrada y salida del generador poco apreciables. Tiene la ventaja de que puede crearse a temperatura ambiente, lo que es necesario para ciertas aplicaciones en las que no puede dañarse la superficie de aplicación.

Se está investigando su empleo en la depuración de gases, pasteurización de líquidos o potabilización de agua. Pero no en residuos sólidos.

1.4.1.3 Generación de plasma térmico

La manera más directa es calentando un gas a muy altas temperaturas, de tal manera que los átomos que lo forman se descompongan en sus partículas elementales. Mediante combustibles fósiles pueden alcanzarse temperaturas de hasta 2000 °C. Sin embargo no es el mejor método, siendo tecnológicamente más sencillo acoplar energía eléctrica o electromagnética a un gas neutro con lo que se obtienen plasmas incluso por encima de los 20000 °C. También se puede generar mediante fuertes compresiones adiabáticas con un gas y otros métodos que no se tratarán aquí por no estar lo bastante extendidos en aplicaciones industriales(8)

Los aparatos usados en la generación son comúnmente llamados antorchas de plasma, siendo las más usadas las siguientes:

Antorchas de corriente continua de arco no transferido.

Consiste en un par de electrodos concéntricos colocados en la antorcha entre los cuales hay un gas circulando. El primero de ellos, con terminación en punta, está colocado en el centro del flujo de gas y el otro es toroidal, atravesando el flujo por su parte interior. Entre ambos se produce un arco eléctrico por el gran voltaje aplicado, el cual ioniza al gas que pasa.

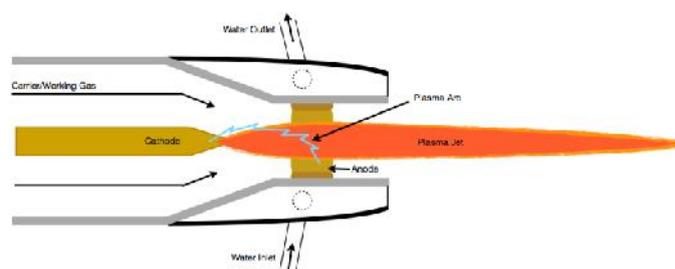


Figura 1 Antorcha de plasma

Los electrodos son fabricados dependiendo de las potencias que consuma la antorcha, cuando son bajas (< 100 kW) se usan “electrodos calientes”, con el cátodo toroidal relizado en wolframio y el ánodo de cobre. Cuando son más altas, usan “electrodos fríos” ambos refrigerados y de forma cilíndrica con una pequeña separación entre ambos para generar el plasma.

Tienen las desventajas de que contamina el producto con el residuo de los electrodos y que su eficiencia energética (energía sale/energía suministrada) puede bajar hasta el 50% en algunos casos.

Generación mediante pulsos de corriente continua

Con este método se pretenden eliminar las faltas de homogeneidad que pueden producirse en el plasma entre sus regiones centrales y externas, haciendo que el gas donde se realiza la descarga tenga siempre su composición original. Permite además operar a potencias superiores. Usado en deposiciones y en microscopía.

Antorchas de corriente continua de arco transferido.

Funcionan de manera parecida a las anteriores pero con la diferencia de que sólo uno de los electrodos se encuentra en la antorcha, siendo el material a tratar el otro electrodo, desapareciendo así el toroidal.

El plasma se genera fuera de la antorcha, ya que la separación entre cátodo y ánodo puede acercarse al metro y su temperatura por tanto será mayor al no estar al lado de la refrigeración.

El cátodo puede ser de un material conductor refrigerado o de refractario. Aunque hay diversas configuraciones posibles, en casos como el tratamiento de residuos es recomendable usar electrodos de grafito por ser más económicos y no importar la contaminación por carbono.

Otra ventaja es la posibilidad de usar antorchas gemelas acopladas, de tal manera que se crea plasma en el espacio libre entre ellas y puede usarse para fundir materiales no conductores.

Antorchas de corriente alterna

Son poco usadas, debido a su mayor ruido, peor control y mayor consumo de electrodos y energía, entre otras razones. Hay poca información sobre ellas.

Descargas de radiofrecuencias.

La energía es transmitida a través de ondas electromagnéticas, comercialmente suelen ser de 13,56 o 27,12 MHz. Los electrones oscilan rápidamente dentro del plasma sin haber contacto con los electrodos por lo que puede usarse en distintas atmósferas corrosivas y no hay riesgo de contaminación por su descomposición. Las descargas pueden ser acopladas capacitivamente o inductivamente, siendo el diseño del equipo en el primer caso parecido a los de corriente continua.

En campos como litografía o deposiciones están muy extendidos. Se estudia su viabilidad para la destrucción de materiales peligrosos, pero su aplicación está limitada por la potencia a la que suelen estar disponibles.

Descargas de microondas

Se trata de ondas electromagnéticas de frecuencias superiores a las radiofrecuencias, con valores típicos en torno a 2,45 GHz. Los electrones siguen las oscilaciones de los campos generados, produciéndose choques entre partículas.

Hay numerosos diseños posibles en función del mecanismo y su aplicación, aunque cabe destacar el plasma generado por ECR (resonancia electrón ciclotrón) que puede ser útil en la destrucción de residuos. Las descargas de microondas se acoplan con campos magnéticos lográndose así que las partículas tomen trayectorias circulares y a los electrones les sea aplicada la energía de manera resonante.

Plasma generado por rayos laser / haces de electrones

Al incidir un haz de láser o electrones sobre un gas a baja presión, el plasma oscila con gran amplitud y al calentarse los electrones en ese campo turbulento, son capaces de mantener el plasma. Dependiendo de la

presión, el voltaje empleado, el tamaño del haz... se puede controlar el grado de disociación del plasma, logrando unas eficiencias en torno al 70% en la transferencia de energía. Además se transfiere la energía de forma más mucho más rápida que en el resto de plasmas, pudiendo fundir ciertos materiales de manera instantánea.

Es empleado en análisis químico, procesos de corte, fundición... y también se investiga su posible empleo como arma militar, para lo cual están desarrollando prototipos. Podría ser empleado para la destrucción de residuos en ciertos casos.

1.4.1.4 Generación de plasma no térmico

Plasma de baja presión

Se puede generar fácilmente aplicando energía (corriente continua, radiofrecuencias o microondas) a un gas a baja presión (en el entorno de 1 mbar) confinado en un recipiente. En principio no tiene ninguna utilidad en el contexto del proyecto, aunque es empleado para limpieza de piezas, activación de superficies, investigación... y cualquier operación a nivel industrial por este método deberá realizarse en discontinuo.

Plasma de barrera dieléctrica

También se emplea en labores parecidas como la eliminación de residuos del diesel el plasma de barrera dieléctrica, en el cual se aplica un campo de alta frecuencia entre un par de electrodos recubiertos por material dieléctrico.

Opera a presiones de hasta 10 bar, voltajes entre 1 y 100 kV, frecuencias de 50 a 1000 Hz y la separación entre electrodos es de pocos milímetros.

La ventaja que ofrece sobre otros métodos es la posibilidad de obtener plasma no térmico a presión atmosférica y el escalado directo a tamaños superiores.

1.4.1.5 TABLA RESÚMEN DE LOS MÉTODOS DE GENERACIÓN:

Tabla 3 Fuentes de plasma(8)

Table 3. Plasma sources and their parameters.

Physics	Pressure (mbar)	n_e (cm^{-3})	T_e (eV)	Bias	Application
Dc glow	10^{-3} –100				
cathode region			100	Yes	Sputtering, deposition, surface elementary
negative glow		10^{12}	0.1	No	Chemistry, radiation
positive column		10^{11}	1–10	No	Radiation
hollow cathode	10^{-2} –800	10^{12}	0.1	No	Radiation, chemistry
magnetron	10^{-3}			Yes	Sputtering
Arc, hot cathode					
external heating low voltage	1	10^{11}	0.1	No	Radiation
internal heating	1000	10^{13}	0.1	No	Radiation welding
Focus	10		keV		Radiation
Rf capacitive					
low pressure	10^{-3} – 10^{-1}	10^{11}	1–10	Yes	Processing, sputtering
moderate pressure	10^{-1} –10	10^{11}	1–10	No	Processing, deposition
hollow cathode	1	10^{12}	0.1	No	Processing, radiation
magnetron	10^{-3}			Yes	Sputtering
Rf inductive	10^{-3} –10	10^{12}	1	No	Processing, etching
helicon	10^{-4} – 10^{-2}	10^{13}	1	No	Processing
MW					
closed structure	1000	10^{12}	3	No	Chemistry
SLAN	1000	10^{11}	5	No	Processing
open structure					
surfatron	1000	10^{12}	5	No	Processing
planar	100	10^{11}	2	No	Processing
ECR	10^{-3}	10^{12}	5	No	Processing
Electron beam					
BPD	10^{-2} –1	10^{12}	1	No	Processing
Dielectric barrier discharge	1000	10^{14}	5	No	Ozone, processing chemistry

Se puede apreciar la gran cantidad de fuentes de plasma existente, aunque algunos sólo tienen actualmente aplicaciones a pequeña escala como puede ser en laboratorios o equipos muy concretos. Los parámetros que aparecen son respectivamente presión del gas (mbar), densidad de electrones (electrones/cm³), temperatura del electrón (eV), la existencia de corrientes de voltaje Bias y sus aplicaciones comunes. El voltaje Bias se debe a una corriente que aparece en el electrodo cuando se estimula a alta frecuencia un plasma estando a muy baja presión, tiene otras implicaciones que no se tratarán aquí al no ser útiles para el campo de aplicación de este proyecto.

Por tanto los métodos interesantes para la gasificación de residuos serían sólo aquellos capaces de generar plasma a 1000 mbar ya que no requieren operar a presiones por debajo de la atmosférica. Se descarta el de barrera dieléctrica al ser plasma no térmico, así que nos quedan dos opciones: plasmas generados por microondas (de varios tipos) y los de arco eléctrico. Estos últimos se sabe que ya han sido empleados en la práctica para el tratamiento de RSU(9) y por tanto serán los que se tomen como referencia, aunque no se puede descartar a priori el empleo de plasma generado por microondas en futuras plantas.

1.5 Objetivos del proyecto

La gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos es aún un método de valorización energética que, salvo en el caso singular de Japón, ha tenido una escasa expansión a nivel global. Sin embargo han surgido nuevos proyectos en EEUU y Europa, tanto comerciales como de plantas piloto, lo cual puede suponer que en los próximos años se produzcan mejoras en sus características y sustituyan a las incineradoras tradicionales. Por tanto, se busca:

- Describir el funcionamiento de las instalaciones de gasificación por plasma de residuos sólidos urbanos ya desarrolladas o que se están desarrollando a gran escala. Valorar sus puntos fuertes y débiles.
- Comparar esta tecnología con las competidoras directas, tanto en cuestiones técnicas como en las económicas. Especialmente con la gasificación convencional (que está más desarrollada comercialmente) y con la incineración, que es la referencia.

Para ello se divide en los siguientes capítulos:

- Capítulo 2: se resumen los posibles tratamientos existentes para los RSU, los combustibles derivados y las diferentes plantas de valorización energética.
- Capítulo 3: se estudian en detalle varias plantas de valorización energética existentes. Una incineradora, otra de gasificación convencional y dos de gasificación por plasma.
- Capítulo 4: balances de materia y energía para plantas de gasificación convencional y por plasma.
- Capítulo 5: análisis económico.

2 TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE RSU Y DERIVADOS

En este capítulo se hará un resumen de las alternativas existentes a la hora de tratar los RSU, así como de los combustibles derivados de éstos. También se enumerarán diferentes compañías que desarrollan la gasificación por plasma explicando cómo es la tecnología y el proceso de cada una.

2.1 Vertederos controlados

El vertedero controlado es la solución más extendida para el tratamiento de residuos, tanto urbanos como industriales. Se considera que es controlado cuando no resulta molesto ni nocivo a la salud o el medioambiente.(10)(11)(12)(13)(14)

Consiste en un terreno especialmente preparado donde se produce la deposición de los residuos que posteriormente se compactan y recubren con tierra formando capas. Dependiendo de la compactación, hay vertederos de baja, media o alta densidad y cuanto mayor sea ésta, menos frecuentes han de ser los recubrimientos. De esta manera se evita la proliferación de animales, los vertidos contaminantes y los incendios entre otros problemas.

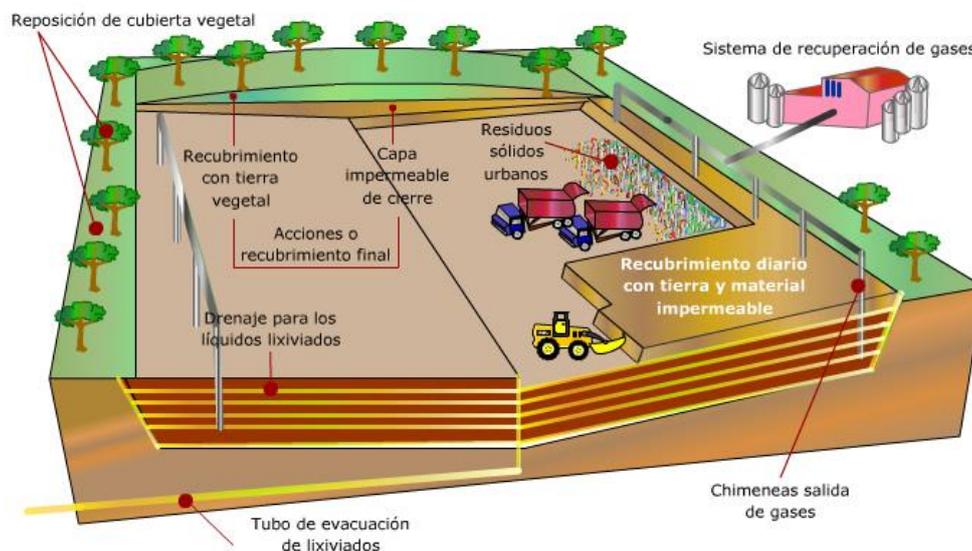


Figura 2 Vertedero

Se producen una serie de transformaciones de naturaleza biológica anaerobias o aerobias en según qué casos y se produce gas de vertedero, el cual está compuesto principalmente por metano junto con nitrógeno y vapor de agua. Este gas causa numerosos problemas como incendios, inestabilidad por bolsas y daños medioambientales. Sin embargo, se puede aprovechar como fuente de energía mediante una instalación que lo capta, conduce y transforma en biogás.

Su emplazamiento y diseño atiende a varios factores:

- No debe estar cerca de poblaciones por las molestias que causa a la población pero tampoco demasiado alejado de éstas porque incrementaría mucho el coste de transporte. Así como tampoco puede estar cerca de aeropuertos, yacimientos de interés histórico ni fuentes de agua o electricidad.
- También deben tenerse en cuenta las condiciones geológicas y topográficas del terreno, tales como su resistencia o permeabilidad en el primer caso y la facilidad de operación en el segundo.

- La naturaleza hidrológica del terreno, para saber en qué cuenca hidráulica influirá el vertedero y el recorrido que llevará el agua de la lluvia, así como la erosión que provocará
- La meteorología es muy influyente, puesto que la velocidad de las transformaciones biológicas es proporcional a la temperatura, las lluvias condicionan el diseño hidráulico y el viento en la posibilidad de que se esparzan olores y partículas.

Este es el método más extendido para el tratamiento de RSU en España, aún muy por encima del compostaje, por lo que tiene la gran ventaja de que es una solución muy extendida y sobradamente probada. Sin embargo son numerosos los inconvenientes que en la práctica tienen los vertederos, ya sean inherentes, por problemas de diseño o de operación:

- Malos olores, ruidos e impactos visuales en las poblaciones cercanas. Son mitigables pero en ocasiones es inevitable que la instalación de un vertedero provoque tales molestias, por lo que es común la oposición de la opinión pública a que se emplacen cerca de sus poblaciones.
- Riesgo de producirse efluentes líquidos incontrolados, provenientes del lixiviado contaminante de los residuos.
- Las grandes necesidades de terrenos, necesitando posteriormente éstos un control exhaustivo de las emisiones contaminantes tras la clausura. La mayor compactación de los residuos puede permitir un mayor aprovechamiento, no obstante, a largo plazo será complicado encontrar nuevos emplazamientos.
- Las materias primas no recicladas se pierden sin obtener ningún beneficio. Se está planteando la “minería de vertederos” para recuperarlas de aquellos donde no hubo reciclaje o fue poco eficiente.

Desde los años 90 se ha realizado un plan para eliminar los vertederos incontrolados en España y cumplir así con la normativa europea, recogida en el RD 1481/2001. No obstante, aún a día de hoy hay algunos que siguen sin estar completamente controlados, lo cual ha dado lugar a un conflicto político al no cumplirse los plazos dados por la UE para este fin (15).

2.2 Compostaje y tratamientos biológicos

El compostaje consiste en someter la fracción orgánica de los residuos a la acción de microorganismos en condiciones aerobias durante una fase de maduración hasta que alcanza cierta estabilidad al cesar la actividad biológica. Aunque sus características finales pueden variar, normalmente siempre presenta unas comunes tales como el color marrón, la relación carbono/nitrógeno baja, cambio continuo debido a los microorganismos y una gran capacidad de absorber el agua e intercambiar cationes. (16)(17)(18)

El compost obtenido es utilizado para mejorar las propiedades de ciertos suelos o como fertilizante al ser rico en amoníaco, potasio, fósforo y sulfatos, compuestos fundamentales para el crecimiento de las plantas. Además se reduce el volumen y se destruyen los organismos patógenos y huevos de insectos que haya en los residuos.

Para su comercialización es necesario que cumpla por normativa, que en España está regida por un Real Decreto y en Andalucía además por una acreditación ambiental de calidad, una serie de características en cuanto a:

- Materia orgánica, humedad, relación Carbono/Nitrógeno y granulometría.
- Contenidos máximos de metales pesados (Cd, Cu, Ni...)
- Presencia de microorganismos por debajo de ciertos niveles.
- Porcentaje en peso de impurezas como gravilla.
- Semillas de malas hierbas.

Existen varios métodos de compostaje:

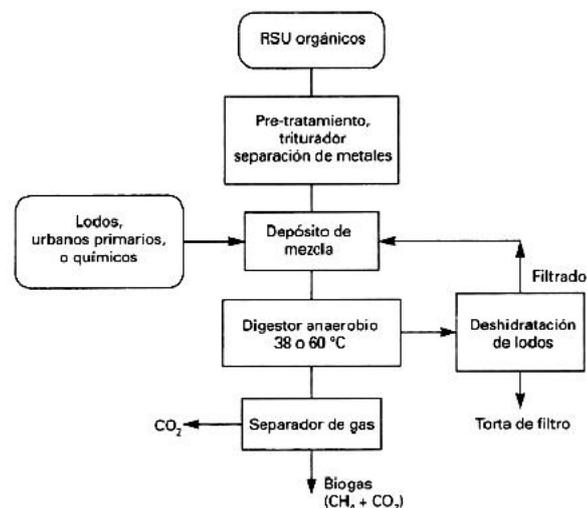
- En hilera: es el más antiguo y simple, consiste en hacer hileras de varios metros de longitud que se va volteando con ayuda de maquinaria para airearlo.
- En pila estática aireada: similar al anterior con la diferencia de que se airea con una serie de tuberías por las que se sopla o aspira el aire. Se le añade una capa de compost ya preparado por encima para controlar el olor.
- Aireación pasiva: como el anterior pero el aire circula por convección al estar el de dentro a mayor temperatura que el ambiental.
- En reactor: se utilizan numerosas configuraciones, siendo las más comunes similares a flujo pistón y tanque agitado. En los últimos años ha aumentado mucho su utilización debido al buen aislamiento de olores, el mejor rendimiento y el control que puede tenerse sobre el proceso.

Por otro lado, están los procesos anaerobios, los cuales son realizados en reactores cerrados y dan lugar a biogases. Se realiza mediante diferentes microorganismos en dos etapas, en la primera se transforman los compuestos orgánicos en ácidos grasos y en la segunda son convertidos en los productos:

- Gaseosos, principalmente (>90%) CH_4 y CO_2 ; en menor medida hay SH_2 y H_2 . Tras eliminar el ácido sulfhídrico, puede utilizarse para producir electricidad.
- Residuo sólido (digestato) que puede convertirse en compost, aunque para facilitararlo, suele mezclarse con residuos agrícolas y de jardinería.

Es necesario aportar energía externa para que se mantenga a las temperaturas necesarias, unos 35 o 60 °C, dependiendo del tipo de bacterias utilizadas. Además se debe evitar la presencia de residuos no orgánicos como metales y vidrio.

Está muy extendida su aplicación en el tratamiento de residuos con alta humedad, ya que ésta impide la correcta aireación en el compostaje, como pueden ser fangos o restos de alimentos. Hay diferentes tecnologías para este proceso, de una o dos etapas que pueden ser secas o húmedas, un diagrama de flujo de un proceso básico sería como este: (19)



2.3 Incineración

Se trata del método tradicional de tratamiento térmico para residuos, estando muy desarrollada su tecnología y cuenta además con un amplio campo de aplicaciones. Puede utilizarse tanto para residuos sólidos urbanos como para residuos industriales y peligrosos e incluso para tratar fangos, siempre que la instalación lo permita. Consiste en someter al residuo a altas temperaturas (por encima de 850 °C) en presencia de aire de tal manera que el oxígeno sea superior al estequiométrico y a presión atmosférica. (18)(20)

En primer lugar la alimentación debe ser sometida a una reducción de tamaño y separación de residuos

metálicos, reciclables y/o que puedan entorpecer el correcto funcionamiento de la instalación. El tamaño de alimentación resultante dependerá del tipo de horno y del residuo a incinerar; por ejemplo en el caso de los residuos peligrosos, cuando éstos deben ser destruidos sin sacarlos de su recipiente. También, si es posible, se disminuye la humedad del residuo. En algunas plantas de residuos sólidos, éstos son convertidos en pellets de tal manera que pueden ser almacenados o llevados a incinerar a otras instalaciones.

Además hay que tener en cuenta el poder calorífico del residuo

Existen varios tipos de horno:

- **Cámaras de inyección**
 - Se utilizan para líquidos, fangos o suspensiones que puedan bombearse.
 - Tiene una cámara de forma cilíndrica, consta de quemadores que pulverizan el residuo y el combustible de apoyo.
 - Se alcanzan temperaturas superiores a 1500 °C en ciertos casos con tiempos de residencia de hasta 3 segundos.
- **Hornos rotatorios**
 - Equipo cilíndrico dispuesto de manera horizontal con el interior cubierto por material refractario.
 - La entrada está colocada a una cota ligeramente superior que la salida y así se logra la pendiente (hasta un 5%) necesaria para que el residuo pueda moverse.
 - Se puede ajustar con facilidad el tiempo de residencia.
 - Gran flexibilidad con la alimentación que procesa, incluso pueden introducirse residuos peligrosos en contenedores metálicos.
- **Hornos de parrilla móvil**

Es el método más utilizado para la destrucción de RSU en Europa, se estima que el 90% de las instalaciones operan con este tipo de horno. Además también tratan residuos industriales no peligrosos, residuos hospitalarios y fangos.

Cuenta con un mecanismo que va moviendo los residuos por la parrilla mientras estos se someten a las altas temperaturas. Además la parrilla cumple con la función de aflojamiento del material y distribuye el aire de manera efectiva con un sistema colocado bajo la parrilla. Hay para cargas continuas o discontinuas y a su vez varios tipos de cada una, como pueden ser oscilantes, de vaivén o de rodillos. Aunque los operadores no han encontrado grandes diferencias entre los diseños que se han implantado en Europa.

Por legislación se requiere trabajar a temperaturas entre 850 y 1100 °C, tiempos de residencia de los gases de 2 segundos tras el último aporte de aire primario e incluso se establecía un exceso de oxígeno mínimo (ya derogado) del 6%. Se ha demostrado que a temperaturas, tiempos de residencia y excesos inferiores también se produce una combustión efectiva para algunos casos, siendo los niveles de monóxido de carbono un indicador clave de la calidad de la combustión.

Dispuesto a continuación del anterior, hay un horno de postcombustión en el que se suministran combustibles de apoyo, se asegura la destrucción del residuo

Para su diseño deben tenerse en cuenta varios factores, aunque depende mucho también del tipo de parrilla y del fabricante:

- Tamaño y forma
- Flujo de gases de combustión
- Tiempo de residencia de los gases en el horno
- Enfriamiento de los gases para evitar la fusión de las cenizas

Tiene una buena flexibilidad en cuanto al tamaño de la alimentación aunque no al nivel de un horno rotatorio.

- **Hornos de lecho fluidizado**

Horno de forma cilíndrica vertical, sirve para incinerar residuos finamente triturados o lodos, de tal manera que sean fluidizables. En la parte inferior, sobre la placa de distribución del aire de entrada, se dispone un lecho de material inerte como arena. Se realiza la alimentación por el lateral y la salida de gases por la parte superior. Los quemadores y las entradas secundarias de aire también se disponen en los laterales.

Una de las mayores ventajas de este tipo de hornos es que logra una homogeneización buena de la temperatura a lo largo del lecho, aumentando ésta en la parte superior donde no hay partículas inertes. Esto permite operar a temperaturas menores, de 650 °C en el lecho y de unos 900 °C en el margen superior, además de necesitar un menor exceso de aire que otros tipos de horno.

Entre sus inconvenientes destacan el riguroso control de la temperatura necesario para evitar la fusión del material inerte, puesto que si se produjera podría atascarse la placa distribuidora. También está la limitación en cuanto a las características de la alimentación, el material debe ser homogéneo y tener una granulometría de 50 mm de tamaño máximo, lo que puede hacer necesaria una preparación previa compleja que requiera tanto trituración como mezcla controlada de residuos. Precisamente el coste de este proceso previo es uno de las mayores hándicaps y por tanto sólo es rentable para proyectos de gran escala, aunque se ha mitigado con la recogida selectiva de ciertos residuos lo que hace más sencillo lograr una alimentación adecuada

En los últimos años se está investigando la aplicación de lechos fluidizados circulantes en los cuales la velocidad del aire que entra por la placa inferior es lo bastante alta como para arrastrar el lecho. A continuación se dispone de otra cámara con un ciclón para separar las partículas y éstas se conducen hacia la parte inferior de la primera. Esta configuración permite un mejor control del tiempo de residencia e incluso la depuración de gases ácidos inyectando las sustancias adecuadas.

Hay una fuerte oposición social a este tipo de instalaciones, por un lado se sospecha que puede acarrear problemas de salud y medioambientales a largo plazo en la zona cercana incluso cumpliendo la normativa sobre monitoreo de emisiones. Por otro, está la posibilidad de que se incineren residuos susceptibles de ser compostados o reciclados, opciones mejor consideradas medioambientalmente. Y además este tipo de plantas pueden suponer un sobre coste a los organismos públicos que las contraten cuando no se alcanzan las expectativas de volumen de residuos procesados o teniendo que asegurar un precio de venta de la electricidad.

Sin embargo, pueden ser un buen complemento para la producción eléctrica de un país, especialmente en épocas en las que el precio de los combustibles es alto. Y en regiones donde el terreno disponible para construir vertederos es escaso (como islas y ciudades autónomas en España o en países como Japón) supone una solución para los RSU sin tener que depender de terceros.

2.4 Pirólisis y gasificación

Son operaciones en las que se busca la conversión del residuo en compuestos químicos útiles ya sea como materia prima o combustible. El producto obtenido se conoce comúnmente como gas de síntesis y está formado principalmente por CO, H₂ y CH₄ además de otros como nitrógeno, CO₂ o vapor de agua, dependiendo del residuo y el tipo de operación. Es común que ambas operaciones se combinen entre sí o con una combustión en un mismo proceso, compartiendo ambas la ventaja con respecto a la combustión convencional de que los caudales de gases a tratar son menores por requerir menos aire.(20)(21)

La gasificación consiste en producir una combustión parcial de la alimentación de tal manera que se mantenga el interior del reactor a la temperatura suficiente como para que se produzca la descomposición del residuo. Puede realizarse en algunos hornos de incineración, disminuyendo el aporte de aire

Existen varios tipos de gasificador:

- De lecho fluidizado
- De corrientes paralelas
- De tipo ciclónico

- De lecho relleno

Los residuos líquidos, pastosos o finamente granulados pueden ser alimentados directamente. En caso contrario, como sucede con los RSU, es necesario un pretratamiento.

La pirolisis es someter a un material a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, de tal manera que sus compuestos volátiles se convierten en gas y el resto se quedan como coque sólido. En un término más amplio, esta operación se incluye en un proceso más amplio que consta de otras operaciones:

- Combustión lenta a unos 500 °C.
- Pirolisis en la que se forma un gas a partir de compuestos orgánicos. Su temperatura está entre los 500 y 800 °C.
- Gasificación del carbono del coque resultante de la pirolisis con ayuda de un agente que puede ser aire, oxígeno o vapor a temperaturas de hasta 1000°C.
- Incineración de coque y gas de síntesis. Este paso depende de la tecnología empleada y de la configuración del proceso.

Generalmente en las plantas de tratamiento de RSU se incluyen previamente separación, trituración y secado del residuo.

Las instalaciones de gasificación/pirolisis según sus desarrolladores y constructores, suponen una forma limpia, segura y económica de aprovechar los residuos para generar energía. Sin embargo los detractores sostienen que no aportan grandes ventajas en términos de contaminación con respecto a la incineración convencional e incluso que la formación de dioxinas y furanos puede ser incluso superior en las grandes instalaciones. (18)

A continuación se incluye una tabla resumen de las tecnologías más desarrolladas de valorización energética de residuos y la frecuencia con la que se aplica para cada tipo de residuo:(17)

Tabla 4 Aplicación de cada tecnología a cada residuo

Técnica	Residuos urbanos sin tratar	RSU pretratados y RDF	Residuos peligrosos	Lodo de alcantarillado	Residuos clínicos
Parrilla-reciprocante	Se aplica ampliamente	Se aplica ampliamente	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica
Parrilla-móvil	Se aplica	Se aplica	Se aplica raramente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Parrilla-oscilante	Se aplica	Se aplica	Se aplica raramente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Parrilla-rodillos	Se aplica	Se aplica ampliamente	Se aplica raramente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Parrilla-refrigerada por agua	Se aplica	Se aplica	Se aplica raramente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Parrilla más horno rotativo	Se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica raramente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Horno rotativo	Normalmente no se aplica	Se aplica	Se aplica ampliamente	Se aplica	Se aplica ampliamente
Horno rotativo-refrigerado por agua	Normalmente no se aplica	Se aplica	Se aplica	Se aplica	Se aplica
Solera estática	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica ampliamente
Horno estático	Normalmente no se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica ampliamente	Normalmente no se aplica	Se aplica
Lecho fluidizado-borboteo	Se aplica raramente	Se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica	Normalmente no se aplica
Lecho fluidizado-circulante	Se aplica raramente	Se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica ampliamente	Normalmente no se aplica
Lecho fluidizado-rotativo	Se aplica	Se aplica	Normalmente no se aplica	Se aplica	Se aplica
Pirólisis	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente
Gasificación	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente	Se aplica raramente

2.5 Gasificación por plasma

2.5.1 Introducción

Actualmente se está investigando el uso del plasma como método eficiente para destruir residuos contaminantes, transformándolos en productos inertes con posible interés económico o que al menos se puedan depositar sin riesgo en un terreno habilitado.

Debido al gran gasto energético, se está buscando la manera de integrarlo en un proceso en el que se recupere parte de la energía, ya sea produciendo vapor por el calor de las corrientes de salida del reactor de plasma o mediante los productos generados.

Por otro lado, tiene la ventaja de que la transmisión de calor es más rápida y efectiva que en otros métodos tradicionales. Además, al dividir residuos en sus elementos básicos se puede realizar un reciclaje más efectivo, siendo otro aspecto que puede ayudar a la rentabilidad económica de este tipo de plantas(21).

2.5.1.1 Tratamiento de RSU

Se están desarrollando varios métodos para realizarlo:(22)

Gasificación por plasma. Se realiza de manera parecida a la convencional, al calentar el sólido en presencia de oxígeno y/o vapor de agua, se forma gas de síntesis que puede usarse para otros procesos químicos o utilizarse como combustible. A su vez se obtiene vapor aprovechando la entalpía de los productos que hay a la salida, obteniéndose electricidad mediante una turbina y se recupera parte de la invertida en el proceso o incluso que haya una producción neta. Como ejemplos de este proceso para tomar como referencia están:

- EcoValley plasma gasification Facility. Utashinai (Japón). Hitachi Metals y Westinghouse E. C.
- Planta experimental en Yblin (Israel). Enviromental Energy Resources ltd.
- Planta de tratamiento de residuos en Shangai (China). GTS Energy y Westinghouse Plasma Corp.

Gasificación integrada con pila de combustible. Es una variación del proceso anterior en la que el gas de síntesis es dirigido a una pila de carbonatos fundidos para generar electricidad, que ofrece una eficiencia eléctrica del 36% y no requiere una buena calidad del gas. Actualmente no hay plantas funcionando con esta tecnología, pero sí que se ha modelado su comportamiento y hay proyectos de desarrollarlo en Reino Unido y Tailandia, en ambos está involucrada la consultora londinense Waste2Tricity.(23)(24)

Gasificación combinada con fermentación. Se trata de usar el gas de síntesis producido de la misma forma que los anteriores para elaborar bioetanol en un reactor biológico. Entre la gasificación y éste último se requiere un proceso de limpieza del gas. Tiene la ventaja de que puede ser usado como combustible y se abre un nuevo mercado derivado del tratamiento de RSU. Por el contrario no es una tecnología plenamente desarrollada y tal vez no sea económicamente viable a gran escala, puesto que aún no se conocen bien los costes de operación.

Hay una planta piloto en Arkansas (EEUU) desarrollada por BRI Energy y Bioengineering Resources Inc.(25)

2.5.1.2 Destrucción de residuos peligrosos

Se ha estudiado el efecto de la gasificación por plasma para multitud de residuos calificados como peligrosos cuyo tratamiento es complicado. (26)

Residuos médicos: la alta temperatura y rápida transferencia de calor destruye cualquier resto orgánico ya sean tejidos, fluidos, bacterias o virus. Se han realizado experimentos con material contaminado procedente de hospitales y los productos de salida no contenían material biológico ninguno. Además pueden tratarse conjuntamente vidrios, plásticos, celulosa... por lo que no se requiere separación previa y da lugar a sólidos inertes y gases que sólo necesitan depuración convencional e incluso pueden ser usados como combustible.

Amianto: comúnmente para su tratamiento debe ser inmovilizado con cemento o polímeros debido a las enfermedades pulmonares que producen sus fibras. Sin embargo el plasma a alta temperatura puede fundirlo,

recristalizando en un producto más compacto y libre de fibras.

Cenizas volantes: son un residuo industrial derivado de depurar gases. Por su composición son consideradas peligrosas en ciertos casos ya que pueden contener metales, tener pH alcalino, contener iones solubles en ciertos casos... El tratamiento con plasma logra vitrificarlas de tal manera que el producto supera las pruebas para residuos peligrosos europeos.

Residuos con cloro: el tratamiento térmico convencional de estos residuos supone un problema debido a que se pueden formar dioxinas y furanos, contaminantes resistentes a las altas temperaturas y que se forman por la combinación de cloro, monóxido de carbono, catalizadores metálicos y temperaturas de unos 300 °C. Experimentos empleando antorchas de arco no transferido para destruir clorocarburos han demostrado la efectividad de este método debido a su posibilidad de someterlos a alta temperatura durante varios segundos seguido de un enfriamiento rápido, por lo que no se forman dioxinas y furanos posteriormente.

2.5.1.3 Destrucción de residuos de la industria metalúrgica

Es posible tratar cenizas y aguas residuales de la industria metalúrgica cuyo impacto en el medioambiente es notable debido a que liberan metales pesados por lixiviación y su alta alcalinidad. Además está el factor añadido de que es posible reciclar algunos de los metales que contienen, ya sea como óxidos tras la solidificación (hierro, níquel,...) o condensando los gases (cinc, plomo,...). (26)

Se están investigando diferentes configuraciones como PLASMADUST que combina el plasma de arco con un horno de carbón para obtener cinc y una escoria no tóxica. O plasma por radiofrecuencia para tratar polvos finos en operación continua y usarlo en la producción de cerámicas.

En el caso de los efluentes líquidos derivados del galvanizado y las electrodeposiciones se han realizado experimentos en los que se obtienen formas minerales no tóxicas.

En la producción de aluminio se obtienen grandes cantidades de desecho debido a la reacción del metal fundido con la atmósfera y se considera peligroso por los lixiviados que podrían producir. El plasma térmico podría disolverlos e incluso integrarse en un proceso de reciclado del aluminio que contienen.

2.5.1.4 Destrucción de otros compuestos de carbono

En los tratamientos de RSU ya se han incluido residuos con plásticos comunes dentro del conjunto, aunque también se han realizado estudios exclusivamente de tratamiento de plásticos mediante pirolisis por plasma usando antorchas de arco no transferido, supuestamente mejores por el tipo de material a tratar. Un informe al respecto de una agencia del ministerio de Medio Ambiente de la India muestra los resultados experimentales de una serie de pruebas y concluye que puede ser una buena solución en ciertos casos en los cuales es muy alto el precio de otras soluciones y/o si hay una gran cantidad de plásticos. Además aquellos polímeros que no puedan ser destruidos o reciclados mediante procesos térmicos convencionales, pueden ser tratados mediante este método. La producción eléctrica conjunta (debido al gas de síntesis generado) depende mucho del tipo de plásticos alimentados, incluso se sugiere la inclusión de otros materiales junto a éstos como puede ser algodón para que sea más eficiente. Los análisis de los gases de salida revelan que las emisiones de contaminantes (CO, CO₂, dioxinas, furanos,...) son siempre más bajas que las de una incineración común, siendo muy efectiva en este sentido con polímeros clorados también.(27)

Los residuos carbonosos en general (como puede ser carbón vegetal o derivados de petróleo) también han sido testados en una pirolisis con plasma y se produce igualmente gas de síntesis. La experimentación ha demostrado que es más efectiva cuando se produce en presencia de oxígeno o vapor de agua.

Para la descomposición de alquitranes existen datos experimentales de que el reformado mediante plasma de arco no transferido logra eficiencias del 88,3% en la descomposición, con un consumo de 0,013 g/kWh. Otro método experimental que usa una antorcha de microondas es capaz de lograr eficiencias para la descomposición incluso mayores, destruyendo todo el alquitrán introducido. Aunque en ambos casos son resultados provenientes de sendas pruebas de laboratorio.(28)

2.5.1.5 Depuración de gases

Uno de los contaminantes que más se están restringiendo en las emisiones gaseosas son los NOx. Su gran

estabilidad provoca que sea complicada la eliminación de los mismos, aunque se han realizado pruebas a escala de planta piloto para su eliminación mediante plasma no térmico. Hay varios procesos en estudio(29):

LoTOx: desarrollado por BOC gases, utiliza ozono generado mediante el plasma no térmico para oxidar NOx y que sea tratado en un depurador cáustico. Elimina entre un 80 y un 95 % de NOx.

WESP: desarrollado por Powerspan Corp. Está diseñado para eliminar varios contaminantes a la vez. Consta de un electrofiltro seco, seguido por una oxidación electro-catalítica para la cual hay un generador de plasma de barrera dieléctrica, posteriormente pasa por una unidad de depuración en dos etapas (neutraliza y absorbe los ácidos formados) y por último hay un precipitador electroestático húmedo que elimina nieblas y aerosoles.

Tabla 5 Destrucción de contaminantes

CONTAMINANTE	DRE (eficiencia de destrucción y eliminación)
Bióxido de azufre, SO ₂	98 %
Óxido de nitrógeno, NO _x	90 %
Particulado total, TPM	99.9 %
Particulado fino, PM ₁₀	95 %
Mercurio, Hg	80 - 90 %

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles también se ha experimentado su destrucción mediante radicales de oxígeno e hidrógeno que se generan por plasma no térmico, dando resultados de un 60 a un 90 % de eficiencia.

2.5.2 Procesos comerciales de gasificación por plasma

Aquí se recopilan diferentes procesos de gasificación por plasma que han sido desarrollados de forma comercial por alguna compañía, ya sea a escala industrial o con proyectos a escala piloto de cierta importancia.

2.5.2.1 Europlasma

Compañía con sede en Francia, tiene una filial llamada CHOPower dedicada a la producción de energía a partir de RSU(30).

Tienen una planta estándar diseñada que produce 10 MW a partir de uno sólo de estos combustibles en la cantidad indicada:

- 75000 T/año RSU
- 55000 T/año residuos industriales no peligrosos
- 50000 T/año biomasa preparada

El coste de inversión es de 35 a 45 M€y la construcción dura 18 meses, tiempo que marca su contrato. Las superficies necesarias para la planta son compactas y aseguran que requieren menos de 10000 m².

Disponen de una planta en Morcenx (Francia) con capacidad de 50000 T/año que produce 12 MW como demostración de su tecnología.

El proceso consiste en:

- 1- Recepción, separación de material reciclable, trituración y almacenamiento.
- 2- Gasificación (explicada en detalle más adelante).
- 3- Tratamiento de gases: enfriamiento, eliminación de ácidos y también de partículas.
- 4- Motores de gas para producir energía eléctrica
- 5- Posibilidad de usar los gases de escape para producir vapor y hacer así un ciclo combinado.

El reactor de gasificación

No usa directamente antorchas para gasificar, sino que son usadas para el cracking térmico de los gases de salida y la vitrificación. Las antorchas son de arco no transferido, realizadas en cobre refrigerado por agua

usan un sistema desarrollado por Europlasma llamado “turboplasma” y ofrecen un rendimiento del 75 al 80 % (energía plasma/energía eléctrica). Consta de las siguientes partes:

- Zona de secado, usando calor reciclado. Se produce vapor a 200°C.
- Gasificador tipo “stoker grate auto-thermal” que también aprovecha también el calor reciclado de las otras partes. Consta de dos zonas:
 - o De gasificación, donde se forma gas de síntesis a unos 850 °C.
 - o De combustión, donde entra aire fresco pero siempre de tal forma que haya déficit de oxígeno.
- Limpieza de gas de síntesis, en la cual una antorcha eleva su temperatura hasta los 1200 °C y destruye compuestos orgánicos como dioxinas.
- Unidad de fundición, donde la materia que no ha gasificado se funde formando un producto vitrificado mediante otra antorcha. Se produce calor para reciclar.

2.5.2.2 Plasco energy group

Compañía con sede en Ottawa (Canadá).

Ha desarrollado un proceso parecido al de Europlasma en el cual la antorcha de plasma no gasifica directamente los residuos, sino que una depura los gases a la salida del gasificador y otra funde el residuo sólido.

Tiene plantas en operación, una en Castlegali (España) con una capacidad de 5 T/día operada por HERA y otra en Ottawa (Canadá) de 85 T/día. Además está en desarrollo una de mayor tamaño también en Ottawa para procesar entre 300 y 400 T/día. Ha sufrido varias modificaciones su proyecto y según la última información aportada esta cifra estaría en torno a 300 en su versión definitiva. (31)

Planta de Ottawa:

El análisis de la nueva planta sirve para entender el proceso que propone esta compañía, puesto que se trata de un proyecto puramente comercial y no con objetivos de investigación como los otros.

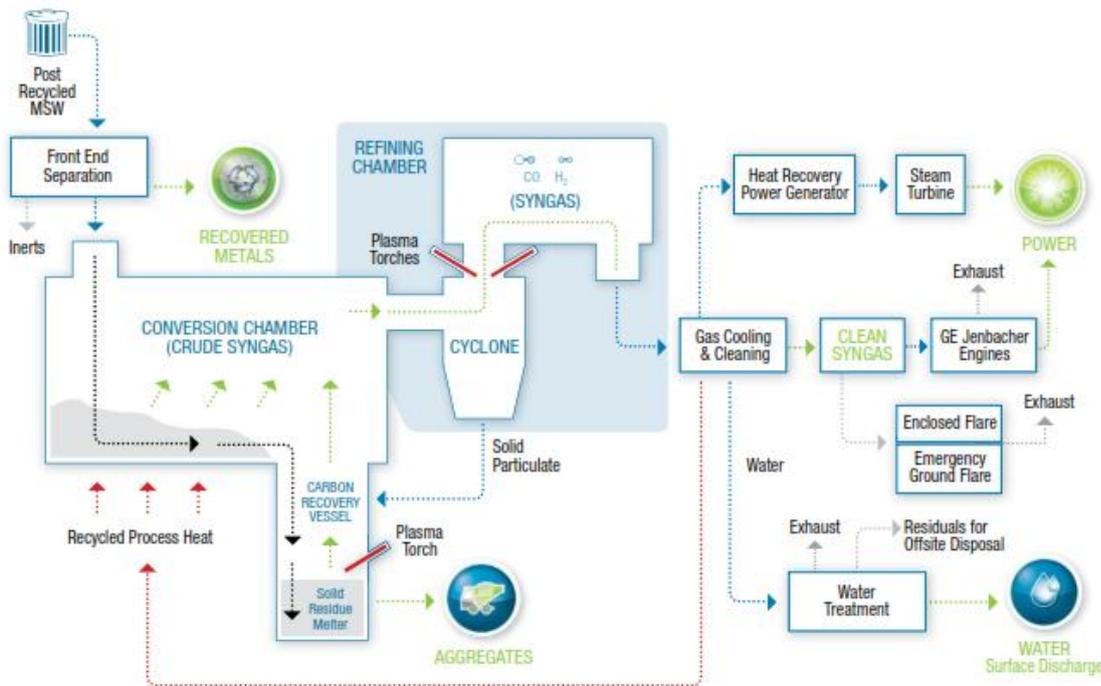


Figura 3 Esquema de la planta de Plasco en Ottawa

Detalladamente, el proceso tiene las siguientes partes:

- Recepción:

- Pueden recibirse hasta 570 T/día de residuos no peligrosos.
- Almacenamiento para 810 T en bruto y 1230 T de material procesado para alimentación.
- Preparación de residuos:
 - Metales y materiales sin contenido energético que sean identificados visualmente son separados.
 - Son almacenados para su reciclado o envío a vertedero.
 - El resto se somete a trituración y separación de metales:

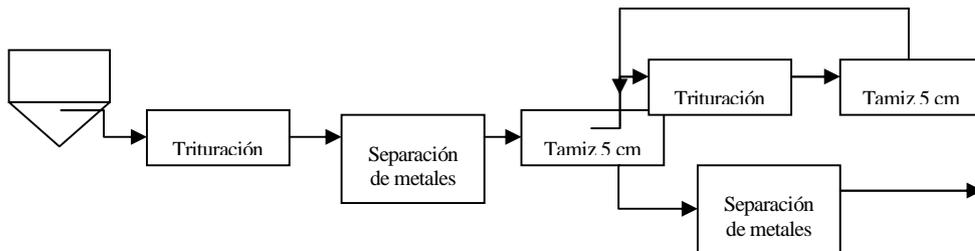


Figura 4 Proceso previo Plasco

- Conversión de residuos:
 - Consiste en un sistema llamado ICARS (Sistema Integrado de Conversión y Refinado) que consta de cuatro reactores interconectados tal y como se aprecia en la fig. 1:
 - Cámara de conversión
 - Reactor de recuperación de carbono
 - Cámara de refinamiento
 - Fundidor de residuos sólidos
 - Cámara de conversión: trabaja sin oxígeno, aplica controladamente aire caliente de otras partes del proceso como fuente de calor.
 - Reactor de recuperación de carbono: con el aporte energético de aire caliente reciclado, se transforma el carbono fijo en CO.
 - Fundición de residuos: mediante una antorcha de plasma se funden los residuos sólidos y posteriormente es solidificado en gránulos.
 - Cámara de refinamiento: el gas de síntesis pasa por un ciclón donde se separan las partículas que son recirculadas al reactor de recuperación de carbono. Después se le añade aire caliente y entra en una cámara con antorcha de plasma donde se destruyen los hidrocarburos de cadena larga.
- Sistema de procesamiento de gas:
 - Recuperador: consiste en dos intercambiadores que enfrían el gas de síntesis con aire. Éste servirá como fuente de calor en el proceso.
 - Quench húmedo
 - Scrubber Venturi con HCl.
 - Unidad de desulfuración.
 - Las corrientes resultantes del proceso anterior:
 - Líquidas son sometidas a filtrado
 - Gaseosas pasan por un lecho de carbón activo
 - Hay un sistema de venteo de emergencia.
- Sistema de generación de electricidad:
 - Se producen 22 MW (aprox.) de los cuales 15 serán para exportar.
 - El gas de síntesis sirve como combustible para 10 motores Jenbacher de G.E. con una potencia de 1,94 MW cada uno.

- Los gases de combustión y el aire caliente del proceso se mezclan y sirven para producir vapor de media presión en un intercambiador. Posteriormente se conducirán a un sistema de control de emisiones antes de ser expulsados a la atmósfera.
- El vapor de media presión mueve una turbina que produce unos 2,5 MW de electricidad.
- Sistema de antorchas
 - Antorchas cerradas para puestas en marcha y paradas, cuando la calidad del aire no es suficiente como para emplearlo en los motores.
 - Antorcha abierta de emergencia.
- Planta de tratamiento de aguas residuales
 - Es necesario controlar sus características
 - Puede usarse para el regadío

2.5.2.3 Inentec

Compañía con sede en Richland (EEUU). Fue fundada a partir de una serie de investigaciones llevadas a cabo por el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) y el PNNL (Battelle Pacific Northwest National Laboratory) financiadas por el Departamento de Energía de EEUU. Posteriormente se buscaron aplicaciones comerciales, fundándose la empresa de la cual proviene InEnTec LLC.

Cuentan con un sistema de gasificación por plasma en el cual entra el plasma directamente con el residuo a gasificar. Es válido para todo tipo de residuos siempre y cuando sean sólidos. (32)

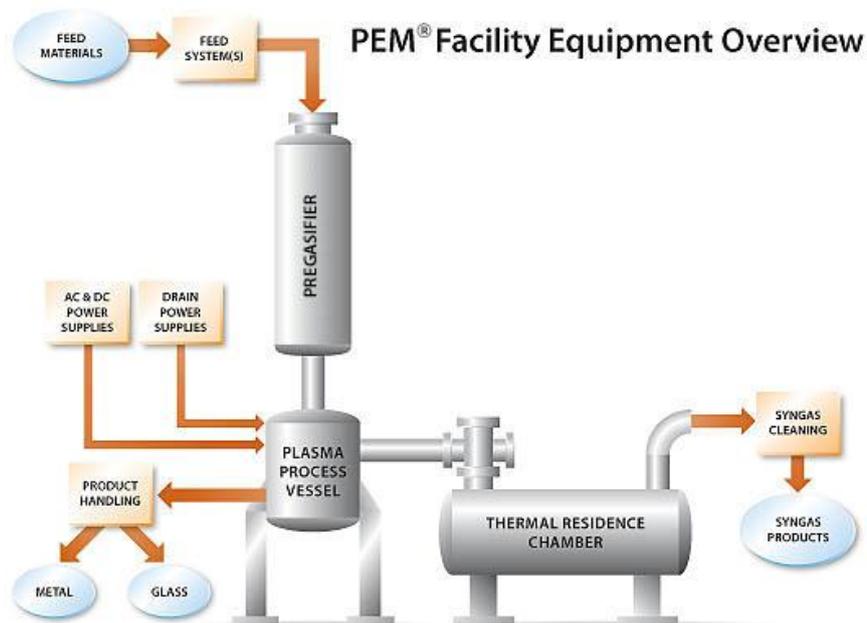


Figura 5 gasificador de InEnTec

- Sistema de alimentación: Introduce el material y tiene un diseño en función de cuál sea.
- Pregasificador: zona de proceso preliminar donde aproximadamente el 80% de la materia orgánica es convertida a gas de síntesis. El resto se transfiere a la cámara de proceso a través de un orificio en la parte inferior.
- Cámara de proceso: El material llega a una superficie de vidrio fundido en la que se funde. La intensa energía del arco de plasma provoca la gasificación del material orgánico restante, mientras que los compuestos inorgánicos son evacuados por el fondo, habiendo un drenado para el vidrio, el cual flota sobre los metales, y otro para éstos últimos. Se transfiere la energía necesaria mediante:

- Arco de plasma de corriente continua entre electrodos de grafito. Es el 75% de la energía que entra.
- Resistencia de corriente alterna, que mantiene la temperatura del material fundido y distribuye calor. También reduce el consumo de la generación de plasma. Es el 14 % de la energía que entra
- Cámara de residencia Térmica: El gas de síntesis entra en esta cámara a alta temperatura, en la cual se completan las reacciones de formación a partir de compuestos orgánicos hasta llegar al equilibrio.
- Limpieza del gas de síntesis: Se prepara el gas en función de su uso posterior.

2.5.2.4 Alter NRG

Compañía con sede en Calgary (Canadá) especializada en la transformación de residuos en energía limpia. Pese a su falta de tradición en el sector, adquirió la estadounidense Westinghouse Plasma en 2007 por lo que se convirtió en un referente al incorporar su tecnología y experiencia.

Cuentan con los datos de operaciones de las dos plantas que Hitachi Metals tenía en Japon, por lo que han tenido información sobre el funcionamiento real de este tipo de plantas antes que la competencia.(33)

Actualmente cuentan con las siguientes plantas comerciales:

- Shanghai, China
 - **Localización:** Shanghai, China
 - **Propietario:** GTS
 - **Alimentación:** RSU y cenizas volantes
 - **Fecha de encargo:** 2014
 - **Configuración de salida:** Slag
- **Wuhan, Hubei, China (demostración)**
 - **Localización:** Wuhan, Hubei, China
 - **Propietario:** Wuhan Kaidi
 - **Capacidad:** 150 T/día
 - **Alimentación:** Biomasa
 - **Fecha de encargo:** 2012
 - **Configuración de salida:** Fischer-Tropsch (FT)
- MEPL, Pune, India:
 - **Localización:** Pune, India
 - **Propietario:** SMSIL
 - **Capacidad:** 72 T/día
 - **Alimentación:** Residuos peligrosos
 - **Fecha de encargo:** 2009
 - **Configuración de salida:** Caldera y producción de energía
- **EcoValley, Japón (cerrada actualmente):**
 - **Localización:** Utashinai, Hokkaido, Japón
 - **Propietario:** Hitachi Metals, Hitachi Ltd.
 - **Capacidad:** 220 T/día
 - **Alimentación:** Municipal Solid Waste and Auto Shredder Residue
 - **Fecha de encargo:** 2003
 - **Configuración de salida:** Caldera y producción de energía
- **Mihama-Mikata, Japón:**
 - **Localización:** Mihama-Mikata, Japan
 - **Propietario:** Hitachi Metals, Hitachi Ltd.

- **Capacidad:** 24 T/día
- **Alimentación:** Municipal Solid Waste and Waste Water Sludge
- **Fecha de encargo:** 2002
- **Configuración de salida:** Caldera y energía térmica

Proceso

Es un proceso similar a los anteriores, en el cual se alimenta el residuo triturado al gasificador. Posteriormente se enfría y depura la corriente de gas que sale para obtener un gas de síntesis utilizable como materia prima o combustible con el que producir energía eléctrica con turbinas de gas y/o de vapor.

Lo que diferencia a este proceso de otros es su gasificador de una sola cámara, en el cual las antorchas se encuentran en la parte inferior y la alimentación se realiza por la parte superior o el lateral. Es similar a un reactor de lecho fluido, los residuos descienden y los gases calientes fluyen en contracorriente produciéndose la gasificación de la materia orgánica. Más adelante se tratará en detalle este proceso.

2.5.2.5 Solena Group

Es una compañía estadounidense dedicada fundamentalmente a la producción de biocombustibles. Entre otros productos, tienen combustibles para aviones que son utilizados por varias compañías.

Su proceso de gasificación por plasma es similar al de Alter NRG, con un reactor el cual es alimentado por los laterales y una serie de antorchas de plasma lo funden. Se agrega cal como fundente para modificar las propiedades del material fundido. Además se introduce oxígeno o aire enriquecido para evitar introducir nitrógeno en la medida de lo posible.(21)



Figura 6 Reactor Gasificación Plasma

Se puede integrar en un proceso de producción de electricidad o combustibles como el resto.

La posición de las antorchas permite que sea gasificado el carbono que acaba sin gasificar en el fondo, donde hay una temperatura aproximada de 1200 °C. El gas de síntesis sale a una temperatura de unos 900 °C, por lo que los precursores de compuestos de carbono peligrosos son destruidos.

Posteriormente, a los gases de salida, se les aplica un enfriamiento rápido (quench) y depuración por métodos convencionales de manera similar a otros procesos.

Se puede alimentar coque de petróleo, carbón, residuos carbonosos y RSU con una gran variedad en cuanto a tamaño y humedad.

2.6 Combustibles derivados de residuos

También es posible transformar los residuos en combustibles líquidos o sólidos, entre los que se encuentran los siguientes:

2.6.1 CSR (Combustibles sólidos recuperados)

Conocido en inglés como SRF. Es un combustible preparado a partir de residuos sólidos no peligrosos estabilizados para incineración o co-incineración según el estándar europeo EN15359. Puede tener numerosas procedencias como fracción resto del RSU, rechazos de plantas de reciclaje, residuos industriales no peligrosos, neumáticos... (34)

Sus características dependen del destino final del residuo, controlándose especialmente:

- El poder calorífico neto, que afecta a la economía del proceso.
- El contenido en cloro, que puede ser especialmente perjudicial dependiendo de la tecnología empleada en la instalación
- El contenido en mercurio y/o cadmio, para el control de emisiones. También se ha propuesto tener el talio en cuenta, pero suele estar en cantidades muy bajas. Este punto depende también de la normativa del país.

Existen diferentes categorías atendiendo a la calidad del CSR, no es lo mismo uno compuesto por residuos especialmente seleccionados de alto poder calorífico a otro que provenga directamente de RSU, así como tampoco lo será en contaminantes. La clasificación se resume en la siguiente tabla, donde para cada parámetro tiene una clasificación numerada del 1 al 5: (35)

Tabla 6 Parámetros CSR

Parámetro	1	2	3	4	5
PCI (MJ/Kg base húmeda)	25	20	15	10	3
% Cl (base seca)	0,2	0,6	1	1,5	3
Hg (mg/Kg base húmeda)	0,02	0,03	0,08	0,15	0,5

El proceso de producción suele tener una serie de pasos como secado, trituración, separación de metales y eliminación de materiales con cloro. Debido a la variedad de residuos y a la naturaleza heterogénea que éstos suelen tener, cada planta opera de una forma diferente.

Como ventaja principal está el aprovechamiento de residuos en lugar de enviarlos a un vertedero y el consecuente ahorro de combustibles fósiles. Sin embargo, las emisiones a la atmósfera deberán estar controladas más estrictamente que en caso de usar un combustible fósil, mediante instalaciones de depuración adecuadas.

2.6.2 CDR (Combustible derivado de residuo)

Es parecido al anterior, un combustible proveniente de residuos que puede estar en forma de sólido, pasta, líquido o gas. La diferencia radica en que los CDR no deben cumplir ninguna normativa oficial, tan sólo las características acordadas entre productor y cliente. En un término más amplio, podría decirse que los CSR son unas variedades concretas de CDR (35)

No obstante, sólo son válidos para las instalaciones específicas que puedan realizar la combustión de estos residuos como las incineradoras y otros tipos que sean previamente autorizadas.

Es un combustible que en España lo utilizan sobre todo las incineradoras convencionales. Sin embargo en los últimos años ha aumentado su consumo en las industrias cementeras, las cuales pueden emplearlo tras obtener una Autorización Ambiental Integrada.

2.6.3 Bioetanol procedente de RSU

Se han planteado algunos métodos para obtener este combustible a partir de residuos, bien sea directamente a partir de éstos o usando el gas de síntesis resultante de su gasificación. Se tomarán los siguientes como ejemplo:

Waste 2 Biofuels de Abengoa

Es un método que ha estado probando la compañía en una planta piloto localizada en Salamanca, según su información, con buenos resultados.

Consiste en una fermentación e hidrólisis enzimática de los residuos para transformar la materia orgánica en una fibra rica en celulosa y hemicelulosa, a partir de la cual se obtiene el bioetanol.

Los datos que ha hecho públicos revelan que pueden obtenerse hasta 60 L de combustible por tonelada de RSU y evita el vertido del 80% de éstos.(36)

Reactor biológico de Coskata

Coskata ha desarrollado un reactor que convierte el gas de síntesis en bioetanol. Consiste en un reactor empacado con delgadas fibras huecas a través de las cuales pasa el gas; mientras que por el exterior de éstas circula agua, bacterias y nutrientes sin que haya contacto directo entre las fases. Las colonias de bacterias crecen en la parte exterior de las fibras y por difusión llega el gas hasta éstas debido a que las paredes actúan como membranas. Las bacterias lo transforman y liberan el etanol al medio acuoso.

De esta manera se puede alimentar más gas de síntesis del que se podría en caso de disolverlo directamente en el agua y además se pueden controlar mejor las concentraciones de etanol de tal manera que nunca lleguen a estar por encima del 3%, lo cual sería perjudicial para las bacterias.

Tras una última etapa de refinado que puede ser realizado por distintos métodos como la permeación, se obtiene el producto final.(37)

3 ANÁLISIS EN DETALLE DE PLANTAS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

3.1 Incineración

Seleccionar una incineradora de referencia para comparar tecnologías resulta complejo debido a la gran cantidad de opciones que hay donde elegir. En cierto modo cada una está configurada para unas necesidades y respecto a la tecnología que había disponible en cada momento.

Se han tenido en cuenta los datos de las incineradoras españolas y del estudio sobre el estado del arte de la incineración de residuos realizado por la Umweltbundesamt (Agencia del Medio Ambiente) austríaca, que incluye un desglose con los costes de inversión y operación típicos para cada tecnología.

De las incineradoras españolas se han podido reunir datos actualizados de:(38)

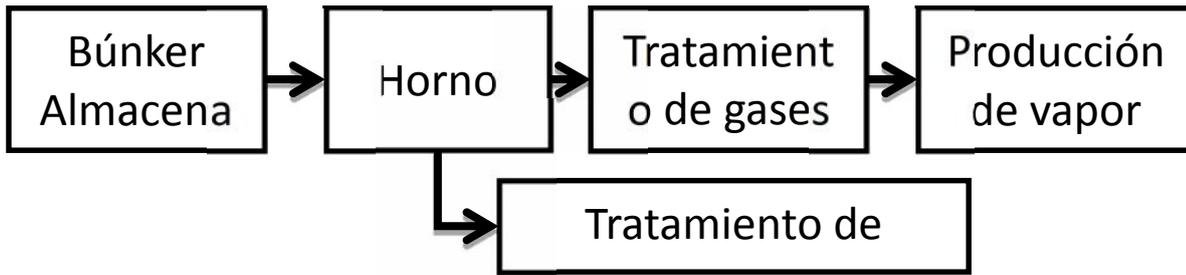
- Zabalgardi, en Bilbao. Horno de parrilla deslizante, cogeneración de electricidad con gas natural. Se trata de una incineradora poco común por este motivo.
- SOGAMA, en La Coruña. Horno de lecho fluido circulante.
- TIRME, en Palma de Mallorca. Cuenta con 4 parrillas, dos de rodillos y las otras móviles.
- REMESA, en Melilla. Parrillas von-roll.
- TERSA, En Barcelona. Parrillas deslizantes.

Se ha elegido una instalación de parrilla deslizante por estar muy extendida, consolidada y poder tratar una gran variedad de residuos como incineradora estándar. Las de lecho fluido circulante suelen lograr mejores rendimientos, pero también es cierto que necesitan una mayor preparación de la alimentación al ser mucho más restrictivas en cuanto a granulometría. Además no están tan extendidas como las anteriores.

3.1.1 Diagrama de bloques y balance de materia

El proceso, a grandes rasgos consiste en los siguientes pasos, cambiando los equipos de una instalación a otra:(20)

Figura 7 Diagrama resumido incineradora



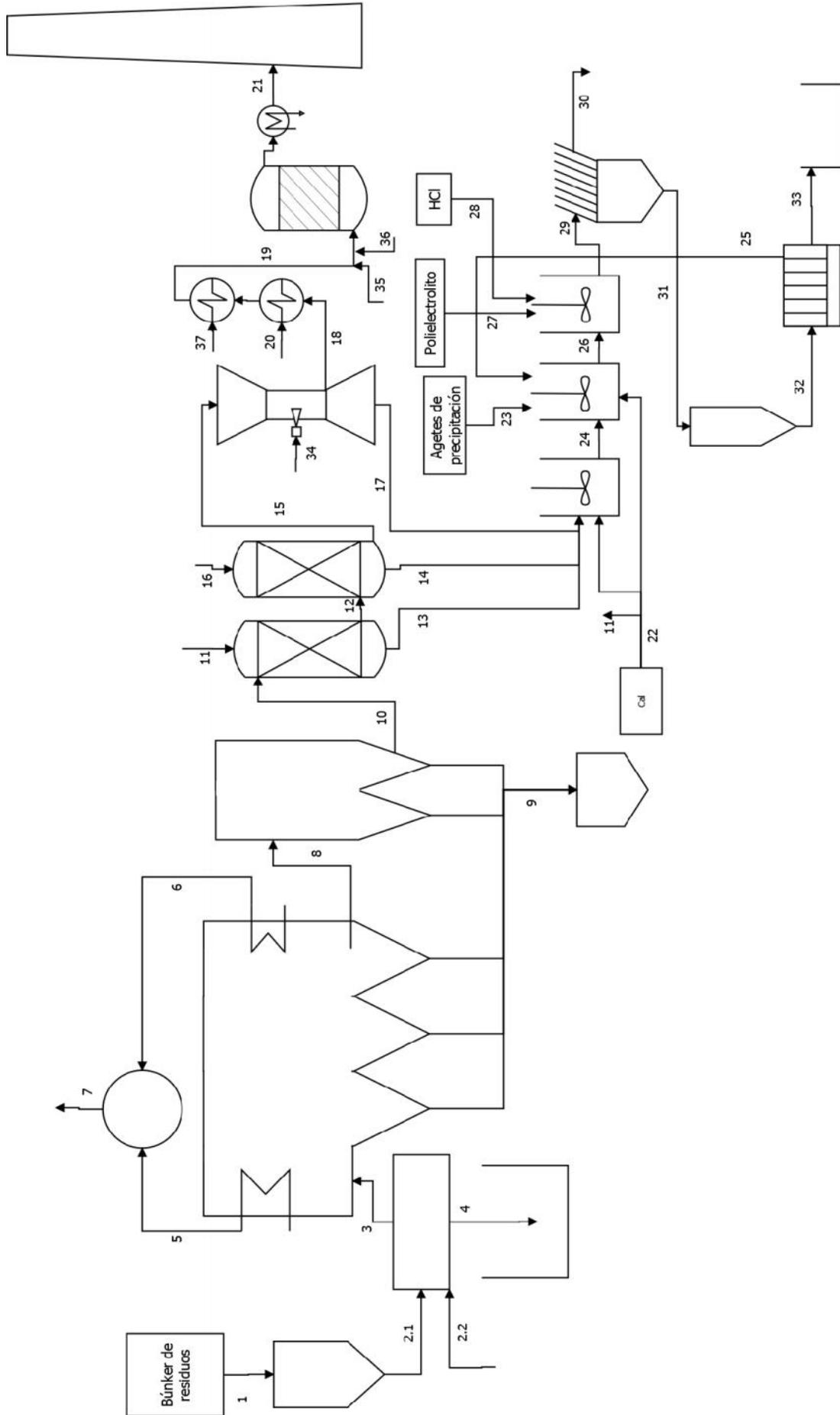


Figura 8 Diagrama incineradora

Tabla 7 Corrientes de la incineradora

Corriente	Descripción	Caudal	Unidades	Tª (°C)	P (kPa)
1	RSU a la tolva de alimentación	---	---	---	---
2.1	RSU alimentado al horno	24,3	T/h	ambiente	ambiente
2.2	Aire precalentado	---	---	---	---
3	Gases de combustión	123930	Nm3/h	---	---
4	Escorias	6,2	T/h	---	ambiente
5	Vapor de agua del intercambiador				
6	Vapor de agua de economizador				
7	Vapor para diferentes consumos	66,8	T/h	270	1600
8	Gases de combustión	123930	Nm3/h	---	---
	Partículas	3000	mg/Nm3	---	---
9	Cenizas volantes recogidas	379,08	kg/h	---	---
10	Gases de combustión	123930	Nm3/h	200	---
	Partículas	30	mg/Nm3	200	---
11	Lechada de cal	---	---	---	---
12	Gases de combustión	123930	Nm3/h	70	---
13	Residuos líquidos de lavado	---	---	---	---
14	Residuos líquidos de lavado	---	---	---	---
15	Gases de combustión	123930	Nm3/h	---	---
16	Disolución de NaOH 30%	84,564	kg/h	---	---
17	Corriente de agua con partículas	---	---	---	---
18	Gases de combustión	123930	Nm3/h	---	---
19	Gases de combustión	123930	Nm3/h	130	---
20	Vapor calefactor	---	---	---	---
21	Gases limpios para emisión a la atmósfera	123930	Nm3/h	---	---
22	Lechada de cal	73,8	kg_de_cal/h	ambiente	ambiente
23	Agentes de precipitación	0,6075	kg/h	---	---
24	Sólidos en suspensión acuosa	---	---	---	---
25	Agua de filtración recirculada	---	---	---	---
26	Agua coagulada	---	---	---	---
27	Poliectrolito (floculante)	0,0729	kg/h	---	---
28	Ácido clorhídrico	0,18225	kg/h	---	---
29	Agua floculada	---	---	---	---
30	Agua clarificada	7596,18	L/h	---	---
31	Fangos	---	---	---	---
32	Fangos	---	---	---	---
33	Torta de filtrado (25% humedad)	22,599	kg/h	---	---
34	Agua para inyectar en el venturi	---	---	---	---
35	Aire a 4 bar	---	---	---	---
36	Hidróxido amónico (25%)	45,441	Kg/h	---	---

37	Gas natural para combustión	398	m3/h	---	---
----	-----------------------------	-----	------	-----	-----

3.1.2 Descripción

Recepción y búnker

Es donde llegan los camiones cargados, pasan por la báscula y descargan en el búnker. Éste consiste en un foso que aísla los residuos para evitar que sus lixiviados salgan. Además se pueden mezclar los residuos en este mismo lugar. Tiene capacidad para el material consumido en unos tres días de operación.

Debido a la buena flexibilidad de los hornos de parrilla con respecto a la alimentación, se suelen introducir los residuos tal y como llegan. Lo común es que hayan sido separados de metales y material reciclable anteriormente, aunque no sea necesario para el funcionamiento de la planta.

Con una grúa puente se cargan los residuos en la tolva de alimentación al horno.

Horno

El horno de parrilla deslizante ha alcanzado un buen grado de desarrollo, siendo ampliamente utilizado en las incineradoras. Se valora mucho su alta fiabilidad y la flexibilidad para trabajar con residuos de muy diverso tipo, incluso no necesita combustible de apoyo con aquellos con bajo poder calorífico inferior (unos 6000 KJ/Kg mínimo).

Está separado del exterior por una clapeta de cierre que permite el paso de residuos en una sola dirección. Los alimentadores, una serie de placas con un movimiento de vaivén, hacen que los residuos circulen por el conducto hasta la parrilla en sí.

Dentro de la cámara, se debe operar siempre por encima de 850 °C, utilizando combustible de apoyo para lograr la temperatura. La parrilla cuenta con unos componentes llamados tejas sobre los que se incineran los residuos y además se mueven para facilitar que éstos, ayudados también por la inclinación de la parrilla, vayan deslizándose a lo largo del horno y se desmenucen para que la combustión sea óptima. Por debajo de las tejas se inyecta el aire primario necesario.

El residuo que entra pasa por unas etapas que deberían producirse durante el mayor tiempo posible, sobre todo las últimas:

- Secado: el agua que contiene se evapora.
- Gasificación/pirolisis: el aire primario es menor del estequiométrico necesario para la combustión, por lo que el residuo libera gas de síntesis.
- Combustión del gas: se produce cuando el gas de síntesis se mezcla con aire secundario en la parte superior del horno, generando el calor necesario para el proceso.
- Combustión del residuo: al ir desmenuzándose y reduciendo la altura del montón de residuos, se produce la combustión completa de éstos con el aire primario.

También se pretende que todo el carbono posible pase a CO₂ en lugar de CO, siendo esto un indicador de lo buena que está siendo la combustión. Ésta se controla regulando los caudales de aire y de residuos alimentados, teniendo como principal perturbación las características de los residuos como combustibles. Generalmente la combustión tarda

Al final de la parrilla, quedan las escorias inertes que pueden ser empleadas en construcción o llevadas a vertedero. Suelen tener aún sobre el 1% de materia combustible que no se ha quemado.

Las parrillas modernas están refrigeradas por un circuito de agua, lo que permite operar con residuos de mayor poder calorífico (hasta 18 MJ/kg) y a mayores temperaturas. Todos los hornos deben tener además un recubrimiento interior realizado en material refractario y otra capa de aislante como lana de roca, de tal manera que la temperatura superficial exterior no sea mucho mayor de 40 °C.

Tratamiento de gases

Los gases de combustión pasan por varias etapas para su depuración:

- Precipitador electrostático

- Lavador húmedo de lechada de cal, para enfriar eliminar los gases ácidos y eliminar ciertos compuestos nocivos como HCl, HF, metales pesados y cenizas. La cal sirve para mantener el pH del agua.
- Destrucción de dioxinas y eliminación de los NOx mediante catalizador. Se le agrega hidróxido amónico y se precalienta para favorecer la reacción.
- Las medidas de las emisiones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 8 Emisiones de la incineradora(20)

Parameter	Emission [mg Nm ⁻³] ^a		
	Minimum	Average value	Maximum
Dust [*]	0.5	2.1	9.1
HCl [*]	0.1	1.6	8.1
HF		0.14	
SO ₂ [*]	0.1	10.4	53.6
C _{org} [*]	0.1	0.7	7.2
CO [*]	1.2	15.2	98.3
NO _x as NO ₂ [*]	0.1	30.5	87.3
Pb		0.044	
Cr		< 0.001	
Zn		0.114	
∑ Pb + Cr + Zn		< 0.159	
As		< 0.001	
Co		< 0.001	
Ni		< 0.001	
∑ As + Co + Ni		< 0.003	
Cd		0.002	
Hg		0.036	
NH ₃ [*]		0.58	
PCDD+PCDF		0.018 ng Nm ⁻³	

Tratamiento de efluentes líquidos

Una parte del líquido de la corriente [14], que contiene parte de los metales precipitados, es llevada a la cuba de las escorias. Esto se debe a la alcalinidad de la corriente líquida.

El resto de efluentes son sometidos a un proceso físico químico en el siguiente orden:

- Coagulación y floculación en depósitos agitados con el correspondiente ajuste de pH para que sea eficaz.
- Decantación en un decantador de lamelas, del cual salen agua limpia y fangos.
- Filtrado de los fangos con recirculación de la corriente líquida.

Residuos

- Las cenizas volantes pueden depositarse en vertedero o emplearse como agregado para construcción.
- Las escorias de combustión se llevan a un vertedero apropiado.
- Las tortas de filtrado son igualmente llevadas a vertedero.

3.1.3 Balance de energía

El siguiente balance está realizado suponiendo los siguientes parámetros típicos para plantas enfocadas en producción de electricidad(39):

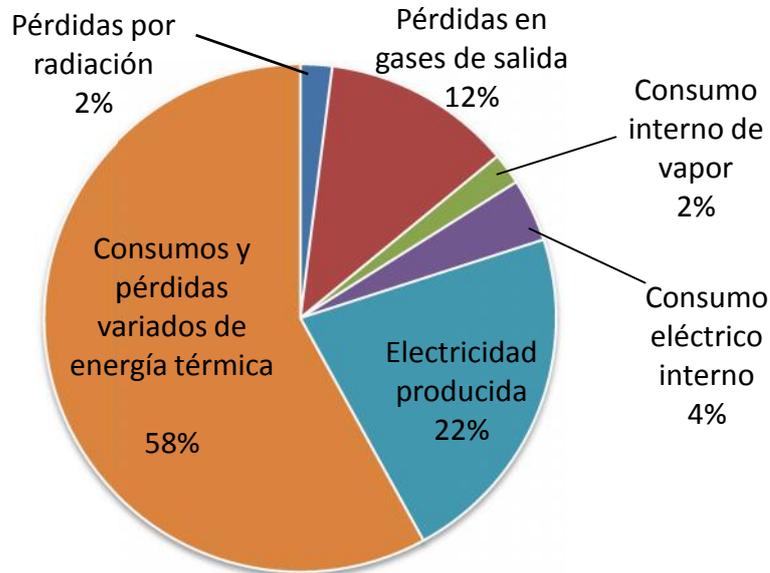


Figura 9 Destino de la energía en una incineradora

Potencia eléctrica exportada:

- 3685 KJ/kg de residuo
- 24,87 MWe

Alrededor del 20% de la energía del residuo es transformada finalmente en electricidad según estas suposiciones, contando con un PCI de 10 MJ/Kg. Comparándolo con las plantas españolas(38) de Mallorca (17,3%), San Adriá de Besós (20,5%) o incluso la de Galicia (22,3%) que emplea otra tecnología, puede suponerse como una aproximación real para plantas con capacidad superior a las 200000 T/año. Sin embargo para otras como las Melilla (7,6%) que trata menos de 50000 T/año, no se cumple la estimación.

3.2 Gasificación

Aunque es una técnica que lleva desarrollándose durante décadas, su aplicación a los residuos urbanos es relativamente reciente. Las plantas de gasificación de RSU son, salvo por el propio equipo de gasificación, parecidas a las incineradoras porque cuentan con instalaciones que cumplen las mismas funciones en ambos casos.

Las ventajas de la gasificación con respecto a la incineración convencional son principalmente que se reducen los caudales de gases a depurar y que se obtiene gas de síntesis, el cual puede tener otros usos como materia prima en lugar de servir como combustible. Sin embargo, hay ciertas dificultades a la hora de emplearlo en fines diferentes a una combustión o en motores de gas alternativos, ya que su composición variable y los alquitranes condensables hacen difícil su empleo en turbinas de gas u otras aplicaciones.

Además la flexibilidad de la alimentación permite el tratamiento de muchos tipos de residuo.(20)(40)(41)

3.2.1 Gasificación convencional

Como exponente de esta tecnología, se establecerá a la compañía noruega Energos que, aunque no emplee un proceso del todo convencional, sí que se considera que han desarrollado suficientemente su tecnología y ha construido varias plantas en Noruega y Alemania.

3.2.1.1 Diagrama de bloques y balance de materia

Puede resumirse el proceso en los siguientes bloques:

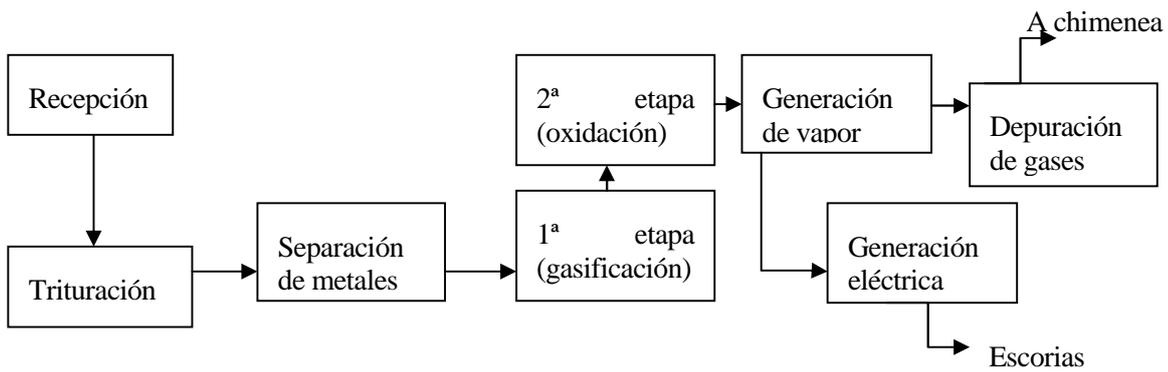


Figura 10 Diagrama resumido de la gasificación

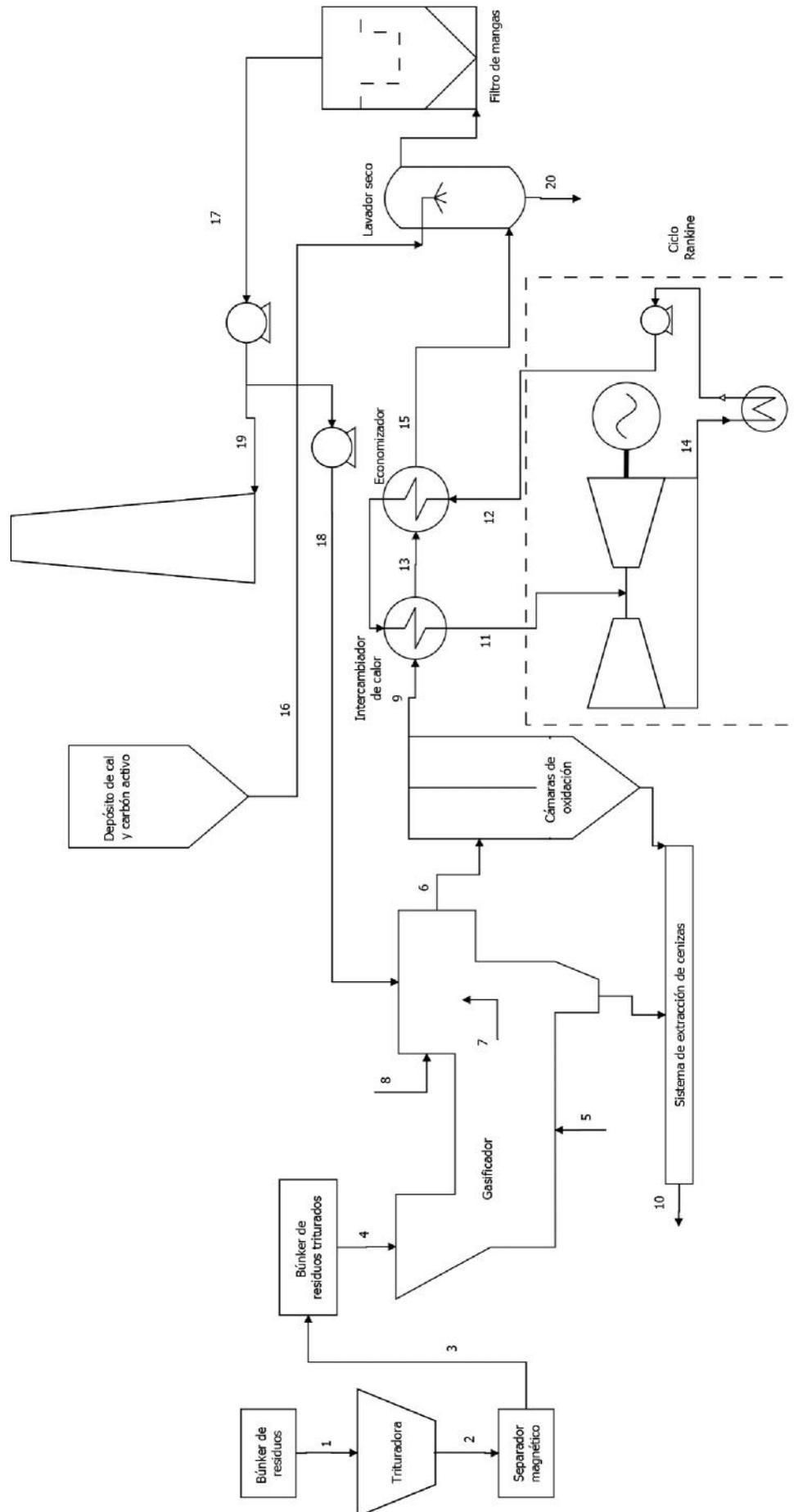


Figura 11 Diagrama de la planta de gasificación convencional

Tabla 9 Corrientes de la planta de gasificación convencional

Corriente	Descripción	Caudal	Unidades	Tª (°C)	P (kPa)
1	RSU en bruto	---	---	ambiente	ambiente
2	RSU triturado	---	---	ambiente	ambiente
3	RSU sin metales	6000	kg/h	ambiente	ambiente
4	RSU alimentados al gasificador	6000	kg/h	ambiente	ambiente
5	Aire primario	10152	Nm3/h	25	105
6	Gases de salida del gasificador	59580	Nm3/h	---	---
7	Gas de síntesis + aire primario	14580,0	Nm3/h	900	---
8	Aire secundario	18420	Nm3/h	25	105
9	Gases de escape de la oxidación	59580	Nm3/h	850	ambiente
10	Cenizas	1044	kg/h	---	---
11	Vapor	25200	kg/h	380	2300
12	Agua para la producción de vapor	25200	kg/h	---	2300
13	Gases de escape de la oxidación	59580	Nm3/h	250	---
14	Salida de la turbina	25200	kg/h	---	10
15	Gases a depurar	59580,0	Nm3/h	150	---
16	Suspensión para la depuración de gases	---	---	---	---
17	Gases depurados	59580	Nm3/h	150	---
18	Recirculación hacia gasificador	26580,0	Nm3/h	---	105
19	Salida hacia chimenea	33000,0	---	130	102
20	Partículas	---	---	---	---

3.2.1.2 Descripción

Preparación de residuos

En primer lugar, se depositan los residuos brutos en un bunker, desde donde se alimentarán a una trituradora para reducir su tamaño hasta un tamaño menor de 20 cm. Posteriormente, un equipo de separación de metales lleva a éstos hasta un contenedor para que sean enviados a reciclaje. Se realiza de la misma manera que en una incineradora.

Gasificación

El gasificador es parecido a los sistemas de incineración con parrilla, cuenta también con una parrilla fija de temperatura controlada sobre la cual circula el residuo y por debajo de ésta se introduce el aire primario, que deberá ser inferior al estequiométrico. El residuo pasa por tres etapas mientras avanza por la parrilla: secado, pirolisis y combustión parcial.

El gas de síntesis formado (H₂ 5%, CH₄ 4%, CO 14%) está a unos 900 °C y se mezcla con aire secundario y gases recirculados, tras lo cual entra en una cámara de oxidación (con un 7% de O₂), donde se produce la combustión del gas. En esta cámara permanece a 850 °C durante, al menos, 2 segundos. Su diseño permite

mantener bajos niveles de cenizas volantes, CO y NOx a la salida.

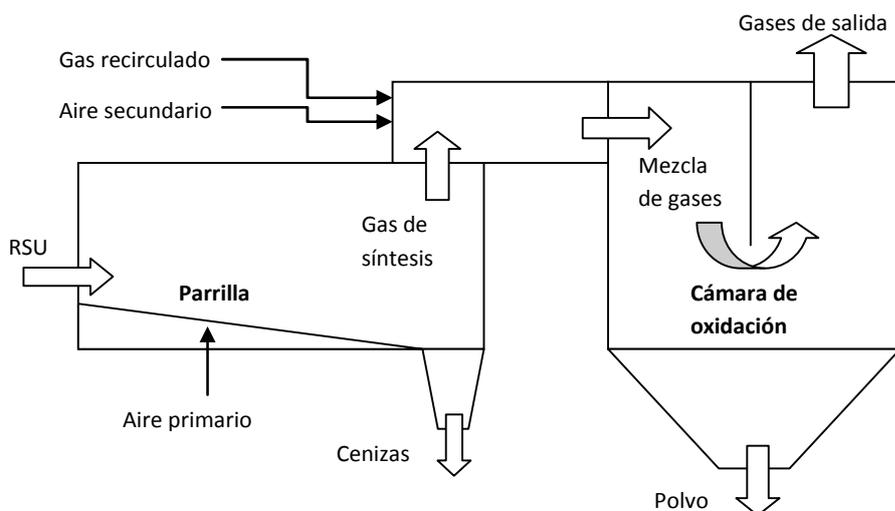


Figura 12 Detalle del gasificador

Producción de vapor y tratamiento de gases

Después los gases de salida son empleados en un intercambiador para producir vapor, que se puede vender o utilizar en turbinas para generar electricidad. Sus condiciones suelen ser de 23 bar y 380°C, al menos en el caso de que sea empleado en turbinas.

Tras el intercambiador, está la fase de depuración en la que se eliminan gases ácidos mediante la inyección de caliza; así como compuestos orgánicos y metales pesados inyectando carbón activo.

Las cenizas recogidas, según el fabricante de los equipos, tienen menos de un 3% de carbono orgánico total y tienen mejores resultados de lixiviación que los de incineración convencional.

3.2.1.3 Balance de energía

Se han recopilado datos de las plantas que hay en funcionamiento para obtener correlaciones entre los RSU alimentados y la producción eléctrica obtenida. Además de cómo aumenta la energía obtenida por tonelada de residuo dependiendo de la capacidad de la planta.(40)

Tabla 10 Recopilación de plantas de gasificación

Planta	Capacidad T/año	Produccion vapor (GWh/año)	Producción eléctrica (MWh/año)	Producción / Capacidad
Ranheim	10000	25	6250	0,625
Forus	39000	105	26250	0,67307692
Averoy	30000	69	17250	0,575
Sarpsborg 1	78000	210	52500	0,67307692
Hurum	39000	105	26250	0,67307692
I. Wight	30000	53,2	13300	0,44333333
Minden	39000	105	26250	0,67307692
Sarpsborg 2	78000	256	64000	0,82051282

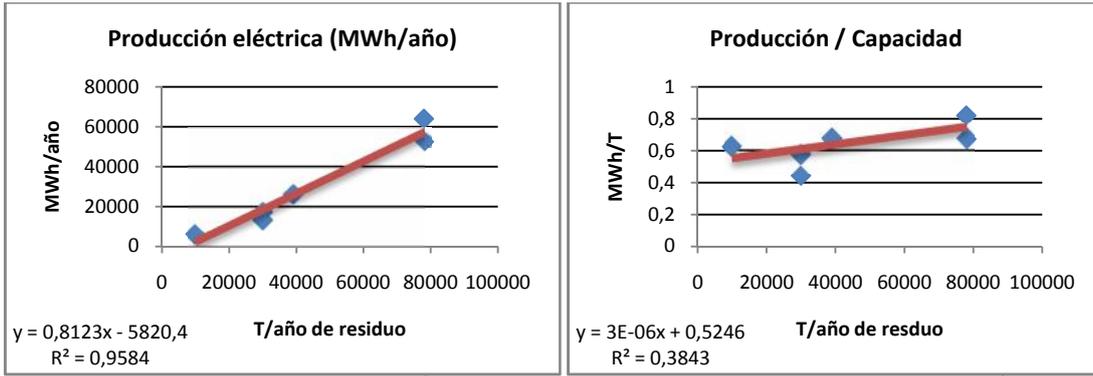


Figura 13 Relacion producción - capacidad

Figura 14 Producción eléctrica

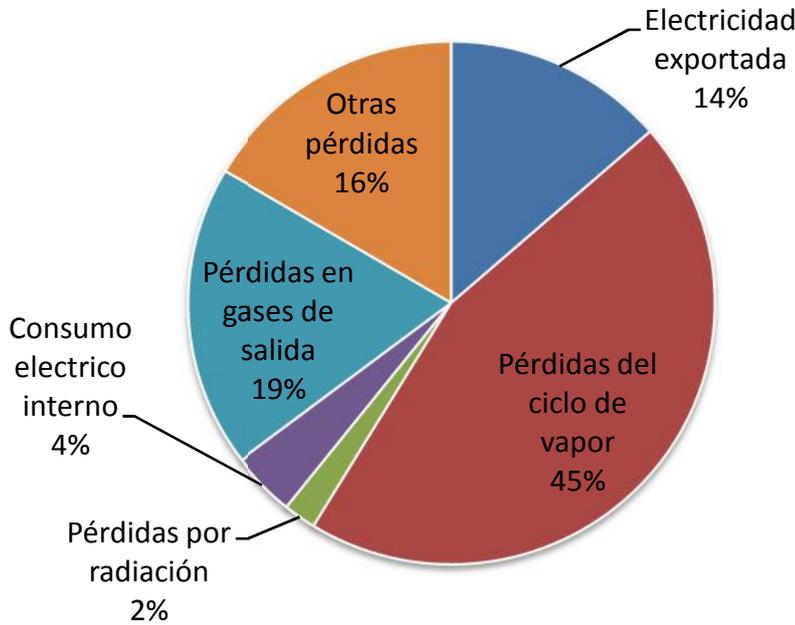


Figura 15 Destino de la energía en la gasificación convencional

3.2.2 Gasificación a alta temperatura

En este tipo de plantas, además de la gasificación, se produce la fusión de las escorias de los residuos, que salen por la parte inferior del gasificador.

Este tipo de plantas ha tenido un buen desarrollo en Japon, país donde se encuentran las de mayor capacidad, operando de manera satisfactoria. Sin embargo, no se ha extendido igual de bien en Europa, donde hay menos plantas y generalmente de menor capacidad. Esto se explica por la importancia que tienen el aprovechamiento energético o para reciclaje y la estabilización de los residuos en Japon, donde se procura, de una manera más rigurosa que en Europa, evitar que vayan a vertederos convencionales si hay otra alternativa debido a la dificultad que tienen para establecer nuevos vertederos.

Se tomará como referencia el proceso de la compañía japonesa NSENGI, al ser el más extendido dentro de ese país y contar con plantas relativamente grandes operando actualmente. Esta compañía surge de la alianza de Nippon Steel con Sumikin Engineering.(42)

3.2.2.1 Diagrama de bloques

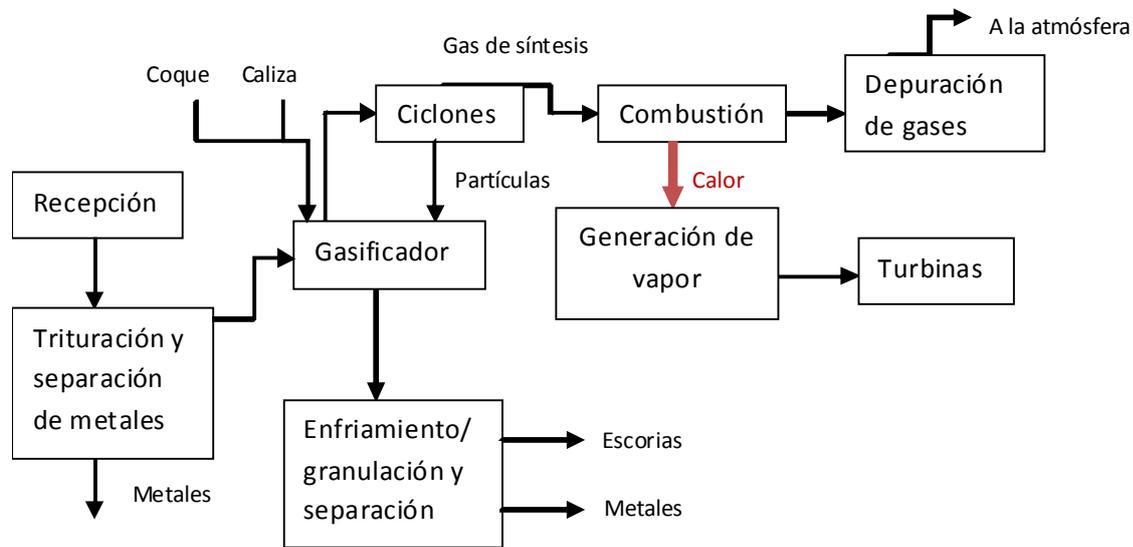


Figura 16 Diagrama de bloques de la gasificación a alta temperatura

3.2.2.2 Descripción

Preparación de la alimentación

Se realiza de igual manera que en otras instalaciones de valorización térmica. Cuenta con búnkeres de almacenamiento, trituradoras y separadores de metales. Si no se ha realizado anteriormente, se pueden separar otros materiales reciclables.

Debe mezclarse la alimentación para que tenga una homogeneidad y características aceptables.(43)

Gasificador

Es un horno parecido a los que se emplea en la industria metalúrgica, es un diseño derivado del de un horno para acero. Por tanto, se trata de un horno robusto y muy probado, capaz de resistir las altas temperaturas a las que se opera.

Por la parte superior se introducen los residuos junto con coque (agente reductor) y caliza (que controla las propiedades de las escorias y, en menor medida, el pH de los gases). Dentro del horno se pueden distinguir varias regiones:

- Secado y precalentamiento, 300-400 °C.
- Zona de gasificación, en la que se forma la mayor parte del gas de síntesis, 300-1000 °C.
- Zona de combustión, en ésta se inyecta aire enriquecido para que se produzca la reacción exotérmica que aporta la energía al gasificador. 1000-1700 °C
- Zona de fundición, donde escorias y metales se funden. Hasta 1800 °C.

Ciclones

El gas sale del gasificador a unos 500 °C y va cargado de partículas y humedad. Las primeras se separan en un ciclón que está a la salida del reactor para ser luego recirculadas al horno tras ser humidificadas.

Por un lado esto sirve para aprovechar mejor la capacidad calorífica del combustible, reduciéndose la materia

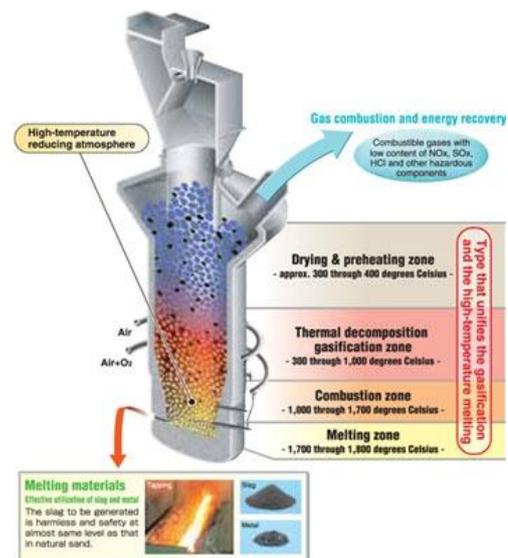


Figura 17 Gasificador de alta temperatura

no reaccionada. Por otro, parte de las partículas son alquitranes que pueden provocar problemas en los equipos posteriores. Además es un método para reducir la producción de dioxinas, ya que éstas se forman en la superficie de de las partículas carbonosas resultantes del proceso.

Combustión y generación de vapor

Se utiliza para la combustión una cámara convencional, debido a que mucho más robusta para este tipo de combustibles que una turbina o un motor de gas por la presencia de alquitranes. Se genera vapor, comúnmente, a 400 °C y 4 MPa, que posteriormente irá a un ciclo de generación de electricidad. También puede venderse a alguna instalación cercana, pero no es lo más usual.

Depuración de gases

Se realiza de la misma manera que en plantas de incineración convencionales, deben eliminarse gases ácidos y partículas con equipos similares.

Enfriamiento, granulación y separación

La materia no volátil, compuesta por escoria y metales, sale fundida por el fondo del horno y llega a un baño de agua donde se enfría formando pequeñas partículas. Posteriormente, se separan las metálicas para ser recicladas y el resto pueden utilizarse como agregado de construcción o ir a vertedero como residuo inerte.

3.2.2.3 Balance de materia y energía

La empresa da muy pocos detalles sobre los flujos de entrada y salida. Los más importantes se detallan a continuación, aproximándose el de aire de los datos de un proceso parecido (Thermoselect) aunque la fracción de oxígeno en el aire sí es la empleada por el de NSENGI.(44)

Tabla 11 Balance de materia

Entrada (T)		Salida (T)	
RSU	100	Escoria	10,94
Coque	5	Metal	1,76
Aire (36% O ₂)	0,1 m ³	Cenizas	2,8

La producción eléctrica por tonelada de residuo varía bastante de una planta a otra. Para obtener un promedio, se ha realizado una regresión contando con las plantas construidas desde el 2005 para tener referencias actualizadas. Se ha supuesto que el PCI del residuo es de 9,5 MJ/Kg para la última columna.

Tabla 12 Producción eléctrica de diferentes plantas de gasificación a alta temperatura(45)

T/día	kW	MWh/día	MWh/T	Producción eléctrica / Energía RSU entrada (%)
95	1210	29,04	0,306	11,58
132	1700	40,8	0,309	11,71
147	2450	58,8	0,400	15,15
148	1990	47,76	0,323	12,22
197	4270	102,48	0,520	19,70
205	4430	106,32	0,519	19,65
255	4800	115,2	0,452	17,11

300	5320	127,68	0,426	16,12
320	14000	336	1,050	39,77
336	9000	216	0,643	24,35
380	10500	252	0,663	25,12
380	8500	204	0,537	20,33
400	8500	204	0,510	19,32
402	10500	252	0,627	23,74
450	13500	324	0,720	27,27
460	8500	204	0,443	16,80
500	14000	336	0,672	25,45
530	9000	216	0,408	15,44
720	23500	564	0,783	29,67

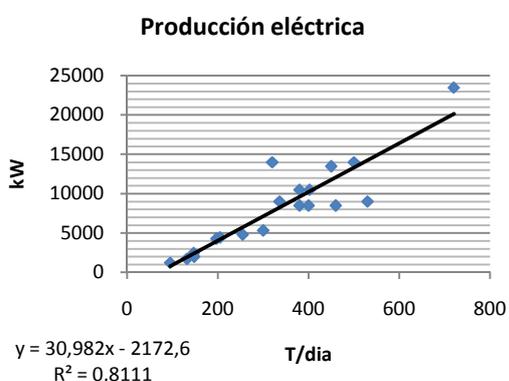


Figura 18 Ajuste de producción eléctrica para gasificación de alta Tª

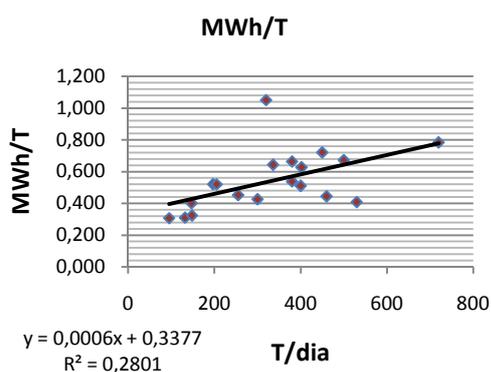


Figura 19 Ajuste de producción eléctrica frente a capacidad de la planta

Se aprecia que hay cierta relación entre el aprovechamiento energético de los residuos y la capacidad de la planta. Por tanto, cuanto mayor sea ésta, más electricidad se producirá por tonelada de residuos.

3.3 Gasificación por plasma

Se han seleccionado dos compañías que tienen plantas comerciales operativas o bien en desarrollo para el tratamiento de RSU a gran escala. Para otro tipo de residuos como residuos hospitalarios o residuos peligrosos industriales, hay otras compañías que han desarrollado plantas de menor escala.

3.3.1 ProcesoPlasco

El análisis de la planta de Ottawa sirve para entender el proceso que propone esta compañía, puesto que se trata de un proyecto puramente comercial y no con objetivos de investigación como los otros. Esta planta está preparada para procesar hasta 400 T/día de residuos(31)

Diagrama de bloques

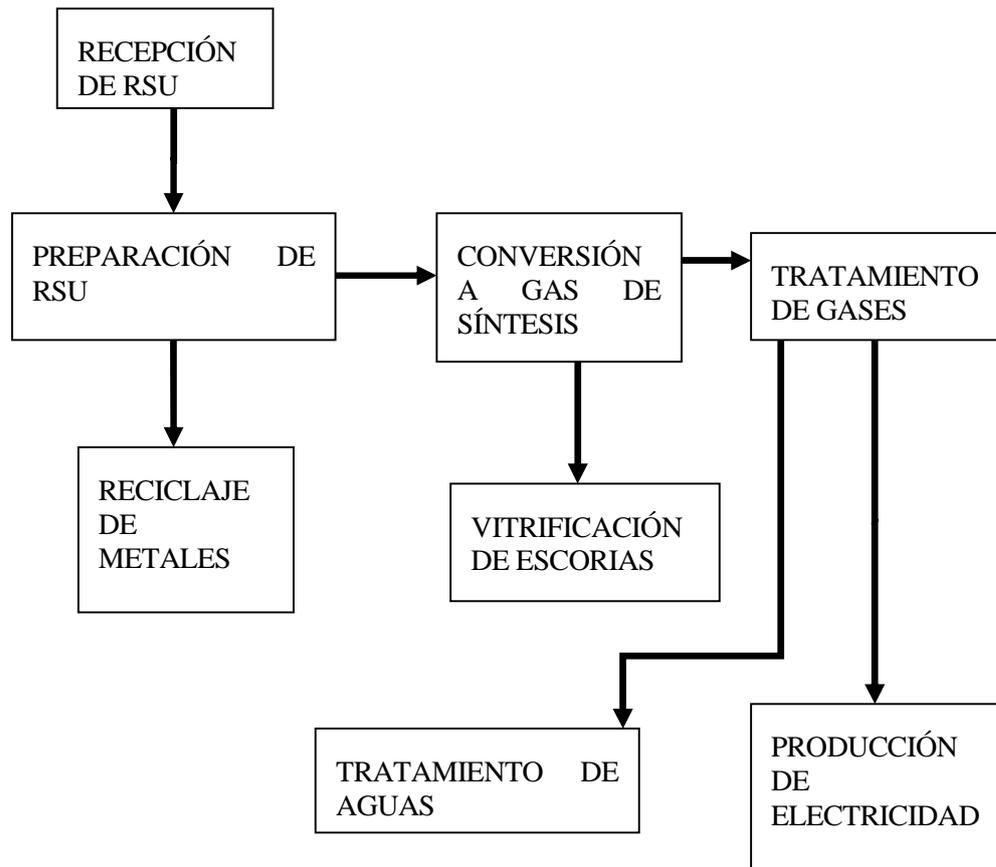


Figura 20 Diagrama resumen del proceso de Plasco

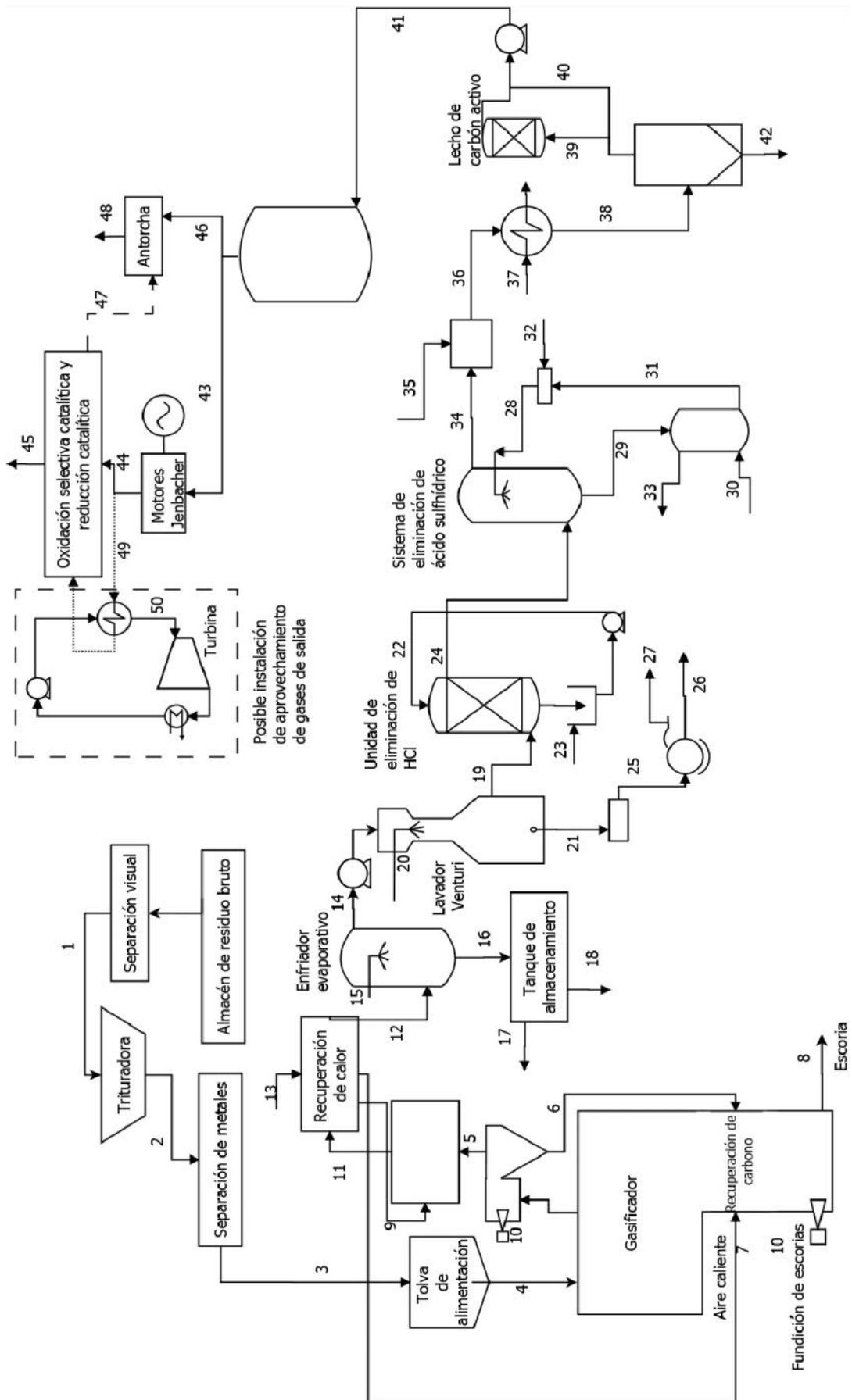


Figura 21 Diagrama del proceso de gasificación por plasma de Plasco (46)

Tabla 13 Corrientes del proceso de gasificación por plasma de Plasco

Corriente	Descripción	Caudal	Unidades	Tª (°C)	P (kPa)
1	RSU en bruto	<10	T/hora	ambiente	ambiente
2	RSU triturado	<10	T/hora	ambiente	ambiente
3	RSU sin metales	<10	T/hora	ambiente	ambiente
4	Alimentación a gasificador	3,54	T/hora	ambiente	ambiente
5	Gas de síntesis bruto	6350	Nm3/hora	---	---
6	Partículas recirculadas	---	---	---	---
7	Aire caliente para gasificación	1800	Nm3/hora	---	---
8	Escorias	---	---	---	---
9	Aire caliente para refinado	2700	Nm3/hora	---	---
10	Plasma	---	---	---	---
11	Gas de síntesis refinado	9050	Nm3/hora	---	---
12	Gas de síntesis refinado	9050	Nm3/hora	---	---
13	Aire a proceso	4500	Nm3/hora	ambiente	ambiente
14	Gases enfriados	4500	Nm3/hora	200	---
15	Agua de refrigeración	---	---	ambiente	ambiente
16	Partículas y líquido no evaporado	---	---	---	---
17	Líquidos drenados	---	---	---	---
18	Sólidos retirados	---	---	---	---
19	Gas de síntesis	4500	Nm3/hora	80	---
20	Agua para el venturi	---	---	ambiente	ambiente
21	Corriente líquida con partículas	---	---	---	---
22	Solución alcalina	---	---	---	---
23	Solución alcalina concentrada	---	---	---	---
24	Gas de síntesis	4500	Nm3/hora	25	---
	HCl	< 5	ppmv	25	---
25	Fangos	---	---	---	---
26	Efluente líquido de filtrado	---	---	---	---
27	Sólidos filtrados	---	---	---	---
28	Disolución de NaOH (pH=9) con carbón activo pulverizado	---	---	---	---
29	Corriente 28 con H2S absorbido	---	---	---	---
30	Aire para oxidación	---	---	---	---
31	Recirculación de NaOH + carbón activo	---	---	---	---
32	NaOH concentrado	---	---	---	---
33	Venteo de aire en exceso	---	---	---	---
34	Gas de síntesis a la salida	4500	Nm3/hora	25	---
	H2S en gas de síntesis	< 20	ppmv	25	---

35	Carbón activo pulverizado	---	---	---	---
36	Gas de síntesis + carbón activo	---	---	---	---
37	Fluido calefactor	---	---	---	---
38	Gas de síntesis + carbón activo	---	---	---	---
39	Gas de síntesis a filtro de carbón activo	---	---	---	---
40	By-pass del gas de síntesis	---	---	---	---
41	Gas de síntesis a presión	---	---	---	122
42	Cenizas filtradas	< 5	kg/h	---	---
43	Gas de síntesis para producción eléctrica	---	---	---	---
44	Gases de escape de los motores	---	---	---	---
45	Gases de escape depurados a la atmósfera	---	---	---	---
46	Exceso de gas de síntesis	---	---	---	---
47	Efluente gaseoso a la atmósfera	---	---	---	---
48	Posible sustitución de la corriente (45), para lograr mayor depuración	---	---	---	---
49	Gases del motor para posible aprovechamiento energético	---	---	---	---
50	Vapor de media presión	---	---	---	---

3.3.2 Descripción

Detalladamente, el proceso tiene las siguientes partes: (46)

- **Recepción:**

Pueden recibirse hasta 570 T/día de residuos no peligrosos. Se ha supuesto que los fines de semana no se recibe nuevos residuos aunque se siga operando. Almacenamiento para 810 T en bruto (dos días de operación) y 1230 T de material procesado para alimentación.

- **Preparación de residuos:**

Metales y materiales sin contenido energético que sean identificados visualmente son separados y almacenados para su reciclado o envío a vertedero.

El resto se somete a trituración y separación de metales:

- **Conversión de residuos:**

Consiste en un sistema llamado ICARS (Sistema Integrado de Conversión y Refinado) que consta de cuatro reactores interconectados tal y como se aprecia en la fig. 1:

- **Cámara de conversión:** trabaja en condiciones por debajo de las estequiometrias de oxígeno. Se aplica controladamente aire caliente de otras partes del proceso como fuente de calor para realizar la pirolisis. Se forma gas de síntesis bruto.
- **Reactor de recuperación de carbono:** con el aporte energético de aire caliente reciclado, se transforma el carbono fijo de las cenizas que entran en CO.

- Fundición de residuos: mediante una antorcha de plasma se funden las escorias y posteriormente son solidificadas en gránulos. Este material a su salida está vitrificado y se puede considerar no peligroso.
- Cámara de refinamiento: el gas de síntesis pasa por un ciclón donde se separan las partículas que son recirculadas al reactor de recuperación de carbono. Después se le añade aire caliente y entra en una cámara con antorcha de plasma donde se destruyen los hidrocarburos de cadena larga.

- **Procesamiento del gas de síntesis:**

- Recuperador: consiste en dos intercambiadores que enfrían el gas de síntesis con aire. Éste servirá como fuente de calor en el proceso.
- Quench: un equipo rocía agua para reducir rápidamente la temperatura del gas hasta los 200 °C y evitar las reacciones “De-Novo” que provocan la formación de dioxinas.
- Scrubber Venturi: para eliminar las partículas del gas mediante su contacto íntimo con agua. La temperatura del gas desciende a su salida hasta los 80 °C
- Scrubber de ácido clorhídrico: se realiza en una torre de relleno. A la salida se controla el pH mediante la adición de soluciones alcalinas, de tal manera que a la salida el gas tiene 5 ppmv de HCl y unos 26 °C.
- Sistema de eliminación del H₂S: consta de dos reactores, en el primero se produce la absorción del gas mediante una solución de sosa cáustica y catalizador de carbón activado en polvo. En el segundo se produce la oxidación de la disolución mediante el aporte de aire de manera controlada. A la salida, el gas de síntesis contiene 20 ppmv de ácido sulfhídrico.
- Las corrientes resultantes del proceso anterior:
 - Líquidas son sometidas a filtrado
 - Gaseosas pasan por un filtro de mangas y por sendos lechos de carbón activo antes y después que eliminan metales pesados y dioxinas.
- Hay un sistema de venteo de emergencia.

- **Sistema de generación de electricidad:**

Para su alimentación, cuenta con depósitos intermedios que tienen una capacidad total de unos 300 m³ (para cada 100 T RSU/día de alimentación) a una presión entre 1,15 y 1,2 bar.

Se producen 22 MW eléctricos aproximadamente, de los cuales 15 serán para exportar. El gas de síntesis sirve como combustible para 10 motores Jenbacher de G.E. con una potencia de 1,94 MW_e cada uno.

Los gases de combustión y el aire caliente del proceso se mezclan y sirven para producir vapor de media presión en un intercambiador. Posteriormente se conducirán a un sistema de control de emisiones antes de ser expulsados a la atmósfera. El vapor de media presión mueve una turbina que produce unos 2,5 MW de electricidad.

- **Sistema de antorchas**

- Antorcha cerrada para puestas en marcha y paradas, cuando la calidad del aire no es suficiente como para emplearlo en los motores.
- Antorcha abierta de emergencia.

- Planta de tratamiento de aguas residuales
 - Es necesario controlar sus características para que cumpla con la legislación.
 - Puede usarse para el regadío

3.3.3 Balance de energía

Balance de energía global obtenido de información de la compañía:

Tabla 14 Producción eléctrica del proceso de Plasco

Producción	Motores Jenbacher (10)	1,94 MW
	Turbina de vapor	2,5 MW
Consumo de la planta		7 MW
Exportación eléctrica		14,9 MW

Sin turbina (% respecto al PCI del RSU)

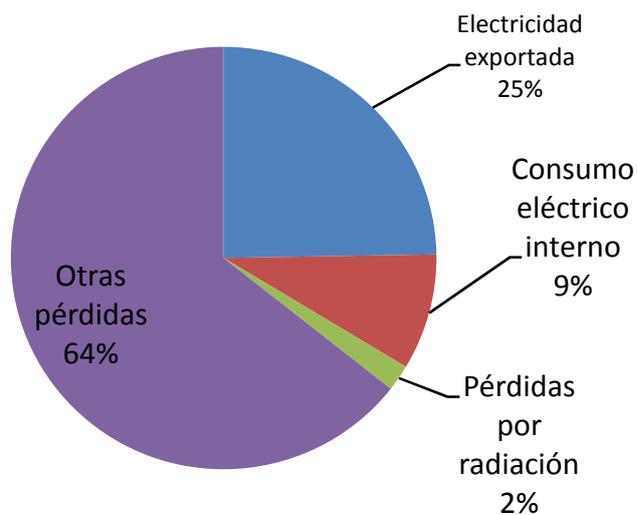


Figura 22 Destino de la energía en el proceso de Plasco

Con turbina tras los motores (% respecto al PCI del RSU)

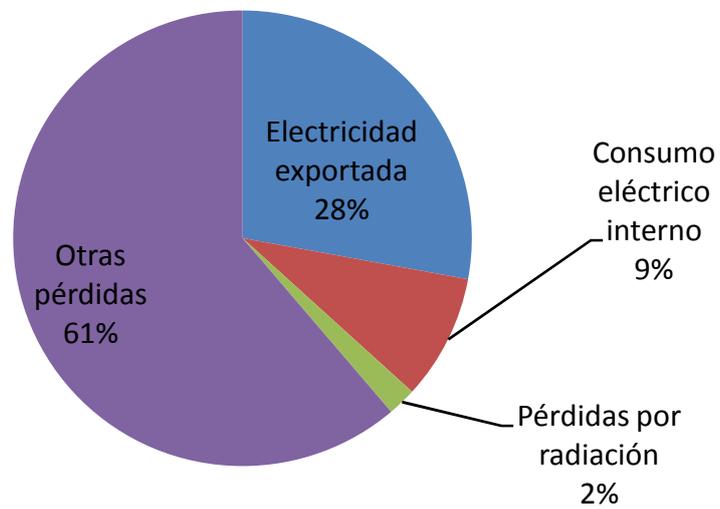


Figura 23 Destino de la energía en el proceso de Plasco (variante con turbina)

3.3.4 Proceso desarrollado por alternrg

3.3.4.1 Westinghouse plasma corp.

Westinghouse Plasma Corp. es una compañía que lleva más de 30 años trabajando en el campo de la generación y aplicación del plasma. Contaba además con experiencia en el desarrollo de plantas comerciales de gasificación por plasma cuando fue adquirida en 2007 por Alter NRG como filial por lo que gran parte del proceso se debe a aquella. En un principio WPC fue filial de Westinghouse Electric Corp. y durante ese periodo desarrolló y comercializó sus productos en gran cantidad de aplicaciones industriales, sobre todo en el campo de la industria metalúrgica.

Además realizó numerosas pruebas para comprobar la eficacia del plasma en la destrucción de múltiples residuos tanto orgánicos como inorgánicos y la recuperación de los metales que hay en éstos, ambas con resultados positivos.

Con la construcción en 1990 de la planta piloto de gasificación de Waltz Mill, se convirtieron en uno de los líderes del desarrollo tecnológico de esta técnica. En ella se pudieron determinar las composiciones de gas de síntesis, contenidos energéticos, emisiones y parámetros de diseño óptimos. En 2007, ya propiedad de Alter NRG fue sometida a varias mejoras. Gracias a los numerosos experimentos realizados por ambas compañías se han podido realizar modelos e incluso pueden realizarse nuevos experimentos enfocados a lo que requiera el cliente.(9)

3.3.4.2 Concepto de proceso de Alter NRG

Al ser un proceso relativamente novedoso, hay que analizarlo con los datos que suministra la empresa sin posibilidad de contrastarlo. Se dispone de información detallada para una planta con capacidad para 710 T/día de RSU y 40 T/día de neumáticos usados que aumentan el poder calorífico alimentado. Hay otros datos recientes para otras alimentaciones los cuales también se pueden utilizar pese a ser menos detallados.(47)(37)

3.3.4.3 Diagrama de bloques y balance de materia

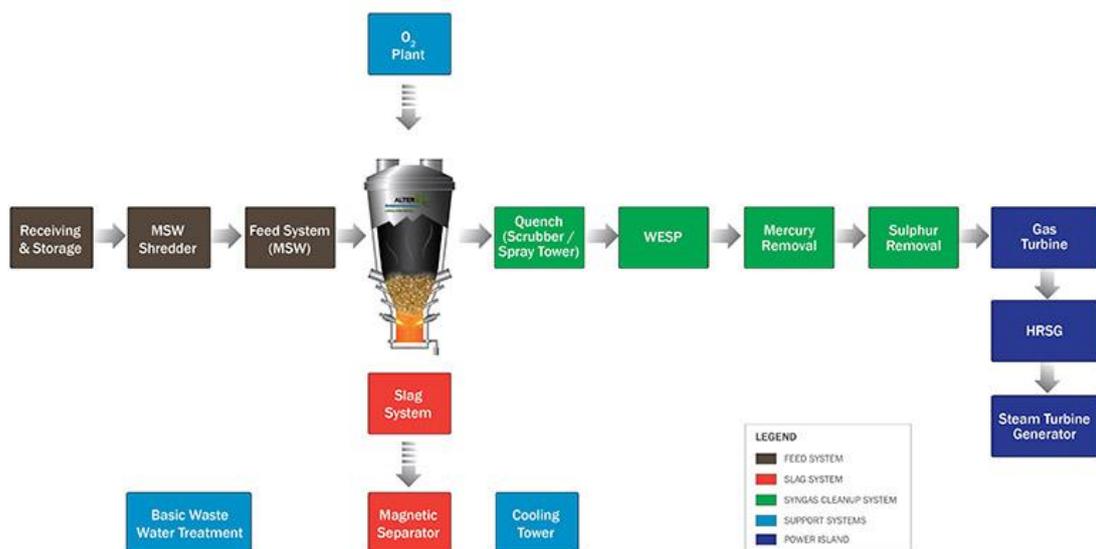


Figura 24 Diagrama resumen del proceso de Alter NRG

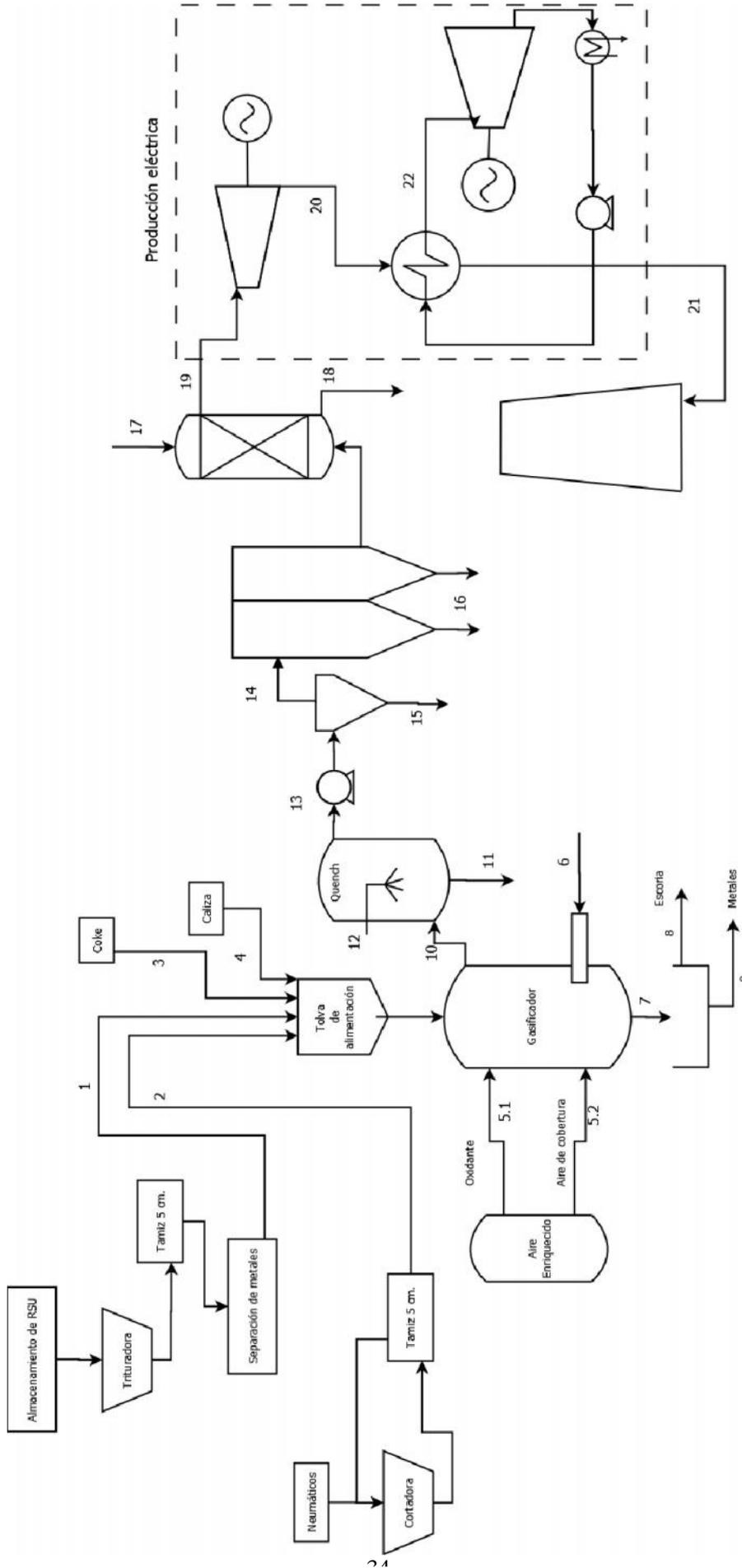


Figura 25 Diagrama de bloques del proceso de gasificación por plasma de Alter NRG (48)

Tabla 15 Corrientes del proceso de Alter NRG

Corriente	Componente	Caudal	Unidades	Tª (°C)	P (kPa)
1	RSU	1000	T/día	ambiente	ambiente
2	Neumáticos (para compensar en caso de deficiencia del PCI del RSU)	56	T/día	ambiente	ambiente
3	Coke	40	T/día	ambiente	ambiente
4	Caliza	141	T/día	ambiente	ambiente
5.1	Oxígeno al 95%	305	T/día	25	136
5.2	Oxígeno al 95%	39	T/día	25	136
6	Aire del plasma	40	T/día	25	1136
7	Gas de síntesis bruto	1314	T/día	900	101
8	Material fundido	250	T/día	1650	101
9	Escorias	---	---	---	101
10	Metales	---	---	---	101
11	Partículas gruesas	15	T/día	---	101
12	Agua para pulverizar	---	---	ambiente	ambiente
13	Gas de síntesis enfriado	1299	T/día	< 150	101
14	Gas de síntesis sin partículas gruesas	1294	T/día	< 150	101
15	Partículas gruesas separadas	5	T/día	< 150	101
16	Partículas finas y metales pesados	20	T/día	< 150	101
	Cd (promedio)	5	Kg/día		
	Cr (promedio)	100	Kg/día		
	Pb (promedio)	400	Kg/día		
17	Crystasulf, compuesto para desulfuración	---	---	---	---
18	Crystasulf no reaccionado	---	---	---	---
	Azufre	0,5	T/día	---	---
19	Gas de síntesis limpio	1274	T/día	---	---
20	Gases de escape de la turbina de gas	---	---	---	---
21	Efluente gaseoso hacia atmósfera	---	---	---	---
22	Circuito de vapor	---	---	---	---

Sistema de alimentación

Los residuos son almacenados en un depósito de hormigón cerrado en el caso de los RSU y apilados al aire libre en el caso de los neumáticos.

Después se reduce el tamaño de ambos mediante trituradores para RSU y cortadores para neumáticos. No se especifica el tamaño final ni la disposición de los equipos, por lo que se puede suponer que se hacen tamizados a 5 cm y hay equipos de separación de metales como en otros procesos. La gasificación por plasma no tiene restricciones de tamaño y sólo se requiere que el residuo sea manejable para los equipos de tal manera que no se produzcan atascos. Además tampoco importa la humedad de la alimentación.

- Neumáticos, corte y tamizado con recirculación:



Figura 26 Esquema de trituración de neumáticos

- RSU, con alimentación desde una tolva:

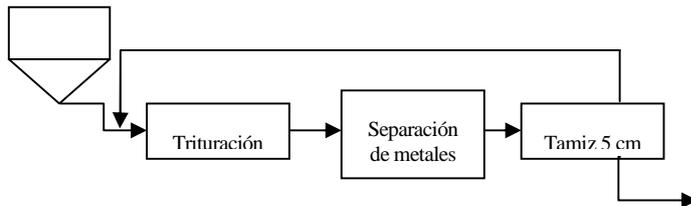


Figura 27 Esquema de la alimentación de RSU

Es recomendable incluir una segunda trituradora en paralelo debido a los atascos que se producen normalmente en este tipo de instalaciones. Además de tener cierto stock triturado para alimentar la planta por si hubiera algún problema.

Se agrega coque metalúrgico para formar un lecho que absorbe la energía calorífica de las antorchas y mantiene la temperatura en la zona de gasificación por su combustión lenta. También se requiere caliza para controlar las propiedades de fundición de la escoria y que fluya satisfactoriamente. Además asegura que se vitrifique completamente, con menor sensibilidad a la alimentación.

RSU, coque, caliza y neumáticos son después montados en una cinta transportadora con una serie de palas cargadoras. Se conducen así hasta las tolvas que alimentan al gasificador. Cada gasificador cuenta con dos de estas, de tal manera que mientras se alimenta con una, la otra permanece cerrada para su llenado.

Reactor de gasificación por plasma

Su diseño está basado en un horno que diseñó Westinghouse plasma para fundición de chatarra de hierro y acero, por lo que es capaz de soportar las temperaturas y la corrosión. Durante su operación en la planta de Utashinai (Japón) fueron necesarias varias modificaciones de sus dimensiones y en el material refractario, optando finalmente por alúmina en la parte externa y carburo de silicio en el interior del reactor. Además hubo que alargar el tubo de alimentación y bajar la temperatura de salida de gases para evitar la corrosión por partículas calientes en la medida de lo posible aunque supusiera una pérdida de rendimiento.

Los compuestos orgánicos son gasificados gracias a las altas temperaturas alcanzadas en la parte inferior del reactor, que favorece cinéticamente las reacciones. Además se deben realizar inyecciones de vapor de agua y oxígeno (o en todo caso aire que puede estar enriquecido). El gas de síntesis sale a presión aproximadamente igual a la atmosférica (1,01 bar) y a unas temperaturas entre 900 y 1100 °C, aunque en ciertos casos es conveniente reducirla más aún para preservar la instalación.

Por otro lado las escorias fundidas salen por un orificio que hay al fondo. Están compuestas por materiales inorgánicos entre los cuales hay metales reciclables.



Figura 28 Gasificador Alter NRG / WPC

El número de antorchas y su potencia varía, aunque hay datos de un diseño estándar que usa seis antorchas MARC 11 L operando a 0,5/0,6 MW cada una para tener la capacidad de aumentarla en momentos puntuales o para la puesta en marcha.

Mediante modelos por ordenador y en base a las experiencias realizadas en planta piloto de Waltz Mill, la compañía ha realizado una serie de mejoras en el reactor original lo que les ha dado una seria ventaja respecto a sus competidores.

A continuación se muestran las características de los equipos comercializados por Alter NRG, según datos de la propia compañía

- Antorchas de plasma, tres modelos:

Tabla 16 Especificaciones de las antorchas de Westinghouse Plasma(48)

Modelo:	MARC 3 A	MARC 11 L	MARC 11 H
Potencia mínima, kW	80	350	860
Potencia máxima, kW	300	800	2400
Corriente máx., A	400	1000	2000
Máximo voltaje del arco	860	950	1200
Caudal de aire, kg/h	42	197	415
Eficiencia térmica	70%	85%	85%
Diámetro, mm	89	45.7	45.7
Longitud, mm	18	35	35

- Los tres modelos de gasificador que actualmente ofrece la compañía son los siguientes:

Tabla 17 Especificaciones de los gasificadores de AlterNRG

Modelo gasificador	Capacidad (T/día)	Gas de síntesis prod. (NM ³ /hr)	Energía química del gas (GJ/año)	Pot. Ciclo combinado (MW gross/net)	FT Liquids BPD / BPY	combustibles fósiles equivalentes (barriles/año)
G65	1000	65,000	4,100,000	58 / 39	785 / 287,000	670,000
W15	290	15,000	976,000	14 / 9	188 / 68,000	160,000
P5	100	5,000	323,000	4.5 / 3	62 / 23,000	50,000

Tabla 18 Especificaciones de los gasificadores de Alter NRG (continuación)

Modelo	Alimentación	Capacidad (T/día)				Gas de síntesis producido (Nm ³ /hr)	Dimensiones (metros)		
		Aire alimentado		O ₂ alimentado			Ø Sup.	Ø Inferior	Altura
		Low	High	Low	High				
G65	RSU	540	620	1000	1000	65,000	9	4	24
	R. Peligrosos	430	720	830	1000				
W15	RSU	120	140	240	290	15,000	6	2.5	15
	R. Peligrosos	100	160	190	300				
P5	RSU	40	50	80	100	5,000	4	2	10
	R. Peligrosos	30	50	60	100				

Unidad de separación de aire

Es necesaria una unidad criogénica para producir una corriente con un 95% de O₂. Esta Pureza, aunque puede ser menor en la práctica sin suponer un problema para el gasificador, aumentaría el caudal de N₂ y por tanto el tamaño de los equipos de depuración.

Se almacena por un lado el oxígeno y por otro el nitrógeno. El primero se alimentará al reactor y el segundo para purgar equipos o incluso podría usarse para el control del NO_x si hubiese una turbina de gas en la instalación.

Puede obtenerse mediante destilación criogénica o adsorción con ciclos de presión si no hicieran falta grandes caudales ni purezas. También puede considerarse su compra directa por tubería en caso de existir una planta cercana que lo produzca o en cisternas en caso contrario.

En principio, para los consumos requeridos en esta planta (unas 10 T/h), la mejor opción será la destilación criogénica:(49)

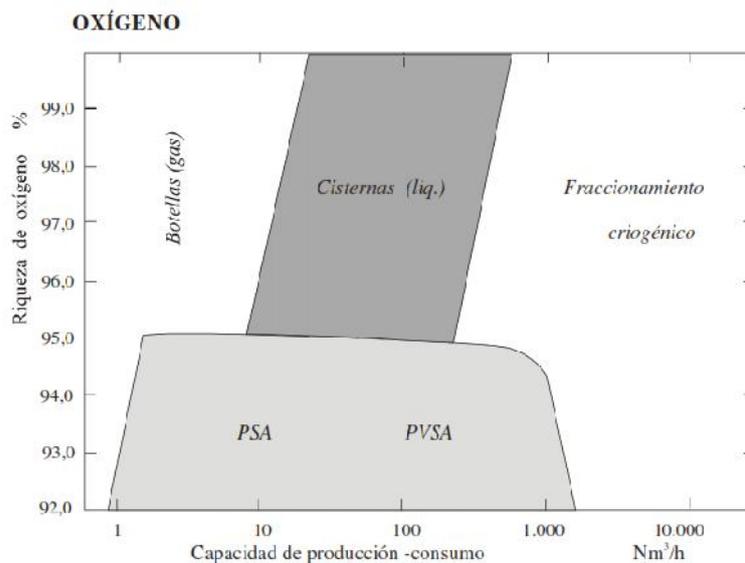


Figura 29 Métodos de separación de oxígeno del aire

Limpieza del gas de síntesis

El gas producido contiene especies y partículas que deberán ser eliminadas para su utilización ya sea como materia prima o como combustible. Distintos grados de depuración serán necesarios en cada caso y también depende de la alimentación usada, por lo que la configuración y los equipos de esta parte de la planta pueden variar mucho de un caso a otro.(37)

Para una alimentación típica de RSU, el gas de síntesis bruto contiene:

- Partículas carbonosas, alcalinas y de metales pesados.
- Gotas de alquitranes líquidos y aerosoles, entre los que hay metales volátiles como mercurio.
- Carbonilos de metales.
- Compuestos gaseosos de halógenos.
- Especies de azufre, como H_2S o SO_2 .
- Especies de nitrógeno, como NH_3 .

Si se agregan neumáticos, como se ha comentado antes, hay que añadir a lo anterior:

- Mayores niveles de compuestos de azufre.
- Partículas microscópicas de óxido de zinc.

La configuración recomendada por el fabricante y utilizada también en otras instalaciones consta de las partes descritas a continuación.

Quench

Se realiza en una torre con un sistema de spray que rocía agua sobre los gases. Así se consigue reducir su temperatura bruscamente, eliminar gran porcentaje de partículas y algunos gases ácidos (como HCl gaseoso).

Debido a las altas temperaturas que hay en el gasificador son destruidos furanos y dioxinas, pero pueden reaparecer por las reacciones de síntesis “de-novo”. Éstas aparecen a unas temperaturas de 180-450 °C en la superficie de las cenizas volantes y otras partículas que contienen carbono. Por tanto es conveniente que el gas de síntesis sea enfriado rápidamente hasta una temperatura inferior en este equipo.

Puede plantearse la recuperación del calor sensible de los gases de salida pero supone otros problemas técnicos añadidos, entre otros requisitos, la transferencia de calor debería ser rápida por lo explicado anteriormente.(37)

Precipitador electrostático húmedo

Este equipo se basa en hacer que las partículas adquieran una carga y la superficie captadora tenga la contraria para que se dirijan hacia ésta por las fuerzas eléctricas resultantes. Esto se logra mediante unos electrodos que

ionizan los gases y por tanto provocan este efecto también sobre las partículas. Operan a unos voltajes entre 20 y 100 kV en corriente continua y normalmente a los electrodos se les aplica la polaridad negativa porque así es más complicado que se produzca la ruptura eléctrica del gas.(50)

Existen tres posibles configuraciones:

- Placa y alambre:

Muy entendidos para tratar grandes volúmenes de gases procedentes de calderas de carbón, cementeras, plantas de incineración...

Los electrodos son largos alambres colocados perpendicularmente al flujo del fluido de tal manera que éste deba pasar por todos ellos sucesivamente.

- Placa plana:

Utilizados generalmente para caudales menores que los anteriores. Tienen la ventaja de que pueden operar con electrodos de polaridad positiva y se reduce la generación de ozono, lo que es fundamental si ese aire está destinado a la ventilación de edificios.

Tienen una eficacia especialmente alta para partículas pequeñas de alta resistividad.

- Tubulares:

Es el diseño original de los primeros precipitadores, de forma cilíndrica con sus electrodos colocados en el eje del tubo. Se utiliza cuando se desea un re-encauzamiento de partículas bajo, comúnmente para sólidos húmedos o pegajosos.

Los precipitadores húmedos se diferencian de los secos en que recogen las partículas captadas mediante una capa de agua que puede ser continua o intermitente, produciéndose un fango que ha de ser tratado. Sin embargo tienen la ventaja de que las partículas no vuelven a la corriente por el golpeteo o que se produzca la corona inversa (que el gas se “rompa” eléctricamente entre ambos electrodos).

Eliminación de mercurio

Tanto en el quench como en el precipitador electrostático se han eliminado partículas de mercurio, pero para lograr una eliminación superior al 90 %, será necesario la utilización de un lecho de carbón activo impregnado de azufre. De esta forma, el mercurio reacciona produciéndose sulfuro de mercurio, compuesto estable. En caso de que la legislación exigiera una eliminación aún mayor, se podría añadir un segundo filtro para eliminar aproximadamente un 99 %, lo cual aumentaría la pérdida de carga y por tanto los costes operativos.

El lecho saturado deberá reemplazarse y ser tratado como residuo peligroso lo que añade otro coste operativo. (37)

Hidrólisis del sulfuro de carbonilo

Se trata de un compuesto tóxico y muy contaminante. Su eliminación se realiza en un reactor catalítico en el cual se transforma en ácido sulfhídrico y dióxido de carbono, siendo un método muy común en los procesos de gasificación existentes.

Hay que tener especial cuidado con el envenenamiento del reactor por cloruros y carbonilos metálicos por lo que es conveniente un lecho de carbón activo como protección. En este caso será el mismo que se emplea para la eliminación de mercurio. (37)

Desulfuración

Existen varias soluciones posibles para la desulfuración, siendo la empleada por Alter NRG una tecnología llamada Crystasulf. (37)

El Crystasulf utiliza una solución líquida no acuosa con gran capacidad de absorber azufre quedando este en forma elemental, por lo que no se forman compuestos sólidos en la corriente líquida. Funciona de la siguiente manera:(51)(52)

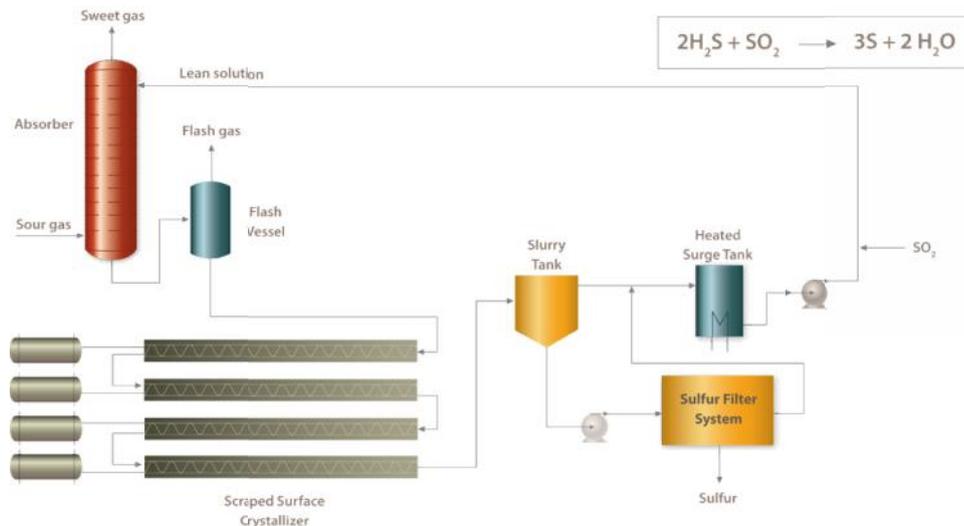


Figura 30 Instalación de Crystasulf

- En la corriente líquida hay SO₂.
- El SO₂ reacciona con el H₂S de los gases produciéndose azufre elemental disuelto en el líquido.
- Posteriormente la corriente líquida pasa por un separador flash, pudiéndose reciclar los gases que se producen.
- Los fondos del flash van a un cristizador donde se enfrían y se obtienen cristales de azufre.
- Para reponer el SO₂ gastado se puede oxidar el azufre obtenido o comprarlo a una empresa externa.

Varias plantas de gasificación japonesas usan otro método llamado Lo-Cat que también es empleado en otro tipo de instalaciones con buenos resultados. (48)

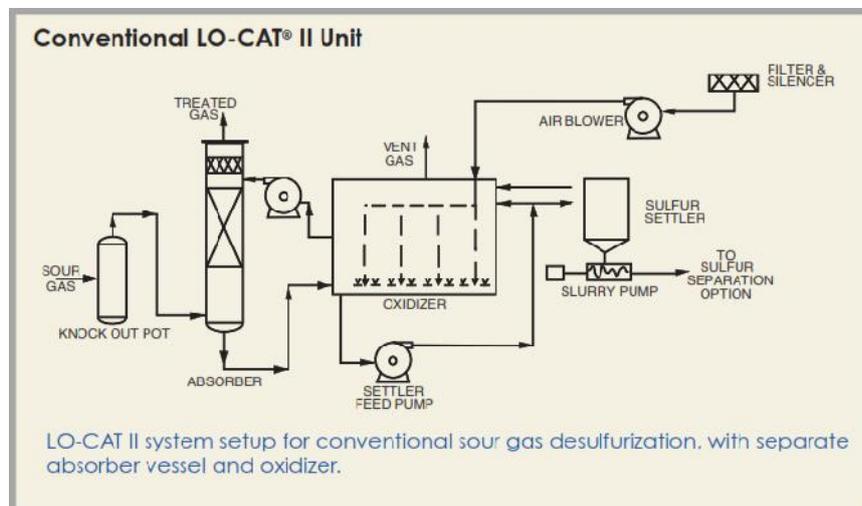


Figura 31 Unidad de catalizadores(53)

Convierte el H₂S en azufre elemental y agua mediante una oxidación con aire sobre un catalizador de hierro. Requiere además que se agreguen una solución cáustica para mantener el pH medianamente alcalino y quelatos, que se degradan con el tiempo. El catalizador no se consume salvo por las pequeñas pérdidas de origen mecánico.(53)

3.3.4.4 Producción de energía y utilización

Hay tres posibles métodos para producir electricidad a partir del gas de síntesis:

Ciclo combinado:

Consiste en emplear una turbina de gas alimentada con el gas de síntesis y usar sus gases de salida para

producir vapor que es alimentado a otra turbina.

Uno de los mayores problemas es que las turbinas comerciales están diseñadas para emplear un combustible con unas características muy restrictivas tanto de poder calorífico mínimo como de limpieza, es decir, no debe contener partículas, gases ácidos o metales alcalinos por la corrosión que producirían. Ambas son características complicadas de lograr en una producción en continuo del gas de síntesis debido a las grandes variaciones que presenta, por lo que es necesario un gran control de la depuración y además contar con una reserva de gas natural de apoyo para momentos puntuales.(37)(22)

General Electric y Siemens han estado desarrollando turbinas específicas para gas de síntesis durante varias décadas, con modelos que han sido testados para estas aplicaciones. En Siemens tienen, entre otros, el modelo SGT5-200E y GE cuenta con los de la clase B que están preparados para operar con combustibles no convencionales. Además existe la opción de encargar una turbina adaptada a la aplicación.(54)(55)

Ciclo de vapor simple:

Consiste en una caldera convencional donde se quema el gas de síntesis para producir vapor de agua. Su rendimiento es menor que el ciclo combinado pero a cambio es más barato, presenta menos problemas operativos y no es tan restrictivo con las características del combustible.

Varias compañías tienen equipos capaces de operar en estas condiciones y hay instalaciones que operan satisfactoriamente de esta manera.(37)

Motores de gas:

Otra opción que ha sido probada con satisfacción en plantas de gasificación es el empleo de motores Jenbacher de General Electric, que son motores de combustión interna alternativos de ciclo Otto. (56)

Hay varios modelos y pueden ser configurados dependiendo de la aplicación, habiendo motores de este tipo funcionando con combustibles diferentes como gas natural o diferentes tipos de biogases procedentes de residuos. Es común que se instalen varias unidades del mismo modelo para que funcionen en paralelo y además se puede ampliar la capacidad de manera relativamente sencilla añadiendo otras unidades.

Existe la posibilidad de usar los gases de escape para producir vapor, ya que éstos salen del motor a unos 450 °C y se podría mejorar el rendimiento de la planta.

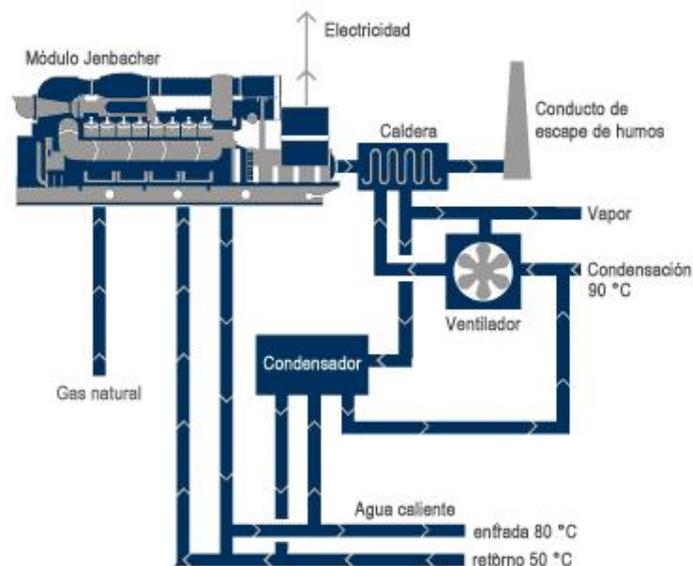


Figura 32 Instalación de motores de gas

3.3.4.5 Tratamiento de escorias

La escoria está formada por los metales y minerales contenidos en los residuos, a los cuales se le ha añadido caliza en la alimentación para controlar el punto de fusión y la viscosidad.

Sale del gasificador por el fondo y se conduce a través de un conducto fabricado en refractario hasta donde están una serie de sprays de agua a alta presión los cuales solidifican las escorias formando pequeños gránulos. Posteriormente pasan por un baño de agua y un separador magnético que recoge el material ferroso.

La escoria cristalizada resultante es inerte según los estudios de lixiviación realizados tanto en plantas comerciales como en las experimentales. Tomando datos de la planta japonesa de Mihama-Mikata y los límites para considerarlo como residuo inerte según la normativa de los vertederos españoles:

Tabla 19 Lixiviados de escorias vitrificadas (47)

Elemento	Mihama-Mikata (mg/L)	Límite (mg/L)
As	0,0023	0,06
Cd	0,0005	0,02
Cr	0,0289	0,1
Pb	0,001	0,15
Hg	0,00001	0,002
Se	0,01	0,04

Usos comerciales

Las aplicaciones principales de este subproducto estarían en el sector de la construcción, como agregado o materia prima. Combinado con asfalto, se puede utilizar de material de relleno en carreteras y aparcamientos. También como materia prima de productos de construcción, tales como la espuma de vidrio que se usa de aislante térmico y acústico. El principal problema sería cumplir con las características físicas que se requieren como porosidad o densidad, lo cual puede ser complicado.(47)(37)

3.3.4.6 Balance de energía

Ciclo combinado, % respecto a la energía de entrada del RSU

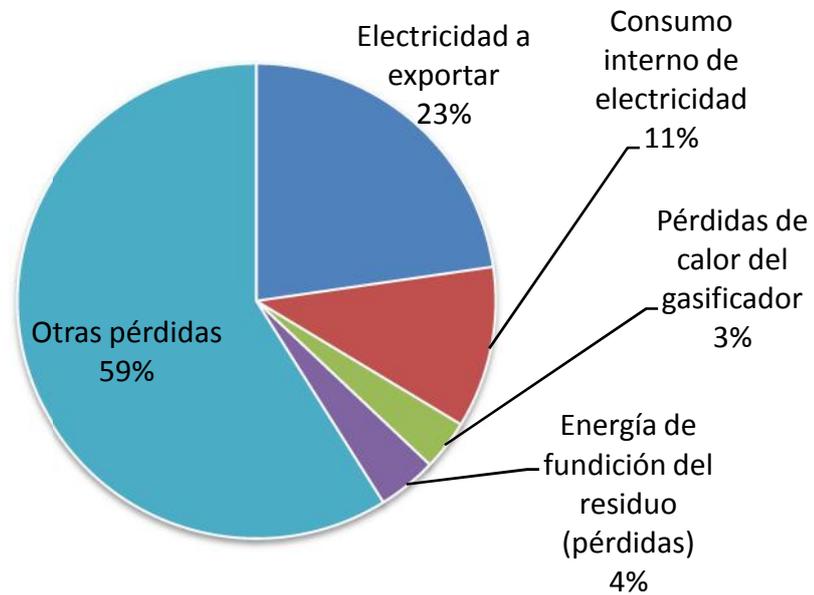


Figura 33 Destino de la energía de la planta de AlterNRG

Potencia eléctrica exportada:

- 3852.5 KJ/Kg de residuo
- 44,56 MWe

3.4 TABLAS COMPARATIVAS

ALIMENTACIÓN			
INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN CONVENCIONAL	GASIFICACIÓN ALTA TEMPERATURA	GASIFICACIÓN POR PLASMA
Admiten gran diversidad de tamaños (siempre dependiendo del diseño de la planta) y composiciones del residuo. No obstante, ambos parámetros influyen en la buena operación de la planta y podría necesitar combustible de apoyo en determinados casos para mantener una temperatura adecuada.	Dependiendo del tipo de instalación, requiere una alimentación con un tamaño máximo entre 1 y 50 mm. La alimentación debería tener un poder calorífico mínimo para poder autosustentar la gasificación.	Si la temperatura está por encima de la de fusión, puede soportar prácticamente cualquier granulometría y composición. En caso contrario, dependerá del tipo de lecho. Aun así, suele realizarse un proceso previo de trituración y mezcla de residuos para mayor homogeneidad.	Cuando incide el plasma directamente en el residuo, es capaz de tratar cualquier tipo de residuo por la alta energía y reactividad del plasma, independizando el funcionamiento del residuo a tratar. Hay diseños en los que la antorcha no incide directamente y en tales casos se asemejaría a una gasificación convencional.
Rentable, sin contar otros factores, para grandes capacidades.	Admite diferentes tipos de residuos y capacidades sin problema. La principal ventaja respecto a la incineración es la rentabilidad con menores capacidades que ésta, aunque para ello habría que utilizar un residuo que diera un buen gas de síntesis.		

PRODUCTOS DE SALIDA			
INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN CONVENCIONAL	GASIFICACIÓN ALTA TEMPERATURA	GASIFICACIÓN POR PLASMA
Producción de vapor, que se puede emplear en otra industria o bien generar electricidad	Gas de síntesis que se puede usar: -Para producir vapor, igual que en la incineración. -Para producir electricidad en ciclos combinados (opción menos probada) o en motores de combustión interna. -Fabricación de bioetanol y otros procesos de química orgánica.		

ENERGÍA ELÉCTRICA EXPORTADA			
INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN CONVENCIONAL	GASIFICACIÓN ALTA TEMPERATURA	GASIFICACIÓN POR PLASMA
7 a 22 % del PCI del residuo, directamente proporcional al tamaño de la planta.	14 % del PCI del residuo con un ciclo de vapor. Podría estar por encima de un 20 % si se emplearan motores o turbinas.	11 a 30 % del PCI del residuo, directamente proporcional al tamaño. Hay un caso en el que se supone que alcanza el 40% según la compañía.	23 a 28 % del PCI del residuo, usando motores o turbinas de gas. Parece haber cierta correlación entre la capacidad del gasificador y la producción eléctrica por tonelada de residuo.

TRATAMIENTO DE GASES			
INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN CONVENCIONAL	GASIFICACIÓN ALTA TEMPERATURA	GASIFICACIÓN POR PLASMA
Depuración de gases tras la combustión.	Es común que se deba depurar tanto el gas de salida del gasificador en función de la instalación posterior como los gases de escape de la combustión.		
Eliminación de partículas, lavado de neutralización de gases ácidos y catalizador para eliminar NOx y dioxinas. Hay diferentes alternativas válidas.	Eliminación de partículas, lavado de neutralización de gases ácidos y tratamiento de afino con carbón activo.	Una buena parte del tratamiento sucede justo a la salida del gas, donde se enfría rápidamente y se eliminan partículas y alquitranes. Además hay diferentes equipos de abatimiento de gases ácidos. Tras la combustión, hay otros elementos de depuración como catalizadores.	

RESIDUOS SÓLIDOS			
INCINERACIÓN	GASIFICACIÓN CONVENCIONAL	GASIFICACIÓN ALTA TEMPERATURA	GASIFICACIÓN POR PLASMA
Cenizas que deben tratarse como residuo peligroso. La vitrificación o inmovilización de contaminantes en los mismos puede ser aplicable pero supone un sobrecoste.		Según la información facilitada por varias compañías, siempre y cuando se produzca la vitrificación de las cenizas en el propio proceso, cumplen la normativa de residuos inertes y pueden ser utilizados en construcción. En caso contrario, son un residuo peligroso (p. ej. En la gasificación asistida que no llega a fundir las cenizas).	

4 COMPARACIÓN DE PLANTAS DE GASIFICACIÓN

En este apartado se procederá a realizar balances de materia y energía para plantas de gasificación por plasma y convencional, de manera comparativa. Se ha decidido realizar así porque ambas tecnologías, aunque ya implantadas, podrían considerarse que son emergentes y una sería competencia de la otra.

Por otro lado, el tamaño elegido (720 Tn de RSU/día) se debe a que esta es la tendencia de las principales compañías desarrolladoras de la gasificación por plasma. Suponemos que estiman un mayor beneficio en plantas grandes debido al alto coste de inversión que supone una planta pequeña en relación a la capacidad.

En primer lugar se procederá al análisis del residuo a tratar, una fracción resto proveniente de plantas donde ya se han realizado tratamientos previos de separación. A continuación se resumen las características consideradas:(57)(58)

Tabla 20 Composición desglosada RSU

% en peso de cada tipo de residuo individual que compone el RSU		Análisis elemental (% en peso) de cada tipo de residuo (base seca)					
		C	H	O	N	S	Cenizas
Materia orgánica	11,70	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5
Papel	14,50	43,5	6	44	0,3	0,2	6
Celulosa sanitaria	6,70	43,5	6	44	0,3	0,2	6
Plastico	21,60	60	7,2	22,8			10
Brick	7,70	26,3	3	2	0,5	0,2	68
Madera	3,30	49,5	6	42,7	0,2	0,5	1,5
Textiles	14,90	55	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Cauchos y gomas	0,20	78	10		2		10
Vidrio	3,60	0,5	0,1	0,4			98,9
Metales férricos	2,30	4,5	0,6	4,3			90,5
Metales no férricos	0,70	4,5	0,6	4,3			90,5
Peligrosos del hogar	0,10	26,3	3	2	0,5	0,2	68
Aparatos eléctricos / electrónicos	1,20	26,3	3	2	0,5	0,2	68
Inertes	2,70	26,3	3	2	0,5	0,2	68
Otros	8,80	26,3	3	2	0,5	0,2	68

Por tanto la composición en peso del residuo se considerará la siguiente:

Tabla 21 Composición elemental RSU (% masa)

C	H	O	N	S	Cenizas	Humedad
34,66%	4,33%	20,21%	0,93%	0,14%	19,74%	20%

PCS del residuo = 14660 KJ/Kg

Calculado según el ajuste:

$$PCS = 349,1 \cdot C + 1178,3 \cdot H + 100,5 \cdot S - 103,4 \cdot O - 15,1 \cdot N - 21,1 \cdot \text{Ceniza}$$

$$PCI = PCS - \lambda_{vap} \cdot 9 \cdot \frac{H}{100} + \frac{M}{100}$$

Donde C, H, S, O y N son los porcentajes máxicos de cada elemento en el residuo, “Ceniza” el porcentaje de cenizas del residuo y M el de humedad. Lambda es la entalpía de evaporación del agua. Todas las unidades energéticas están expresadas en KJ/Kg. (22)

4.1 Planta de gasificación por plasma

4.1.1 Pretratamiento

Los residuos llegan a un búnker habilitado para su recepción y pasan una primera inspección visual en la que se separan los elementos reciclables que se aprecien.

Posteriormente se tritura el residuo y se hace pasar por un tamiz de 5 cm de luz. Debido a la naturaleza del proceso, no hay un tamaño mínimo establecido para la alimentación al gasificador, sino que éste se elige según otros criterios operativos tomando un tamaño similar al de otras plantas.(22)

Aprovechando las múltiples corrientes de fluidos calientes que se disponen en otras partes del proceso, se pueden secar los RSU para que cumplan con el valor de humedad del 20% que se ha propuesto.

La energía empleada en esta parte del proceso se incluye en el balance global.

4.1.2 Gasificador

Al gasificador se añade:

- RSU triturado
- Coque triturado para aportar consistencia estructural a la materia del seno del gasificador, además de un aporte energético ante fluctuaciones de las características del residuo. Las características son las siguientes:(59)

Tabla 22 Composición del coque (% máxico)

C	H	O	N	S	Cenizas
82,11%	4,12%	0%	1,17%	0,60%	12,00%

- Caliza triturada que da mejores cualidades al material a la hora de fundirse y cristalizar. Se considerará que sale del equipo completamente como material fundido.
- Aire para gasificación.
- Plasma térmico, usando aire como gas de operación. Aunque en algunos modelos de antorcha se requiere añadir gases nobles a esta corriente, se ha asumido que se añade sólo aire para este balance.

Se toman las siguientes consideraciones de cálculos:(60)

- Relaciones de coque, caliza y plasma por Kg de RSU introducido han sido calculadas según datos de fabricantes.
- Los productos de la gasificación a la salida cumplirán la misma proporción molar que en los datos de un gasificador comercial. En la siguiente tabla se indican las relaciones molares con respecto al COen (moles_compuesto/moles_CO) para mantener la misma relación entre compuestos.

Tabla 23 Moles de cada compuesto por mol de CO

CO2	0,115
CH4	0,029
C2H6	0,012
C2H4	0,006
C3H8	0,006
C4H10	0,006
H2	0,559

- Se ha supuesto que todo el carbono sale del gasificador convertido en los compuestos anteriores. En la realidad también se transformaría una parte en partículas y alquitranes, pero es complicado saber cuánto.
- El azufre se transformará por completo en H₂S. En los datos reales también se forman pequeñas cantidades de COS, que se han despreciado para simplificar este análisis.
- El aire introducido para la gasificación es tal que se agota completamente su oxígeno por las reacciones anteriores.
- Las cenizas salen todas fundidas por la parte inferior del equipo.

Entonces los balances de materia se realizan de la siguiente forma:

- Los caudales másicos de entrada se igualan con los de salida:

$$m_{\text{aire}} + m_{\text{gasplasma}} + m_{\text{RSU}} + m_{\text{coque}} + m_{\text{caliza}} = m_{\text{g.síntesis}} + m_{\text{ceniza}}$$

- Para cada elemento i (C, H, N, O y S) se iguala su masa total en las especies de entrada (e) y salida (s), donde m es el caudal másico de entrada para cada especie (RSU, aire, escoria...) y x la fracción másica del elemento en la especie:

$$\bar{m}_e \cdot x_{i_e} = \bar{m}_s \cdot x_{i_s}$$

La composición del gas de síntesis se estima con los valores de la tabla 23 y teniendo en cuenta el balance por elemento expresado antes, la masa total de cada elemento que entra se reparte a la salida entre los diferentes compuestos químicos de forma proporcional.

El hidrógeno que hay en exceso se considera que se transforma en agua.

El aire introducido se calcula en función de las especies que hay a la salida, realizando el mismo balance una vez conocidas. Hay que tener en cuenta el aporte de oxígeno de las otras corrientes.

El balance de energía está realizado de esta forma:

$$E_{\text{RSU}} + E_{\text{plasma}} + E_{\text{coque}} = E_{\text{sensible}_{\text{gs}}} + E_{\text{escoria}} + E_{\text{química}_{\text{gs}}} + E_{\text{vapor}_{\text{gs}}} + E_{\text{perdidas}}$$

Donde, de izquierda a derecha, se han representado las potencias (en MW) de:

- El RSU introducido, como se calculó al principio del capítulo.
- La antorcha de plasma, según datos del fabricante.

- El coque
- El calor sensible del gas de síntesis de los s compuestos (salvo agua) que lo forman $E = \sum_s m_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta T$
- Las escorias fundidas. Tomando una energía de fusión de 1'95 MJ/kg de escoria.
- La energía química del gas de síntesis. Es el caudal de cada compuesto multiplicado por el PCI (poder calorífico inferior) de cada uno de ellos $E = \sum m_s \cdot PCI_s$
- La potencia consumida en la evaporación del agua. Su caudal másico por la diferencia de entalpías a la entrada y salida $E = m_{agua} \cdot (H_{T^a_{salida}} - H_{25^\circ})$.
- Las pérdidas por los cerramientos del equipo, según un fabricante son aproximadamente un 3'5% de la energía de entrada al equipo.

Se dispone de datos para calcular todas salvo la potencia consumida por el incremento de temperatura de los gases (gas de síntesis y agua) que dependen ambas de una sola variable, la T^a de salida del equipo. Por tanto se puede resolver de esta forma el sistema.

Por tanto, entrada y salida quedarían de la siguiente manera:

Tabla 24 Entrada al gasificador por plasma

ENTRADA			
Materia	Kg/h	Energía	MW
RSU	30000	RSU	122,2
Caliza	2300	Caliza	0,0
Coque	1200	E_coque	10,3
Gas Plasma	1200	E_plasma	2,75
Aire	46067	Aire	0,0
Caudal másico de cada elemento (humedad considerada aparte)		Temperatura (°C)	25
Masa C	11327	Presión (kPa)	101,3
Masa H	1344		
Masa N	36545		
Masa O	17076		
Masa S	53,71		
Masa de cenizas	8342		
Humedad	6060		

Tabla 25 Salida del gasificador por plasma

SALIDA				
MATERIA	Kg/h	% v/v	ENERGÍA	MW
Gas de síntesis	72425		Energía química	105,7
Composición:			Energía sensible	12,45
CO	21656	25,0%	Evaporación agua	8,01
CO2	3903	2,9%	Escorias	4,52
H2	864,6	14,0%	Pérdidas	4,57
CH4	360	0,7%		
C2H4	125,8	0,1%	Temperatura de los gases (°C)	570
C2H6	270,1	0,3%	Presión (kPa)	101
C3H8	197,7	0,1%		
C4H10	260,5	0,1%		
N2	36545	42,1%		
H2S	57,29	0,1%		
Vapor	8157	14,6%		
Escoria fundida	8342			

4.1.3 Enfriamiento de escorias

Para enfriarla es necesario aportar agua suficiente como para que cristalice la escoria y no todo el agua que

entra se evapore, por lo que se toma una temperatura de salida de 95°C para ésta.

$$\Delta H_{\text{ESCORIAS}} = m_{\text{agua}} \cdot c_P \cdot 95 - 25$$

Por tanto se requieren 55492 Kg/h de agua como mínimo.

4.1.4 Tratamiento de gases

En primer lugar hay un enfriamiento rápido (quench) hasta los 150 °C con agua que se considera que está a temperatura ambiente (25 °C), posteriormente hay otro hasta los 60 °C.

Entonces el caudal total necesario de agua será, considerando que se emplea para ambas partes del proceso la misma corriente hasta que alcance los 95 °C:

$$m_{\text{agua}} \cdot c_P \cdot 95 - 25 = m_{\text{gases}} \cdot c_{P_{\text{gases}}} \cdot 570 - 60 + m_{\text{vapor}_{\text{gases}}} \cdot (H_{\text{agua}}[570] - H_{\text{agua}}[60])$$

Caudal másico de agua = 211668 Kg/h

Donde H_{agua} es la entalpía del agua a la temperatura indicada entre corchetes y presión prácticamente igual a la atmosférica.

Por la parte inferior salen algunas de las partículas gruesas que lleva el gas y el resto son separadas en un ciclón posterior, siendo las finas capturadas en el filtro de mangas que hay tras éste.

Después viene la etapa de desulfuración que se realiza en una instalación de Crystasulf, para lo cual se inyecta SO₂ en una relación molar tal que sea la mitad que el H₂S de la corriente gaseosa, por lo que la relación másica será aproximadamente igual a 1. SO₂ como H₂S se transforman en azufre elemental, por lo que se puede obtener la cantidad de éste resultante.(51)

$$m_{\text{SO}_2} = 64 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}_{\text{SO}_2}} \cdot \frac{1}{2} \frac{\text{mol}_{\text{SO}_2}}{\text{mol}_{\text{H}_2\text{S}}} \cdot \frac{1}{34} \frac{\text{Kmol}_{\text{H}_2\text{S}}}{\text{Kg}_{\text{H}_2\text{S}}} \cdot m_{\text{H}_2\text{S}} = 53,92 \frac{\text{Kg}}{\square}$$

4.1.5 Producción de electricidad

Se ha optado por motores de gas por su compromiso entre robustez y rendimiento. Los métodos más robusto y eficiente son respectivamente un ciclo de vapor y una turbina de gas, pero el primero no tiene tanto rendimiento ni el segundo suele ser factible en estos casos por los requisitos tan estrictos que requiere su combustible.

Existe la opción de recuperar parte de la energía de los gases de escape mediante la producción de vapor, lo cual requiere un estudio económico por separado para comprobar su viabilidad.

El rendimiento de estos motores para la producción eléctrica suele estar en torno a un 45%.(55)

Por tanto, conociendo la energía química del gas, se obtiene la producción eléctrica, de la cual se emplearán 2,40 MW para distintas partes del proceso y 3,25 MW en alimentar las antorchas (suponiendo un 85% de rendimiento respecto a la potencia eléctrica suministrada); el resto será para exportar. El dato de la electricidad que requiere el proceso sin contar antorchas, se ha obtenido de datos de plantas de incineración convencionales en funcionamiento.(60)(20)

Tabla 26 Producción y consumo eléctrico

Producción y consumos	Potencia (MW)
Potencia eléctrica bruta	47,56
Potencia exportada	41,91
Consumo de la planta (incluyendo las antorchas de plasma)	5,65

El aire requerido para esta combustión se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Aire combustión} = \sum_i m_{\text{aire},i} \cdot m_i$$

Donde $m_{\text{aire},i}$ son los Kg de aire por Kg del compuesto i necesarios para la combustión y m_i es el caudal másico en Kg/h del compuesto i

$$\begin{aligned} \text{Aire combustión} \quad [\text{Kg/h}] &= 17,24 \cdot \text{CH}_4 + 16,07 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 15,68 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 15,46 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5,75 \cdot \text{CO} \\ &+ 34,3 \cdot \text{H}_2 + 14,78 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 = 173710 \end{aligned}$$

4.1.6 Efluentes del proceso

Gaseosos: Se ha supuesto que el agua del gasificador condensa en el tratamiento de gases, por lo tanto estarían compuestos por los productos de combustión del gas seco y el aire requerido para esta combustión. 237987 Kg/h

Líquidos: El agua empleada en el tratamiento de gases y escorias y aquella aportada por la condensación del vapor podrían enfriarse y ser reutilizadas tras ser depuradas. Por lo que sólo se requerirían pequeñas purgas puntuales (para evitar que se acumulen demasiado las especies disueltas en agua) en tal caso. El caudal total del efluente es de 275317 Kg/h.

Debido a que el agua de enfriamiento de escorias probablemente esté más cargada de contaminantes, se podría tratar por separado de una manera más eficiente. En algunas plantas incineradoras se emplea un proceso físico-químico de floculación con decantación de sólidos, método ya muy probado y robusto. (20)

Sólidos:

La escoria vitrificada puede venderse o llevarse a un vertedero de residuos inertes. 8342 Kg/h.

El azufre de la desulfuración tiene cierto valor económico. Son 80,67 Kg/h en total que pueden ser vendidos o bien emplearse parte de ellos para ser tostados y obtener el SO_2 requerido en la depuración de gases.

Los sólidos separados del gas de síntesis deberán ser enviados a un vertedero de residuos peligrosos. No se han tenido en cuenta para este análisis, pero en los datos de algunos fabricantes son aproximadamente un 0,3% en peso del gas de síntesis.

4.1.7 Resumen del balance de materia y energía

Datos en Kg/h:

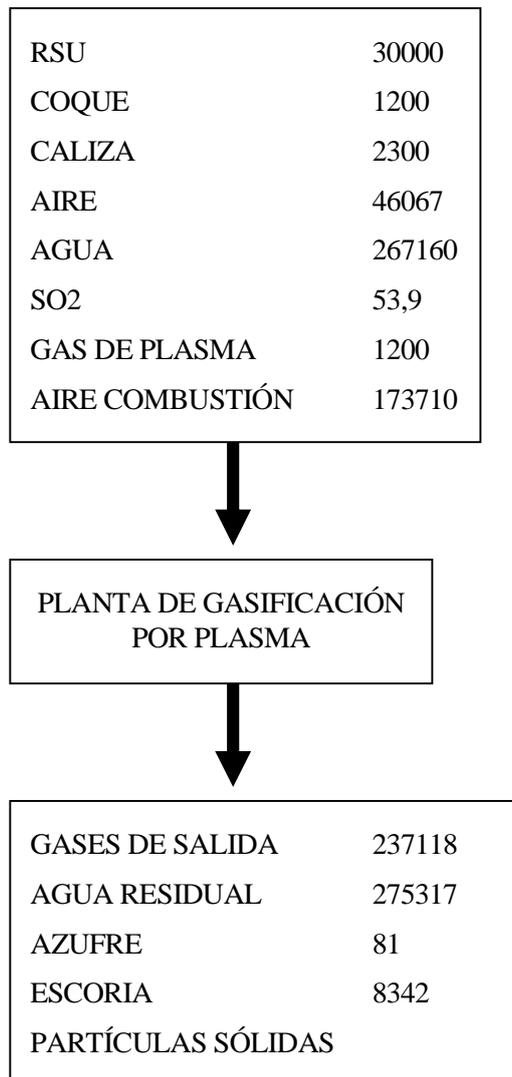
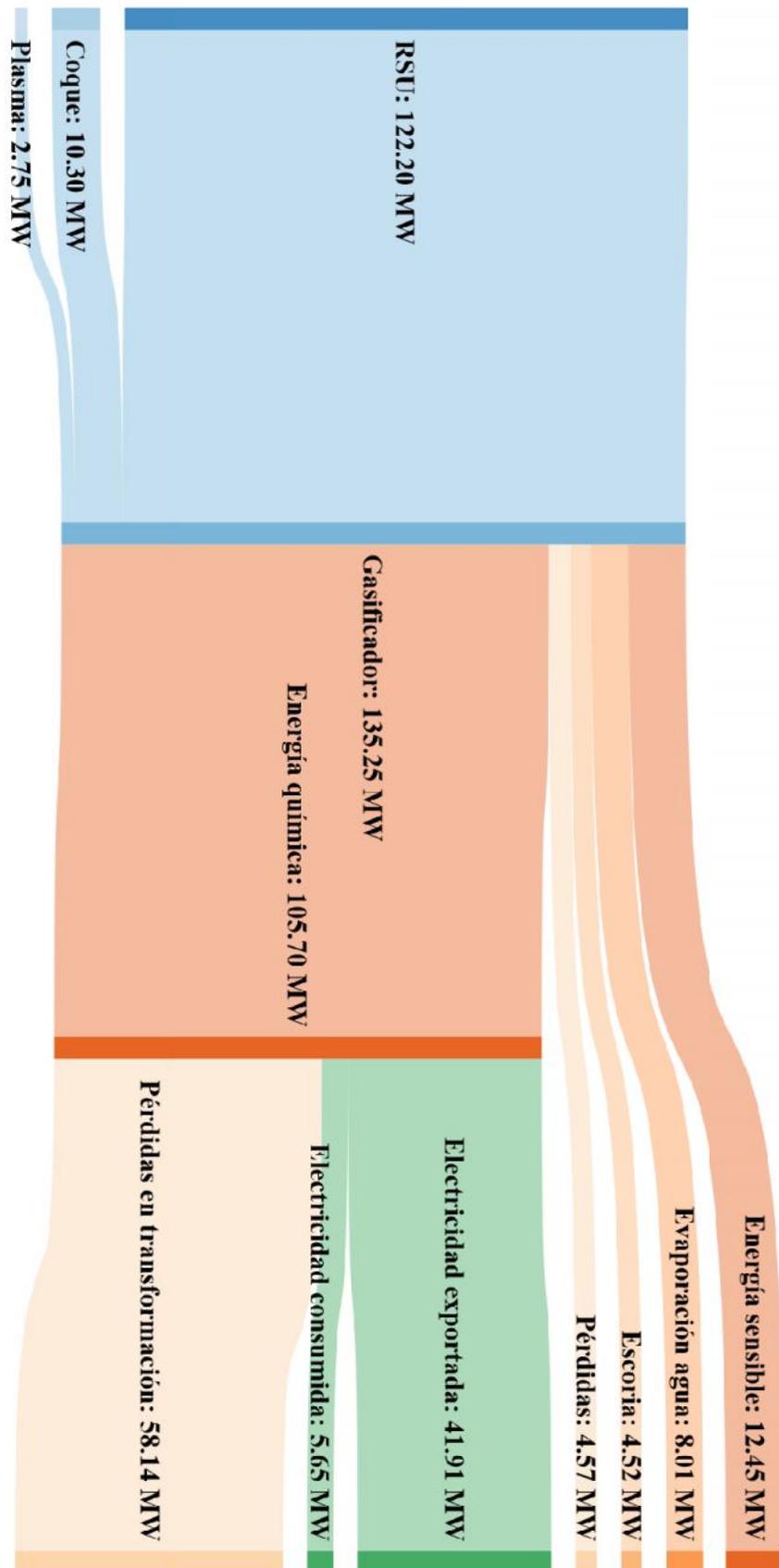


Tabla 27 Resumen del balance de materia

Figura 34 Diagrama de Sankey gasificación por plasma



4.2 Planta de gasificación convencional

Se procederá de la misma manera que en la planta de gasificación por plasma, con un proceso similar a éste salvo en la parte del gasificador. Por tanto todas las líneas de pretratamiento, tratamiento de gases y producción eléctrica es exactamente igual a la descrita anteriormente. Otra diferencia es que no es necesaria la solidificación de las cenizas.

4.2.1 Gasificador

En este caso, se añade únicamente el residuo triturado procedente del pretratamiento y el aire requerido para la gasificación.

Para el cálculo de la composición del gas de síntesis, igualmente se emplean datos obtenidos de fabricantes para conocer las relaciones entre compuestos utilizando la composición molar del gas de síntesis seco, se ha supuesto que las relaciones molares entre unos y otros se mantienen(22):

Tabla 28 Composición gas de síntesis gasificador (% v/v)

CO	14%
CH4	4%
H2	5%

El aire introducido será el 50% del estequiométrico, calculado a partir de la composición elemental del residuo.

La temperatura en el interior es de 900 °C aproximadamente, por lo tanto se puede realizar el balance energético teniendo en cuenta este dato(22):

$$E_{rsu} = E_{sensible_gs} + E_{gasificación} + E_{química_gs} + E_{vapor_gs} + E_{perdidas}$$

- E_{rsu} : energía introducida con el propio residuo. Conocida.
- $E_{sensible_gs}$: energía sensible del gas de síntesis seco. Calculada con las masas de cada compuesto a la salida:

$$E_{sensible} = m_{compuesto} \cdot c_{p_{compuesto}} \cdot (900 - 25)$$

- $E_{gasificación}$: energía empleada en el propio proceso de gasificación. Calculada por diferencia entre términos de la ecuación.
- $E_{química_gs}$: energía química de combustión del gas de síntesis. A partir de la composición del gas a la salida y sus PCI (Poder Calorífico Inferior) respectivos.

$$E_{química} = m_{compuesto} \cdot PCI_{compuesto}$$

- E_{vapor_gs} : energía del vapor de agua del gas de síntesis. Tomando la masa total como la suma de la humedad y del agua formada por reacción química:

$$E_{vapor} = m_{vapor} \cdot (H_{agua\ 900^\circ, 1atm} - H_{agua\ 25^\circ, 1atm})$$

- $E_{pérdidas}$: pérdidas de calor por las paredes del gasificador. Se ha supuesto un 4% de la energía del RSU.

Tabla 29 Entrada al gasificador

ENTRADA			
Materia	Kg/h	Energía	MW
RSU	30000	RSU	122,2
Aire	55423	Aire	0,0
Masa total por cada elemento		Temperatura (°C)	25
Masa C	10392	Presión (kPa)	101,3
Masa H	1298		
Masa N	42789		
Masa O	18976		
Masa S	42,31		
Masa de cenizas	5906		
Humedad	6000		

Tabla 30 Salida del gasificador

SALIDA				
Materia	Kg/h	% v/v	Energía	MW
Gas de síntesis	79489,83		E. química gas seco	79,2
CO	13354	15,37%	E. gasificación	17,3
CO2	11092	8,12%	E. sensible gas seco	25,9
CH4	2180	4,39%	E. vapor de agua	12,2
H2	340,7	5,49%	E. pérdidas	5,6
H2S	45,13	0,04%	Temperatura (°C)	900
N2	42789	49,24%	Presión (kPa)	101,3
Agua	9689	17,34%		
Cenizas	5906			

4.2.2 Tratamiento de gases

Este tratamiento es igual que el empleado en el caso de la gasificación con plasma. Por tanto se resumirán directamente los caudales de cada compuesto empleados:

Caudal de agua en el quench = 354443 Kg/h

SO₂ para el cristasulf = 42,48 Kg/h

4.2.3 Producción de electricidad

De igual manera, se emplean los motores de gas para este cometido.

Masa de aire necesario para la combustión = 126060 Kg/h

Tabla 31 Producción y consumo eléctrico

Producción y consumos	Potencia (MW)
Potencia eléctrica bruta	35,63
Potencia exportada	33,23
Consumo de la planta	2,4

4.2.4 Efluentes del proceso

Se considerarán los mismos que en el caso de la gasificación por plasma, aunque sus propiedades en la práctica no serán totalmente similares.

Gaseosos:

Gases procedentes de combustión = 195889 Kg/h

Líquidos:

Agua de lavado de gases y condensada = 364132 Kg/h

Sólidos:

Escoria = 5906 Kg/h

Azufre = 63.55 Kg/h

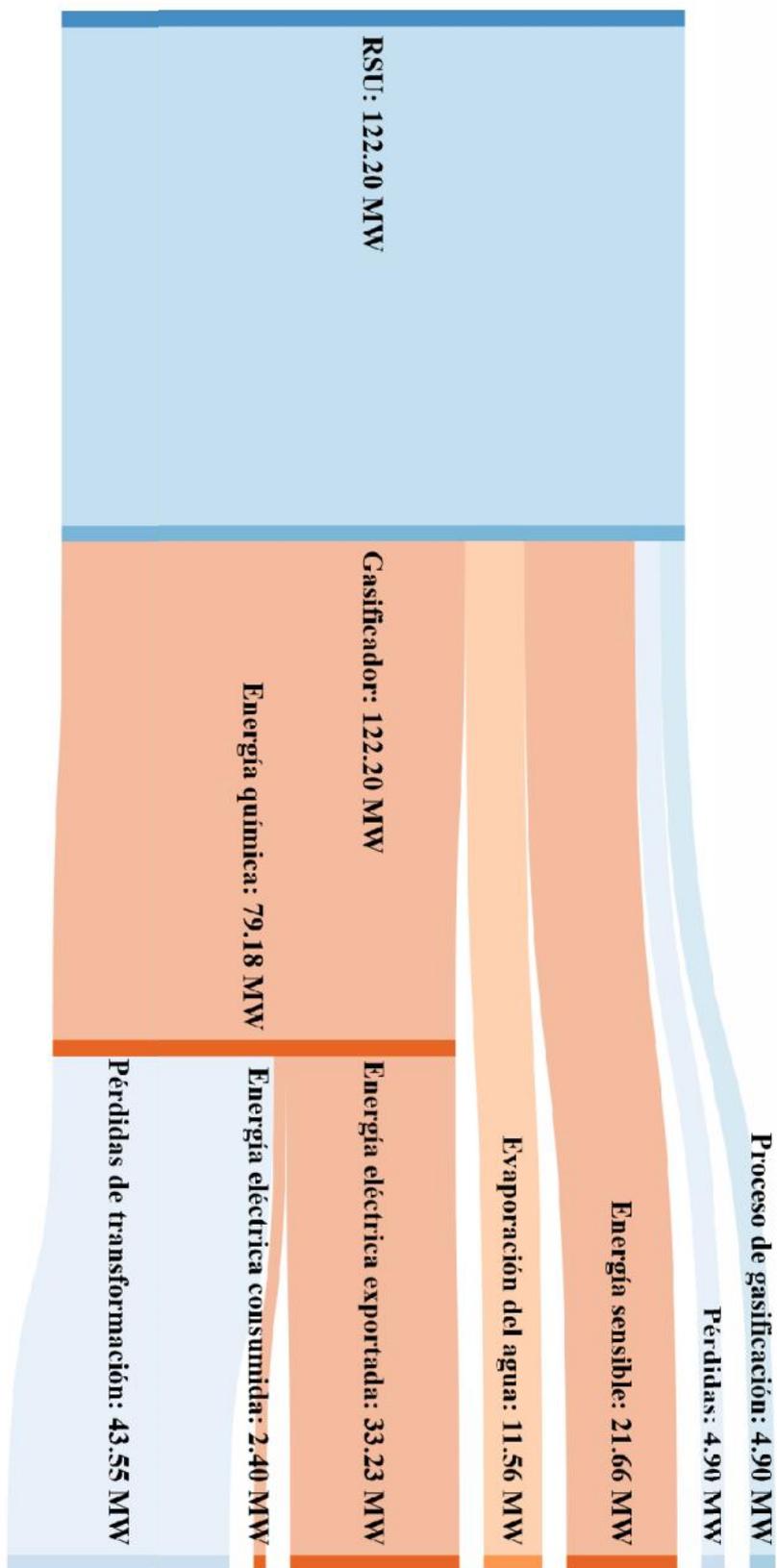


Figura 35 Diagrama de Sankey de la gasificación

5 ESTIMACIÓN DE COSTES E INGRESOS.

En este apartado se estudiarán y estimarán los datos de costes e ingresos de las plantas del capítulo anterior. Tanto la inversión necesaria como los costes de operación y mantenimiento, para deducir la rentabilidad de las mismas en según qué casos.

5.1 Costes

La tecnología de gasificación por plasma se encuentra escasamente desarrollada para aplicaciones comerciales, ya que hay plantas de demostración e investigación operativas pero pocas lo hacen con volúmenes importantes y con objetivos puramente económicos. Además las compañías que los desarrollan ofrecen escasa información al respecto, por lo que hay que dar por buena la información de las compañías y estimaciones disponibles.

Por un lado, la consultora *SCS Engineers* realizó un estudio económico para una planta de gasificación por plasma en Marion (EEUU). Asimilaron los costes tanto de construcción como de operación y mantenimiento a una incineradora clásica de residuos sólidos urbanos agregando los costes del equipamiento específico relacionado con el gasificador de plasma y la producción de energía.

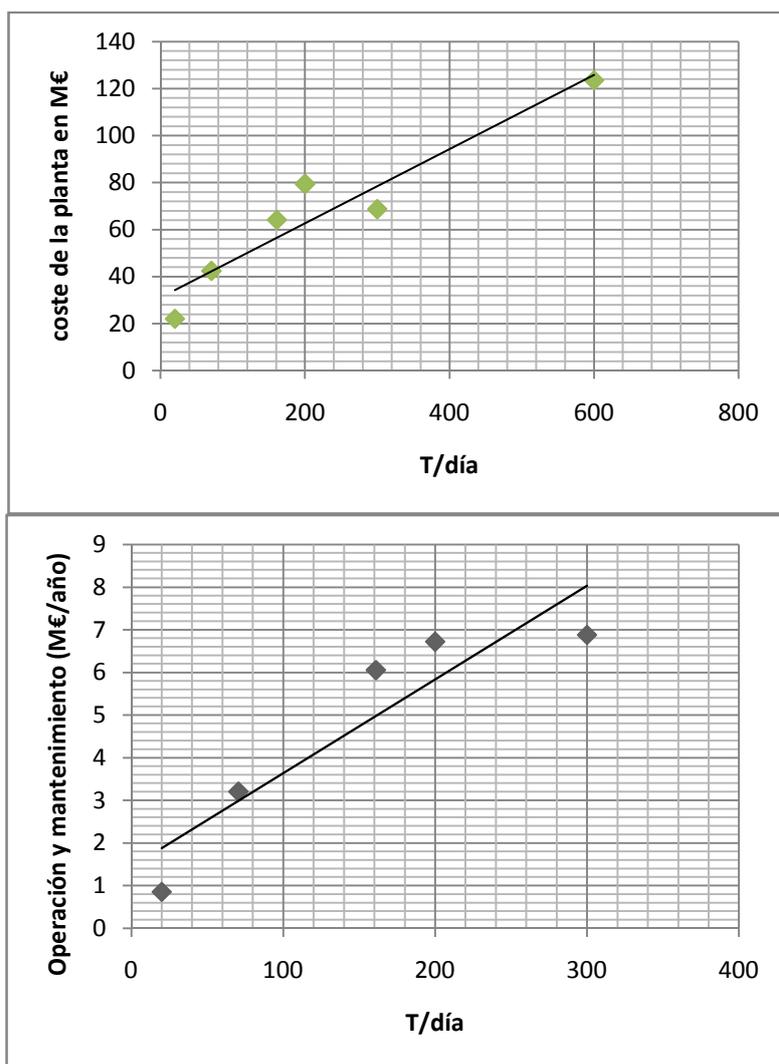
Por otro lado, en un informe de la consultora *Talent With Energy* para el ayuntamiento de Sydney aparecen datos de varios estudios y plantas construidas, incluyendo la anteriormente citada. (22)

Pasando los datos a su equivalente en Euros para cada año y aplicando los Índices de Precios Industriales (IPI) que proporciona el INE, se pueden aproximar a los costes que tendrían a día de hoy.

Tabla 32 Plantas de gasificación por plasma (costes corregidos)

Planta	T/día	Coste planta	O y M	Moneda	Año	Actualizado	
						Coste planta (M€)	O y M (M€/año)
Mihama-Mikata	20	18000000	700000	USD	2002	21,99	0,86
Propuesta GeoPlasma	70,5	47490000	3590000	USD	2005	42,37	3,20
Proyecto básico	161	90000000	8500000	AUD	2010	64,09	6,05
Utashinai	200	65000000	5500000	USD	2002	79,40	6,72
Propuesta	300	89500000	8967345	USD	2010	68,64	6,88
Propuesta re-escalada	600	161000000	0	USD	2010	123,47	0,00
Propuesta Rigel	3000	800000000	73050000	USD	2005	713,78	65,18

Se ha realizado una primera regresión sin el último valor, ya que no hay valores próximos para comprobar si el ajuste es bueno para esas dimensiones.



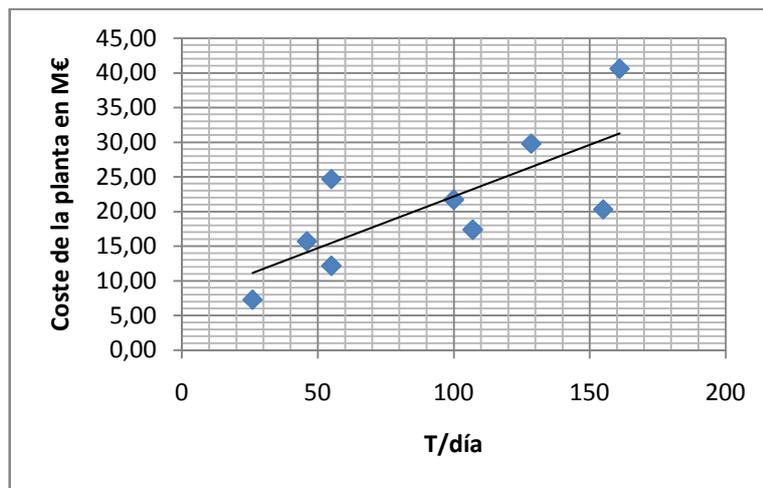
De la misma manera se ha realizado para una planta de gasificación convencional, reuniendo datos de diferentes estimaciones y plantas realizadas con precios actualizados:(22)

Tabla 33 Plantas de gasificación

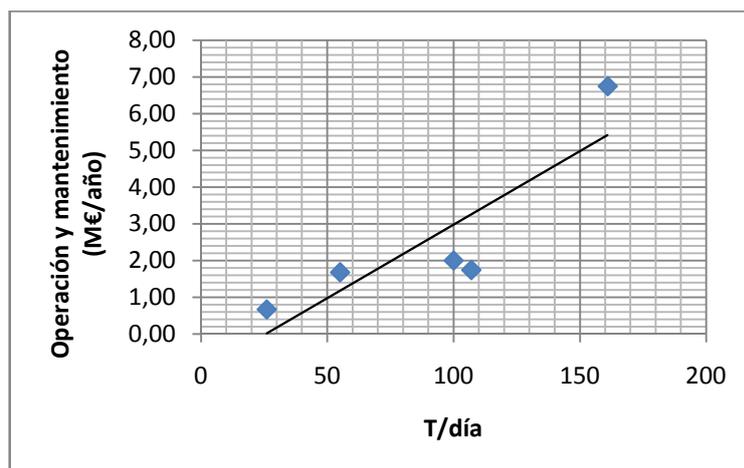
Tabla 34 Plantas de gasificación (costes corregidos)

Planta	Tn/día	Coste de la planta	O y M	Moneda	Año	Actualizado, en M€	
						Coste planta	O y M
PRM Filadelfia	26	6500000	600000	USD	2005	7,29	0,67
PRM Stanton	46	14000000	4800000	USD	2005	15,69	5,38
Middlebury	55	12000000	n/a	USD	2010	12,17	---
PRM Stuttgart	55	22000000	1500000	USD	2005	24,66	1,68
Propuesta NTECH	100	19356500	1783960	USD	2005	21,70	2,00

Propuesta Primenergy	107	15500000	1557000	USD	2005	17,37	1,75
Estudio S. y T.	128,5	22145328	n/a	EUR	2004	29,77	---
Universidad Carolina del Sur	155	20000000	n/a	USD	2010	20,29	---
Proyecto básico	161	40000000	6650000	AUD	2010	40,58	6,75



En el ajuste para costes de operación y mantenimiento, se ha eliminado el segundo valor, ya que no encaja con los demás y empeoraba el ajuste de la recta de regresión. Además se ha preferido un ajuste potencial debido a que la falta de valores para capacidades mayores de 100 Tn/día resulta en unos valores demasiado altos si se empleara el ajuste lineal.



5.2 Ingresos

Para los ingresos por la electricidad, se han considerado los valores publicados por OMIE de los últimos 7 años:(61)

Tabla 35 Precios de venta de la electricidad

Año	Precio medio aritmético de España	Precio actualizado a 2014
2.007	42,19	47,97
2.008	64,43	71,13
2.009	36,96	43,46
2.010	37,01	40,12
2.011	49,93	52,38
2.012	47,23	48,60
2.013	44,26	44,35
2.014	41,47	41,47

Se toman los valores superior e inferior como posibles precios para cada escenario.

Mientras que los ingresos por destrucción de residuos se han tomado según datos de la asociación de incineradoras españolas (Aversu). (38)(62) Se han tomado el valor medio de las tarifas y el más bajo, ya que es el rango donde están, salvo para casos especiales como las que están localizadas fuera de la península, la mayoría de plantas. Además, la tarifa menor se debe tener en cuenta el caso de que deba ofrecerse un precio competitivo con respecto al de los vertederos convencionales, generalmente inferiores a 60 €/T. Se han transformado estos precios a los valores actuales.

Tabla 36 Incineradoras en España(62)

Comunidad	Municipio	Empresa titular	Capacidad (Tn/año)	Habitantes a los que da servicio	Año construcción	Inversión (M€)	Inversión actualizada a 2010	Tarifa de entrada (€/Tn de RSU)
Baleares	Palma	Tirme	300.000	846.210	1997	210	298,66	140
Cantabria	Meruelo	TIR	90.000	580.000	2006	65	71,79	54
Cataluña	Mataró	UTETEM	160.000	393.360	1994	33,26	53,69	42,14
Cataluña	S. Adriá	Tersa	321.728	750.000	1975	---	---	34,5
Cataluña	Girona	Trargisa	35.000	125.000	1984	13	28,2	77,63
Cataluña	Tarragona	Sirusa	168.192	350.000	1991	24	42,34	38,4 / 89,90
Galicia	Cerceda	Sogama	550.000	2.285.000	2002	216	269,86	51,1
Madrid	Madrid	Tirmadrid	295.000	1.000.000	1997	119	169,24	47,02
Melilla	Melilla	Remesa	31.000	74.000	1996	17,8	26,22	95,86
País Vasco	Bilbao	Zabalgardi	320.000	700.000	2005	192	219,21	65

A partir de estos datos se obtienen tres posibles escenarios:

- Caso favorable:
 - o Precio de venta de la electricidad a niveles medios de 2008: 71,13 €/MWh
 - o Ingresos por destrucción de RSU a 75 €/T.

- Caso desfavorable:
 - o Precio de venta de la electricidad a niveles medios de 2010: 40,12 €/MWh
 - o Ingresos por destrucción de RSU a 45 €/T.
- Caso intermedio, con valores actuales:
 - o Precio promedio de 2015 para la electricidad, 60,67 €/MWh.
 - o Precio de destrucción de residuos 65 €/T.

Basándose en los datos de la compañía y en el método explicado, se ha hecho una aproximación de su rentabilidad. Hay que destacar, no obstante, que ese estudio es estimativo ya que la falta de datos reales impide hacerlo de una manera más realista. Para los ingresos por la electricidad, se han considerado los valores publicados por OMIE de los últimos 7 años; mientras que los ingresos por destrucción de residuos se han tomado según datos de la asociación de incineradoras españolas (Aversu), tomando valores hipotéticos de entre los ingresos más bajos y la media aritmética (rango en el que se encuentran las plantas de nueva construcción).

Se han tomado los siguientes valores para los cálculos:

- 90% de horas estará operativa la planta (330 días/año)
- El ingreso por tratamiento de residuos se incrementará al mismo nivel que el IPC, un 1,4% (media últimos 5 años).
- Los costes de mantenimiento y operación aumentarán en una proporción igual a la media del IPRI de los últimos 5 años, un 1,9%.
- Los impuestos supondrán un 10% de los ingresos (tipo impositivo reducido debido a la actividad)
- Planta de gasificación por plasma: 145 M€ de inversión y 18 M€/año de operación y mantenimiento, en el cual se incluye el coste del coque (80 €/Tn).
- Planta de gasificación convencional: 115 M€ de inversión y 18,2 M€/año de operación y mantenimiento.

Tabla 37 Resumen de VAN y TIR

Plasma	Desfavorable	Favorable	Intermedio
VAN	-86.879.481,87 €	82.235.218,56 €	25.458.194,32 €
TIR	-1%	13%	9%
Convencional	Desfavorable	Favorable	Intermedio
VAN	-87.200.921,45 €	61.219.352,48 €	11.632.670,44 €
TIR	-5%	12%	9%

Puede apreciarse que el analizar la rentabilidad del proyecto es muy complejo ya que el escaso desarrollo comercial de la tecnología deja mucha incertidumbre. Por un lado, la gran horquilla de precios de la inversión inicial y por otro las fluctuaciones de los precios de venta de la electricidad y la diferencia de tasas de vertedero entre unas comunidades y otras da lugar a casos muy extremos.

Al ser esencial el suministro de residuos, ya que operar a menor capacidad reduce notablemente los ingresos, se debe lograr un suministro constante bien sea por tener un precio competitivo del orden del que tiene un vertedero (compensándolo con un precio alto de venta de electricidad) o bien llegando a algún acuerdo con las administraciones públicas para que éstas lo garanticen.

La gran baza con la que juega la planta de gasificación por plasma es la mayor producción de electricidad frente a la gasificación convencional (también gracias a la necesaria adición de coque), siempre suponiendo

que las premisas en las que se basan los cálculos sean válidas. Esto compensaría la mayor inversión requerida, contando además con que puede tratar una mayor variedad de residuos.

También podría estudiarse el empleo de biomasa en lugar de RSU, pero su adquisición supondría un coste añadido ya que otro tipo de plantas, instalaciones y máquinas las emplean también como combustible. Esta opción, si no hay otros condicionantes, queda en principio descartada frente a los residuos cuyo tratamiento es una fuente de ingresos.

Comparando estos datos con una incineradora de capacidad parecida como es elCT Las Lomas (Madrid), con las siguientes características de operación durante el pasado año(38):

Horas/año de operación de la planta:	6.072
Tipo de residuos:	RDF
Procedencia:	Rechazo RSU
Habitantes a los que se presta servicio:	1.000.000
Valorización de residuos urbanos:	241.730 t (RDF/Pellets)
Línea de incineración:	3
Capacidad de incineración:	660 t/día de RDF con un PCI de 3.500 kcal/kg (por línea)
Tipo de horno:	Lecho fluidizado burbujeante
Temperatura de combustión (media):	910°
Electricidad producida (MWh)	145.163
Exportación eléctrica(MWh)	102.530

El residuo considerado es muy similar al que aparece en los cálculos del anterior capítulo en cuanto a contenido energético y tan sólo ha tratado 5000 toneladas más que las plantas analizadas en la práctica, aunque al no estar operando en condiciones alejadas de su capacidad máxima, se ha preferido recurrir a valores promedio de años anteriores. Considerando un registro histórico (63):

Tabla 38 Registros de la incineradora

Año	2004	2005	2006	2007	Media
T/año	290.689	285.035	284.335	298.900	289.740
MWh producidos	228.501	214.387	215.980	226.362	221.308
MWh exportados	173.377	162.956	155.725	161.707	163.441
MWh exportados/T	0,596	0,572	0,548	0,541	0,564
% exportado	75,88%	76,01%	72,10%	71,44%	73,86%

El coste de la planta ha sido imposible de contrastar. Sólo se dispone del dato indicado en la tabla 36, que si se redimensiona a una capacidad de 720 T/día y se actualiza según el índice de precios industriales, sería de 153,6 M€. Se ha redimensionado según la fórmula estimativa:

$$\frac{Capacidad_1}{Capacidad_2} = \frac{Coste_1}{Coste_2}^{2/3}$$

Por tanto todas las plantas aquí comparadas tienen un coste de inversión del orden de 150 M€y se diferencian unas de otras en los requisitos operativos intrínsecos a cada tecnología y la exportación eléctrica final.

Las referencias bibliográficas no son claras a la hora de evaluar los costes relativos entre unas y otras instalaciones:

- Algunos estudios estiman que el coste de una planta de gasificación es mayor que el de una incineradora para iguales capacidades (21)
- Sin embargo en otros se considera que, para plantas por debajo de 100000 Tn/año, la estructura modular de las plantas de gasificación empieza a ganar terreno frente a la incineración, aunque igualmente baja la relación inversión/capacidad al aumentar esta última(64)
- También hay una tabla realizada por ENEA en 2004 en la que se comparan los valores típicos para los costes de gasificación y combustión, que se incluye a continuación con los valores monetarios actualizados y los costes de construcción y operación para el caso considerado en nuestro caso: (64)

Tabla 39 Tabla de rangode costes

	Incineradora			Gasificación				
	Rango de valores entre		Media	Caso considerado	Rango de valores entre		Media	Caso considerado
Coste de la planta (€/Tn/año)	430,0	806,3	618,2	146,9M€	241,9	1209,5	725,7	172,4 M€
Coste operativo (€/Tn)	40,3	201,6	121,0	28,7 M€	80,6	322,5	201,6	47,9M€

Se aprecia la enorme variación entre los valores máximos y mínimos para la gasificación, lo cual muestra la incertidumbre existente en este apartado. La instalación de las plantas de gasificación puede ser relativamente más barata que una incineradora, aunque los costes operativos serán en general mayores según este cuadro. Puede deberse a los problemas técnicos que surgen durante la operación continuada de la gasificación, al ser todavía una tecnología menos robusta que la incineración.

En cuanto a los costes para el caso considerado, el de construcción de la planta es algo mayor pero está en el orden de los resultados aquí obtenidos. Sin embargo el coste operativo de la gasificación es mucho mayor que el estimado anteriormente.

6 CONCLUSIONES

En el presente proyecto se han realizado los siguientes apartados:

- Se ha explicado qué es el plasma y como se genera. También las posibles aplicaciones y ventajas que presenta para tratar residuos de diverso tipo, como pueden ser RSU o residuos peligrosos.
- Definición y caracterización de RSU, fracción resto y combustibles derivados de residuos.
- Descripción de las tecnologías más empleadas a la hora de tratar los RSU, incluyendo la valorización energética.
- Análisis detallado de las tecnologías de gasificación por plasma comerciales que hay desarrolladas actualmente explicando el proceso y los equipos que intervienen. También se han analizado de la misma forma una incineradora y una planta comercial de gasificación térmica.
- Balances de materia y energía de una planta de gasificación por plasma y otra de gasificación térmica comercial, para comparar ambas. Análisis económico comparativo de dichas plantas.

Los siguientes aspectos no han podido ser estudiados más detalladamente por falta de información:

- Balances de materia en el reactor de gasificación por plasma. En qué medida se obtienen los diferentes compuestos a la salida en función de la alimentación y las condiciones de operación.
- Costes de inversión, operación y mantenimiento del equipo de gasificación y su variación en función del tamaño. Hay algunos datos estimativos al respecto, pero las diferencias de valores entre ellos son, a veces, importantes. El resto de la planta, en este aspecto, es asimilable a una de gasificación de RSU.

A continuación se resume en un cuadro las ventajas y los inconvenientes de las tres tecnologías consideradas en el capítulo anterior:

	Incineración	Gasificación convencional	Gasificación por plasma
Ventajas	Tecnología muy probada Ciertos diseños de hornos son capaces de tratar una gran variedad de residuos.	Mientras se cumplan los requisitos de poder calorífico y granulometría, se adapta fácilmente a diferentes tipos de residuos. Al producir gas de síntesis se amplía el abanico de posibilidades. Además, si se instalaran motores o turbinas de gas, la eficiencia sería mucho mayor que en un ciclo de vapor simple. Emplea mucho menos aire que una combustión, lo que deriva en menor caudal de gases a la salida	Añade a la convencional el hecho de que no necesita ni cumplir una granulometría máxima ni un poder calorífico mínimo, ya que el plasma es capaz de descomponer todo tipo de residuos al fundirlos e independiza la gasificación del aporte por combustión parcial. También es el más efectivo a la hora de destruir compuestos peligrosos. Bien sea por la alta temperatura y reactividad del plasma o porque se transforman en inertes al vitrificarse las cenizas. Plantas compactas y modulares.
Inconvenientes	El hecho de emplear una combustión directa de	Requiere unas condiciones restrictivas	Tecnología poco desarrollada aún, sólo se tienen algunas

	<p>sólidos implica tener que operar con excesos de aire y tiempos de residencia relativamente elevados para garantizar una buena reacción del residuo.</p> <p>La mejora en eficiencia está muy limitada debido a que es una combustión simple del residuo combinada con un ciclo de vapor. Las centrales modernas deben emplear procesos más complejos como la cogeneración (combinando RSU y gas natural por ejemplo) para mejorar la eficiencia.</p>	<p>en cuanto a granulometría del residuo y poder calorífico del mismo para autosustentar las reacciones.</p> <p>En Europa no ha tenido un desarrollo muy importante aún. Las compañías que han tratado de desarrollar plantas de este tipo, han tendido a realizarlas en pequeña escala.</p>	<p>experiencias puntuales de operación en continuo para capacidades comerciales.</p> <p>Los grandes proyectos en desarrollo hasta ahora han sufrido retrasos, remodelaciones y problemas técnicos que han hecho dudar de que la viabilidad comercial que tiene sobre el papel, se pueda lograr en la práctica.</p>
--	--	--	--

Por tanto se puede resumir que si bien la gasificación por plasma plantea sobre el papel una serie de ventajas muy claras frente a la gasificación convencional y la incineración:

- Control de la temperatura (y por tanto de las reacciones de descomposición) independientemente del poder calorífico del residuo. Al aportar la energía necesaria la antorcha de plasma, las variaciones de la composición del residuo apenas afectan al proceso de gasificación.
- Alta reactividad del plasma, que asegura una mayor conversión del residuo y destrucción de compuestos orgánicos en menor tiempo de residencia.
- Residuos sólidos vitrificados inertes, en los cuales quedan los compuestos contaminantes retenidos en una matriz y supone un mejor comportamiento frente a la lixiviación.
- Un mayor poder calorífico del gas de síntesis, lo cual compensaría los mayores costes de la instalación y de operación de la planta.

Además el hecho de producir gas de síntesis ofrece alternativas en cuanto al aprovechamiento del producto que una incineradora clásica no puede tener. Como es el uso de otros equipos más eficientes para producir electricidad (por ejemplo, motores de gas) o como materia prima en otras plantas (para fabricar bioetanol entre otros).

El tratamiento de los gases se produce parcialmente como paso previo al aprovechamiento energético para dotar al gas de síntesis de unas características aceptables, a diferencia de la incineración, en la que está enfocado únicamente a eliminar contaminación del efluente gaseoso. Sin embargo, como se ha visto en capítulos anteriores, no emplea una tecnología muy diferente de la usada en incineradoras y en ese sentido serían parejos. Lo que sí cambia es el caudal de los mismos, haciendo que la instalación para una planta de gasificación deba tratar menos caudal por la menor entrada de aire requerida.

Una de las mayores desventajas de la gasificación con plasma frente a otras técnicas de tratamiento de residuos como puede ser el envío a vertederos, es algo inherente a las plantas de valorización que podría agravarse en este caso: no es rentable si opera a poca capacidad, con muchos días de parada, a unos bajos ingresos por tonelada de residuo destruida y/o bajos precios de la electricidad exportada.

- Debido a su gran consumo energético y costes de instalación y operación, necesita aprovechar su mayor capacidad de producción eléctrica para compensarlo. Si la entrada de residuos está muy por

debajo de la nominal, no es rentable su operación. Se hace obligatorio prever un suministro de residuos constante.

- Las plantas anteriormente construidas han tenido problemas operativos que obligaban a hacer paradas muy regularmente. Se espera que las de nueva generación sean capaces de operar de forma más continuada.
- Los precios muy bajos de la electricidad y de la tasa de destrucción de residuos lógicamente afectan a estas plantas. Esto último puede suceder en lugares donde las tasas de vertedero sean muy bajas por la facilidad que tienen de ampliación y lo primero es coyuntural.

Por tanto en lugares con poco espacio para la instalación de vertederos y plantas de compostaje puede suponer una buena alternativa a las incineradoras, debido a que son plantas compactas y cuyas cenizas se pueden considerar inertes. Esto explica su mayor implantación en Japón, donde ya se han operado a gran escala. En el caso de España, sería interesante valorar su implantación en las comunidades insulares o en las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, que requieren plantas compactas de tratamiento de residuos y pueden aceptarse tasas de destrucción mayores que en la península. En otros lugares, puede ser integrado en estrategias de aprovechamiento de la fracción resto de los RSU si la cantidad de ésta es suficiente.

Aún quedan por ver los resultados que en la práctica son capaces de ofrecer las últimas plantas construidas por Alter NRG y Plasco (las empresas a priori más prometedoras en esta tecnología) y si pueden convertir la especulación en certeza.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. http://www.ambientum.com/revista/2003_05/RESIDUOS.htm. [En línea]
2. **Departamento de Medio Ambiente y Sostenibilidad Ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz.***Estudio de viabilidad de una planta de producción de CSR en el ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz.* .
3. **Cortés García, Angela Nuria.***ESTUDIO TERMOQUIMICO Y CINÉTICO DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.*
4. **IDAE.***Biomasa: gasificación.*
5. **Rincón, Gómez y Klose.***Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial.* .
6. **Conrads y Schmidt.***Plasma generation and plasma sources.*
7. *La electricidad y la generación de plasmas.* **Torres, J.P., Sola, A. y Gamero, A. J.**
8. **H Conrads, M Schmidt.***Plasma generation and plasma sources.*
9. **Westinghouse Plasma Corporation.** <http://www.westinghouse-plasma.com/>. [En línea]
10. **Ecologistas en Acción y Amigos de la Tierra.** *.Un yacimiento en la basura .*
11. **Castillo Marín, Gloria P.***Análisis del riesgo ambiental de un vertedero controlado de residuos.*
12. **COGERSA.** <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19174>. [En línea]
13. **UNED.** <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina4.htm>. [En línea]
14. http://www.redisa.uji.es/artSim2009/ImpactoYRiesgoAmbiental/Estudio%20de%20un%20vertedero%20controlado_An%C3%A1lisis%20de%20su%20estabilidad%20a%20trav%C3%A9s%20de%20la%20estimaci%C3%B3n%20de%20la%20compresibilidad.pdf. [En línea]
15. **Planelles, Manuel.** Bruselas denuncia a España por no eliminar 61 vertederos ilegales. *El País.* 2015.
16. **Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea.***Ejemplos de buenas prácticas de compostaje y recogida selectiva de residuos .*
17. **Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino (Gobierno de España).***Manual de compostaje.*
18. **Departamento de Ingeniería química y ambiental (Universidad de Sevilla).***Apuntes de la asignatura de gestión y tratamiento de residuos.*
19. **Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Vigo.***Tratamiento biológico.*
20. **Ministerio de Medio Ambiente (Gobierno de España).***Mejores técnicas disponibles: Incineración de residuos.*
21. **Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos.***Proyecto TEVER.*
22. **Talent With Energy Pty. Ltd.***Gasification Technologies Review.*
23. **Waste2tricity.** <http://waste2tricity.com>. [En línea]
24. **Galeno, G.***From waste to electricity through integrated plasma gasification/fuel cell.*
25. **BRI Energy LLC y Bioengineering Resources INC.***Gasification-Fermentation pilot facility.*
26. **Gomez, E., y otros.** Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review.
27. **Central Pollution Control Board (Ministerio de Medioambiente y Bosques de la India).***Report on plastic waste disposal through plasma pyrolysis technology.*

28. **Young Nam Chun, Seong Cheon Kim, Kunio Yoshikawa.***Destruction of Biomass Tar Using a Gliding Arc Plasma Reformer.*
29. **EPA (EEUU).***Usando plasma no térmico para controlar contaminantes del aire.*
30. **Europlasma.** <http://www.europlasma.com/>. [En línea]
31. **Plasco Energy Group.** <http://www.plascoenergygroup.com/>. [En línea]
32. **InEnTec Inc.** <http://www.inentec.com/>. [En línea]
33. **Alter NRG Corp.** <http://www.alternrg.com/>. [En línea]
34. **European Recovered Fuel Organization.***Facts and figures about SRF.*
35. —. *Classification Of Solid Recovered Fuels.*
36. **Abengoa inaugura la primera planta de demostración con tecnología 'Waste to Biofuels' (W2B). Econoticias.**
37. **Juniper Consultancy.***The Alter NRG / Westinghouse Plasma gasification process.*
38. **Aeversu.** www.aeversu.org. [En línea]
39. **Umweltbundesamt.***State of the Art for Waste Incineration Plants.*
40. **ENER-G.** <http://www.ener-g.com/energy-from-waste/>. [En línea]
41. **S. Consonni, F. Viganò.***Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies.*
42. **Nippon Steel & Sumikin Engineering.** <http://www.eng.nssmc.com/english/>. [En línea]
43. **Helmut Seifert, Jürgen Vehlow.***APPENDIX 2: STUDY TOUR OF JAPAN .*
44. **B.Sc., W.F.M. Hesseling.***Thermo Select Facility Karlsruhe.*
45. **Nippon Steel & Sumikin Engineering.***Reference List of Direct Melting System.*
46. **Plasco.***Plasco Trail Road. Design and operation report.* 2011.
47. **Westinghouse Plasma Corporation.***Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse.*
48. **Alter NRG.***Resumen de calificaciones. Tecnología de gasificación por plasma de Westinghouse.* 2014.
49. **Universidad Politécnica de Madrid.***Componentes del aire y tecnologías para su separación .*
50. **EPA (EEUU).***Controles de materia particulada.*
51. **Dennis A. Dalrymple, David W. DeBerry.***Emerging technologies for small and medium scale sulfur recovery - CRYSTASULF and TDA.*
52. **GTC Technology.** <http://www.gtctech.com/technology-licensing/sulfur-gas-processing/crystasulf/>. [En línea]
53. **Merichem Co.***LO-CAT Process.*
54. **General Electric.***Syngas turbine technology.*
55. **Poloczek, V. y H., Hermsmeyer.***Modern gas turbines with high fuel flexibility.*
56. **General Electric Company.** <http://site.ge-energy.com/corporate/gas-engines-profile/index.htm>. [En línea]
57. **Zambrana Vásquez, David Alejandro.***Estudio de la valorización energética de la "fracción resto" del ecovteredero de Zaragoza.*
58. **UNE-ENV 12920:1999.** *Caracterización de residuos. Metodología para la determinación del comportamiento durante el lixiviado de residuos en condiciones específicas.*
59. **Thermo Fisher Scientific S. p. A.***Organic Elemental Analysis for Carbon Characterization by the Thermo Scientific FLASH 2000 CHNS/O Elemental Analyzer .*
60. **ASME.***AlterNRG heat and material balance.*

61. **OMIE.** <http://www.omie.es>. [En línea]
62. **Greenpeace.** *La incineración de residuos en cifras.*
63. **Dirección del parque tecnológico de Valdemingómez.** *Memoria de actividades año 2007.*
64. **Genon, G., Tedesco, V. y Urso, P.** *Assessment of the feasibility of an innovative technology plant aimed at the energetic valorization of municipal waste in the province Turin.*

GLOSARIO

RSU → Residuos Sólidos Urbanos